

Rádiósugárzó aktív galaxismagok a korai Univerzumban

DOKTORI ÉRTEKEZÉS

Perger Krisztina



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola

Doktori iskola vezetője: DR. GUBICZA JENŐ

Részecskefizika és csillagászat program

Programvezető: DR. KATZ SÁNDOR

Témavezetők:

DR. FREY SÁNDOR

tudományos főmunkatárs

Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont

Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

DR. TÓTH L. VIKTOR

egyetemi adjunktus

Eötvös Loránd Tudományegyetem

Csillagászati Tanszék

Budapest

2020

Van egy elmélet, miszerint, ha egyszer kiderülne, hogy mi is valóban az Univerzum, és mit keres itt egyáltalán, akkor azon nyomban megszűvne létezni, és valami más, még bizarrabb, még megmagyarázhatatlanabb dolog foglalná el a helyét.

Van egy másik elmélet, amely szerint ez már be is következett.

Douglas Adams

Tartalomjegyzék

Előszó	1
1. Bevezetés	2
1.1. Az aktív galaxismagok felfedezése és az egyesített elmélet	2
1.2. Aktív galaxismagok nagy vöröseltolódás mellett	12
1.3. VLBI technika és képalkotás	18
2. Nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok katalógusa és alkalmazása	40
2.1. A katalógus	40
2.1.1. Motiváció	40
2.1.2. A katalógus összeállítása	41
2.1.3. A katalógusbeli források tulajdonságai	42
2.2. Nagy vöröseltolódású, gyenge rádiósugárzást kibocsátó aktív galaxismagok vizsgálata a FIRST rádiófelmérés térképeinek alkalmazásával	45
2.2.1. A rádiósugárzó AGN-ek rádió-luminozitásfüggvénye és a sugárzás eredete	45
2.2.2. Mintaválasztás	47
2.2.3. A halmozási eljárás	48
2.2.4. Hamis források térképhalmozása és a zajszint értelmezése	53
2.2.5. Modellillesztés a halmozott térképekre	55
2.2.6. A karakterisztikus 1,4 GHz-es rádióteljesítmény meghatározása	55
2.2.7. Csillagkeletkezési ráta a halmozott mintában	56
2.2.8. Diskusszió	56
2.2.9. Összefoglalás	63
3. A PMN J2134–0419 jelű nagy vöröseltolódású aktív galaxismag rádiójet-sajátmozgásának vizsgálata	64
3.1. Jetek sajátmozgásai a korai Univerzumban és a PMN J2134–0419 rádiósugárzása	64
3.2. Az Európai VLBI Hálózat mérései	67
3.3. A Very Large Array mérései	68
3.4. Eredmények	68
3.5. Diskusszió	71
3.6. Összefoglalás és következtetések	75

4. A PMN J0909+0354 jelű röntgensugárzó rádiókvazár ezredívmásodperc felbontású térképezése	77
4.1. Röntgensugárzás aktív galaxismagokban, a rádió- és röntgenemisszió kapcsolata	77
4.2. A PNM J0909+0354 kvazár rádió- és röntgenemissziója	79
4.3. A felhasznált mérések és az adatfeldolgozás	81
4.4. Eredmények	84
4.4.1. A nyaláb kiloparszek skálájú szerkezete	84
4.4.2. A rádiónyaláb parszek skálájú szerkezete	86
4.5. Diskusszió	89
4.5.1. Kiloparszek skálájú szerkezet	89
4.5.2. Parszek skálájú szerkezet	90
4.5.3. A kiloparszekes szerkezet és az északkeleti nyalábkomponens kapcsolata	91
4.5.4. A kvazár spektrális energiaeloszlása, röntgen- és rádióspektruma .	92
4.5.5. Jetparaméterek	93
4.6. Összefoglalás és következtetések	97
5. Összefoglalás	98
6. Summary	102
Ábrák jegyzéke	i
Táblázatok jegyzéke	ii
Függelék	iii
A. Rövidítések, betűszók, idegen kifejezések	iii
B. További ábrák	vii
Irodalomjegyzék	xi
Köszönetnyilvánítás	xxxv

Előszó

A huszadik század egyik jelentős tudományos eredménye volt az aktív galaxismagok (active galactic nucleus – AGN) felfedezése és megismerése. A technológia fejlődésével a csillagászati műszerek pontossága és érzékenysége jelentős mértékben megnövekedett, ami lehetővé teszi, hogy a legnagyobb vöröseltolódásoknál is megismerhetővé váljon a Világegyetem. A doktori értekezésemben a legnagyobb kozmológiai távolságokban található aktív galaxismagok rádiósugárzását vizsgálom a legjobb szögfelbontással és nagy érzékenységgel rendelkező nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (very long baseline interferometry – VLBI) technikiájának alkalmazásával.

A dolgozat első fejezetében rövid áttekintést adok az aktív galaxismagok felfedezéséről, az egyes objektumokat összefogó egyesített elmélet modelljéről, bemutatom a VLBI technika elméleti és gyakorlati aspektusait, valamint összefoglalom a nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok ismert tulajdonságait.

A 2. fejezetben számot adok az ismert nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok általam összeállított katalógusáról és annak alkalmazásáról. Az első alfejezetben beszámolok a katalógus létrehozásának szükségességéről, annak megalkotásáról és tartalmáról. A második alfejezetben bemutatom a jelentős rádiósugárzással nem rendelkező és a FIRST felmérésben ezáltal nem detektált (mJy-nél gyengébb) nagy vöröseltolódású ($z > 4$) AGN-ek rejtett rádiósugárzásának vizsgálatát térkép-összeátlagolási módszerek (stacking) alkalmazásával.

Az 3. fejezetben egy különleges egyedi objektum, a PMN J2134–0419 jelű, $z = 4,3$ vöröseltolódású kvazár tulajdonságait vizsgálom meg archív Very Large Array (VLA) és VLBI észlelések alkalmazásával. Meghatározom a rádiónyaláb ezredívmásodperces (milliarcsecond – mas) skálájú komponenseinek sajátmozgását és a jetparamétereket parszek és kiloparszek skálákon.

A dolgozat 4. fejezetében a PMN J0909+0354 rádiókvazár parszekes skálájú rádiószerkezetéről, valamint a VLBI módszerrel készült rádió- és archív röntgenmérések alapján detektált jetkomponensek közötti (látszólagos) ellentmondásokról számolok be, kitérve a kvazár rádiónyalábjának fizikai tulajdonságaira és azok meghatározására.

Az utolsó két fejezetben összefoglalom magyar és angol nyelven a dolgozat tartalmát.

1. Bevezetés

1.1. Az aktív galaxismagok felfedezése és az egyesített elmélet

Az aktív galaxismagok olyan galaxisközéppontok, melyek energiakibocsátásának mértéke nagyságrendekkel meghaladja a normális galaxisok nukleáris régióit jellemző értékeket (és bolometrikus luminozitásuk elérheti az akár 10^{41} W-ot is, pl. Sandage, 1964; Edelson és mtsai, 1996; Fan és mtsai, 2014; Wolf és mtsai, 2018). Az AGN-ek először a 20. század elején kerültek a figyelem középpontjába, mikor előbb Fath (1909), majd Slipher (1917) is különös emissziós sávokat tartalmazó spirálködszínképekről számolt be, ami az addigi, csillagok kompozit abszorpciós spektrumát mutató galaxisképpel nem volt összeegyeztethető. Végül Seyfert (1943) célzott galaxisnukleusz-vizsgálata volt az, amihez az AGN-ek felfedezését kötik, tiszteletére az „emissziós spirálködöket” Seyfert-galaxisoknak nevezzük. A rádiócsillagászat kialakulásával (Jansky, 1933a,b; Reber, 1940, 1944; Hey és mtsai, 1946; Bolton és Stanley, 1948) és a nagy égbolttérületekre kiterjedő felmérésekkel (Ryle és mtsai, 1950; Shakeshaft és mtsai, 1955; Edge és mtsai, 1959; Bennett, 1962) megnyílt az út a kvazárok (quasi stellar radio source, csillagszerű rádióforrás, Schmidt, 1963; Greenstein és Matthews, 1963), rádiógalaxisok (Matthews és mtsai, 1964) és a BL Lac objektumok (Schmitt, 1968) felfedezéséhez. Az AGN-ek megismerésének korai szakaszában egyértelművé vált, hogy az egyes „különös” objektumtípusok (galaxisok, ködösséget mutató kvazárok és BL Lac objektumok) spektruma nagymértékben hasonló (pl. Burbidge és mtsai, 1963; Zwicky, 1965; Sandage, 1965). Az objektumokra jellemző – sokszor csak marginális különbségeket mutató – tulajdonságok alapján egy egységes fizikai modell állítható fel, amelyet az *aktív galaxismagok egyesített elméletének* nevezünk. Az elfogadott modell szerint a galaxisok többségének központjában – a gravitációs potenciálgödörben – található szupernagy tömegű ($10^6 - 10^9 M_{\odot}$ ¹) fekete lyukak a környezetükben lévő hideg csillagközi anyagot egy anyagbegyűjtési folyamat (akkréció) során bekebelezik, és ennek hatására a teljes elektromágneses tartományban megfigyelhető sugárzást bocsátanak ki (pl. Salpeter, 1964; Shakura és Sunyaev, 1973; Hills, 1975).

Az AGN-ek felépítése az egyesített elmélet szerint. A rendszerben a szupernagy tömegű fekete lyukra egy akkréciós korongon keresztül hullik be a környező csillagközi anyag, ami a rendszer erős optikai luminozitásának elsődleges forrása (Shakura és Sunyaev, 1973; Hills, 1975). Az akkréciós korongot körülölelő koronasugárzás a kemény röntgensugárzás létrehozásában játszik szerepet (pl. Galeev és mtsai, 1979; Liang, 1979).

¹Lásd Bentz és Katz (2015) AGN-tömeg adatbázisa, www.astro.gsu.edu/AGNmass/

1. táblázat. Az AGN-ek egyesített elmélet szerinti csoportosítása.

	2. típus keskeny vonalú	1. típus széles vonalú	0. típus szokatlan
Rádióhalk	Seyfert 2 NELG IR QSO	Seyfert 1 RQ QSO	BAL QSO
Rádióhangos	FR I FR II } NLRG	BLRG SSRQ FSRQ	BL Lac OVV FSRQ } blazár

Rálátás szöge csökken

Fekete lyuk forgási sebessége nő

Az egyesített elmélet az AGN-eket két fő rendezési elv alapján csoportosítja. Az emissziós vonalak jelenlétét és szélességét a rendszernek az észlelő látóirányára vonatkoztatott inklinációja szabja meg (2., 1., és 0. osztály), míg a rádiósugárzás erősségét a fekete lyuk forgási sebességével (impulzuszórával) állítja kapcsolatba (Urry és Padovani, 1995).

A spektrumban megfigyelhető széles emissziós sávok a *széles vonalak keletkezési régiójában* (broad line region – BLR, pl. Blandford és mtsai, 1990; Antonucci, 1993), a keskeny emissziós vonalak pedig a *keskeny vonalak keletkezési régiójában* (narrow line region – NLR, pl. Blandford és mtsai, 1990; Antonucci, 1993) jönnek létre, mindkét esetben a központi forrás által, fotoionizáció útján keltett egy-egy ún. ionizációs kúp által definiált térrészben (Netzer, 2015, és a benne található hivatkozások). A BLR erősen ionizált anyagfelhői $1000 - 20000 \text{ km s}^{-1}$ sebességekkel (pl. Blandford és mtsai, 1990; Netzer, 2015) keringenek a fekete lyuktól $0,01 - 1 \text{ pc}$ távolságban (Netzer, 2015). A rendszert körülöleli egy főként porból álló, a fekete lyuktól $0,1 - 10 \text{ pc}$ távolságban (Netzer, 2015) elhelyezkedő, többé-kevésbé tóruszra emlékeztető alakú kitakaró közeg (pl. Lawrence, 1987; Antonucci, 1993; Urry és Padovani, 1995; Bartscher és mtsai, 2013). A tórusz jelenlétének következményeként a $\sim 90^\circ$ látószögű rendszerek esetén a BLR vonalai hiányoznak az optikai spektrumból, azonban polarizált fényben a széles emissziós alakzatok is kimutathatók (pl. Antonucci, 1984; Antonucci és Miller, 1985; Moran és mtsai, 2000; Netzer, 2015). Az NLR $100 - 1000 \text{ km s}^{-1}$ sebességű felhői a kitakaró tórusz külső peremétől kezdve akár a kpc skáláig is megfigyelhetők (pl. Groves, 2007; Netzer, 2015). A teljes AGN-populáció $\sim 10\%$ -a esetén jelentős rádiósugárzás figyelhető meg (pl. Urry és Padovani, 1995; Netzer, 2015), mely a fekete lyuk forgástengelyével párhuzamosan, az

akkréciós korongra merőlegesen kiinduló kollimált relativisztikus rádiónyalábok (jetek) szinkrotronsugárzásából származik (pl. Urry és Padovani, 1995; Netzer, 2015; Merloni és Heinz, 2007). A rádiónyalábok esetén gyakran megfigyelhető a relativisztikus hatások miatti, a fénysebességet látszólag meghaladó, ún. szuperluminális mozgás és a sugárzás Doppler-erősítése és -gyengítése rendre a észlelő felé mutató, valamint az tőle távolodó nyalábok esetén (Urry és Padovani, 1995; Urry, 2004). Az AGN-ek felépítését a 1. ábrán mutatom be.

Az egyesített elmélet az aktív galaxismagokat két fő csoportosítási elv szerint osztályozza:

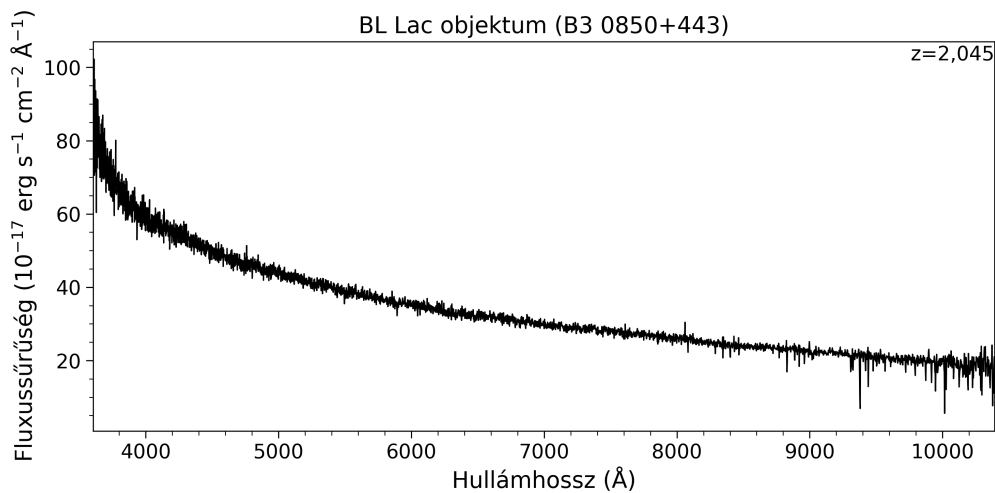
- ◆ az optikai színekben megfigyelhető emissziós vonalak hiányáért, jelenléteért, valamint a megfigyelt vonalszélességekért a rendszer látóirányra vonatkoztatott orientációja felel,
- ◆ a szinkrotron rádiósugárzás erősségét a fekete lyuk forgási sebességének mértéke, illetve az anyagbegyűjtési folyamatok hatékonysága szabályozza.



1. ábra. Az AGN-ek egyesített modellje. A rajzon az észlelő látóirányát a fekete nyilak szemléltetik a különféle AGN-típusok elnevezése mellett. (pl. Urry és Padovani, 1995; Beckmann és Shriver, 2012; Britto és mtsai, 2016)

A) Osztályzás az emissziós vonalak alapján – Az észlelő látóirányával bezárt szög változása

Az első szempont alapján az egyes osztályok közötti eltéréseket a rendszernek (a fekete lyuk forgástengelyének vagy a rádiónyalábnak) az észlelő látóirányára vonatkoztatott inklinációs szöge szabja meg, amit az 1. táblázatban és az 1. ábrán szemléltetnek. Az elmélet szerint a 2.-tól a 0. típus felé haladva csökken az objektum inklinációja: előbbinél éléről látunk rá a rendszerre, míg utóbbi esetén merőleges a rálátás (pl. Urry és Padovani, 1995). Néha egy 3. típust is megkülönböztetünk (Tadhunter, 2008): az alacsonyabb luminozitású AGN-ek közé tartozik a rádiógyenge LINER (alacsony ionizációs fokú nukleusz, low ionization nuclear emission line regions) és a rádióhangos WLRG (weak line radio galaxy, gyengevonalú rádiógalaxis).



2. ábra. Egy BL Lac típusú AGN optikai színeképe. A spektrumot az SDSS archívumából töltöttem le² (SDSS 16. adatkiadás, Ahumada és mtsai, 2020)

0. típusú AGN. A 0. osztályba tartozó AGN-ek színeképe különleges, a kontinuum erősen polarizált és rövid időskálán lezajló, erős változékonyságot mutat (pl. Lawrence, 1987; Urry és Padovani, 1995). Az osztály tagjainak egy része nem mutat vonalas sugárzást (pl. BL Lac objektumok, 2. ábra, Turnshek, 1984; Urry és Padovani, 1995). A csoport tagjai a BL Lac objektumok, a lapos spektrumú rádiókvazárok (flat spectrum radio quasar – FSRQ), az optikai tartományban erősen változó források (optically violently variable – OVV), és a széles abszorpciós vonalas kvazárok (broad absorption line quasars – BAL QSO). Az előbbi három típus összefoglaló neve blazár (Urry és Padovani, 1995). Ezen források rádiónyalábjai az észlelő látóirányával nagyon kis szöget ($0 \leq \Theta \leq 20^\circ$) zárnak be, a rádiósugárzást magas fényességi hőmérséklet jellemzi (ugyanígy a sugárzás

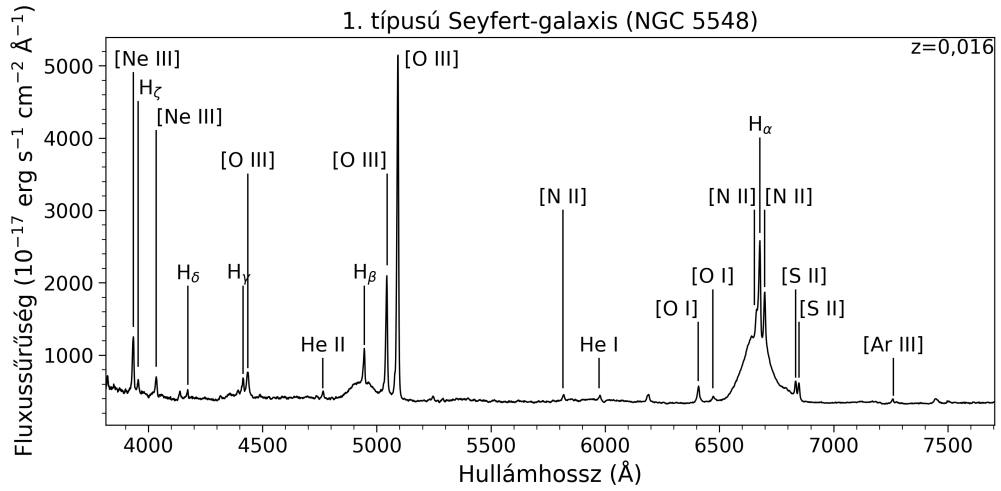
²Science Archive Server, dr16.sdss.org/optical/spectrum/search

felerősítését jellemző Doppler-faktor is nagyobb, mint 1), valamint gyakori szuperluminális transzverzális sebességek detektálása a kompakt rádiósugárzás (gyakran egyoldalú nyalábot mutató) komponenseinek sajátmozgásában (Urry és Padovani, 1995; Urry, 2004).

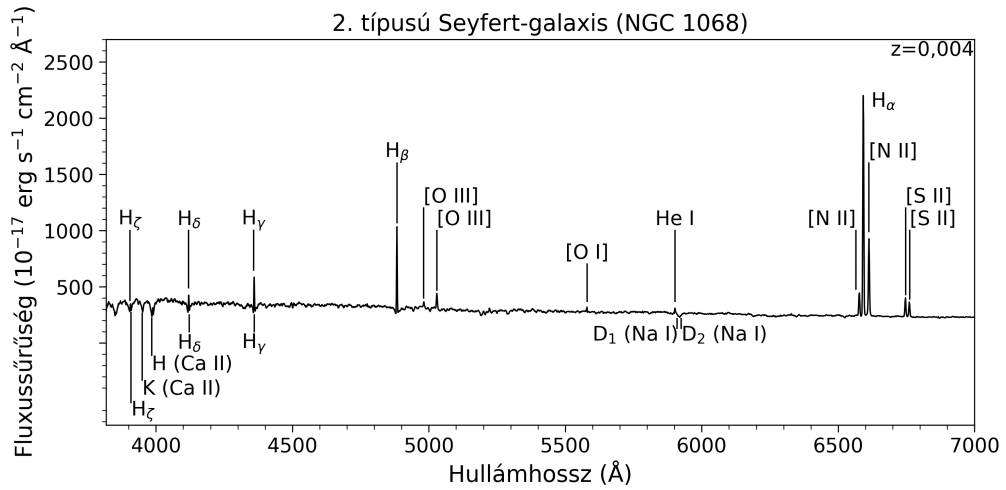
1. típusú AGN. Az 1. típusba tartozó objektumok fényes, kevésbé polarizált optikai kontinuumszugárzással rendelkeznek (Urry és Padovani, 1995), melyre magas ionizációs fokú tiltott keskeny és széles megengedett emissziós vonalak rakódnak (pl. Lawrence, 1987; Antonucci, 1993; Urry és Padovani, 1995; Netzer, 2015). A kontinuum általában erős változékonyságot mutat (pl. Antonucci, 1993). Tagjai az 1. típusú Seyfert-galaxisok (3a. ábra), a rádiócsendes kvazárok (radio-quiet quasi stellar object – RQ QSO), széles vonalú rádiógalaxisok (broad line radio galaxy – BLRG), valamint a meredek és lapos spektrumú rádiókvazárok (steep spectrum radio quasar – SSRQ, flat spectrum radio quasar – FSRQ, 3c. ábra), az osztályok közötti határvonal $\alpha \approx 0,5$ spektrálindeknél húzódik (Urry és Padovani, 1995). Az 1. és 2. osztályok közötti átmenet folytonos, amit a keskeny H_α és H_β vonalak széles vonalakra vonatkoztatott intenzitásai arányának növekedése jelez, ezáltal beszélhetünk 1,5-es, 1,6-es stb. típusokról is (pl. Antonucci, 1993; Netzer, 2015). Általánosságban a típusba tartozó AGN-ek erős keV-os röntgensugárzással rendelkeznek (pl. Antonucci, 1993). Az osztályba tartozó AGN-ek plazmanyalábjainak iránya az észlelő látóirányával több mint 20° -os szöveget zárnak be.

2. típusú AGN. A 2. típusú AGN-ek látható tartományú színképét kevésbé hangsúlyos kontinuum jellemzi, melyben keskeny tiltott és megengedett emissziós vonalak figyelhetők meg (pl. Lawrence, 1987; Antonucci, 1993; Urry és Padovani, 1995; Netzer, 2015). A tórusz jelenléte miatt a széles emissziós sávok csak a polarizált fényben figyelhetők meg (pl. Antonucci, 1984; Antonucci és Miller, 1985; Moran és mtsai, 2000; Netzer, 2015). A keskeny vonalú osztály rádiócsendes tagjai a Seyfert-2 galaxisok (3b. ábra), a keskeny emissziós vonalú röntgengalaxisok (narrow-emission-line X-ray galaxy – NELG) és az infravörös kvazárok (infrared quasi stellar object – IR QSO), rádióhangos tagjai a keskeny vonalú rádiógalaxisok (narrow line radio galaxy – NLRG), amelyek morfológia alapján további két alosztályba sorolhatók: a Fanaroff–Riley I (FR I) és Fanaroff–Riley II (FR II) csoportokba (Fanaroff és Riley, 1974). A 2. típusú AGN-ek rádiónyalábjai vagy a fekete lyukak forgástengelyei az észlelő látóirányával nagy szöveget zárnak be (a kitakaró poros közeget mintegy éléről figyelhető meg), gyakorlatilag az égbolt síkjában fekszenek ($\vartheta \sim 90^\circ$).

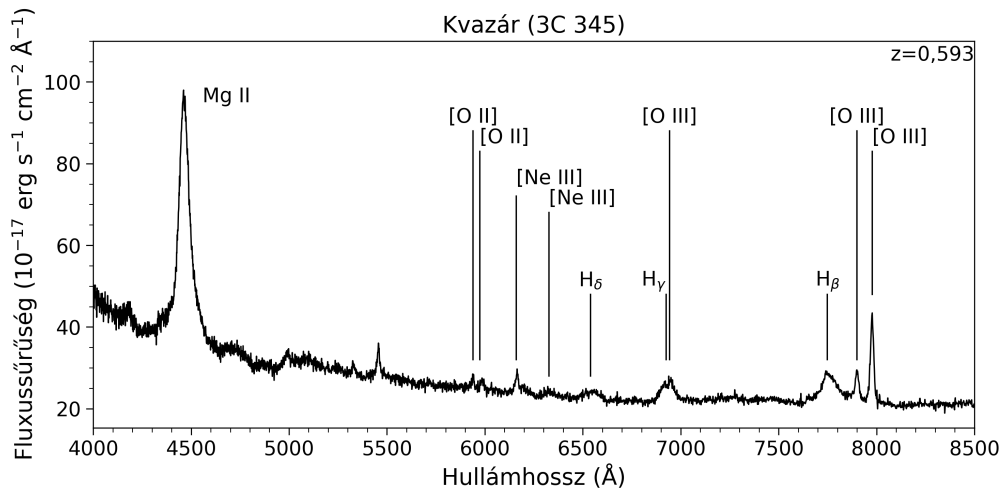
³ned.ipac.caltech.edu



(a) 1. típusú Seyfert-galaxis

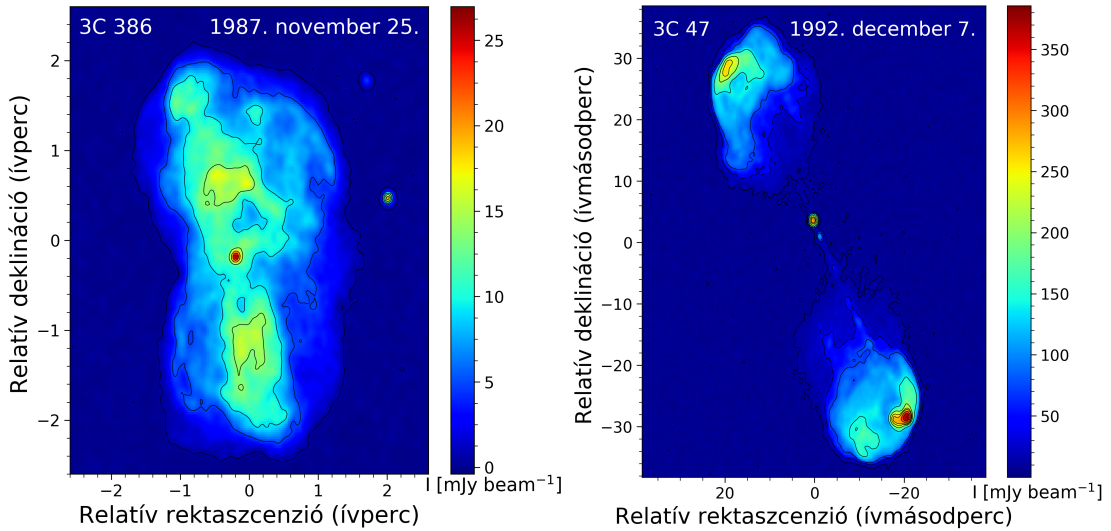


(b) 2. típusú Seyfert-galaxis



(c) Kvazár

3. ábra. Az 1. és 2. típusú Seyfert-galaxisok, valamint egy kvazár optikai színeke. A spektrumokat az SDSS archívumából töltöttem le (SDSS 16. adatkiadás, Ahumada és mtsai, 2020).



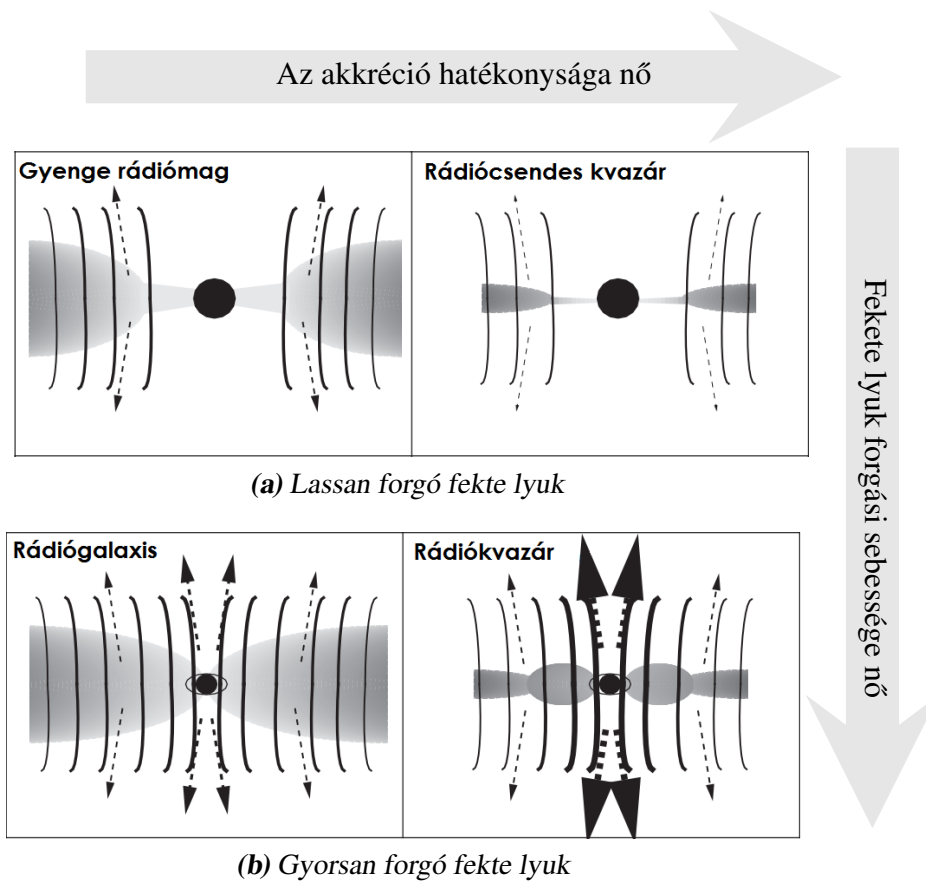
(a) A 3C 386 jelű FR I típusú rádiógalaxis. (Az eredeti adatokból készített térkép, Leahy és Perley, 1991)

(b) A 3C 47 jelű FR II típusú rádiógalaxis. (Az eredeti adatokból készített térkép, Slee, 1977)

4. ábra. Fanaroff–Riley I és II típusú rádiógalaxisok. Az FR I-esek esetében a „mag” régiója sokkal hangsúlyosabb, a középponttól való távolodással az intenzitás csökken. Az FR II-k esetén a lebenyek határozottak, megfigyelhetők a fényes forrópontok, az intenzitás a középponttól távolodva növekszik. A képeket a NASA/IPAC extragalaktikus adatbázisának³ felhasználásával készítettem.

B) Osztályozás a rádiósugárzás erőssége alapján – A fekete lyuk forgási sebessége, az akkréció hatékonysága

A másik osztályozási szempont a rádiósugárzás detektálhatósága és erőssége alapján csoportosít. A klasszikus definíció szerint akkor tekintünk egy AGN-t rádióhangosnak, ha az 5 GHz-es és az optikai B sávban mért fluxussűrűségeinek aránya legalább 10 ($R = F_{5\text{GHz}}/F_B \geq 10$, Kellermann és mtsai, 1989), és akkor rádiócsendesnek, ha $R < 10$. A két osztály közötti különbség fizikai okait a fekete lyuk forgási sebességének (vagyis impulzusmomentumának, Meier, 2002), valamint az akkréció hatékonyságának és geometriájának (Meier, 2002; Hardcastle és mtsai, 2007; Trump és mtsai, 2011; Best és Heckman, 2012) tulajdonítják. A nagy akkréciós rátákon működő rendszerek erős látható és röntgentartományú fényt bocsátanak ki, míg a kisebb rátákon működő AGN-ek jelentősen halványabbak (pl. Trump és mtsai, 2011). Az előbbi csoportba tartozó AGN-ek látható tartományú színeképében határozott emissziós vonalak figyelhetők meg (pl. Seyfert-galaxisok, rádiócsendes kvazárok, rádiókvazárok, Meier, 2002; Trump és mtsai, 2011), míg az alacsonyabb akkréciós rátát mutató AGN-ek optikai vonalemissziója kevésbé markáns (pl. rádiógalaxisok, gyenge rádióforrások, Meier, 2002; Trump és mtsai, 2011). A rádiósugárzás erősségét befolyásoló paraméterek szerinti megoszlást a 5. ábra szemlélteti.



5. ábra. A Meier (2002)-féle, a fekete lyuk impulzusmomentumát és az akkréciós rátát is figyelembe vevő egyesített modell. A (a) panel a kis impulzusmomentumú (közel Schwarzschild-féle) fekete lyuk különböző akkréciós rátákon működő módjait, míg a (b) a nagy impulzusmomentumú (Kerr-féle) fekete lyuk különböző akkréciós rátán működő módjait mutatja be. A bal oldali panelek esetében alacsony, míg a jobb oldaliak esetében magas akkréciós ráták figyelhetők meg.

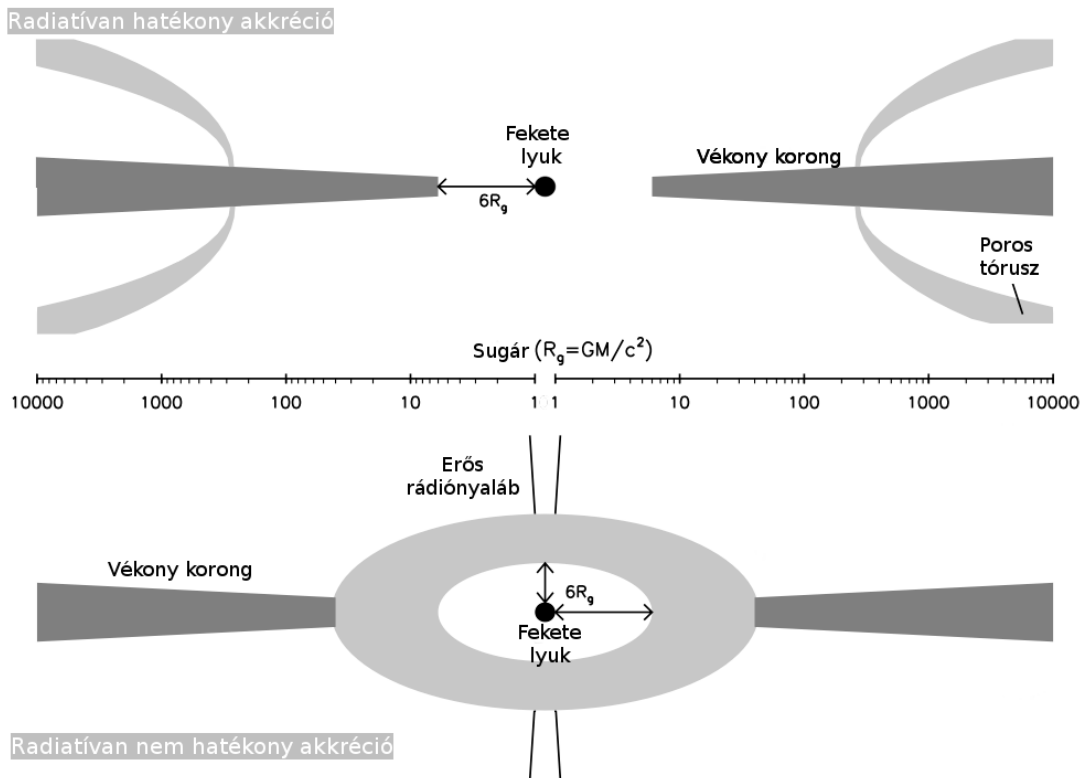
Rádiócsendes AGN. A klasszikus definíció szerint akkor tekintünk egy AGN-t rádiócsendesnek, ha az 5 GHz-es és az optikai kék sávban mért fluxussűrűségeinek aránya kisebb, mint 10 (Kellermann és mtsai, 1989). Az osztályba tartozó objektumok esetén nem mérhető jelentős rádió-fluxussűrűség (vagy a rendszer rádió-fluxussűrűsége nem éri el a detektálási határértéket). Az osztály tagjai (1. táblázat első sor és 1. ábra alsó fele) adják a teljes AGN populáció ~ 90%-át (pl. Urry és Padovani, 1995; Padovani, 2011). Bár az arányszám alapján a rádiócsendes osztályba tartoznak, számos (az 1,4 GHz-es sugárzás tekintetében) alacsony luminozitású (teljesítményű) aktív galaxismag esetén detektáltak parszek skálájú, lapos spektrumú rádiósugárzást (pl. Panessa és mtsai, 2019, és a benne található hivatkozások). A Meier (2002)-féle modell alapján a rádiócsendes AGN-ek esetében a szupernagy tömegű fekete lyuk impulzusmomentuma alacsony, a Schwarzschild-féle fekete lyuk akkréciójával modellezhető (5. ábra, felső sor).

Rádióhanges AGN. A rádióhanges osztályba azokat a típusokat soroljuk, amelyek esetén az 5 GHz-es fluxussűrűség optikai kék (B) sávban mért fluxussűrűségére vonatkoztatott arány nagyobb vagy egyenlő, mint 10 (Kellermann és mtai, 1989). A rádióhanges osztály tagjai nem alkotnak homogén csoportot, hanem a jelenlegi empirikus tapasztalatot alátámasztó modellek szerint (legalább) két aktivitási mód különböztethető meg: a radiatívan hatékony és radiatívan nem hatékony AGN-ek (6. ábra, pl. Hardcastle és mtai, 2007; Best és Heckman, 2012). A *radiatív módban* működő AGN-ek (pl. Hardcastle és mtai, 2007; Best és Heckman, 2012) esetén az akkréció egy standard, vékony akkréciós korongon keresztül megy végbe, a radiatív energiatranszport tekintetében hatékonyan (mint pl. Shakura és Sunyaev, 1973), a hideg fázisban (azaz hideg csillagközi anyag begyűjtése révén, pl. Hardcastle és mtai, 2007). A radiatív módban akkretáló AGN-eket nevezik még kvazármódúnak, hideg módúnak, és gyors akkretálónak is: az akkréció hatékonysága az Eddington-ráta⁴ $\sim 1 - 10\%$ -a közé esik (pl. Best és Heckman, 2012). A radiatív módba tartozó AGN-ek jellemzően $L_{1,4\text{GHz}} \geq 10^{26} \text{ W Hz}^{-1}$ rádióteljesítményűek (1. ábra jobb oldal, 6. ábra felső panel, Best és Heckman, 2012).

A másik aktivitási csoport tagjai a *radiómódban* (vagy más néven jetmódban) tartozó AGN-ek (pl. Hardcastle és mtai, 2007; Best és Heckman, 2012). Az osztály tagjai esetén a sugárzási (radiatív) energiatranszport nem jelentős és nem hatékony: az energiakibocsátás jelentős része a fekete lyuk forgástengelyével közel párhuzamosan kiinduló erőteljes rádiónyalábokban sugárzódik ki (Merloni és Heinz, 2007). Az akkréció az Eddington-határ kevesebb mint 1%-ával történik (Best és Heckman, 2012; Heckman és Best, 2014). Ez utóbbi osztályt szokták még a radiatívan nem hatékony és advekción által dominált akkréciós áramlásnak is nevezni (rendre radiatively inefficient accretion flows – RIAF és advection dominated accretion flows – ADAF), minthogy az anyagbegyűjtés egy geometriailag vastag, de optikailag vékony közegben történik (pl. Narayan és Yi, 1995; Trump és mtai, 2011; Netzer, 2015) a forró fázisban (pl. Hardcastle és mtai, 2007). A csoport tagjai (statisztikailag) kevésbé jelentős rádióteljesítményt mutatnak: $L_{1,4\text{GHz}} \leq 10^{26} \text{ W Hz}^{-1}$ (Best és Heckman, 2012), mindazonáltal az általuk kibocsátott teljes energiamennyiség legnagyobb részét kinetikus energia formájában a rádiónyalábokban bocsátják ki (pl. Merloni és Heinz, 2007).

A keskeny vonalú rádiógalaxisok (NLRG) két osztálya, az FR I és FR II nagy vonalakban megfeleltethetők rendre a rádió- és a radiatív módokkal (bár az osztályok nem

⁴Az Eddington-féle maximális luminozításhoz (Eddington-határ) tartozó akkréciós ráta, mely esetén a gravitációs erők és a sugárnyomás hidrosztatikus egyensúlyban van. Az Eddington-határ elérésével/meghaladásával a sugárnyomás leállítja az akkréciós folyamatokat, és $L_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMcm_p}{\sigma_T}$ (M a fekete lyuk tömege, σ_T a Thomson-féle hatáskeresztmetszet, m_p a protontömeg). Az Eddington-ráta az $\dot{M}_{\text{Edd}} = \frac{4\pi GMm_p}{\epsilon c \sigma_T}$ alakban írható fel (ϵ a sugárzási hatékonyság).



6. ábra. A radiatív és jetmódban akkretáló AGN-ek közötti különbségek. A felső ábrán a radiatíván hatékony mód látható, míg az alsó az advekción által dominált akkrécións áramlások jetmódját mutatja be. A radiatív módban lévő vékony korongról korongszelek indulnak, míg a jetmódú AGN-ek erőteljes rádiónyalábok keletkezésének nyújtanak kedvező környezetet (az eredeti verzió: Trump és mtsai, 2011)

tökéletesen követik a csoportokat, van átfedés NLRG-csoportok és a módok között, Miraghaei és Best, 2017). Az FR I-ek átlagosan alacsonyabb luminozitásúak, rádiónyalábjaik szimmetrikusak, az intenzitás a középponttól távolodva csökken (maghangsúlyos – core-brightened, Fanaroff és Riley, 1974), míg a FR II rádiógalaxisok jelentősebb rádióteljesítményt mutatnak, melynek jelentős része a kollimált nyalábokban, a határozott lebenyekben és a forrópontokban sugárzódik ki, továbbá az optikai színekben megfigyelhető vonalemissziójuk is hangsúlyosabb (nyalábhangsúlyos – limb-brightened, Fanaroff és Riley, 1974).

Egy új osztályzási séma a rádiósugárzás alapján. A rádiócsillagászatban használt eszközök fejlődésével és érzékenységének javulásával jelentősen megnövekedett a rádióterületben detektált, ellenben a rádióhangosság feltételének meg nem felelő (nagy vöröseltolódású, mJy-nél gyengébb sugárzást kibocsátó, vagy alacsony optikai luminozitású) AGN-ek száma (pl. Pedlar és mtsai, 1993; Roy és mtsai, 2001; Kharb és mtsai, 2006). Ezért Padovani (2016) a rádióhangos és rádióhalk osztályok helyett a *nyalábos*

(jetted) és *nyaláb nélküli* (non-jetted) AGN kifejezések használatát és terjesztését javasolta (bár a kifejezés már korábban megjelent a szakirodalomban, pl. Rawlings, 2003; Reimer és Böttcher, 2013; Ghisellini és mtsai, 2013; Fossati, 2014; Ghisellini és mtsai, 2015a).

A téma nyitott kérdései

Bár az első AGN-ek felfedezése óta eltelt egy évszázad során számos elméleti problémát sikerült megoldani, azonban napjainkig sok nyitott kérdés maradt megválaszolatlan, többek között az AGN-ek és az őket befogadó anyagaxisokban zajló csillagkeletkezés közötti kapcsolat (az ún. visszacsatolás, pl. Fabian, 2012), a legkorábbi Univerzumban (akár már az Ősrobbanás után 700 millió évvel) megfigyelhető 10^9 – 10^{10} M_{\odot} tömegű fekete lyukak kialakulásának folyamata (pl. Inayoshi és mtsai, 2020), az AGN-ek és AGN-jetek kozmológiai időskálán való fejlődése (pl. Blandford és mtsai, 2019), vagy akár az AGN aktivitást létrehozó akkréció ciklikus leállításának és újraindulásának fizikai háttere (pl. Blandford és mtsai, 2019).

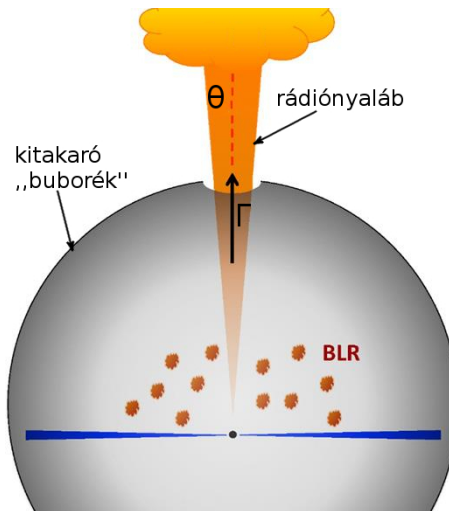
1.2. Aktív galaxismagok nagy vöröseltolódás mellett

A nagy vöröseltolódású AGN-ek (a forrás saját vonatkoztatási rendszerében vizsgált) ultraibolya spektruma nagy hasonlóságot mutat kis vöröseltolódású társaikéval, a széles vonalak jellemző kékeltolódást mutatnak (Shen és mtsai, 2016; Martínez-Aldama és mtsai, 2018; Vito és mtsai, 2019), a vonalprofilok pedig az Eddington-határhoz közeli akkréciót sejtetnek (gyors akkretálók, radiatív mód, Martínez-Aldama és mtsai, 2018). Az ultraibolya–röntgen tartományú luminozitások is konzisztensek a kisebb vöröseltolódású AGN-eknél tapasztaltnal, nem figyelhető meg érdemi evolúció (Vito és mtsai, 2019). A nagy vöröseltolódású AGN populáció feketelyuk-tömegei jellemzően a $\sim 10^9$ M_{\odot} nagyságrendbe esnek (Kurk és mtsai, 2007; Ghisellini és mtsai, 2011; Mortlock és mtsai, 2011; Wu és mtsai, 2015; Mazzucchelli és mtsai, 2017; Bañados és mtsai, 2018; Kim és mtsai, 2018; Trakhtenbrot és mtsai, 2017; Vito és mtsai, 2019; Tenneti és mtsai, 2019), bár a $2 \leq z \leq 4$ közötti AGN-ek esetén megfigyelhető a feketelyuk-tömegek enyhe csökkenése (pl. 2. ábra: Trakhtenbrot, 2020, és a benne található hivatkozások), ami a szupernagy tömegű fekete lyukak első gyors növekedési fázisára utal (pl. Trakhtenbrot és mtsai, 2011; Trakhtenbrot, 2020, és a benne található hivatkozások). A már az Univerzum nagyon korai ($z \sim 7$) állapotában is felfedezett $\geq 10^9$ M_{\odot} nagyságrendű feketelyuk-tömegek további kihívást állítanak a megfelelő növekedési és kialakulási modellek elé: a kialakulásukhoz (az Eddington-határ akkréciós limitjét és a tapasztalt akkréciós rátákat figye-

lembe véve) kb. $10^5 - 10^6 M_{\odot}$ (pl. Ghisellini és mtsai, 2011; Natarajan, 2011; Woods és mtsai, 2019) kezdeti feketelyuk-magok létrejötte szükséges. A milliárd naptömegnyi fekete lyukakat akkrécióval létrehozó magok kialakulási elméletei magukban foglalják a nagy ($100 - 200 M_{\odot}$ kezdeti tömegű) III. populációs csillagok összeomlásából keletkezett fekete lyukakat (majd akkréciójukat, pl. Sesana és mtsai, 2007; Bellovary és mtsai, 2011; Inayoshi és mtsai, 2019), a legnagyobb magok kialakulásához azonban a galaxis-halók direkt összeomlását tartják valószínűnek (pl. Agarwal és mtsai, 2012, 2016; Woods és mtsai, 2019).

A feketelyuk-magok kialakulásának és gyors növekedésének vizsgálatában jelentős szerepet játszik a legtávolabbi rendszerek átfogó és statisztikailag teljes vizsgálata: a VLBI technikával vizsgált AGN-ek által kibocsátott rádiónyalábok és azok szerkezetének megismerése fontos adalékokkal szolgálhat. A különböző röntgensillagászati űrteleszkópoknak köszönhetően számos nagy vöröseltolódású AGN-t detektáltak a röntgentartományban (pl. Nanni és mtsai, 2017; Vito és mtsai, 2019; Pons és mtsai, 2020). Bár az elmúlt évtizedekben számos nagy érzékenységű rádiócsillagászati műszer és technika fejlesztése valósult meg, a legalacsonyabb fluxussűrűségeken még nem végeztek teljes égboltfelméréseket, így – az alacsony vöröseltolódású populációhoz hasonlatosan – a korai Univerzumban fellelhető AGN-ek esetén csupán a teljes minta töredéke ($\lesssim 10\%$ -a) rendelkezik 1 mJy-nél nagyobb fluxussűrűségekkel (pl. Perger és mtsai, 2017). A pár száz ismert, a rádiódetektálási határt elérő fluxussűrűségű forrás közül csupán néhány tucat esetben vizsgálták és detektálták az AGN-aktivitáshoz köthető relativisztikus nyalábokat nagy érzékenységű és felbontású VLBI technika segítségével a $z > 3$ tartományban (pl. Gurvits és mtsai, 1992, 1994; Frey és mtsai, 1997; Bouchy és mtsai, 1998; Bouchy és Lestrade, 1998; Paragi és mtsai, 1999; Schilizzi és mtsai, 1999; Lobanov és mtsai, 2001; Volvach, 2003; Pérez-Torres és mtsai, 2006; Frey és mtsai, 2010; Ojha és mtsai, 2010; O’Sullivan és mtsai, 2011; Frey és mtsai, 2015; Gurvits és mtsai, 2015; Lobanov és mtsai, 2015; Coppejans és mtsai, 2016; Edwards és Tingay, 2016; Cao és mtsai, 2017; Zhang és mtsai, 2017; Frey és mtsai, 2018; Gabányi és mtsai, 2018a; Perger és mtsai, 2018a; Zhang és mtsai, 2020; An és mtsai, 2020, a teljesség igénye nélkül). A relativisztikus nyalábbal rendelkező források esetén szép számmal azonosítottak Doppler-erősített blazárynalábokat mind röntgen- (pl. Ghisellini és mtsai, 2011, 2015b; Sbarrato és mtsai, 2015; Belladitta és mtsai, 2019), mind a rádiótartományban (pl. Veres és mtsai, 2010; Frey és mtsai, 2015; Coppejans és mtsai, 2016; Cao és mtsai, 2017), míg néhány esetben a látóiránnyal nagyobb szöget bezáró nyalábbal rendelkező rádióforrásokat (rádiógalaxisokat) is azonosítottak (pl. Gabányi és mtsai, 2018b,a; Saxena és mtsai, 2018).

A *Swift* űrteleszkóp gamma-kitörések észlelésére tervezett eszközével (Burst Alert Te-



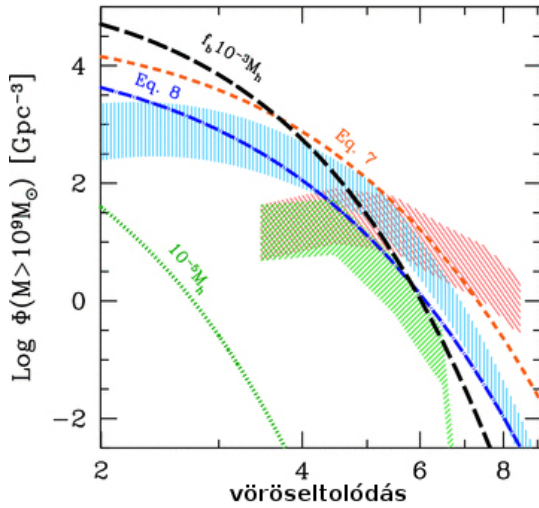
7. ábra. A „sötét buborék” modell egy gömbszerű kitakaró közeggel magyarázza a nagy vöröseltolódású, nem-blazár jellegű rádióhanges AGN-ek detektálásának problémáját (Ghisellini és Sbarrato, 2016).

lescope – BAT) 38 blazárt detektált a 15 – 150 keV-os röntgentartományban elvégzett égboltfelmérése során (ezek közül kettő a $3 \leq z \leq 4$ vöröseltolódás-tartományban található, Ajello és mtsai, 2009). A *Swift*/BAT blazárok mindegyike jelentős, az Eddington-határt közel elérő rátákon működő akkréciós koronggal rendelkezik (Ghisellini és mtsai, 2011). Az azonosított blazárok számából megbecsülhető a teljes rádióhanges AGN-populáció számsűrűsége az adott vöröseltolódás-tartományra vonatkoztatva. A nem blazár jellegű (a látóirányhoz viszonyítva nagyobb inklinációjú) rádiósugárzó AGN-ek száma az adott blazár relativisztikus nyalábját jellemző Lorentz-faktor értékével ($\Gamma \sim 15$) arányos. A rádiónyaláb (kúp) nyílásszöge (Θ) a teljes égbolton (4π sr) $2\pi \cos \Theta$ területet foglal el, ami a kis szögekre alkalmazható közelítés ($\cos \Theta \approx 1 - \Theta^2/2$, a Taylor-sorfejtés első tagja) alapján a teljes égbolt $1/\Theta^2$ részét jelenti. Minthogy a kúp fél nyílásszöge $1/\Gamma$ (ahol Γ a nyalábot jellemző Lorentz-faktor), $2\Gamma^2$ olyan AGN-nek kell léteznie, melyben a jet ennél nagyobb szöget zár be az észlelő látóirányával. A blazárok definícióját a látószög $\Theta < 1/\Gamma$ megkötés szerint megadva, Volonteri és mtsai (2011) megállapították, hogy a Sloan Digitális Égboltfelmérés (Sloan Digital Sky Survey – SDSS) és a Faint Images of the Radio Sky at Twenty-centimeters (FIRST, Becker és mtsai, 1995) rádiófelmérés által meghatározott közös mintában azonosított (a klasszikus definíció szerinti $R \geq 10$ feltételt teljesítő) rádióhanges AGN-ek száma nem éri el a *Swift*/BAT blazárok alapján jósolt értéket. A blazárok korai Univerzumra – evolúciós modellek alkalmazásával – extrapolált számsűrűségének felhasználásával megbecsült rádióhanges AGN-ek száma több nagyságrenddel is meghaladja a rádió-luminozitásfüggvény alapján várt értékeket ($\Gamma = 15$ Lorentz-faktor alkalmazása mellett, Volonteri és mtsai, 2011). Az ellentmondás feloldására három lehetőséget vázoltak fel: 1) a Lorentz-faktor értéke alacsonyabb, ezáltal a nem nyalábolt

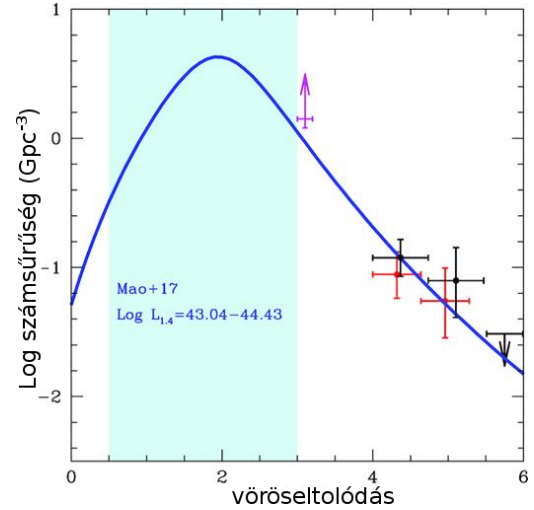
rádiójetek száma is egy nagyságrenddel kisebb, 2) az SDSS–FIRST minta a rádióhangos osztályra nem elég érzékeny (kiválasztási effektus), 3) az optikai sugárzás valamely módon (önabszorpció, külső elnyelődés) történő gyengülése miatt mind a rádiócsendes, mind a rádióhangos osztály nagy teljesítményű tagjai jelentős számban alulreprezentáltak az SDSS–FIRST keresztkorrelált mintában (Volonteri és mtsai, 2011). Az ellentmondás feloldását jelentheti továbbá a Ghisellini és Sbarato (2016) által tárgyalt „sötét buborék” elmélet is. A tanulmány felvetése, hogy a korai Univerzum fiatal AGN-jeit egy porból álló (gömbyszerű) „buborék” öleli körül, aminek következményeképpen a nukleáris régió (az akkréciós korong és a BLR) látható tartományú sugárzása a megfigyelő elől rejtve marad (7. ábra) – illetve infravörös tartományban megfigyelhető az újra kisugárzott elnyelt fény –, amennyiben a rendszer a megfigyelő látóirányával $1/\Gamma$ -nál nagyobb szöget zár be (vagyis nem blazár, Ghisellini és Sbarato, 2016). A modell szerint mind a rádióhangos, mind a rádiócsendes AGN-ek esetén is maximális teljesítményű (Eddington-határ közeli) akkréció szükséges ahhoz, hogy a legnagyobb tömegű fekete lyukak ($M > 10^9 M_{\odot}$) körüli „buborékok” eltűnjenek a $z \sim 4$ vöröseltolódást elérve (egyetértésben a $z < 4$ AGN-számsűrűséggel, Ghisellini és Sbarato, 2016).

A korai Univerzum blazár-számsűrűségét független módszerek alkalmazásával is meghatározták: a Cosmic Lens All Sky Survey (CLASS) fluxussűrűség-limitált (> 30 mJy) mintájában kerestek rádió-, optikai és infravörös tartományú mérések felhasználásával blazárokat (Caccianiga és mtsai, 2019). A CLASS minta $z > 4$ blazárjainak (az adott vöröseltolódás-tartomány együttmozgó térfogatába eső) számsűrűsége ellentmond a Volonteri és mtsai (2011) által alkalmazott evolúciós modell (pl. Ajello és mtsai, 2009) becslésének, és a Mao és mtsai (2017) által jósolt értékeket támasztja alá, miszerint az AGN-aktivitás maximuma $z \sim 2$ körül zajlott le (hasonlóan a rádiócsendes AGN-ekhez, 8. ábra). A különbség magyarázata lehet, hogy a röntgensugárzáson alapuló kiválasztás csak a legnagyobb teljesítményű AGN-ekre érzékeny (így a számsűrűség maximuma nagyobb vöröseltolódáson figyelhető meg, 8. ábra), míg a CLASS-mintához hasonló kiválasztás statisztikailag jobban reprezentálja a teljes rádiósugárzó AGN-populációt (Caccianiga és mtsai, 2019).

A röntgentartományban elvégzett számsűrűségbecslések statisztikai feltevése (vagyis a felhasznált Lorentz-faktor értéke) egyedi objektumok VLBI-megfigyelésével is pontosítható. Bár a legkorábbi rádió-AGN-ek szerkezete és pontos fizikai tulajdonságai még viszonylag kevésbé ismertek, számos tanulmány született a témában. Az eddigi legkiterjedtebb $z > 4,5$ minta VLBI módszerrel való vizsgálatát Coppejans és mtsai (2016) végezték. A 27 nagy vöröseltolódású AGN esetében a források nagy többsége Doppler-erősített rádiójet-emissziót mutat, közülük a minta fele az ismert lapos spektrumú rádiókvazárok



(a) AGN számsűrűség a Swift/BAT blazárok alapján (Volonteri és mtsai, 2011)

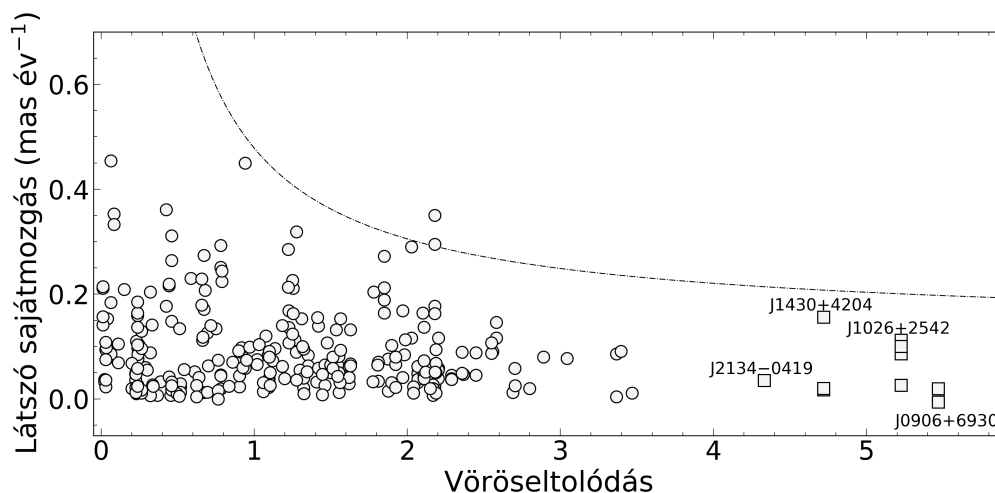


(b) AGN számsűrűség a CLASS rádiókvazárok mintájából becsülve (Caccianiga és mtsai, 2019)

8. ábra. A nagy vöröseltolódású AGN-ek számsűrűsége a különböző evolúciós modellek becslései alapján. Az (a) ábrán a zöld, piros területek rendre a Swift/BAT blazárok és az Ajello és mtsai (2009)-féle evolúciós modell alapján megbecsült rádióhangos AGN-számsűrűséget jelölik, míg a kék ív a rádiócsendes kvazárok számsűrűségének becslését mutatja a vöröseltolódás függvényében ($\Gamma = 5$ és $\Gamma = 15$ Lorentz-faktorok feltételezése mellett). A (b). ábra a CLASS rádióforrások felhasználásával a Mao és mtsai (2017)-féle evolúciós modell alkalmazásával megbecsült számsűrűségeket mutatja.

(vagyis blazárok) számát növelte, másik fele pedig meredek spektrumot mutatott (nagy valószínűséggel megahertz vagy gigahertz tartományú maximummal rendelkező rádiókvazár, Coppejans és mtsai, 2016). Minthogy a rádiónyalábok komponens-sajátmozgásai az alacsonyabb vöröseltolódásoknál jól ismertek (pl. Britzen és mtsai, 2008), az elfogadott kozmológiai modellekkal a távoli Univerzumra becslést tehetünk (pl. Vermeulen és Cohen, 1994; Kellermann és mtsai, 1999). Az AGN-nyalábok tényleges sajátmozgásának meghatározásához szükség van legalább két (ideális esetben több) időpontban elvégzett VLBI mérésre. A kozmológiai idődilatació következtében a megfigyelő vonatkoztatási rendszerében akár évtizedeknek kell eltelnie, hogy a rádiónyaláb komponenseinek mozgását megfelelő pontossággal meghatározzuk, emiatt viszonylag kevés kvazárról rendelkezünk jetsajátmozgás-értékkel a $z > 4$ populációban (9. ábra), ezek a J1430+4204 (Veres és mtsai, 2010; Zhang és mtsai, 2020), a J1026+2542 (Frey és mtsai, 2015), a J2134–0419 (Perger és mtsai, 2018a)⁵, valamint a J0906+6930 (An és mtsai, 2020) jelű kvazárok. Ezekben a forrásokban a sajátmozgásértékek megfelelnek a korai Univerzumra számított előrejelzéseknek (9. ábra, Kellermann és mtsai, 2004; Britzen és mtsai, 2008;

⁵A Perger és mtsai (2018a) publikáció a doktori értekezés résztét képezi, a 3. fejezetben részleteiben tárgyalom.



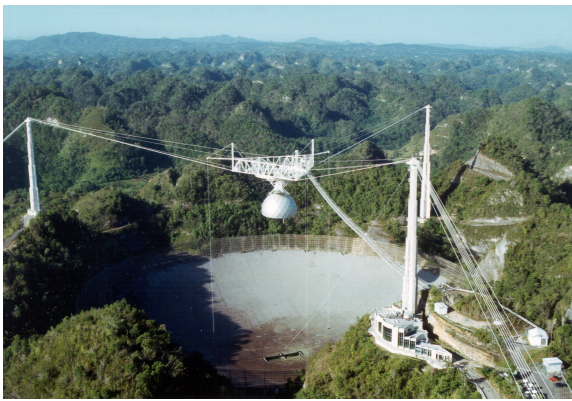
9. ábra. AGN-sajátmozgások a vöröseltolódás függvényében. A körök a Britzen és mtsai (2008)-féle minta legjobb adatpontjait jelzik, a különböző vöröseltolódásokon kapott értékek összehasonlításaként. A szaggatott görbe a $\Gamma = 25$ -ös Lorentz-faktor feltételezésével, a jelenlegi kozmológiai modellek alapján ($\Omega_m = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$, és $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$) számított felső határ a sajátmozgásra. A négyzetek a nagy vöröseltolódású AGN-ek ismert sajátmozgás értékeit jelölik (Veres és mtsai, 2010; Frey és mtsai, 2015; Perger és mtsai, 2018a; An és mtsai, 2020; Zhang és mtsai, 2020).

Hovatta és mtsai, 2009; Lister és mtsai, 2009), azonban ezen objektumok mindegyike erős Doppler-nyalábolást mutat (és a nyaláb az észleléssel kis szöget zár be), így nem oldja fel a korábban felvetett „túl sok blazár” problémát. A Volonteri és mtsai (2011) által javasolt megoldás, miszerint alacsonyabb Lorentz-faktor feltételezése megoldaná a hiányzó nagyobb inklinációjú források problémáját, nem vethető el vagy erősíthető meg, hiszen a szakirodalomban számos esetben találunk magas Lorentz-faktorokat ($\Gamma = 10 - 15$, pl. Veres és mtsai, 2010; Frey és mtsai, 2015; Ghisellini és mtsai, 2015a; Sbarrato és mtsai, 2015; Zhang és mtsai, 2020), ugyanakkor van példa jóval alacsonyabb értékekre is ($\Gamma = 3 - 6$, pl. Perger és mtsai, 2018a; An és mtsai, 2020). Szintén megfigyelhető, hogy számos esetben ellentmondás lép fel a különböző tartományú mérések alapján meghatározott fizikai paraméterek között: míg a röntgenmérések nagy Lorentz-faktort adnak (J2134–0419, J0906+6930 Ghisellini és mtsai, 2015a; Sbarrato és mtsai, 2015), addig a VLBI mérések a mas skálán jóval alacsonyabb áramlási sebességre utalnak (J2134–0419, J0906+6930, Perger és mtsai, 2018a; An és mtsai, 2020). Továbbá olyan AGN-eket is találhatunk a szakirodalomban, melyek a röntgentartományban egyértelműen blazártulajdonságokat mutatnak (J1420+1205, J2220+0025, Ghisellini és mtsai, 2015a), azonban kiterjedt mas skálájú szerkezettel rendelkeznek és nem mutatnak relativisztikus nyalábolást rádiótartományban (Cao és mtsai, 2017). Az eltérés magyarázatát elősegíti a már ismert röntgentulajdonságokkal rendelkező távoli AGN-ek, új, parszek skálájú felbontá-

sát lehetővé tévő VLBI észlelések sorozata, pl. a kutatócsoportunk által megpályázott (projektkód: EC073 és EF029, vezető kutató: Hongmin Cao és Frey Sándor), és folyamatban lévő (projektkód: EG102, vezető kutató: Gabányi Krisztina) méréssorozatok az Európai VLBI Hálózattal.

A fentiekből jól látható, hogy a nagy vöröseltolódású AGN-ek kutatásában jelenleg számos nyitott vagy vitatott kérdés vár megválaszolásra. Ennek legfőbb oka, hogy egyelőre még viszonylag kevés ilyen objektumot ismerünk, és közülük még kevesebbről rendelkezünk elegendő mérési adattal a különböző elektromágneses hullámsávokban. Ezért minden új információ, felfedezés értékes adalékokkal szolgálhat a tématerület fejlődéséhez.

1.3. VLBI technika és képzalkotás



(a) Forrás: Arecibo Observatórium



(b) Forrás: Jeff Dai (TWAN)

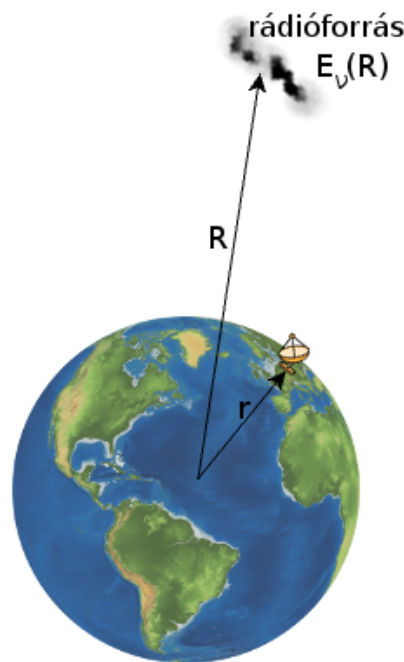
10. ábra. A 300 m-es Arecibo és az 500 m-es FAST rádióantennák.

A nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok pc-skálájú szerkezetének vizsgálatához elengedhetetlen, hogy az AGN-morfológiát a legfinomabb felbontást nyújtó eszközökkel térképezzük fel. Minthogy az adott eszköz felbontása függ az észlelés λ hullámhosszától és az észlelést végző eszköz leképző felületének vagy nyílásának d átmérőjétől ($\sin \theta \approx \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$ módon), a paraboloid rádiótávcső antennaátmérője jelentős szerepet kap a rendszer felbontásának meghatározásában. A rádiócsillagászati észlelések során (a hosszú hullámhosszak következményeképp) a felbontás érdekében óriási átmérőjű paraboloid antennákat hoztak létre, azonban az átmérő nem növelhető a végtelenségig: a legnagyobb még pozicionálható rádiótávcső maximális mérete kb. 100 m (pl. Green Bank, Effelsberg). Az ennél nagyobb távcsövek a saját súlyuk alatt deformálódnának, elveszítenék a fókuszáló felület alakját, ezért az ennél lényegesen nagyobb „egyványéros” teleszkópok csak rögzített konfigurációban valósíthatók meg, mint például a Puerto Ricó-i

Arecibo⁶ (305 m, 10a. ábra) vagy a kínai FAST⁷ (Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope, 500 m, 10b. ábra) állomások esetén, melyek mindegyikét természetes mélyedésekbe építették.

A felbontás további (nagyságrendi) növeléséhez azonban nem tudunk elegendően nagy átmérőjű rádiótányért létrehozni. Ezt a problémát küszöböli ki a fény hullámtermeszetét kihasználó rádióinterferometria módszere, ahol a tányérátmérő, mint felbontást meghatározó tényező szerepét „átveszi” az egyes tagteleszkópok közötti b bázisvonal. Ezzel a módszerrel ezredívmásodperces (vagy akár nagyobb) szögfelbontást érhetünk el. Amikor a bázisvonalak hossza eléri a több száz vagy több ezer kilométeres értéket, nagyon hosszú bázisvonalú interferometriáról beszélünk. A VLBI módszer matematikai leírását Clark (1995) alapján foglaltam össze vázlatosan.

Egy távoli rádióforrás megfigyelésekor annak helyvektora \mathbf{R} , a kibocsátott sugárzás időben változó elektromágneses térerőssége pedig $\mathbf{E}(\mathbf{R}, t)$, amit a Föld középpontjától mért \mathbf{r} helyvektorú pontban detektálunk. Az elektromos térerősség adott ν frekvencián



11. ábra. A rádióforrás és rádióantenna elhelyezkedése (Clark, 1995 alapján). A rádióforrás a Föld középpontjától (origó) mért \mathbf{R} helyvektorral jellemezhető pontban $\mathbf{E}(\mathbf{R}, t)$ sugárzást bocsát ki, melyet az origótól \mathbf{r} távolságra elhelyezkedő rádióantennával észlelünk.

mért monokromatikus komponense a távcső (megfigyelő) helyén az alábbi módon írható fel, ahol $P_\nu(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ a propagátor függvény (megadja, hogy az \mathbf{R} -ben kibocsátott sugárzás

⁶www.naic.edu

⁷www.fast.bao.ac.cn

miként hat az \mathbf{r} helyen mért elektromágneses térre):

$$\mathbf{E}_v(\mathbf{r}) = \int P_v(\mathbf{R}, \mathbf{r}) \mathbf{E}(\mathbf{R}) dS \quad (1)$$

Feltételezve, hogy az észlelő és a kibocsátás helye közötti tér üres és P_v skalárfüggvény, az elektromos térerősség kvázi-monokromatikus komponense az

$$\mathbf{E}_v(\mathbf{r}) = \int \frac{\mathbf{E}(\mathbf{R}) \cdot e^{2\pi i v |\mathbf{R}-\mathbf{r}| \frac{1}{c}}}{|\mathbf{R}-\mathbf{r}|} dS \quad (2)$$

alakban írható fel.

Az interferométer \mathbf{r}_1 és \mathbf{r}_2 pontokban elhelyezett két távcsöve által mért elektromágneses tér közötti korreláció az alábbi módon definiálható (\mathbf{E}_v^* a komplex konjugált):

$$\mathbf{V}_v(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle \mathbf{E}_v(\mathbf{r}_1) \mathbf{E}_v^*(\mathbf{r}_2) \rangle \quad (3)$$

Felhasználva a 2. egyenletet a sugárzás két külön felületen vett integrálra alakítható:

$$\mathbf{V}_v(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \left\langle \iint \mathbf{E}_v(\mathbf{R}_1) \mathbf{E}_v(\mathbf{R}_2) \frac{e^{2\pi i v |\mathbf{R}_1-\mathbf{r}_1| \frac{1}{c}} e^{2\pi i v |\mathbf{R}_2-\mathbf{r}_2| \frac{1}{c}}}{|\mathbf{R}_1-\mathbf{r}_1| |\mathbf{R}_2-\mathbf{r}_2|} dS_1 dS_2 \right\rangle \quad (4)$$

Míthogy az asztrofizikai objektumok által kibocsátott sugárzás (térben) inkoherens (vagyis $\mathbf{R}_1 \neq \mathbf{R}_2$ helyen $\langle \iint \mathbf{E}_v(\mathbf{R}_1) \mathbf{E}_v(\mathbf{R}_2) \rangle = 0$), az $\mathbf{s} = \mathbf{R}/|\mathbf{R}|$ a forrás irányába mutató geocentrikus egységvektor bevezetésével, és \mathbf{V} vektortermészetétől való eltekintéssel a sugárzás intenzitása $I = |\mathbf{R}|^2 \langle |\mathbf{E}_v|^2 \rangle$ alakban felírható, amivel a korrelációs függvény a

$$V_v(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int I_v(\mathbf{s}) e^{-2\pi i v \mathbf{s} \cdot (\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2) \frac{1}{c}} d\Omega \quad (5)$$

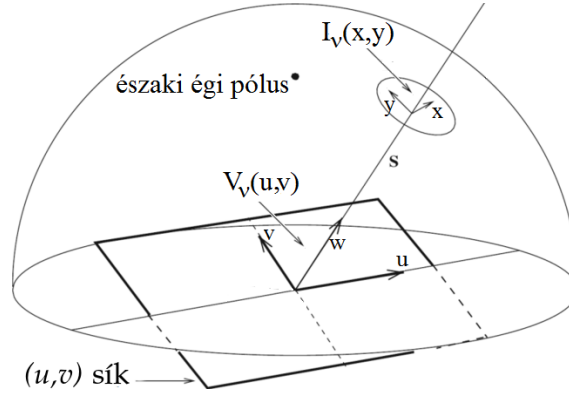
alakot ölti. A $V_v(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2)$ korrelációs függvény az átalakításokkal már csak a két antenna $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ távolságától, vagyis a bázisonaltól függő mennyiség, amit vizibilitásnak nevezünk.

A forrás kis szögmérete miatt bevezethető az (u, v) síknak nevezett, az észlelő-rádióforrás látóirányra merőleges koordináta-rendszer (12. ábra). Az (u, v) síkon $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \frac{c(u, v, w)}{v}$ és $\mathbf{s} = (x, y, 1)$, amivel a vizibilitás

$$V_v(u, v) = \iint I_v(x, y) e^{-2\pi i (ux+vy)} dx dy \quad (6)$$

alakban írható fel, és ismeretében az I_v monokromatikus intenzitás meghatározható Fourier-transzformációval:

$$I_v(x, y) = \iint V_v(u, v) e^{2\pi i (ux+vy)} du dv \quad (7)$$



12. ábra. Az (u,v) sík elhelyezkedése a rádióforráshoz viszonyítva. Az (u,v) sík merőleges az észlelő rádióforrásra vonatkoztatott látóirányára. Az interferometrikus hálózat egy mérése során az egy-egy bázisvonalon lévő antennák általi mérés egy-egy mintavételezési (vizibilitás) pontot jelent, hosszabb ideig tartó észlelés – a Föld forgását kihasználva – alatt a bázisvonal vetülete elliptikus ívet ír le az (u,v) síkon. A mintavételezett pontokban mért vizibilitási értékek Fourier-transzformációjával előállítható a forrás eredeti intenzitáseloszlása (Burke és Graham-Smith 2014 alapján).

A valóságban az interferométeres hálózat nem folytonos, a vizibilitásértékek nem töltik ki a teljes (u,v) síkot, így bevezetendő egy $S(u,v)$ mintavételezési függvény (melynek értéke a mérési pontokban 1, mindenhol máshol zérus), amivel a

$$I_v^D(x,y) = \iint V_v(u,v) S(u,v) e^{2\pi i(ux+vy)} dudv \quad (8)$$

Fourier-transzformáció a „piszkos térképet” (dirty map, 18b. ábra) adja meg. A „piszkos térkép” és a valódi intenzitás kapcsolatát az $I_v^D = I_v \times B$ konvolúció adja meg, ahol

$$B(x,y) = \iint S(u,v) e^{2\pi i(ux+vy)} dudv \quad (9)$$

módon előálló pontválasz függvény („piszkos nyaláb”, dirty beam, 18a. ábra), vagyis az interferométer pontforrásra adott válasza.

A VLBI technika elvén működő interferométerek

Egy aktív galaxismag rádiósugárzásának intenzitáseloszlása az előző alfejezetben részletezett elvek alapján a VLBI technika segítségével ívmásodperc, de akár ezredívmásodperc felbontással is vizsgálhatóvá válik. A nagy vöröseltolódású AGN-ek szerkezetének leg részletesebb megismeréséhez alapvető fontosságú, hogy a legfinomabb felbontással és legnagyobb érzékenységgel rendelkező interferométerekkel figyeljük meg az égitestet.

Az Európai VLBI Hálózat. Az Európai VLBI Hálózat (European VLBI Network – EVN) hosszú észak–déli (pl. Zelencsukszkaja – Hartbeesthoek) és kelet–nyugati (pl. Effelsberg – Ürümszi) tájolású bázisvonalai különösen alkalmasak az ezredmásodperc skálájú szerkezet feltárására, míg nagy gyűjtőfelületű antennái (pl. Effelsberg) az érzékenység maximalizálásában játszanak szerepet. A végleges adatsor termikus zajszintje továbbá csökkenthető a célobjektumon töltött idő növelésével, egészen a $\mu\text{Jy beam}^{-1}$ nagyságrendekig⁸.

Az EVN méréseiben résztvevő egyes antennák a mérés megtervezésekor választhatók, a hálózat állandóan elérhető rádióantennái a következők⁹:

- ◆ Effelsberg (Németország)
- ◆ Hartebeesthoek (Dél-afrikai Köztársaság)
- ◆ Irbene (Lettország)
- ◆ Jodrell Bank és az e-MERLIN hálózat (Egyesült Királyság)
- ◆ Medicina (Olaszország)
- ◆ Noto (Olaszország)
- ◆ Onsala (Svédország)
- ◆ a QUASAR állomások: Svetloje, Zelencsukszkaja, Badari (Oroszország)
- ◆ Sardinia (Olaszország)
- ◆ Tianma (Kína)
- ◆ Toruń (Lengyelország)
- ◆ Ürümszi (Urumqi, Kína)
- ◆ Westerbork (Hollandia)
- ◆ Yebe (Spanyolország)



Image by Paul Boven (boven@jive.eu). Satellite image: Blue Marble Next Generation, courtesy of Nasa Visible Earth (visibleearth.nasa.gov).

13. ábra. Az Európai VLBI Hálózat rádióantennái.

⁸Az egyes mérési beállításokhoz tartozó termikus zaj az EVN kalkulátorral becsülhető meg: old.evlbi.org/cgi-bin/EVNcalc

⁹www.evlbi.org/telescopes

Az állandó tagok mellett alkalmanként bevonják még az amerikai VLBA (Very Long Baseline Array) és/vagy az ausztrál hálózat (Long Baseline Array – LBA) elemeit is az ún. globális VLBI észlelésekbe. Az EVN-nel együttműködő további állomások Arcibo (Puerto Rico), Mesáhovi (Finnország), a koreai VLBI hálózat állomásai: Yonsei, Ulsan, Tamna (Dél-Korea), továbbá a Wettzell (Németország) teleszkóp.

Az EVN (és társintézményeinek) egyedi állomásai által elvégzett mérések adatait az alábbi központok egyikében korrelálják:

- ◆ Az Európai VLBI Intézet (JIVE, Dwingeloo, Hollandia)¹⁰
- ◆ A Max Planck Rádiócsillagászati Intézet (MPIfR, Bonn, Németország)¹¹
- ◆ A Very Long Baseline Array (VLBA) adatfeldolgozó központja (Socorro, Új-Mexikó)¹²

A Very Long Baseline Array. Az EVN-hez hasonló tulajdonságokkal rendelkező, az Amerikai Egyesült Államok területén elhelyezkedő VLBI hálózat a Very Long Baseline Array (VLBA)¹³. A VLBA állomások listája az alábbi, az egyes teleszkópok elhelyezkedése pedig a 14. ábrán tekinthető meg;

- | | |
|-------------------------------|-----------------------------|
| ◆ St. Croix (Virgin-szigetek) | ◆ Pie Town (Új-Mexikó) |
| ◆ Hancock (New Hampshire) | ◆ Kitt Peak (Arizona) |
| ◆ North Liberty (Iowa) | ◆ Owens Valley (Kalifornia) |
| ◆ Fort Davis (Texas) | ◆ Brewster (Washington) |
| ◆ Los Alamos (Új-Mexikó) | ◆ Mauna Kea (Hawaii) |

A hálózatot 10, egyenként 25 méteres rádióantenna alkotja, legrövidebb bázisvonala 200 km, a leghosszabb 8600 km (Mauna Kea – St. Croix). A VLBA termikus érzékenysége szintén elérheti a $\mu\text{Jy beam}^{-1}$ nagyságrendet, legnagyobb felbontása eléri a 0,1 ezredív-másodperc nagyságrendet (96 GHz-en). Az interferométer által rögzített adatok korrelálását a VLBA Socorróban (Új-Mexikó) elhelyezkedő adatfeldolgozó központjában végzik el.

A hálózat távcsöveivel készül az egyik legjelentősebb tudományos projekt, a jelenleg is folyamatosan végzett 10. VLBA Kalibrátorfelmérés¹⁴. A jelenleg futó méréseket további 9 hasonló projekt előzte meg (Beasley és mtsai, 2002; Fomalont és mtsai, 2003; Petrov és mtsai, 2005, 2006; Kovalev és mtsai, 2007; Petrov és mtsai, 2008; Gordon és

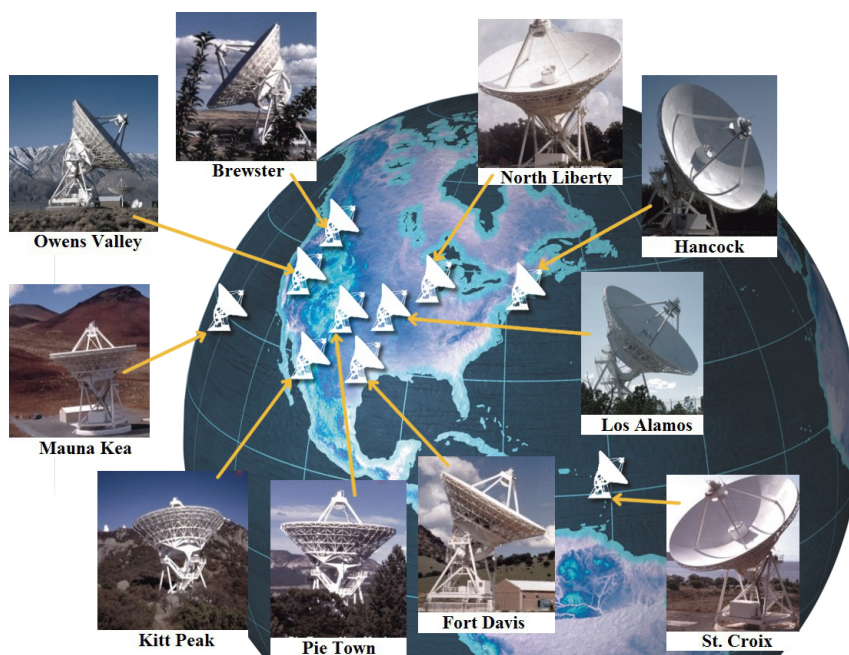
¹⁰www.jive.eu

¹¹www3.mpi-fr-bonn.mpg.de

¹²www.vlba.nrao.edu

¹³public.nrao.edu/telescopes/vlba/

¹⁴astrogeo.org/vcs10



14. ábra. A VLBA rádióantennái. Az VLBA 10 egyenként 25 m átmérőjű rádióantennából áll, melyek az Egyesült Államok területén találhatók. A felhasznált képek forrása: *public.nrao.edu* és *www.vlba.nrao.edu*

mtsai, 2016; Petrov, 2016). A felméréssorozat célja a kompakt extragalaktikus rádióforrásokat tartalmazó legteljesebb minta megalkotása. A felmérésben vizsgálják az AGN-ek spektrálindeket kiloparszek (szögmásodperces felbontás) és parszek (ezredívmásodperces felbontás) skálákon, a rádióforrások morfológiáját, és az ezen tulajdonságok közötti összefüggéseket. A méréseket egyidejűleg két frekvencián, 4,3 és 7,6 GHz-en végzik a VLBA távcsövei, folyamatosan növelve az ismert kalibrátorforrások számát. Az eddig elvégzett VLBI mérések adatai a astrogeo.org/vlbi_images/ oldalon érhetők el. A cél- és kalibrátorforrásokat tartalmazó gyűjtemény több mint 15 000 rádióforrás adataival rendelkezik, ahol rögzítették a megfigyelt objektum nevét, koordinátáit és a fluxussűrűségét, továbbá elérhetőek az előzetesen kalibrált adatok további tudományos adatfeldolgozás céljából.

A Karl G. Jansky Very Large Array. Az Új-Mexikóban található Very Large Array (új nevén Karl G. Jansky Very Large Array – VLA, 15. ábra) 28 db (27 használatban lévő és 1 tartalék), egyenként 25 m-es, Y alakban elhelyezkedő teleszkópból megalkotott hálózat. A VLA 4 különböző (A, B, C, D) konfigurációjában 14' (74 MHz, D) és 0',04 (45 GHz, A) közötti felbontás érhető el¹⁵, mérete ~ 1 km és ~ 36 km között változtatható, amit egy különleges sínrendszer tesz lehetővé. Az Y alakú elrendezés a megfigyelt égitest terület hatékony megfigyelését szolgálja, rövid, akár néhány perces észlelési idő alatt

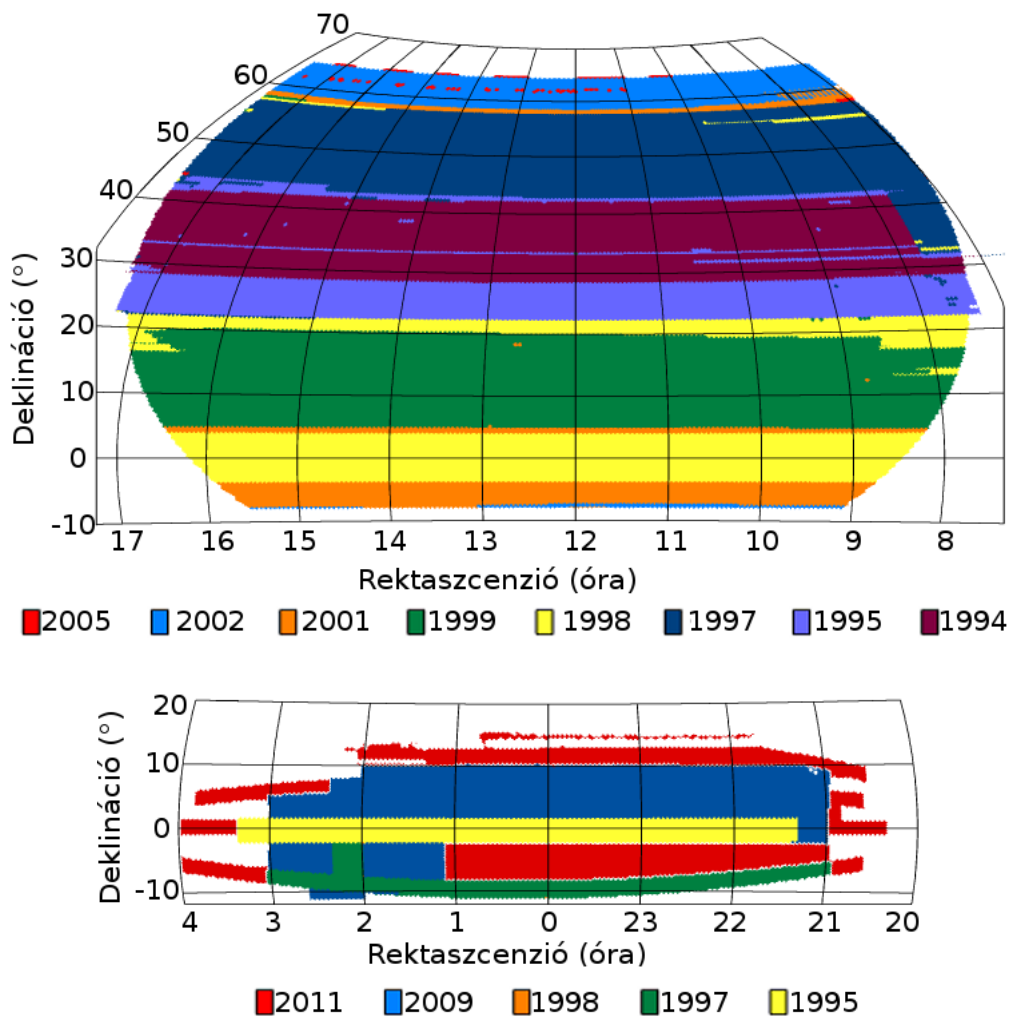
¹⁵science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/resolution



15. ábra. A Very Large Array. Az Új-Mexikóban elhelyezkedő, az Egyesült Államok Nemzeti Rádiócsillagászati Observatóriuma által fenntartott távcsőhálózat 28 db, egyenként 25 m tányérátmérőjű antennából áll. (Forrás: public.nrao.edu)

is jó (u, v) lefedettség érhető el vele. A száranként 9–9 teleszkóp bázisvonalai a beépített sínrendszeren egyszerűen változtathatók a tudományos céloknak megfelelő kisebb vagy nagyobb felbontás elérése érdekében.

A FIRST rádiófelmérést (Becker és mtsai, 1995) a VLA teleszkópjai közreműködésével, az égboltot 10 000 négyzetfokon lefedő területen végezték el. Megtervezésekor számos frekvenciatartományban rendelkezésre álltak a teljes égboltot vizsgáló (látható tartományban a Palomar Observatory Sky Survey, gamma-tartományban a SAS2 és a Compton Gamma-ray Observatory, a röntgentartományban az Uhuru és a ROSAT, infravörös hullámhosszakon az IRAS, továbbá rádiótartományban a Cambridge, Texas és Green Bank Telescope) felmérésekből származó katalógusok. Az addig elvégzett rádiófelmérések érzékenysége és felbontása azonban viszonylag gyenge volt ($\gtrsim 30$ mJy, $30''$). A VLA korai észlelési programjai során számos új forrást detektáltak a néhány mJy fluxussűrűségű tartományban, továbbá az egy nagyságrenddel finomabb szögfelbontásnak köszönhetően az egyantennás felmérések forrásainak háromnegyede esetén detektáltak felbontott sugárzást. Így számos (akár többkomponensű) rádióforrás azonosítása a látható tartományú objektumokkal lényegesen pontosabbá vált. A FIRST felmérés megtervezésének tudományos céljai között nagy hangsúlyt kapott az optikai forrásokkal való azonosítás hatékonyságának elősegítése, az alacsonyabb fluxussűrűségű objektumok populációjának vizsgálata, továbbá a szögmásodperc skálájú morfológia felfedése. A projekt égboltlefedettségét úgy választották meg, hogy egybeessen az akkor induló látható tartományú égboltfelmérés (SDSS) által megfigyelt égbolterülettel. A felmérést a VLA B konfigurációjában végezték el az 1,4 GHz-es központi frekvencián, 70 MHz széles frekvenciasávban, érzékenysége átlagosan ~ 1 mJy. Az $5''$ -es felbontással rendelkező rádiótérképek átlagos zajszintje $0,15$ mJy beam $^{-1}$. Az északi égbolt közel 80%-át, míg a déli égbolt $\sim 20\%$ -át figyelték meg a felmérés keretei között (16. ábra). A FIRST első észlelési periódusát 1993-tól 2004-ig végezték, majd 2009 és 2011 között további, a déli galaktikus



16. ábra. A VLA FIRST felmérés égboltlefedettsége (2014. december 17.). Az északi égbolt (felső) közel 80%-át, míg a déli égbolt (alsó) ~ 20%-át figyelték meg eddig a felmérés keretei között. (Forrás: sundog.stsci.edu)

pólus körüli területeket lefedő mérésekkel bővítették az égboltlefedettséget. A felmérés az északi égbolton a 7^h és 17,5^h rektaszncenziójú, valamint a -8° és +57,6° deklinációjú koordináták között, míg a déli égbolton a 20,4^h és 4^h rektaszncenzió és -11,5° és 15,4° deklináció koordinátákon teljes, a katalógusban 94 432 darab 1 mJy-nél nagyobb fluxus-sűrűségű rádióforrás található. A FIRST képtárházából (képkivágási szolgáltatás) a felmérés által lefedett teljes égboltterületről elérhetők ún. bélyegképek (rádiótérképek)¹⁶, amelyek a FITS (Flexible Image Transport System, Wells és mtsai, 1981) formátumban további feldolgozásra felhasználhatók.

¹⁶third.ucllnl.org/cgi-bin/firstcutout

Mérés VLBI hálózatokkal és az adatok korrelálása

Rádióinterferometrikus észleléseket a fent bemutatott hálózatok segítségével végezhetünk, az észlelés elméleti leírását és folyamatát többek között Clark (1995) és Shepherd (1997) tárgyalja. A Föld felszínén különböző helyszíneken lévő távcsövek esetén ugyanazon hullámfront beérkezéséhez eltérő úthossz, így eltérő időpont is tartozik. Ezeket az úthosszakat ($c \cdot \tau$) mesterséges módon, atomórákkal szinkronizált időbélyegek felhasználásával módosítják, hogy minden állomás egyenlő effektív távolságra kerüljön a forrástól. A megfigyelt rádióforrásból érkező komplex hullámfrontokat az egyedi rádióteleszkópok külön-külön észlelik, a jeleket a vevőberendezésekkel rögzítik, majd periodikus függvényjelekkel egy-egy oszcillátoron keresztül lekeverik és erősítik, az észlelt rádiófrekvenciákat (RF) kezelhető, alacsonyabb frekvenciájú sávokká (intermediate frequency – IF) alakítva, majd az adott állomáson mágneses adathordozóra rögzítve tárolják, újabban esetleg valós időben, szélessávú optikai távközlési kábelhálózatokkal továbbítják. Az egyes adathalmazokat egy helyre szállítják (JIVE, MPIfR, stb.), ahol az egyes bázisvonalakhoz tartozó teleszkóppárok adatait interferálják és korrelálják, a kapott komplex vizibilitásokat az idő függvényében rögzítik. Az egy adott bázisvonalra vonatkozó vizibilitások valamely térbeli gyakorisággal mintavételezett adatok, azonban a Föld forgásának (földforgási szintézis) következtében a bázisvonalak elfordulnak az idő függvényében, így a távcsövek által mért térbeli frekvenciák, vagyis a bázisvonalak vetületei is változnak, és – a VLBI hálózat geometriájától függő – elliptikus pályát írnak le az (u, v) síkon, melyet (u, v) lefedettségnek is nevezünk (17a. ábra). Minél jobban benépesített az (u, v) sík, annál sűrűbb az interferométer térbeli mintavételezése. Az (u, v) lefedettség teljesebbé tehető az észlelési idő hosszának és a bázisvonalak (teleszkópok) számának növelésével, valamint több frekvenciasávban vagy nagyobb sávzélességgel történő észleléssel (Jackson, 2008).

Fázis- és amplitúdókalibráció az AIPS programcsomaggal

A korrelált adatokat az egyes állomások által a mérés során rögzített rendszerhőmérsékletek, az antennanyereségnek a megfigyelt rádióforrás horizont feletti magasságától való függését leíró paraméterek, vagyis a „nyereségi görbék” (gain curve), valamint egy ismert, fényes kalibrátorforrás segítségével kalibráltam az USA Rádiócsillagászati Observatóriuma (National Radio Astronomy Observatory – NRAO) által fejlesztett Astronomical Image Processing System¹⁷ (AIPS, jelentése: csillagászati képfeldolgozó rendszer, Greisen, 2003) programcsomag felhasználásával.

¹⁷www.aips.nrao.edu/index.shtml

Az AIPS által elvégzett kalibráció lépéseit¹⁸ egy általam vizsgált nagy vöröseltolódású rádiókvazár, a PMN J0909+0354 (a továbbiakban J0909+0354, 4. fejezet) példáján mutatom be. A 6 órás VLBI mérésben az EVN 15 antennája vett részt, a mérés adatainak korrelációját a JIVE-ban végezték el a J0909+0354 cél-, valamint a J0909+0121 és a J0909+0835 kalibrátorforrásra. A kalibrátorforrások az interferenciamintázat-illesztéshez, valamint a fázis- és amplitúdókalibrációhoz szükségesek. A korrelált adatok egy eredeti kalibrációs táblázattal (CL1) rendelkeznek, amelyben az amplitúdó, a fázis és az adott sáv frekvenciaeltolására vonatkozó alapértelmezett kalibrációs paramétereket rögzítették (ez az amplitúdóra általában 1, a fáziskésésre pedig zérus). A korreláció során továbbá mellékeltek a mérés és az előzetes kalibráció során törölt adatpontok naplóját (flag), amely tartalmazza azoknak a mérési pontoknak a listáját, amikor az adott időpontban az egyes antennák nem figyelték meg a forrásokat vagy az adott mérés minősége nem megfelelő.

A négy .IDI kiterjesztésű adatfájlt beolvastam az AIPS programcsomagba, megadva többek között a képfájlok számát, a beolvasott állomány AIPS-könyvtárbeli elnevezését, valamint, hogy a beolvasott adatokat a program egy állománnyá fűzze össze (FITLD). A beolvasott állományhoz hozzacsatoltam az előzetesen törölt adatok FG1 hibatáblázatát (UVFLG), majd az egyes állomások által szolgáltatott, a mérés során rögzített rendszerhőmérsékleteket tartalmazó adatokat, létrehozva a rendszerhőmérséklet és a nyereségi görbe táblázatokat (ANTAB). A nyers adatok fázisait és amplitúdóit az eredeti kalibrációs és hibatáblázatok alkalmazásával elemeztem (POSSM), kiválasztva egy tetszőleges 1 perces időintervallumot mind a cél-, mind a kalibrátorforrásokra, bázisvonalanként jobb (RR) és bal (LL) cirkuláris polarizációkban. A Jodrell Bank (a mérésben 1-essel jelzett) állomás bázisvonalaira vonatkozó spektrumok egy részletét – az első kalibrációs és hibatáblázatok alkalmazásával – a Függelékben, a B.1a és a B.2a ábrákon mutatom be.

Az eredeti kalibrációs, valamint a rendszerhőmérséklet és nyereségi görbe táblázatokat felhasználva a teljes adatsorra amplitúdókalibrációt végeztem (APCAL), létrehozva az első megoldástáblázatot. A megoldástáblázatot az eredeti kalibrációs táblázatra alkalmazva létrehoztam az előzetes (a priori) amplitúdókalibrációt tartalmazó táblázatot (CLCAL). A következő lépésben manuális fáziskalibrációt végeztem, melyhez egy egyperces, a J0909+0121 jelű kalibrátorforrásra vonatkozó mérési szakaszt választottam ki úgy, hogy az időintervallumban az összes antenna minden bázisvonalára megfelelő minőségű (jel/zaj arányú) fázis- és amplitúdómérések álljanak rendelkezésemre, lehetőleg az összes IF-en és bázisvonalon (Függelék, B.1a. ábra). Az intervallum adatait és az előzetes kalibrációs táblázatot felhasználva 2 perces megoldásintervallumon végeztem el a manuális fázisillesztést (FRING), ami a 2. megoldástáblázatot eredményezte. Ebből létrehoz-

¹⁸Az adatfeldolgozásról további információk találhatóak az AIPS kézikönyvben a www.aips.nrao.edu/cook.html és www.jive.eu/~marcote/evn_user_guide/ oldalon.

tam a 3. kalibrációs táblázatot (Függelék, B.1b és B.2b. ábra). Ezt követően illesztettem az interferenciamintázatot a teljes adatsorra (FRING, fringe-illesztés, Schwab és Cotton, 1983) minden forrásra és időpontra (3. megoldás- és 4. kalibrációs táblázat). Az adatokat ezután manuálisan vizsgáltam meg (POSSM, Függelék, B.1c és B.2c. ábra), és az egyes IF-ekben és a szomszédos IF-ek között található kilógó adatpontokat (csatornákat) eltávolítottam, majd az eredményt az hibatáblázathoz csatoltam (UVFLG). A manuális hibakeresést követően az amplitúdóra és fázisra kalibrált, interferenciamintázat-illesztett adatokat forrásonként leválasztottam, majd FITS formátumba exportáltam (SPLIT, FITTP). A forrásonkénti adatokat egyesével beolvastam a DIFMAP (Differential Mapping – differenciális térképezés, Shepherd, 1997) programcsomagba, ahol mindegyikre elvégeztem a hibrid térképezést, és végül további amplitúdókalibrációt hatottam végre az egyes állomások közötti jelentős amplitúdókülönbségek korrigálására¹⁹. Az eredményül kapott, az antennákra és IF-ekre vonatkozó átlagos amplitúdókalibrációs faktorokat (jellemzően 0,8 és 1,5 közötti értékek) a három forrásra teleszkóponként átlagoltam. Visszatérve az AIPS programcsomaghoz, az átlagértékeket távcsövenként alkalmaztam a 4. kalibrációs táblázatra (CLCOR), ami a végső megoldás- és kalibrációs táblázatokat eredményezte (Függelék, B.1d és B.2d. ábra). Az AIPS-beli adatfeldolgozás utolsó részeként újból leválasztottam a célforrást (J0909+0354) egy külön állományba, majd ismét exportáltam további önkalibráció és térképezés céljából.

A hibrid térképezés és a clean algoritmus²⁰

A FITS formátumú, az eredeti vizibilitásokat és az alkalmazott kalibrációt tartalmazó adatsor feldolgozását a DIFMAP programcsomaggal folytattam²¹. Az adatok beolvasása után manuális ellenőrzést és hibakeresést végeztem. Először a teljes, 5,24 órás (17b. ábra) adatsoron végeztem el a hibakeresést, az amplitúdókat és a fázisokat az (u, v) sugár függvényében megjelenítve (19a. ábra), majd az adatokat az egyes bázisvonalakon (19b. ábra) szerkesztettem, eltávolítva a jelentősen kilógó adatpontokat (19c és 19d. ábra).

Az ún. piszkos térképből (dirty map) a clean dekonvolúciós eljárás (Högbom, 1974) segítségével állítható elő a rádióforrás eredeti intenzitáseloszlásának modellje. A clean algoritmus alapfeltevése, hogy az égbolton megfigyelhető (valamint a mérés látómezejében található) rádióforrások pontforrások összességként írhatók le. A hibrid térképezés során létrehoztam Fourier-transzformációval a dirty map-et, majd ebből kijelöltem egy

¹⁹ A DIFMAP programban elvégzett önkalibrációt a **A hibrid térképezés és a clean algoritmus** szakaszban részletezem.

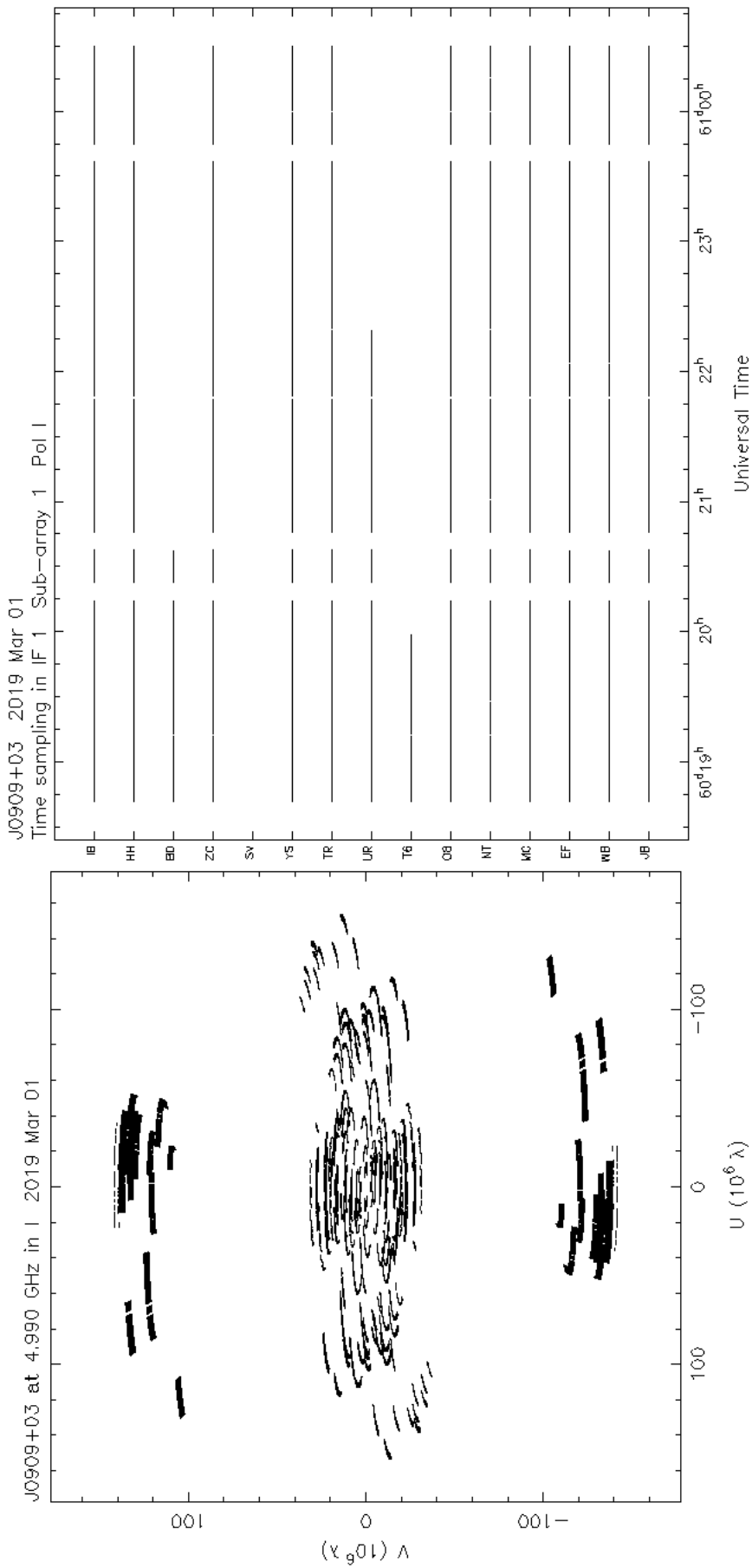
²⁰ Az AIPS-ben elvégzett kalibráció során, az interferenciamintázat-illesztést követő DIFMAP-adatfeldolgozás lépései megegyeznek az alábbiakban részletezett hibrid térképezés módszerével.

²¹ A DIFMAP program részletes leírása és kézikönyve a <ftp://ftp.astro.caltech.edu/pub/difmap/difmap.html> oldalon érhető el, az adatfeldolgozást és kalibrációt továbbá brandeisastro.pbworks.com/w/page/14977088/Difmap%20Tutorial részletezi.

– alapértelmezetten az interferométer pontválaszfüggvénye (piszkos nyaláb, dirty beam) méretével megegyező – clean ablakot a legnagyobb intenzitású pixelek körül. Az (u,v) síkon (17a. ábra) értelmezett vizibilitásokra elvégzett Fourier-transzformációval megkapjuk a forrás sugárzásának az interferométer pontválaszfüggvényével (dirty beam, 18a. ábra) eltorzított térképét (dirty map, 18b. ábra).

A térképezés során a súlyozás (Briggs és mtsai, 1999) állításával elkerülhető, hogy a mesterségesen előálló struktúrákat – amelyek az antenna pontválaszfüggvénye által létrehozott diffrakciós minta nem elsődleges, lokális maximumából származó ún. „side lobe”-ok eredményeképpen tűnnek elő – valódiként való azonosítsam. Minthogy a mérés során a vizibilitások mintavételezése diszkrét és minden ponthoz egy adott hiba tartozik, a Fourier-transzformáció során fontos, hogy a kisebb hibával rendelkező adatpontokat nagyobb súllyal vegyük figyelembe a dirty map előállításánál. A statisztika szerint az ideális súlyozás a σ_i^{-2} (σ_i az i -edik vizibilitási adatpontra vonatkozó szórás) összefüggést követi, azonban a kisebb tányérátmérőjű antennák (nagyobb hiba) hozzájárulása kevésbé jelentős, ezért a térképezés korai szakaszában célszerű a σ_i^{-1} arányban beszámítani az egyes távcsövek által mért adatokat. A súlyozás továbbá arányos az (u,v) sík egy egységnyi cellájába eső vizibilitások számával. A DIFMAP programcsomagban az alapértelmezett beállítás 2 pixeles egységekre vonatkoztatva veszi figyelembe a vizibilitások számát, ezt egységes (uniform) súlyozásnak nevezzük, és a fényes, kompakt struktúrák azonosítására ideális. A csúcstényesség csökkenésével azonban hozzájárulhat a hamis fényességelemek megjelenéséhez: ekkor érdemes a természetes súlyozásra áttérni, amelyben a Fourier-transzformáció a vizibilitásértékeket pixelenként veszi figyelembe, így nagyobb érzékenységet mutat a halványabb nyalábkomponensek feltárására. A térképezést egységes súlyozással kezdtem, az amplitúdók hibáját minden teleszkóp esetén egységnyiinek tekintettem.

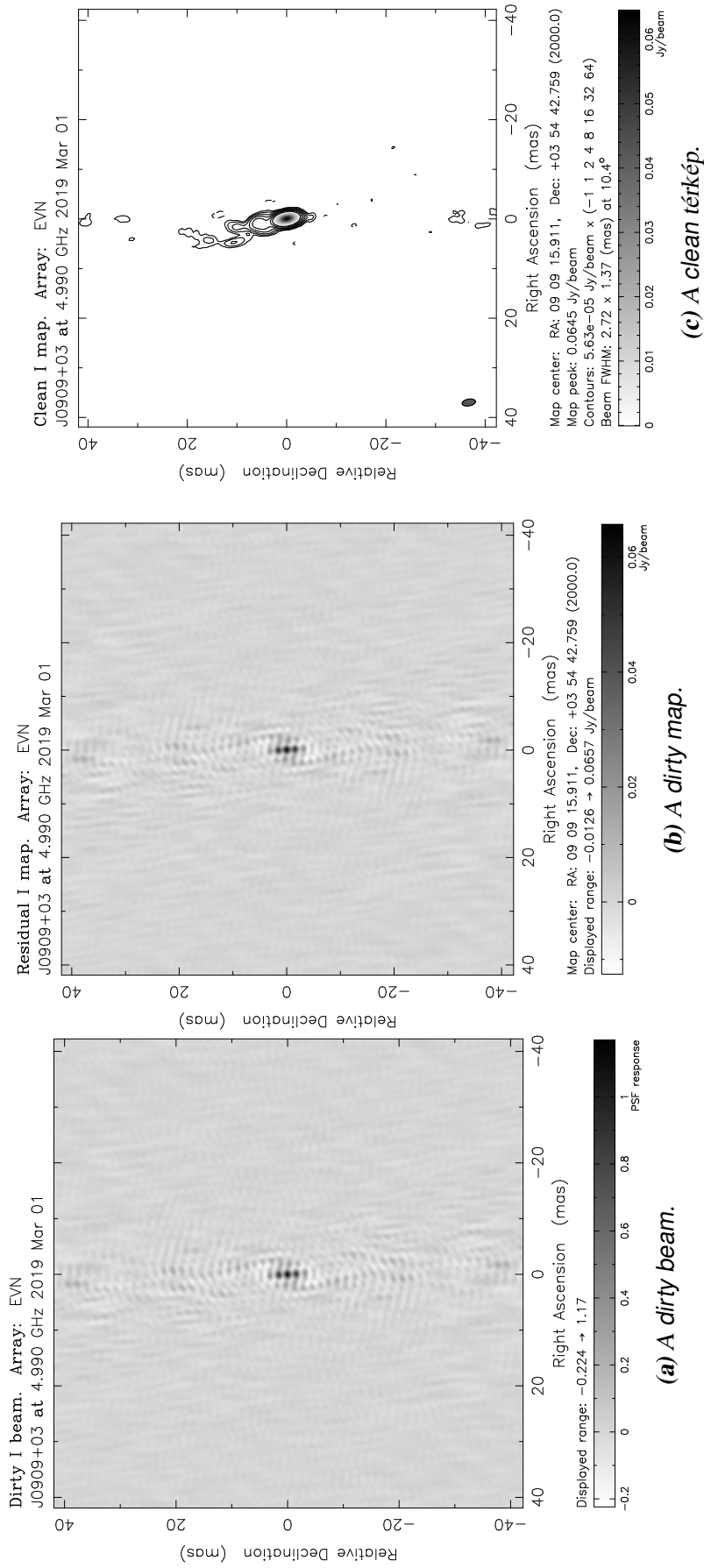
A clean iterációs eljárással (jellemzően 100 ciklus) levontam az dirty beam és a pontforrásmodell konvolúcióját, amit az algoritmus a clean modellhez (térképhez) csatolt. A pontforrásmodell amplitúdóját az ablakban található, mindenkor csúcstényesség 5%-ának választottam (nyereség). Az alacsony nyereséggel elkerülhető, hogy a valós fényességet meghaladó intenzitásértékek kerüljenek levonásra az iteráció során. Ezt követően fázis-önkalibrációt végeztem (selfcal, Cornwell és Wilkinson, 1981), majd ismét megvizsgáltam a maradéktérképet. A clean–selfcal eljárásokat addig végeztem, ameddig még számottevő fényességet találtam a clean ablakban. Amikor az aktuális clean ablakon belül nem volt jelentős intenzitástöbblet és a jel-zaj arány magasabb volt, mint 5, továbbá a dirty map-en további fényes struktúrák voltak jelen, újabb clean ablakokat jelöltem ki, majd megismétltem az iterációs és önkalibrációs lépéseket.



(a) Az (u, v) lefedettség.

(b) A mérésben résztvevő távcsövek időbeli mintavételezése.

17. ábra. A VLBI technika alapfogalmai I. Az (a) panel az (u, v) lefedettséget, vagyis az egyes, a mérésekben részt vevő bázisvonalak által leírt görbék (u, v) síkra vonatkoztatott vetületét mutatja be, míg a (b) panel az egyes állomások mintavételezési időintervallumait (scan) jeleníti meg a világitó függvényében. Az ábrákat a J0909+0354 nagy vöröseltoledású kvazár EVN-mérésének adataiból állítottam elő a DIFMAP programban.

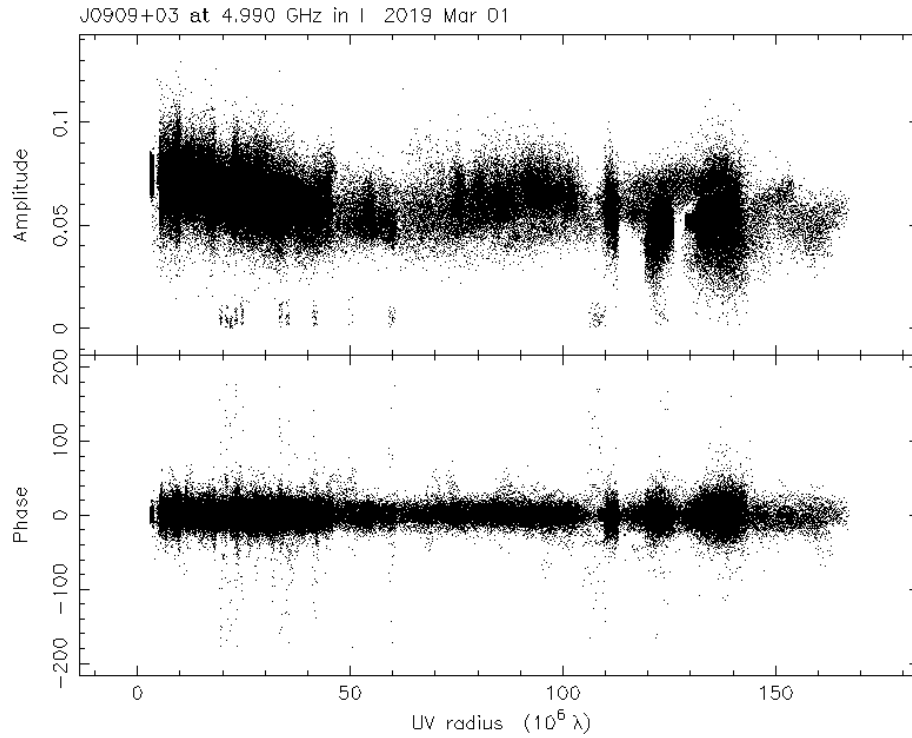


18. ábra. A VLBI technika alapfogalmai II. Az (a) panel a dirty beam-et, vagyis az interferométer pontválaszfüggvényét, a (b). ábra a dirty map-et, vagyis a forrás sugárzásának a dirty beam-mel torzított térképét mutatja be, míg a (c) ábrán a hibrid térképezés eredménye, a clean map látható. Az ábrákat a J0909+0354 nagy vöröseltolódású kvazár EVN-mérésének adataiból állítottam elő a DIFMAP programban.

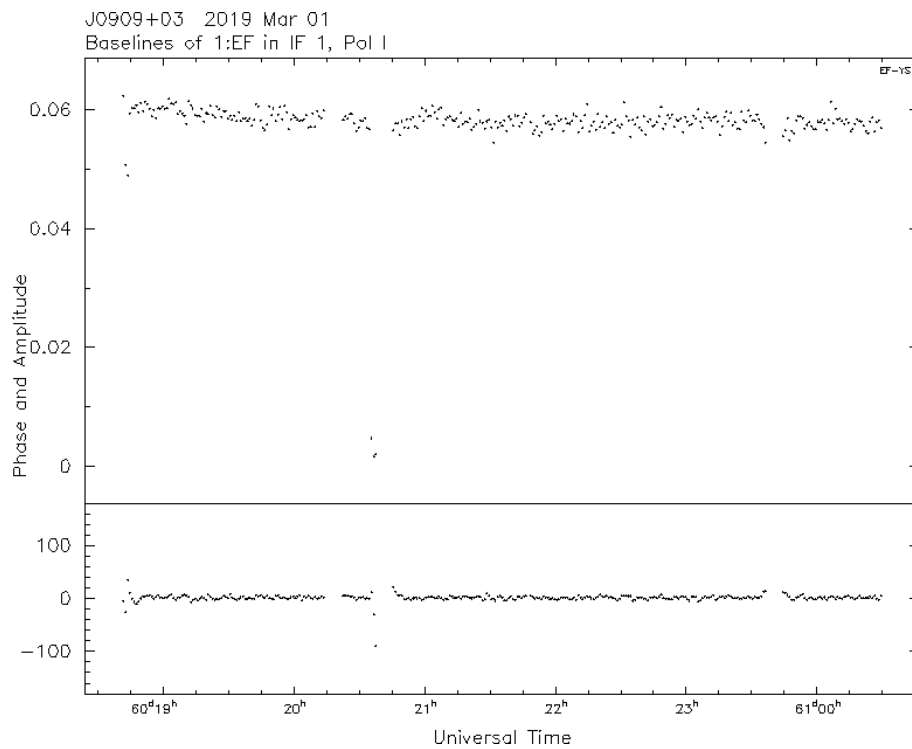
A térképezés ezen pontján áttértem a természetes súlyozásra, előbb -1 , majd -2 hatványon figyelembe véve az amplitúdók hibáját. Amikor a jel-zaj arány elérte a ~ 5 értéket, és nem azonosítottam további jelentős fényességmaximumot a maradéktérképen, az adatokon amplitúdó- és fázis-önkalibrációt végeztem: előbb a teljes forráson végzett mérési időre (~ 5 óra), fokozatosan csökkentve a kalibrációs időt 0 percre. Az önkalibráció során minden lépésben ellenőriztem a maradéktérképet. A térképezési eljárás végén az interferométer pontválaszfüggvényét elliptikus Gauss-függvénnyel közelítve előállítottam a clean map-et, vagyis a forrás intenzitáseloszlásának térképét (18c. ábra): az első szintvonalakat a dirty map zajszintje ± 3 -szorosának választottam. A negatív fényességi kontúroknak természetesen fizikai értelmük nincs, az ábrázolásuk azonban hozzájárul a térkép zajszintjének vizuális megjelenítéséhez. A térképen megjelenő, a nyálábmeretnél kisebb kiterjedésű pozitív és negatív „foltok” jelzik, hogy a szintvonalas ábrázolásnál az alsó kontúrok definiálásakor helyesen jártunk el. A kalibrált adatokra illesztett modelleket a bázisvonalak és a világidő függvényében a 19e és 19f ábrákon szemléltetem.

Modellillesztés a kalibrált vizibilitásokra

A hibrid térképezést követően a clean modell eltávolításával a teljesen kalibrált vizibilitásadatokra körszimmetrikus Gauss-modellkomponenseket illesztettem a modelfit programmal, előbb a központi fényes komponensre, majd az illesztés 10 iterációját követően előbukkanó újabb komponensekre egyaránt. A modellillesztés a többváltozós függvényekre ideális Levenberg–Marquardt nemlineáris legkisebb négyzetek közelítésének módszerével történik (Pearson, 1995). A modellillesztés során a mérési pontokat egy előre definiált függvénnyel közelítjük oly módon, hogy amikor az ideális paraméterektől (lokális minimum) viszonylag távol van a függvény, a gradiens módszer elvét alkalmazza, a lokális minimum közelében pedig a Gauss–Newton-közelítést (Gavin, 2011). A gradiens módszer esetén a paraméterek módosítása mindig a függvény adott pontban vett gradiensének (csökkenő) irányába történik, a Gauss–Newton-közelítésben pedig a kvadratikusan feltételezett legkisebb négyzetek függvényének minimuma az irányadó (Gavin, 2011). Az iteratív módon végrehajtott függvényminimum-keresés során egy, a redukált χ^2 -től függő jósági paraméter (Pearson, 1995) határozza meg az alkalmazandó módszert: ha a paraméterek módosítása során az érték nő, a gradiens módszer lépését végzi el az algoritmus, csökkenés esetén pedig a Gauss–Newton-módszerrel a lokális minimum felé törekszik (Gavin, 2011). A VLBI adatfeldolgozás során a legelterjedtebb az elliptikus (és így a körszimmetrikus) Gauss-függvény illesztése. A modellillesztés során inverz módon közelítjük az ideális paraméterteret: a fényességeloszlás modelljét a képalkotási egyenletek felhasználásával (Fourier-transzformáció) az (u, v) síkra transzformáljuk, és összevetjük a mért értékekkel (Pearson, 1995).

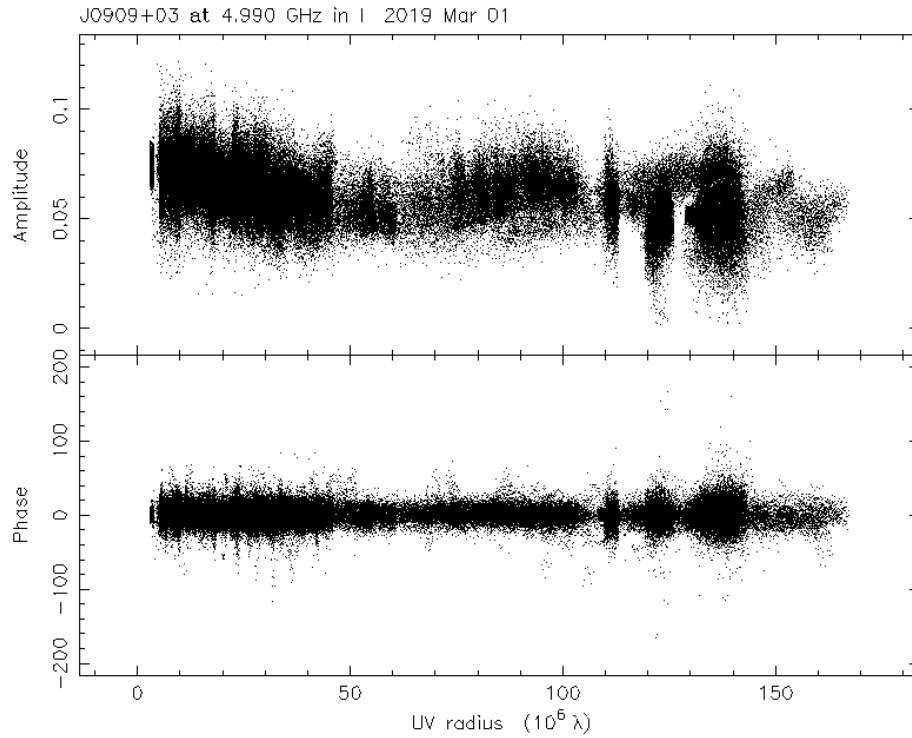


(a) Az Δ IPS-ben kalibrált amplitúdók és fázisok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz függvényében.

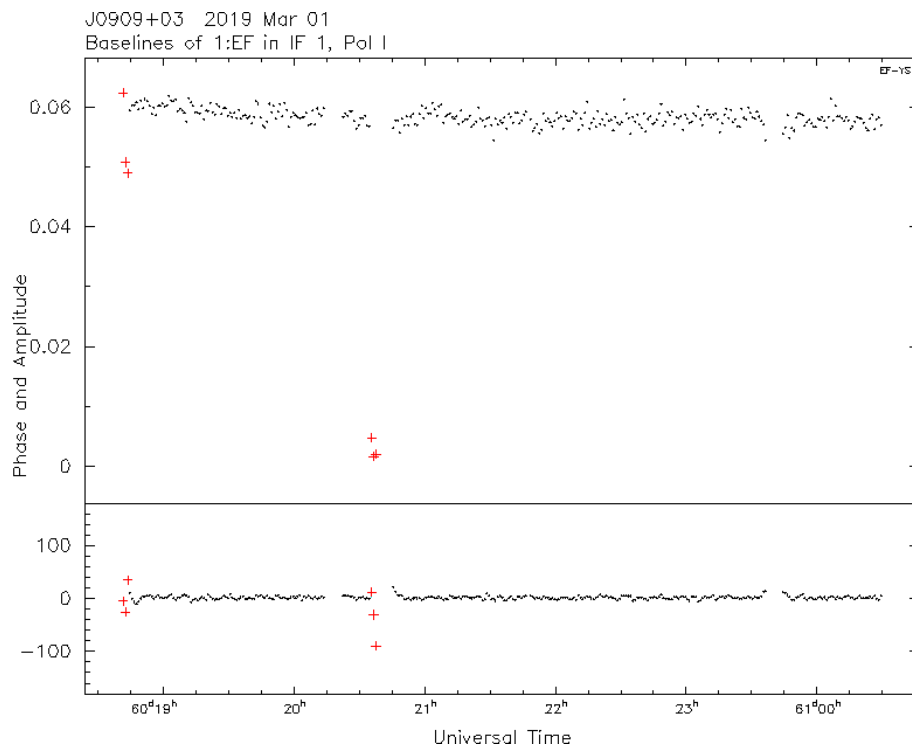


(b) Az Δ IPS-ben kalibrált amplitúdók és fázisok egy adott bázisvonal egyik frekvenciasávjára az idő függvényében.

19. ábra. Amplitúdó- és fázisadatok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz (felső) és egy adott bázisvonal (Effelsberg–Yebes) egyik frekvenciasávjára (IF1) az idő (alsó) függvényében. Az ábrákat a DIFMAP programcsomaggal készítettem.

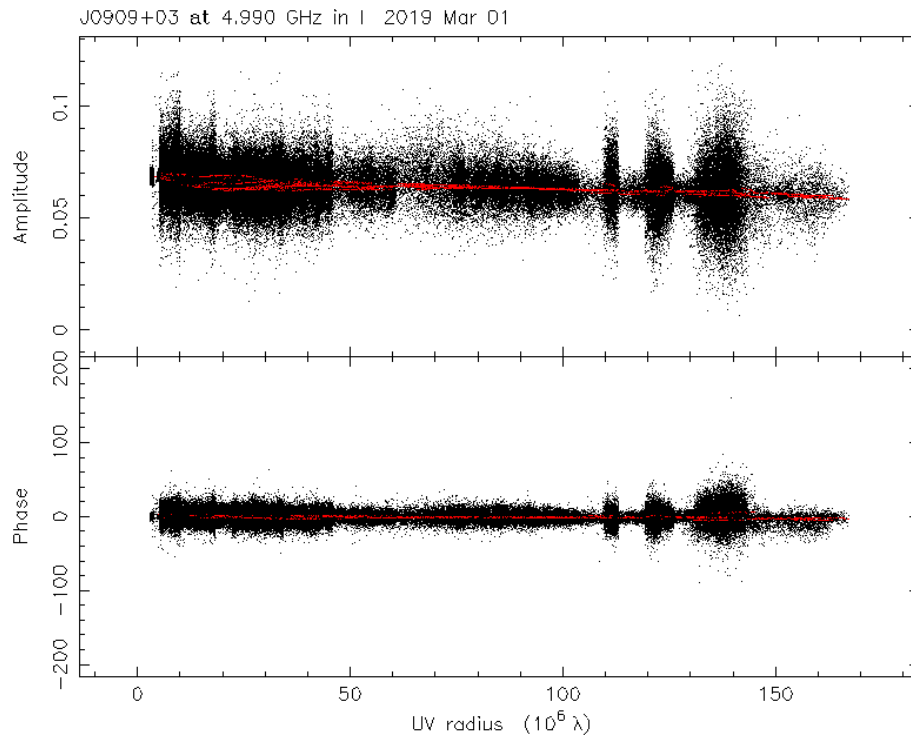


(c) A hibaszűrés utáni amplitúdók és fázisok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz függvényében .

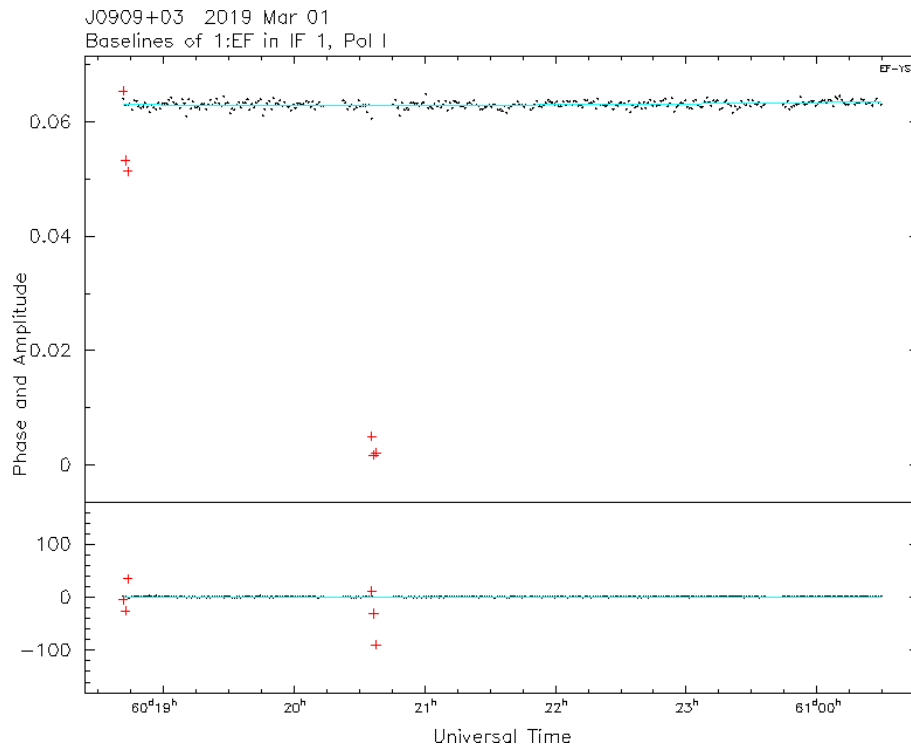


(d) A hibaszűrés utáni amplitúdók és fázisok egy adott bázisvonal egyik frekvenciasávjára az idő függvényében (piros kereszt jelöli az eltávolított pontokat).

19. ábra. (folytatás) Amplitúdó- és fázisadatok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz (felső) és egy adott bázisvonal (Effelsberg–Yebe) egyik frekvenciasávjára (IF1) az idő (alsó) függvényében. Az ábrákat a DIFMAP programcsomaggal készítettem.



(e) Az önkalibrációt és modellillesztést tartalmazó amplitúdók és fázisok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz függvényében (a modellt piros görbe jelöli).



(f) Az önkalibrációt és modellillesztést tartalmazó amplitúdók és fázisok egy adott bázisvonal egyik frekvenciasávjára az idő függvényében (a modellt kék görbe jelöli).

19. ábra. (folytatás) Amplitúdó- és fázisadatok az (u,v) síkra vetített bázisvonalhossz (felső) és egy adott bázisvonal (Effelsberg–Yebe) egyik frekvenciasávjára (IF1) az idő (alsó) függvényében. Az ábrákat a `DIFMAP` programcsomaggal készítettem.

A paramétereket a vizibilitásokkal összehasonlítva korigáljuk, majd több iteráció során elérjük az ideális értékeket. Bár az egységesen fényes (uniform) korong és az optikailag vékony gömb fizikailag megfelelőbb közelítés az égi objektumok fényességeloszlására, Fourier-transzformációjuk bonyolult, a függvények transzformáltja csak numerikus formában, Bessel-függvényekkel kifejezhető (Pearson, 1995). A Gauss-függvény eleganciája, hogy Fourier-transzformáltja szintén Gauss-függvény, ami analitikusan kezelhető probléma, így a több Gauss-függvényből (pontforrásból) összeállított modell könnyedén konvolválható. Emellett rövid bázisvonalakon mindhárom függvény bázisvonalakra vonatkoztatott kvadratikus függése közel azonos, ezért a Gauss-függvény alkalmazása a legcélszerűbb (Pearson, 1995). A DIFMAPben elvégzett modellillesztés (modelfit) iterációi során a változó paraméterek az alábbiak: az adott komponens fluxussűrűsége, polárkoordinátái, a modellkomponens mérete (félértékszélessége), tengelyarány, a nagytengely pozíciószöge.

A modellillesztés során meghatározott paraméterek hibáját nem az illesztett függvény kovarianciamátrixának közvetlen felhasználásával határozzák meg, mert ezzel a legkisebb négyzetek módszerében alkalmazott előzetes feltételek gyakorta sérülnek (Pearson, 1995). Alternatív módszerként a χ^2 minimumérték közeli kontúrjainak felhasználásával meghatározott konfidenciaszintek használhatók, amelyek teljesítik a $\chi^2 < \chi^2_{\min} + \Delta\chi^2$ feltételt, ahol $\Delta\chi^2$ értéke a meghatározott paraméterek számától és a konfidenciaszintjétől függ (Pearson, 1995). Az általam is alkalmazott hatparaméteres illesztésben, 90%-os konfidenciaszint mellett $\Delta\chi^2 = 16,8$ -es kontúrral határozható meg a paraméterek bizonytalansága (Pearson, 1995). A paraméterekre vonatkozó 1σ határon belüli bizonytalanság becslésére a Fomalont (1999) közelítésén alapuló, Lee és mtsai (2008) által meghatározott formulákat alkalmaztam a fluxussűrűség, modellpozíció és -méret, valamint az intenzitás-maximum hibájának becslésére.

Az illesztés eredményeképp kapott paraméterekből (komponensek pozíciója, fluxussűrűsége, mérete) levezethetők az AGN-nyalábra vonatkozó fizikai paraméterek (Doppler-faktor, inklináció, Lorentz-faktor). A származtatott mennyiségek hibáját a Gauss-féle hibaterjedési törvény alkalmazásával határoztam meg.

Az adatfeldolgozás módszerének folyamatát a 20a ábrán összegzem.

Fázis- és amplitúdókalibráció a CASA programcsomaggal

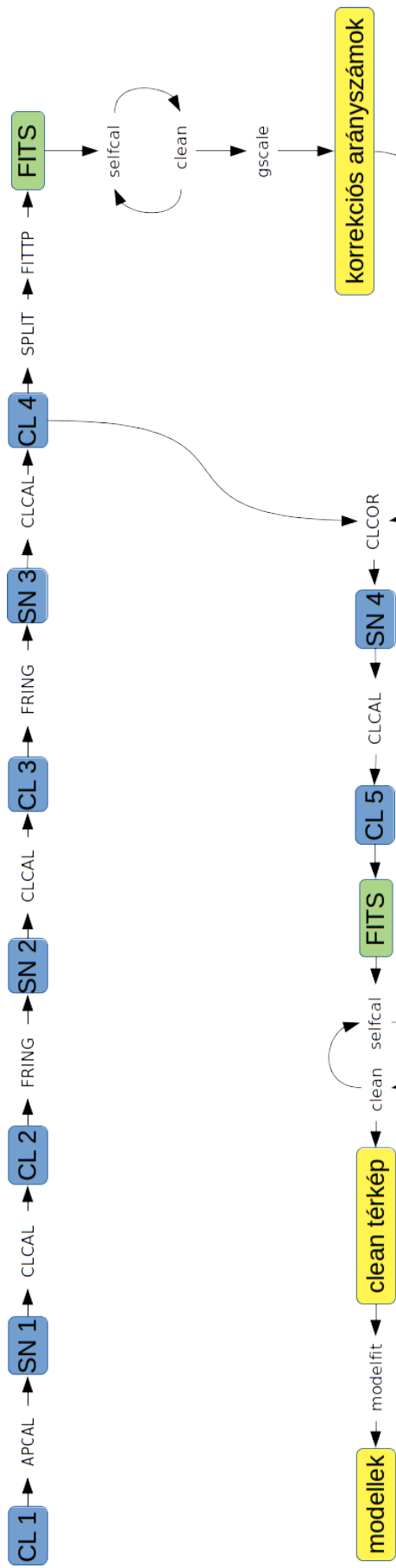
Bár számos mérési adatsor kalibrációja elvégezhető az AIPS programcsomaggal, az új generációs VLA észlelések vizibilitásadatait már ún. mérési összeállításban (measurement set – ms) teszik elérhetővé. Az ms formátumban rögzített mérési adatok egy nemzetközi konzorcium által fejlesztett programcsomag, a Common Astronomy Software Applica-

tions²² (CASA, McMullin és mtsai, 2007) segítségével dolgozhatók fel. A CASA programcsomagban elvégzett kalibráció lépéseit egy általam vizsgált nagy vörösetlódású rádiókvazár, a J0909+0354 (4. fejezet) példáján mutatom be²³. A kalibráció során különböző korrekciókat és skálafaktorokat határoztam meg, melyeket az adatfeldolgozás végén kollektíven alkalmaztam az eredeti ms adatfájl vizibilitásaira.

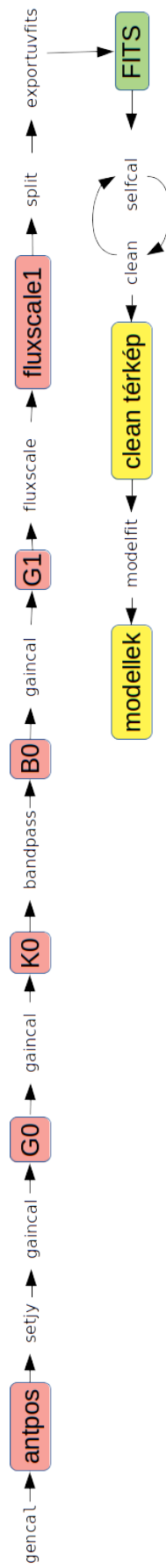
Legelső lépésben egy kezdeti korrekciót végeztem az egyes antennák pozícióira vonatkozóan (gencal), amelynek eredményét az antpos táblázatba írtam. Következő lépésben definiáltam egy amplitúdómodellt (setjy) a J0831+0429 kalibrátorforrásra a CASA adatbázisából elérhető modell segítségével. Ezt követően kezdeti fáziskalibrációt (gaincal) végeztem mind a kalibrátor-, mind a célforrásra, a frekvenciasávok középső csatornáit felhasználva, hogy ellenőrizzem, az egyes antennák esetén előfordulnak-e hirtelen fázisugrások. Minthogy minden antenna esetén folytonosan változtak a fázisértékek az idő függvényében, nem volt szükség adatok eltávolítására. A kalibrációt a J0831+0429 kezdeti fáziskalibrációjával folytattam: a megoldásokat 10 másodperces időintervallumon belül kerestem a középső csatornákon, és az eredményt a G0 táblázatba írtam. Az egyes antennák közötti relatív időkéseket a korábbi két táblázat felhasználásával (antpos,G0) korrigáltam (K0 táblázat). Minthogy a VLA mérései során az egyes IF-ek adatainak rögzítése úgy történik, mintha különálló spektrumvonalakat észlelnének, ezért kontinuum-sugárzás vizsgálata esetén szükséges korrigálni a nyereségi görbék frekvenciafüggésére: ezt szintén 10 másodperces időintervallumokra végeztem el (bandpass), létrehozva a B0 táblázatot. Felhasználva az antennapozíciókra, időkésekre és frekvenciafüggésre vonatkozó korrekciós táblázatokat, elvégeztem a amplitúdók és fázisok együttes kalibrációját mind a kalibrátor- (J0931+0429), mind a célforrás (J0909+0354) esetén, összefűzve az eredményeket egy közös táblázatba (G1). Alkalmazva a feldolgozás elején definiált amplitúdómodellt, létrehoztam egy fluxussűrűség-skálát tartalmazó táblázatot (fluxscale1). Legvégül az antennapozíciókra, az időkésekre és az egyes frekvenciasávokra vonatkozó korrekciókat, valamint a fluxussűrűség-skálát tartalmazó táblázatokat alkalmaztam a J0909+0354 célforrásra. A kalibrált adatsor fázisait megvizsgáltam a csatornák függvényében, majd eltávolítottam az első és utolsó 5–5 csatornát, melyekben a fázisok nem voltak megfelelőek. Az adatokat FITS formátumba exportáltam. Az amplitúdó- és fázisönkalibrációt, valamint a hibrid térképezést és a modellillesztést a DIFMAP programcsomaggal végeztem el, a fent leírt módon. A CASA programcsomaggal történő kalibráció folyamatát a 20b ábrán összegzem.

²²casa.nrao.edu

²³A VLA mérések CASA programcsomaggal történő kalibrációja során a casaguides.nrao.edu/index.php?title=VLA_Continuum_Tutorial_3C391-CASA5.5.0 segédlet útmutatását követtem.



(a) A VLBi adatok feldolgozásának folyamatábrája. Kék színnel az AIPS, sárgával a DIFMAP program használatát, zölddel pedig a beolvasott és exportált fájlokat jelöltem.



(b) A VLA adatok feldolgozásának folyamatábrája II. Rózsaszínnel a CASA, sárgával a DIFMAP program használatát, zölddel pedig a beolvasott és exportált fájlokat jelöltem.

20. ábra. A VLA adatok feldolgozásának folyamatábrái az AIPS, CASA és DIFMAP programcsomagok használatával.

2. Nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok katalógusa és alkalmazása

Bevezetés a fejezethez

Mint ahogy azt a dolgozat bevezetésében is bemutattam, a nagy vöröseltolódású aktív galaxismagok megértéséhez szükséges egy statisztikailag minél teljesebb mintával rendelkezünk. Bár a szakirodalomban számos – különféle hullámhossztartományban észlelt tulajdonságokkal jellemzett – AGN-katalógus létezik (pl. Constantin és mtsai, 2009; Véron-Cetty és Véron, 2010; Shen és mtsai, 2011; Kalfountzou és mtsai, 2014; Secrest és mtsai, 2015), az Univerzum történetének legkorábbi szakaszában fellelhető forrásokat összegyűjtő munkák száma elenyésző (pl. Kalfountzou és mtsai, 2014; Ross és Cross, 2020). A fejezet első részében részletesen kifejtem a nagy vöröseltolódású AGN-ek általam létrehozott katalógusa összeállításának lépéseit, a katalógusba kerülés kritériumait, a beválogatott AGN-ek tulajdonságait.

A katalógus alkalmazásaként a fejezet második részében a FIRST felmérés által egyedileg nem detektált AGN-ek rejtett, halvány rádiósugárzásáról értekezek. A vizsgálat során a $z \geq 4$ AGN-ek pozíciói körüli rádiótérképek halmozásával kerestem a μJy erősségű rádióemissziót. A halmozási eljárást a hagyományos átlag és a medián módszerekkel is elvégeztem.

A nagy vöröseltolódású AGN-katalógusról a *Frontiers in Astronomy and Space Sciences* folyóiratban jelent meg referált szakcikk (Perger és mtsai, 2017). A gyenge rádiósugárzó AGN-ek FIRST térképeinek halmozásáról szóló tanulmányt a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* folyóiratban publikáltam (Perger és mtsai, 2019).

2.1. A katalógus

2.1.1. Motiváció

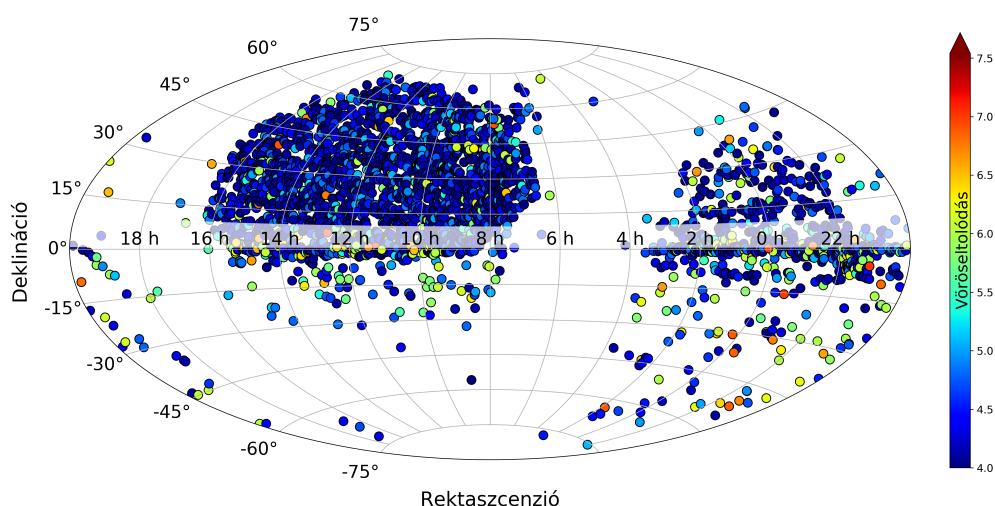
A katalógus megalkotásának elsődleges célja egy olyan minta létrehozása volt, melynek felhasználásával a legtávolabbi, $z \geq 4$ vöröseltolódású aktív galaxismagok vizsgálata egyszerűbbé, könnyebben kezelhetővé válik. Az AGN-ek karakterisztikus tulajdonságainak minél jobb megértése érdekében nem csupán a látható tartományban mért fényességeket gyűjtöttem össze, hanem a jelenleg elérhető égboltfelmérésekből származó rádiófluxussűrűségekre vonatkozó információkat is.

A katalógus többféle tudományos célra alkalmazható. A lista felhasználható az AGN-luminositásfüggvény meghatározásához a legnagyobb vöröseltolódás mellett (pl. Fan és mtsai, 2004; Willott és mtsai, 2010; Jiang és mtsai, 2016), a kvazár-anyagalaxisok és a nagy vöröseltolódású kvazárok környezetének tanulmányozására (pl. Orsi és mtsai, 2016; Uchiyama és mtsai, 2018). Ultraibolya tartományban végzett mérésekkel kiegészítve koz-

mológiai vizsgálatokban is alkalmazható az AGN-ek „standard gyertyaként” való bevonásával (pl. Marziani és Sulentic, 2014). A legtávolabbi rádiósugárzó AGN-eket a szög-
méret és a vöröseltolódás közötti összefüggés tovább finomításában (pl. Gurvits és mtsai, 1999), valamint új VLBI mérések tervezésében is alkalmazhatjuk. A katalógus objektumai továbbá a galaktikus előtér különböző hullámhossztartományokban történő meghatározásában is segítséget nyújthatnak (pl. Perger és mtsai 2018b).

2.1.2. A katalógus összeállítása

Az alapkatalógust három nagy AGN-minta bevonásával hoztam létre: az SDSS tizenkettedik adatkiadásából származó kvazárkatalógus (Jiang és mtsai, 2016; Pâris és mtsai, 2017), a Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System felmérés $z \geq 5,6$ kvazárokat tartalmazó mintájának (Pan-STARRS, Bañados és mtsai, 2016), valamint a Félmillió Kvazár (Half Million Quasars) katalógus kvazárjainak (HMQ, Fleisch, 2015) felhasználásával. A HMQ és SDSS listák a teljes $z > 0$ vöröseltolódás-tartományban tartalmaztak objektumokat, ezeket $z \geq 4$ feltétellel válogattam le.



21. ábra. A katalógusban található nagy vöröseltolódású AGN-ek eloszlása az égbolton. A színek az egyes AGN-ek vöröseltolódását szemlélteti. Az objektumok égi eloszlása láthatóan nem egyenletes, elsősorban a kiindulásul használt égboltfelmérések lefedettségi területeit tükrözi.

Az egyéni mintákat ezután keresztkorreláltam koordináták (rektaszenció és deklináció) alapján, keresési sugárnak a Barro és mtsai (2011) és Rimoldini és mtsai (2012) által alkalmazott $1''$ -et választottam. Először, az ismétlődések elkerülése céljából a két legkiterjedtebb listát kereszteztem: SDSS kvazárpozíciókat kerestem és zártam ki a HMQ minta elemei közül. Két kvazárt akkor tekintettem azonosnak, ha az adott keresési sugárral történő keresztkorreláció után mindkét mintában megtalálhatóak voltak. Az SDSS

minta 1881, míg a HMQ katalógus 2363 $z \geq 4$ kvazárt tartalmazott, és két kivétellel az összes SDSS kvazár megtalálható volt a HMQ listában. Az SDSS–HMQ keresztkorreláció egy 2365 tagot számláló AGN listát eredményezett, amelyet ezután a Pan-STARRS kvazárjaival is keresztkorreláltam, szintén 1''-es keresési sugárral. Ennek eredményeképpen az egyedi források száma 2470-re emelkedett, létrehozva az alapkatalógust. A listák összehasonlítását és összefűzését a TOPCAT katalóguskezelő szoftver²⁴ (Taylor, 2005) segítségével végeztem el.

A katalógusban található AGN-ek listáját a készítése óta folyamatosan bővíttem és ellenőrzöm, többek között a szakirodalomban megjelent – a nagy listákat megelőző, valamint az azokat követő publikációkban leközölt – objektumok bevonásával. A legutolsó bővítést követően a nagy vöröseltolódású AGN-ek katalógusa jelenleg 2823 tagot számlál e sorok írásakor (2020 májusában). A legfrissebb verzióban található AGN-ek égbolton való eloszlását szemlélteti az 21. ábra.

A folyamatos frissítés során továbbá ~ 20 bejegyzés esetén bebizonyosodott, hogy koordinátái tévesek (pontatlanok), esetleg nem valós azonosításon alapul a katalógizálásuk, melyeket rendre javítottam, illetve eltávolítottam a listából.

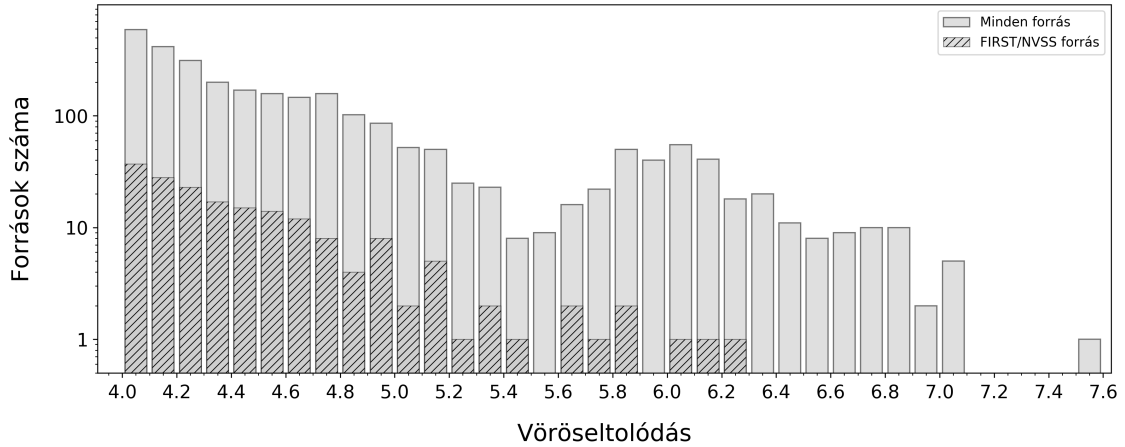
2.1.3. A katalógusbeli források tulajdonságai

Rádiódetektálás. A katalógus a korábban fellelhető listákhoz képest annyiban teljesebb, hogy az optikai fényességek mellett a források rádiótartományban elvégzett felmérésekben való detektálását (vagy a detektálás hiányát), azonosítás esetén pedig a fluxus-sűrűségét is rögzítettem. A II. egyenlítői koordináták felhasználásával először a FIRST égboltfelmérés (Becker és mtsai, 1995; Helfand és mtsai, 2015) adatbázisában²⁵ kerestem a katalógusbeli pozíciókkal egybeeső pontforrásokat, 1,5''-es keresési sugárral (Ivezic és mtsai 2002 nyomán). A 2823 AGN-ből 152-höz tartozik rádiódetektálás a FIRST adatbázisban. Akkor tekintettem egy forrást a FIRST-ben detektálnak, ha az adott AGN a FIRST égboltlefedettségébe esett és a felmérés érzékenységet meghaladó (1 mJy) fluxus-sűrűséggel rendelkezett.

Azok esetén a kvazárok esetén, amelyek – bár a FIRST lefedettségébe tartozó égterületen helyezkednek el, de – nem bocsátanak ki a detektáláshoz elegendő rádiósugárzást, a FIRST rádióterképek adott pozíciójában mért térképi zajszintet (rms) tüntettem fel. Ez további 2267 objektumról szolgáltatott információt. A FIRST által nem vizsgált égterületeken található AGN-ek listáját (404 db) az NRAO VLA égboltfelmérésének (NVSS, Condon és mtsai, 1998) adatbázisában is ellenőriztem, 10''-es keresési sugárral (Sadler és

²⁴www.starlink.ac.uk/topcat/

²⁵sundog.stsci.edu



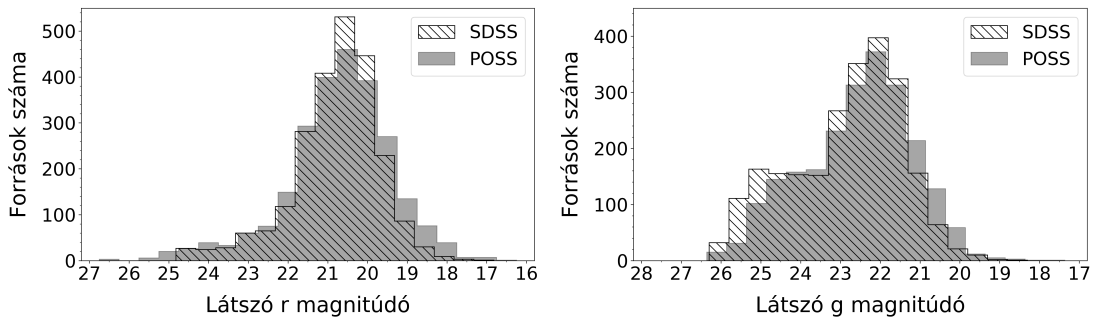
22. ábra. A katalógusban található 2823 AGN eloszlása a vöröseltolódás függvényében. A teljes mintát szürke, a rádiósugárzással rendelkező 185 forrást sávozott oszlopok jelölik.

mtsai, 2002), ami további 33 rádióforrás azonosítását eredményezte. A VLBI módszerrel is vizsgált és észlelt AGN-ek esetén feltüntettem a fluxussűrűségeket és a hozzájuk tartozó szakirodalmi publikációkat. Jelenleg 47 kvazárról áll rendelkezésre VLBI-észlelésből származó, publikált vagy online archívumban hozzáférhető fluxussűrűség-adat. A katalógusban 34 (a déli féltéken, magas deklinációknál elhelyezkedő) AGN pozíciója kívül esik mind a FIRST, mind az NVSS által lefedett égterületen. A katalógus legfrissebb verziójában található AGN-ek vöröseltolódás szerinti eloszlását a 22. ábrán mutatom be, az egyes vöröseltolódás-tartományokban külön kiemelve az 1,4 GHz-en rádiósugárzással rendelkező tagokat. A $z = 5,2$ és a $z \sim 6$ értékeknél látható kiugró elemszám közötti „hiány” kiválasztási effektus eredménye. A Pan-STARRS felmérésben az érzékenység magas, akár az $m_g = 23,2^{\text{mag}}$ halvány AGN-ek azonosítását is lehetővé tette, azonban csak $z \geq 5,6$ AGN-eket tartalmaz. Bár a Pan-STARRS felmérés során az égbolt lefedettsége teljesebb, mint az SDSS esetén, a független Pan-STARRS kvazárok többségének vöröseltolódása 5,7 és 6,4 közötti, létrehozva a látszólagos elemszám-ellentmondást.

A katalógusban rögzített adatok. A katalógus jelenlegi verziójában az alábbi tulajdonságok találhatóak meg: II. egyenlítői koordináták (rektaszcenzió és deklináció) decimális és óra-perc-másodperc, illetve fok-perc-másodperc formátumban, azonosító (név), rádió- és röntgenelnevezések (amennyiben ismertek), vöröseltolódás, optikai magnitúdók (SDSS azonosítás esetén azok hibái is), a felfedezésre és a vöröseltolódásra vonatkozó szakirodalmi hivatkozások a SAO/NASA szakirodalmi adatbázisának²⁶ (Astrophysics Data System – ADS) bibliográfiai formátumában, valamint a FIRST és NVSS felmérésekből, illetve egyéni VLBI észlelésekből származó rádiótartományú fluxussűrűségek és az ezekhez tartozó publikációk.

²⁶ui.adsabs.harvard.edu

Optikai magnitúdók. A teljes lista 2823 eleméből 2492 AGN esetében feltüntettem a Palomar Observatory Sky Survey (POSS) fotólemezei alapján meghatározott r sávú (vörös) magnitúdókat (a HMQ katalógusból átemelve). 2362 kvazár rendelkezik az SDSS felmérés 5 sávjában (u, g, r, i, z szűrőkkel) detektált fényességértékkel. A POSS és SDSS vörös és zöld sávú magnitúdóinak eloszlását szemlélteti a 23. ábra. A hisztogram halvány végén a csökkenő tendencia a felmérések korlátozott érzékenysége miatti kiválasztási effektus eredménye. Az is megfigyelhető, hogy a minta tartalmaz néhány kifejezetten fényes forrást a POSS magnitúdók tekintetében (pl. $m_r = 16,5^{\text{mag}}$). Figyelembe véve a nagy vöröseltolódást, ezek a magnitúdók rendkívül nagy luminozitásra utalnak, ezért ezt a sajátosságot a katalógus néhány egyedülálló, fényes objektumának kiválasztásával vizsgáltam. Ezeknél a kiválasztott forrásoknál azt találtam, hogy a HMQ katalógusból



(a) R sávú szűrővel mért magnitúdók.

(b) G sávú szűrővel mért magnitúdók

23. ábra. A $z \geq 4$ AGN-ek piros és zöld sávú szűrővel mért magnitúdóinak eloszlása a POSS és SDSS felmérésekből. A POSS felmérés szűrőinek központi hullámhossza $\lambda_r = 480 \text{ nm}$ és $\lambda_g = 650 \text{ nm}$, míg az SDSS szűrőké $\lambda_r = 477 \text{ nm}$ és $\lambda_g = 623 \text{ nm}$.

származó, POSS fotólemezeken alapuló fotometriával rendelkező tagok szignifikáns különbséget mutatnak az SDSS-ben megfigyelt értékekhez képest, elérve az akár $2 - 3^{\text{mag}}$ mértéket. Az eredeti HMQ katalógusban ezeknél az AGN-fényességeknél feltüntettek egy figyelmeztető jelzést a fotometria megbízhatóságát illetően, ezért fotometriai számításoknál az SDSS-által mért fényességek használata ajánlott.

A katalógus aktuális verziója a astro.elte.hu/~perger/catalog.html oldalon, továbbá e dolgozat elektronikus mellékletében érhető el. A readme.txt dokumentum a katalógus elemeinek és oszlopainak leírását tartalmazza.

2.2. Nagy vöröseltolódású, gyenge rádiósugárzást kibocsátó aktív galaxismagok vizsgálata a FIRST rádiófelmérés térképeinek alkalmazásával

2.2.1. A rádiósugárzó AGN-ek rádió-luminozitásfüggvénye és a sugárzás eredete

Az aktív galaxismagok luminozitásfüggvényének (LF), azaz a térfogategységre jutó, adott luminozitástartományba eső források számának vizsgálatát számos tanulmány tárgyalja. A hagyományos megközelítésben a rádió LF-et úgy határozzák meg, hogy a teljes AGN-populációt egy folytonos eloszlású mintaként kezelik (e.g. Condon, 1991; Willott és mtsai, 1998; Goldschmidt és mtsai, 1999; Best és mtsai, 2014; Pracy és mtsai, 2016; Mao és mtsai, 2017; Smolčić és mtsai, 2017c). Mindazonáltal, az AGN-ek luminozitásfüggvénye egy bimodiális eloszlással is leírható (pl. Strittmatter és mtsai, 1980; Kellermann és mtsai, 1989; Goldschmidt és mtsai, 1999; White és mtsai, 2007). Feltételezve a bimodiális eloszlás valós fizikai tulajdonságokból származó eredetét, az AGN-ek két jól elkülönülő csoportra oszthatók: rádióhangos és rádiócsendes alosztályokba. Ennek a felosztásnak a valódisága kérdéses, okozhatják észlelési (kiválasztási) effektusok, továbbá az LF meghatározásához felhasznált matematikai módszerek mesterséges hatásaként is megjelenhet a bimodalitás (Zamfir és mtsai, 2008; Mahony és mtsai, 2012; Baloković és mtsai, 2012; Condon és mtsai, 2013).

Az 1,4 GHz-es frekvencián elvégzett, nagy lefedettséggel rendelkező felmérésekben (FIRST, Becker és mtsai 1995; Helfand és mtsai 2015; NVSS, Condon és mtsai 1998) nagy égterületekről érhetők el rádiótérképek az adott projekt archívumában. A FIRST és NVSS által vizsgált égterületeken található – az általam összeállított katalógusban szereplő – $z \geq 4$ AGN-ek közül kevesebb mint 200 rádióforrást azonosítottak. Az objektumok többségének fluxussűrűsége nem éri el a detektálási határt (~ 1 mJy a FIRST és $\sim 2,5$ mJy az NVSS felmérésben). Ezeknek az érzékenységi határ alá eső AGN-ek esetén azonban nem jelenthető ki egyértelműen a rádiócsendes természet, ugyanis ezek a mJy-nél gyengébb források is rendelkezhetnek rádiónyalábokkal parszek (pc) léptékű skálán (pl. Wang és mtsai, 2017), azonban rejtve maradnak a fluxussűrűség által limitált felmérésekben, viszonylag alacsony rádióteljesítményük és nagy távolságuk miatt. A detektálási határértéket meg nem haladó fluxussűrűségű, halvány objektumok lehetnek rádiócsendes AGN-ek, vagy nagy vöröseltolódásoknál található rádióhangos kvazárok is.

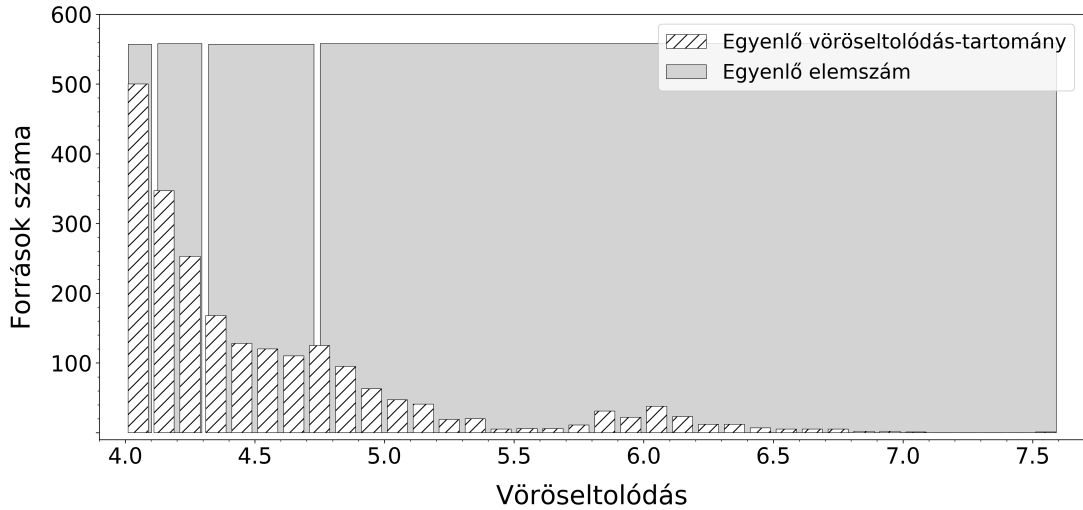
A nagy vöröseltolódású AGN-ek rejtőzködő – kis és mérsékelten jelentős rádióteljesítménnyel rendelkező – tagjai felfedhetők a nagy égboltfelmérések térképeinek összeátlagolásával (halmozásával). Ezzel a módszerrel hozzáférhetővé válnak a detektálási határt el nem érő sugárzást kibocsátó objektumok és megbecsülhetők a tipikus (karakterisztikus) fluxussűrűség-értékek (pl. White és mtsai, 2007).

A szakirodalomban nagyszámú, a gyenge rádiósugárzó kvazárokra és az azokat tartalmazó égiterekre vonatkozó halmozási vizsgálat érhető el. A 2dF QSO Redshift Survey felmérés 8000 rádiócsendes kvazárjának pozícióival egybeeső FIRST rádiótérképek medián átlagolása ($z \leq 2,3$ vöröseltolódásnál) 20 és 40 μJy közötti fluxussűrűségeket fedett fel (Wals és mtsai, 2005). Hodge és mtsai (2008) tanulmánya szintén a néhány tíz μJy nagyságrendbe eső értékekről számol be, egy, az SDSS és a Luminous Red Galaxy felmérésekből kiválasztott kvazárminta halmozásával. A közepesen távoli ($2 \leq z \leq 4$) extrém vörös kvazárok többfrekvenciás (1,4 és 6,2 GHz) összeátlagolása hasonló eredményt hozott (Hwang és mtsai, 2018).

A rádió LF „halvány” ($P_{1,4\text{GHz}} \leq 10^{22,5-23} \text{ W Hz}^{-1}$) populációját kialakító fizikai folyamatok valós természete jelenleg vita tárgyát képezi. A lehetséges folyamatok között számon tartják az AGN-ek által létrehozott rádiónyalábokat (Zensus, 1997; Roy és mtsai, 2018), az AGN-ek akkréciós korongjáról kibocsátott AGN-szeleket (Jiang és mtsai, 2010; Zakamska és Greene, 2014; Zakamska és mtsai, 2016; Roy és mtsai, 2018), továbbá az anyagaxisban felerősödött csillagkeletkezési és csillagontási eseményeket (Jahnke és mtsai, 2004; Condon és mtsai, 2013; Rosario és mtsai, 2013; Hwang és mtsai, 2018). A legfrissebb elméletek továbbá felvetik, hogy a rádiócsendes kvazárokból megfigyelhető rádiósugárzás a szupernagy tömegű fekete lyuk körül elhelyezkedő, mágnesesen felfűtött akkréciós korong koronasugárzásából származik (Laor és Behar, 2008; Laor és mtsai, 2019).

A különböző halmozási tanulmányokban meghatározott csillagkeletkezési ráta (star formation rate – SFR) a néhány $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ és a néhányszor 10 $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ közötti tartományokban mozog (de Vries és mtsai, 2007; Hodge és mtsai, 2008). Más munkák a megfigyelt rádiósugárzást az alacsony luminozitású AGN-nyalábok és az anyagaxis magja körüli, cirkumnukleáris csillagkeletkezés együttes hatásaként azonosították (pl. Karim és mtsai, 2011; Pierce és mtsai, 2011).

Empirikus vizsgálatokból az is ismert, hogy rádióhangos AGN-ek esetén magasabb vöröseltolódásnál figyelhető meg a rádió LF maximuma, mint a rádiócsendes társaik esetén (Goldschmidt és mtsai, 1999; Mao és mtsai, 2017). Egy különböző hullámhossztartományokban elvégzett méréseket felhasználó analízisben azt találták, hogy a Cosmic Evolution Survey (COSMOS) felmérés által lefedett égboltterület rádiósugárzásuk alapján kiválasztott forrásainak ($z \leq 6$; $S_{1,4\text{GHz}} \geq 37 \mu\text{Jy}$) populációs eloszlása (rádióhangos/rádiócsendes AGN, aktív csillagkeletkezést mutató galaxis) erősen függ a vizsgált fluxussűrűség-tartománytól (Delvecchio és mtsai, 2017), ezzel magyarázva az AGN és az anyagaxis közötti aktivitási összefüggést (visszacsatolás) is. Az 1,4 GHz-en 11,5 μJy -nél erősebb források spektrális energieloszlását (spectral energy distribution – SED) mo-



24. ábra. A halmozott AGN-ek eloszlása a vöröseltolódás függvényében. A csíkos oszlopok az egyenlő vöröseltolódás-tartományú felosztást, a szürke oszlopok a halmozásban alkalmazott egyenlő elemszámú beosztást szemléltetik.

dellezve Mao és mtsai (2017) és Ceraj és mtsai (2018) is azt találták, hogy a rádió LF $z \sim 2$ vöröseltolódáson éri el a maximumát. A rádiósugárzás bimodalitását alacsonyabb frekvenciákon (120 – 168 MHz) is vizsgálták, és azt találták, hogy az alacsony teljesítményű AGN-ek galaxisainak rádiósugárzásában a csillagkeletkezés dominál (Gürkan és mtsai, 2019).

A vizsgálat elvégzésekor (2018. november 23-i katalógusverzió) a FIRST lefedettségbe eső, de nem detektált források száma 2229 volt. A detektálási határ alatti AGN-ek pozícióira középpontozott FIRST rádióterképeket felhasználva kerestem az objektumok által kibocsátott gyenge rádiósugárzást, valamint annak eredetét (AGN aktivitás vagy csillagkeletkezés).

Az analízis során elvégzett számításokban a standard Λ hideg sötét anyag (Λ cold dark matter – Λ CDM) kozmológiai modell állandóit használtam fel: $\Omega_m = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$ és $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

2.2.2. Mintaválasztás

A halmozási eljárásban használt kvazármintát a nagy vöröseltolódású ($z \geq 4$) AGN katalógusom (Perger és mtsai, 2017) bevonásával hoztam létre. Az eljárásba bevont – optikai vagy közeli infravörös spektroszkópia alapján azonosított – AGN-eket úgy választottam, hogy pozícióik (II. egyenlítői koordináták) a FIRST felmérés által vizsgált égterületekre essenek és fluxussűrűségük ne haladja meg a felmérés detektálási határát (általában $\sim 1 \text{ mJy}$). Az intenzitásingadozások (effektív zaj) az AGN-ek optikai pozícióiban a FIRST képekben néhányszor tíz mJy beam^{-1} és $\lesssim 1 \text{ mJy beam}^{-1}$ tartományban változnak.

2. táblázat. A halmozás során felhasznált 2229 AGN listájának első 5 eleme.

Név	α (h m s)	δ ($^{\circ}$ ' ")	z_{spec}	Referencia
SDSS J000046.69+010951.2	00 00 46,69	+01 09 51,24	4,25	Pâris és mtsai (2012)
SDSS J000124.23+111212.6	00 01 24,23	+11 12 12,69	4,30	Pâris és mtsai (2017)
SDSS J000404.71+000039.0	00 04 04,71	+00 00 39,08	4,31	Pâris és mtsai (2012)
SDSS J000457.11–000538.7	00 04 57,11	–00 05 38,78	4,05	Pâris és mtsai (2012)
SDSS J000527.14+025813.2	00 05 27,15	+02 58 13,29	4,11	Pâris és mtsai (2012)

Megjegyzés: 1. oszlop – az objektum neve, 2. oszlop – rektaszczenzió, 3. oszlop – deklináció, 4. oszlop – spektroszkópiai vöröseltolódás, 5. oszlop – felfedezés hivatkozása. A teljes lista elérhető az elektronikus mellékletben.

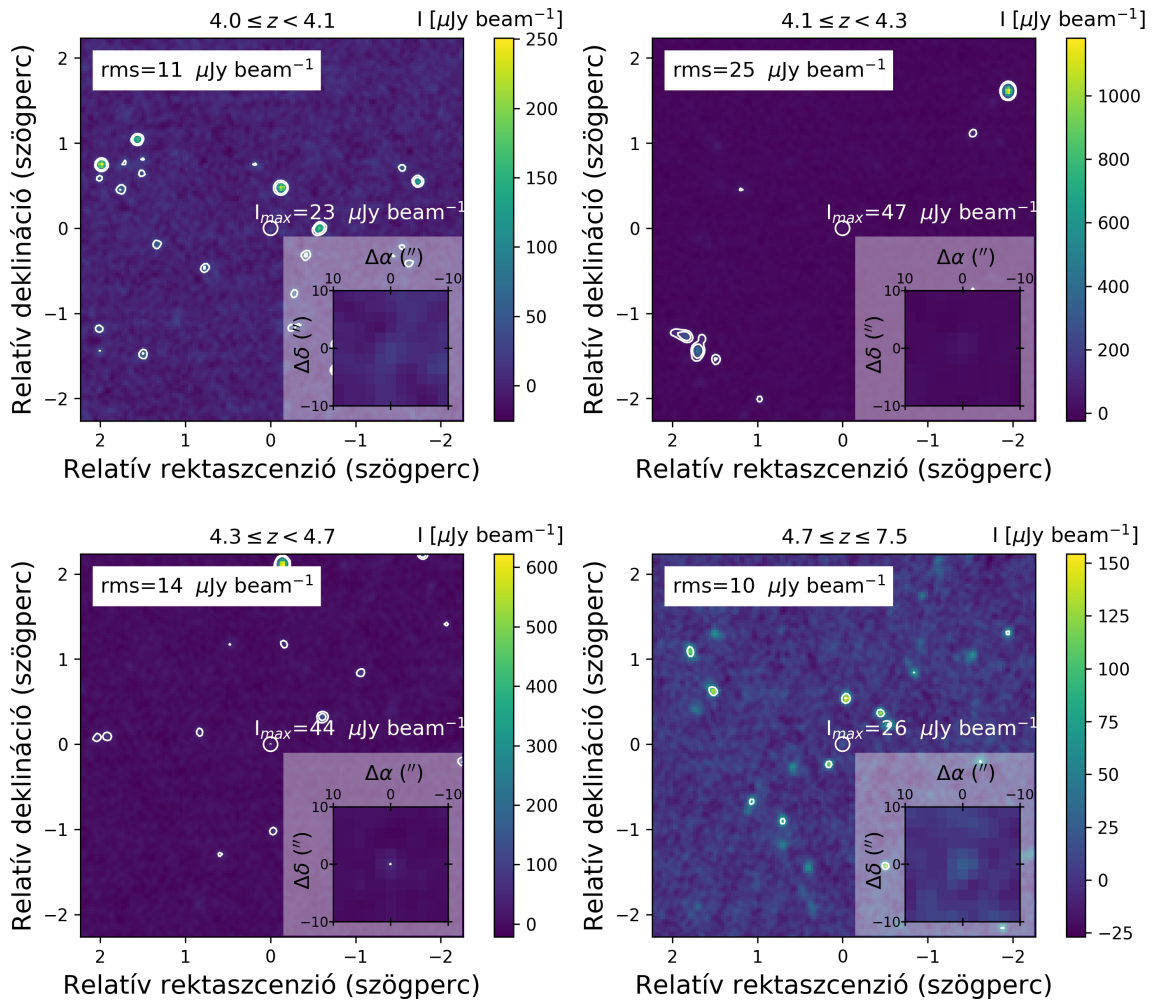
A megbúvó nagy vöröseltolódású rádió-AGN populáció teszteléséhez az egyes objektumok körüli területekről készült FITS formátumú rádiótérképeket a FIRST „kép kivágó” szolgáltatásából töltöttem le²⁷, $4,5 \times 4,5$ méretben. A hiányos vagy erősen sérült képmezővel rendelkező elemek kizárása után végül 2229 térkép vett részt a halmozás folyamatában. A felhasznált minta vöröseltolódás függvényében ábrázolt számbeli eloszlása a 24. ábrán látható, a 2229 AGN listájának első öt bejegyzését a 2. táblázat tartalmazza. A teljes lista elérhető a dolgozat elektronikus mellékletében.

2.2.3. A halmozási eljárás

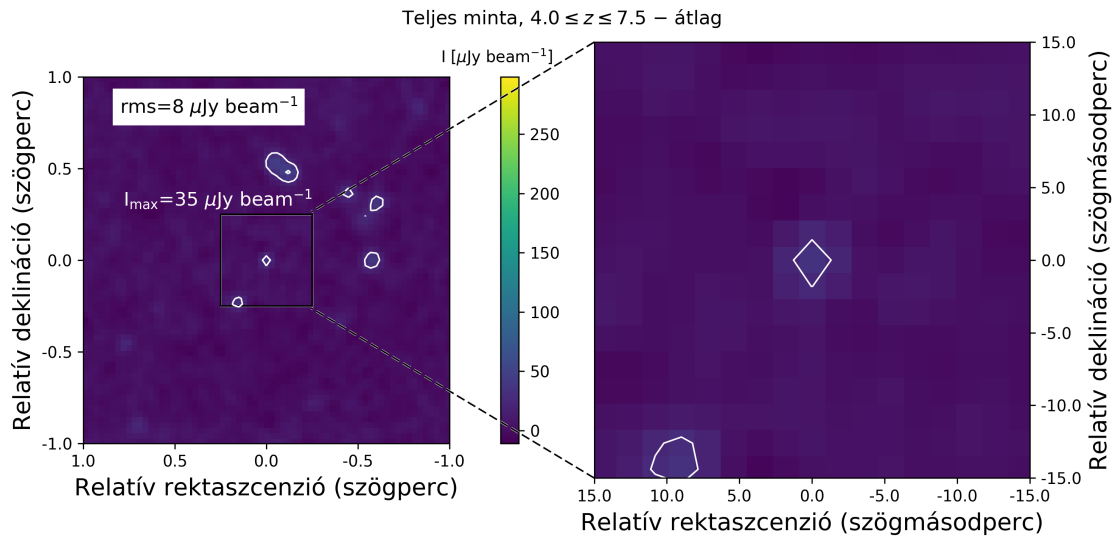
A 2229 objektumból álló mintát az egyes források vöröseltolódása alapján négy almintára osztottam, mindegyik vöröseltolódás-csoportba megközelítőleg azonos számú képet vonva be. A négy vöröseltolódás-tartományba végül 554, 559, 559 és 557 kvazár térképe került, a tartományhatárok pedig a $4,0 \leq z_1 < 4,1$, $4,1 \leq z_2 < 4,3$, $4,3 \leq z_3 < 4,7$, és $4,7 \leq z_4 < 7,6$ vöröseltolódás-értékek.

A halmozást kétféle módon végeztem el: hagyományos átlag és medián eljárásokkal. A szakirodalomban mindkét módszer alkalmazásával végeztek el halmozásos vizsgálatokat (átlag, pl.: White és mtsai 2007; de Vries és mtsai 2007; Hodge és mtsai 2008; medián, pl.: White és mtsai 2007; de Vries és mtsai 2007; Hodge és mtsai 2008; Hwang és mtsai 2018; Roy és mtsai 2018). A hagyományos átlag módszerével történő képátlagolás meghatározza a mintában lévő képpontok intenzitásainak számtani középértékét. Ez a módszer azonban nagyon érzékeny a mintában szereplő szélsőséges értékekre, valamint a véletlen, a képmezőbe eső nagy intenzitású pontforrásokra. A medián módszerrel való képátlagolás ellenben a bevont térképek képpontjainak megfelelő intenzitásértékek helyzeti középértékét határozza meg, ezáltal nem érzékeny a mintában előforduló nagy fényességcsúcsokra.

²⁷third.ucllnl.org/cgi-bin/firstcutout

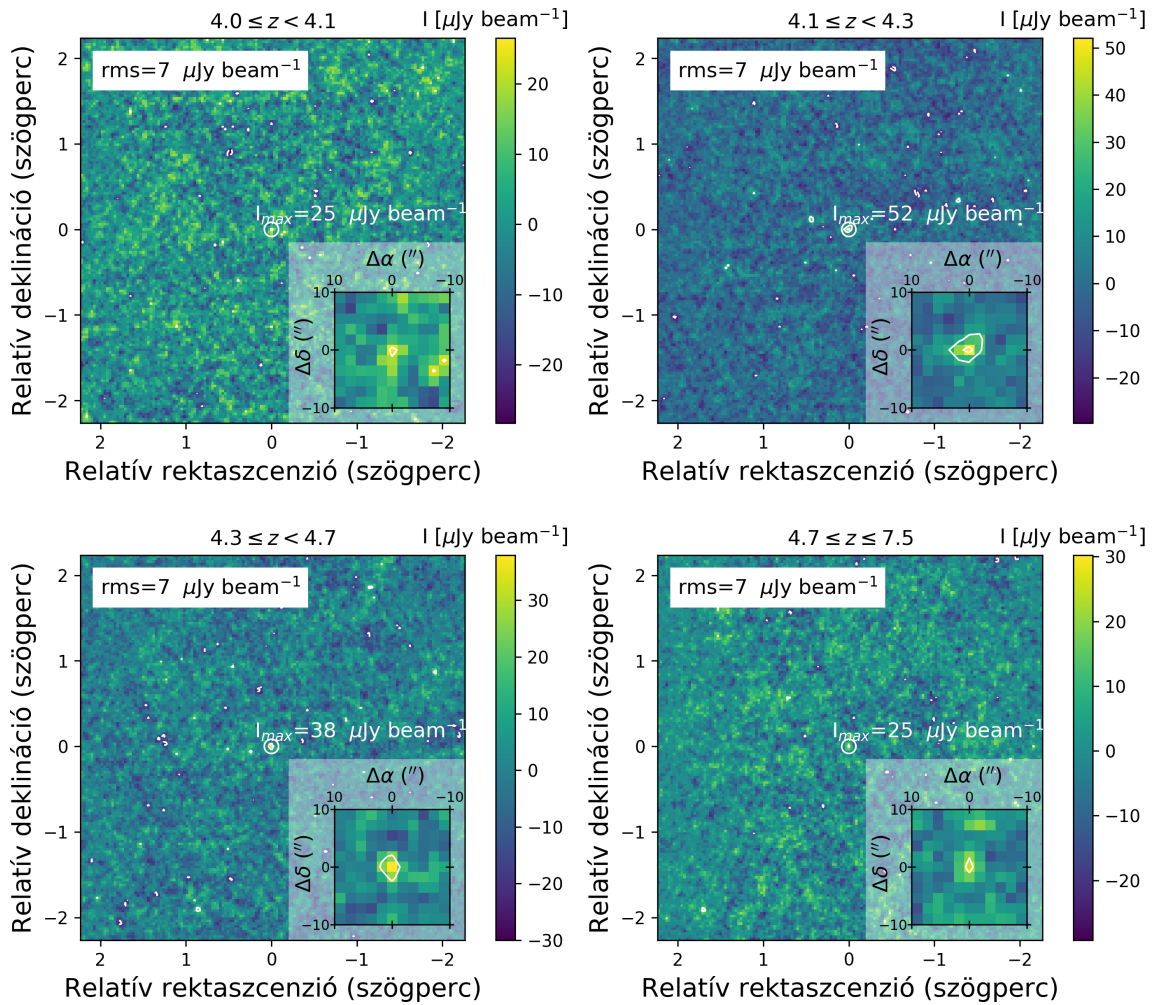


(a) Átlag térképek az vöröseltolódás szerint felosztott mintára.



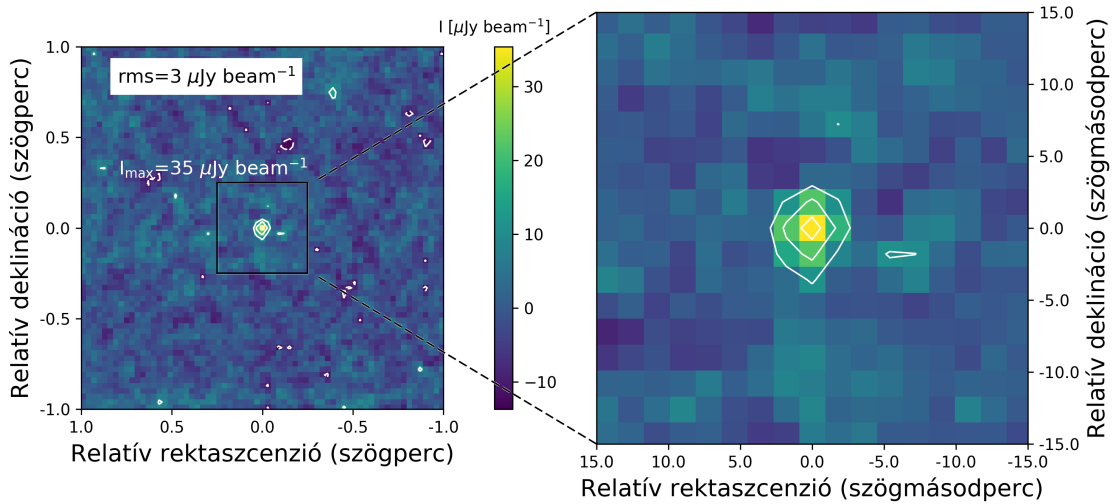
(b) Átlag térkép a teljes mintára vonatkozó FIRST képek felhasználásával. A belső $30'' \times 30''$ részt kiemeltem a jobb láthatóság érdekében.

25. ábra. A $z \geq 4$ vöröseltolódású (a FIRST által nem detektált) AGN-minta koordinátáira pozicionált, a FIRST felmérésben készült rádióképek felhasználásával létrehozott hagyományos átlag szerint halmozott térképek, valamint azoknak a középpont körüli $30'' \times 30''$ -es belső régiója. A belső $5''$ sugarú körben számolt maximális intenzitást és a zajszintet (rms) szintén feltüntettem. A kontúrvonalak a zajszint ± 3 és 6 -szorosát jelölik.



(a) Medián térképek az vöröseltolódás szerint felosztott mintára.

Teljes minta, $4.0 \leq z \leq 7.5$ – medián



(b) Medián térkép a teljes mintára vonatkozó FIRST képek felhasználásával. A belső $30'' \times 30''$ részt kiemeltém a jobb láthatóság érdekében.

26. ábra. A $z \geq 4$ vöröseltolódású (a FIRST által nem detektált) AGN-minta koordinátáira pozicionált, a FIRST felmérésben készült rádióképek felhasználásával létrehozott medián módszerrel halmozott térképek. A vöröseltolódás szerint csoportosított adatok esetén a belső $30'' \times 30''$ területek a jobb láthatóság érdekében kiemeltém. A belső $5''$ sugarú körben számolt maximális intenzitásokat és a zajszintet (rms) szintén feltüntettem. A kontúrvonalak a zajszint ± 3 , 6 és 9-szeresét jelölik.

3. táblázat. A hagyományos átlag és a medián módszerrel halmozott térképek tulajdonságai.

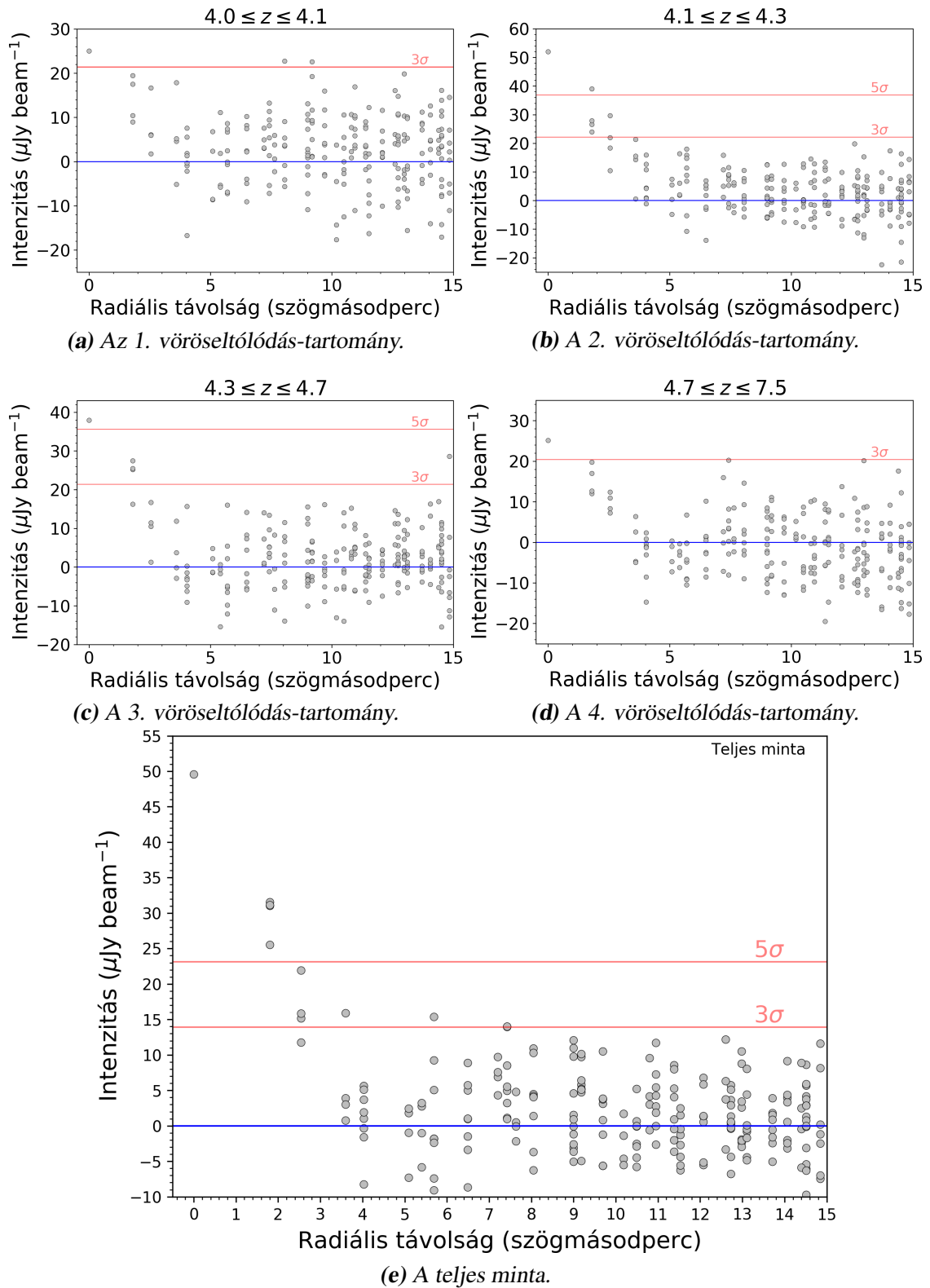
	Bin	rms [$\mu\text{Jy beam}^{-1}$]	I_{max} [$\mu\text{Jy beam}^{-1}$]	SNR
Átlag	1	9	173	19
	2	16	402	25
	3	18	931	51
	4	9	142	17
	Teljes	7	233	32
Medián	1	7	27	4
	2	7	52	7
	3	7	38	5
	4	7	30	4
	Teljes	3	35	11

Megjegyzés: 1. oszlop – vöröseltolódás-tartomány, 2. oszlop – kép zajszintje, 3. oszlop – intenzitásmaximum, 4. oszlop – jel-zaj arány

A két módszerrel kapott térképek alkalmazhatóságának kiértékeléséhez kiszámítottam a négyzetes középértékeket (root mean square – rms), azaz a térképek zajszintjeit, az intenzitás maximumát és a jel-zaj arányt (signal-to-noise ratio – SNR) mind a hagyományos átlag, mind a medián halmozással kapott térképekre, minden vöröseltolódás-tartományban (3. táblázat). Az egyes vöröseltolódás-tartományokban az effektív zajértékek a $10 - 20 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ nagyságrendbe esnek a hagyományos átlaggal kapott képeknél, míg a medián halmozás eredményeként $\sim 7 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ zajszintet kaptam. A teljes minta felhasználásával összeátlagolt térképeken $8 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ és $3 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ rms zaj, rendre a hagyományos átlag és a medián módszerekre (25. és 26. ábra).

A hagyományos átlagolással kapott térképek magas SNR értékei ellenére (akár ~ 50) a módszer nem hozott hatékony eredményt a rejtett központi forrás felfedéséhez. A térképek a kiugró értékek által szennyezettek, a középponttól eltérő pontokban számos domináns „forrás” jelenik meg, amelyeket a halmozásban felhasznált egyedi térképek erős intenzitású csúcsai okoznak. A középponton kívüli források jelenléte a zajszint nagymértékű növekedéséhez vezet a medián térképekkel összehasonlítva. Ezért a hagyományos átlagolódású térképeket a további analízis és számítások során figyelmen kívül hagytam. A számított tulajdonságokat a 3. táblázatban listáztam.

A medián térképek előnye a hagyományos átlagolással ellentétben, hogy az eljárás nem érzékeny a képmezőben alkalmanként felbukkanó fényes forrásokra. Az összes vöröseltolódás-tartomány szerint felosztott almintában egységes zajszint figyelhető meg ($7 \mu\text{Jy beam}^{-1}$). A teljes minta felhasználásával készült medián térképen egy kiemelkedő intenzitású csúcs tűnt elő, a jel-zaj arány pedig meghaladja a 10-es értéket. A medián térképek maximumai $27, 52, 38$ és $30 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ a vöröseltolódás-alcsoportokban és $35 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ a teljes mintában. A medián halmozással kapott rádiótérképek a 26. ábrán



27. ábra. A medián módszerrel halmozott térképek fluxussűrűség-eloszlása a középponttól való távolság függvényében a belső 15'' sugarú körön belüli területen (radiális profil). Az ábra a White és mtsai (2007) által javasolt 1,4-es szorzóval korrigált fluxussűrűségeket jeleníti meg. A 3 és 5 σ zajszintet piros szín jelöli.

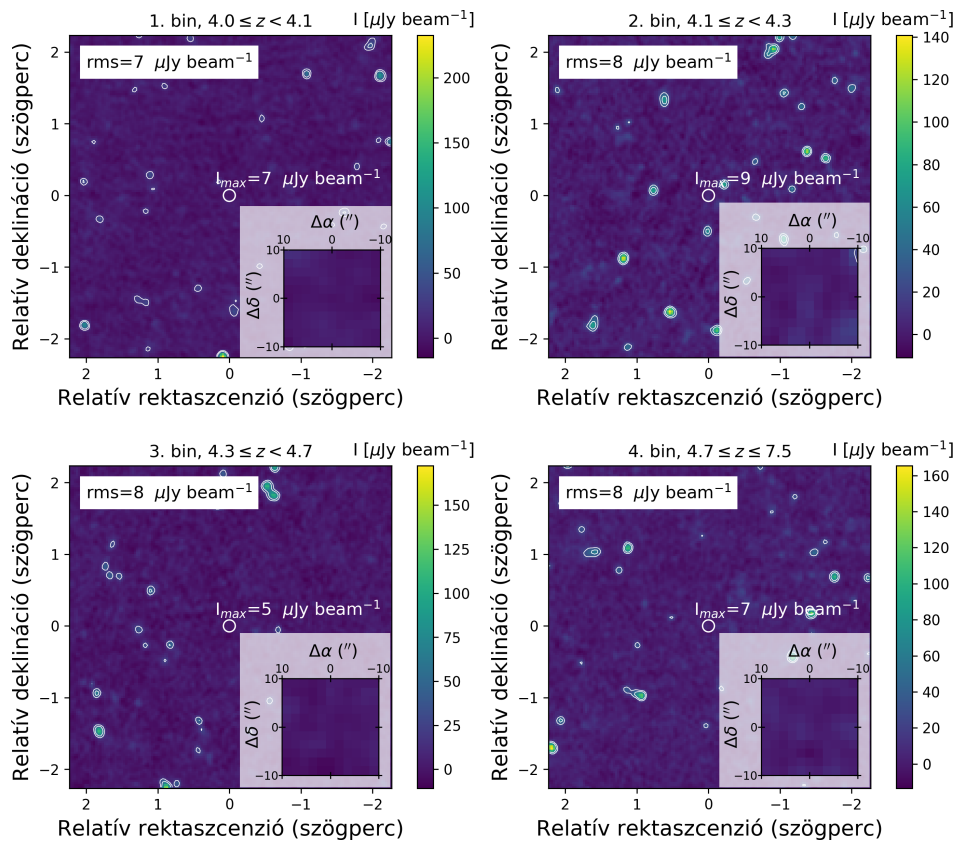
láthatók, a térképekre számított tulajdonságokat a 3. táblázat tartalmazza, míg az egyes tartományok és a teljes minta medián-képének sugárirányú intenzitásprofilját a 27. ábrán szemléltetem.

Az egyéni térképek zajszintjének várt csökkenése a halmozás során összefügg a résztvevő térképek N számával, a \sqrt{N} értékkel arányosan. Az eredeti FIRST térképek jellemző zajszintjei $\sim 0,15 \text{ mJy beam}^{-1}$ mértékűek. A 2229 kvazár esetén elérhető legalacsonyabb zajszint $\sim 3 \mu\text{Jy beam}^{-1}$, ami megegyezik a medián halmozás során kapott rms-értékekkel.

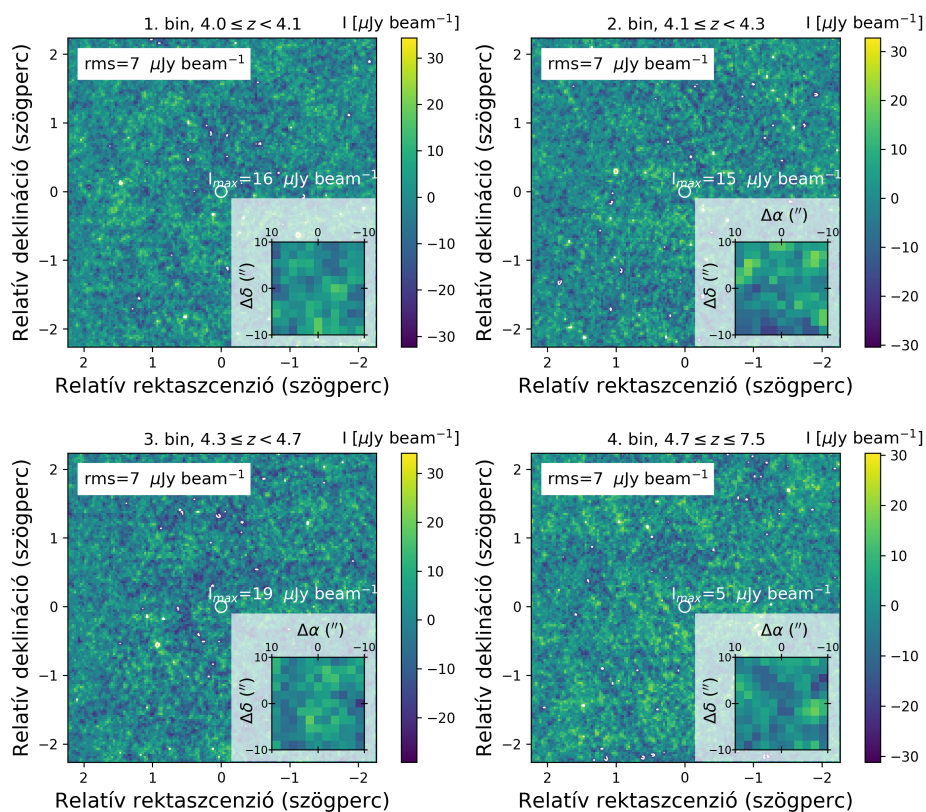
2.2.4. Hamis források térképhalmozása és a zajszint értelmezése

Eredményeim megbízhatóságának ellenőrzése céljából négy azonos méretű mintát készítettem olyan mesterséges forráskoordinátákkal, amelyeket az eredeti koordináták módosításával kaptam, a rektaszcenzió és deklináció értékeihez 1° hozzáadásával és/vagy kivonásával. A mesterséges minta vöröseltolódás-tartományait az eredeti (valós) mintáéhoz hasonló módon hoztam létre.

A hamis források négy almintájának egyikében sem találtam rádiókibocsátást a középonti régióban, sem az átlag, sem a medián módszerrel. Az átlag módszer képei a központi képpontoktól eltérő, számos, a látómezőbe véletlenszerűen beleeső forrást mutatnak, hasonlóan a valódi mintánál kapott eredményekhez. A vöröseltolódás szerint beosztott alminták térképein (28. ábra) számított rms zaj $10 - 20 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ és $\sim 7 \mu\text{Jy beam}^{-1}$, rendre az átlag és a medián módszerekre. A teljes minta halmozásával kapott térképek zajszintjei összevethetők a valódi mintáéival: $8 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ az átlag és $3 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ a medián módszer esetében. A mesterséges forráskoordináták jel-zaj arányai az átlag módszerrel $16 - 30$ közötti értékeket vesznek fel az egyes alcsoportokban, míg a teljes mintára ~ 30 alattiak. A magas jel-zaj arányt itt is a középponttól eltérő területeken felbukkanó fényes pontforrások okozzák, hasonlóan a valódi mintához. Medián módszert alkalmazva a vöröseltolódás-alcsoportokban tipikusan $4 \lesssim \text{SNR} \lesssim 5$ közötti jel-zaj arányt kaptam. A térképeken a várttal összhangban lévő módon nem figyelhető meg szignifikáns rádiótöbblet a kép középpontjában. Mivel az eredeti, valós mintával létrehozott térképek halmozásakor elért jel-zaj arány a vöröseltolódás szerint felosztott alcsoportokban egy értéktartományba esik a hamis források esetében tapasztalattal, ezért a későbbi analízis során csak a teljes minta által szolgáltatott adatokat használtam fel.



(a) Hagymányos átlag módszerével halmozott térképek.



(b) Medián módszerrel halmozott térképek.

28. ábra. Mesterséges AGN-pozíciók térképeinek halmozása átlag és medián módszerrel. Az eredeti AGN-pozíciókhoz képest mindkét koordinátában $\pm 1^\circ$ -kal eltolt mesterséges koordináták körüli területeken.

2.2.5. Modellillesztés a halmozott térképekre

További elemzés céljából egy körszimmetrikus Gauss-modell komponenst illesztettem a teljes minta medián halmozásával kapott rádiótérképének középponti régiójában megfigyelhető fényességtöbbletre, az intenzitáseloszlás jellemzésének céljából. A modellillesztéshez az AIPS programcsomag imfit programját használtam. A modellillesztés egy felbontatlan pontforrást eredményezett. A modellkomponens fluxussűrűségének értékét egy 1,4 torzításkorrekciós tényezővel korrigáltam, amit White és mtsai (2007) javasolt FIRST térképek halmozása esetén. A pontforrás fluxussűrűsége a korrekció után $S_{1,4\text{GHz}} = 52 \pm 1 \mu\text{Jy}$, ami a gyenge rádiósugárzó $z \geq 4$ AGN-ek karakterisztikus fluxussűrűségének tekinthető.

2.2.6. A karakterisztikus 1,4 GHz-es rádióteljesítmény meghatározása

A nagy vöröseltolódású AGN populációt jellemző monokromatikus, a források saját vonatkoztatási rendszerében értelmezett 1,4 GHz-es rádióteljesítmény karakterisztikus értékének meghatározásához a korábbi analízisben használt 2229 kvazár FIRST térképét összegeztem. Minthogy a halmozási eljárás során kapott térképre történő modellillesztés egy felbontatlan pontforrást eredményezett, a rejtett rádiósugárzást pontforrás formájában kerestem. Az analízisben a kumulatív fluxussűrűséget ezért az egyes térképek középponti pixeljeinek összegeként kezeltem. Az összeadás és az 1,4 GHz-es rádióteljesítmény meghatározásnál azt az egyszerűsítő feltételt szabtam meg, hogy minden forrás – a saját vonatkoztatási rendszerében vett – teljesítménye megegyezik ($P_{1,4\text{GHz}}$), és az adott vöröseltolódásra számolt fluxussűrűségeik adják ki kumulatív értéket. Habár ez a feltételezés erősen elnagyolt, és nem egyezik meg a valódi értékkel, a nagy vöröseltolódású AGN-ek karakterisztikus jellemzésére – egyéb információ hiányában – megfelelően alkalmazható.

A becsléshez az alábbi, K -korrekcióval bővített összefüggést használtam a kumulatív fluxussűrűség és az egyedi objektumok karakterisztikus rádióteljesítménye között:

$$S_{1,4\text{GHz},\text{sum}} = \sum_{i=1}^N \frac{P_{1,4\text{GHz}}}{4\pi D_{Li}^2 (1+z_i)^{-\alpha-1}}, \quad (10)$$

ahol $S_{1,4\text{GHz},\text{sum}} = 77 \text{ mJy}$ a 2229 egyedi térkép középpontjának összeadásából kapott kumulatív fluxussűrűség, α a rádiótartományú spektrálindex, azaz a rádióspektrum meredeksége ($S_\nu \propto \nu^\alpha$ konvenció szerint alkalmazva, ahol ν a frekvencia), D_{Li} és z_i pedig rendre az i -edik forrás luminozitástávolsága és vöröseltolódása. Mivel az egyedi források rádiósugárzásának spektrálindexe nem ismert, ezért többféle, a szakirodalomban használt értéket alkalmaztam (pl. Hopkins és mtsai, 2003; Hyvönen és mtsai, 2007; White és mtsai, 2007; Hwang és mtsai, 2018), a $-0.5 \leq \alpha \leq -1$ tartományban. Az egyes spektrálindexekre számított rádióteljesítményeket a 4. táblázat 2. oszlopában soroltam fel.

4. táblázat. A megbecsült 1,4 GHz-es rádióteljesítmények és csillagkeletkezési ráták az összeadott 2229 FIRST térkép középponti pixeljeire.

α	$P_{1,4\text{GHz}} [10^{24} \text{ W Hz}^{-1}]$	SFR [$M_{\odot} \text{ év}^{-1}$]			
		(1)	(2)	(3)	(4)
-0.5	2.9	1600	1800	370	1700
-0.6	3.4	1900	2100	420	2000
-0.7	4.1	2300	2500	480	2400
-0.8	4.8	2700	3000	540	2800
-0.9	5.7	3200	3500	610	3400
-1	6.8	3700	4200	700	4000

Megjegyzés: 1. oszlop – feltételezett spektrálindeks, 2. oszlop – becslült 1,4 GHz-es rádióteljesítmény, 3-6. oszlop – a különböző összefüggésekből számított csillagkeletkezési ráták: (1) Bell (2003), (2) Schmitt és mtsai (2006), (3) Davies és mtsai (2017) és (4) Mahajan és mtsai (2019)

2.2.7. Csillagkeletkezési ráta a halmozott mintában

A galaxisokból érkező rádiósugárzás eredhet a középponti régió AGN aktivitásából, kibocsátói a nagy teljesítményű – egy szupernagy tömegű fekete lyukra történő anyagbehullás révén létrejövő – relativisztikus plazmanylábok. Azonban a galaxisokban megfigyelt, relativisztikus elektronok által létrehozott szinkrotronsugárzás és az ionizált hidrogén szabad-szabad átmenetei által létrejövő sugárzás a teljes AGN anyagagalaxisban, kiterjedt területeken létrejöhet. Ezeknek eredete számottevő esetben a közelmúltban lezajlott csillagkeletkezési esemény (pl. Condon, 1992).

Feltételezve, hogy a halmozott nagy vöröseltolódású AGN-ek esetén tapasztalt rádiósugárzás kizárólag az anyagagalaxisok középponti részéhez közel lezajlott csillagkeletkezésből származik, és nem AGN-aktivitás számlájára írható, megbecsültem a csillagkeletkezési ráta (star formation rate – SFR) felső határát. Az SFR értékét a karakterisztikus 1,4 GHz-es rádióteljesítmény felhasználásával határoztam meg, négy egymástól független összefüggést (Bell, 2003; Schmitt és mtsai, 2006; Davies és mtsai, 2017; Mahajan és mtsai, 2019) alkalmazva. A becslés eredménye a 4. táblázat 3–6. oszlopaiban található. A kapott felső határértékek – a rádió spektrálindextől és az alkalmazott relációtól függően – kb. egy nagyságrendet ölelnek fel. Nagy vonalakban kijelenthető, hogy a csillagkeletkezés jellemző tipikus felső határértéke az $1000 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ nagyságrendbe esik.

2.2.8. Diszkusszió

A halmozott minta fluxussűrűségének értelmezése

A medián halmozás során kapott $52 \mu\text{Jy}$ fluxussűrűség összemérhető – bár kissé magasabb – a korábbi munkák által közölt eredményekkel (pl. Wals és mtsai, 2005; White és

mtsai, 2007; Hodge és mtsai, 2008; Hwang és mtsai, 2018). Figyelembe véve, hogy az általam felhasznált források nagy vöröseltolódású objektumok, az a következtetés vonható le, hogy ezek az AGN-ek eredendően erőteljesebb forrásokat rejtenek, mint a korábbi munkákban vizsgált minták.

A kapott érték kontextusba helyezhető néhány részletesen is tanulmányozott egyedi forrással való összehasonlítással. Az SDSS J010013.02+280225.8 jelű, $z = 6,4$ vöröseltolódású ultrafényes kvazárt – nem szerepelt a halmozásban, mivel a FIRST lefedettségén kívül esik – 3 GHz-en $100 \mu\text{Jy}$ fluxussűrűséggel (Wang és mtsai, 2016) detektálta a VLA ($0,65''$ felbontással és $\sim 3 \mu\text{Jy beam}^{-1}$ érzékenységgel). Ennek $-0,7$ -es spektrálindeket feltételezve 1,4 GHz-en $\sim 170 \mu\text{Jy}$ -nek adódik. További nagyfelbontású mérések a VLBA-val 1,5 GHz-en egy részlegesen felbontott, ~ 10 ezredívmásodperces léptékű rádiószerkezet jelenlétét mutatták, $\sim 90 \mu\text{Jy}$ fluxussűrűséggel (Wang és mtsai, 2017). A kvazár ezredívmásodpercnél finomabb felbontású szerkezete határozottan indokolja a FIRST által nem detektált – a halmozott mintából származó – források nagy érzékenységgű VLBI technikával való megfigyelését, észlelését. A VLBI észlelésekkel detektálhatóvá válnának a gyenge, kompakt AGN aktivitáshoz köthető rádiósugárzást kibocsátó források. Az általam meghatározott karakterisztikus fluxussűrűség továbbá arra enged következtetni, hogy legalább néhány olyan kvazár van a felhasznált 2229 objektum között, amelyek szinkrotron AGN nyalábbal járulnak hozzá a rádiósugárzáshoz, és nem köthetők kizárólag csillagkeletkezési folyamatokhoz.

A rádióteljesítmény és AGN aktivitásból származó rádiósugárzás kapcsolata

Az 1,4 GHz-es rádióteljesítmények becsült értékei bármely feltételezhető spektrálindeket esetén a $P_{1,4\text{GHz}} \sim 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$ nagyságrendbe esnek (4. táblázat). A korábbiakkal szemben most azt feltételezve, hogy a rádiósugárzás csak AGN aktivitásból származik, a FIRST által nem detektált nagy vöröseltolódású AGN-ek a rádió-AGN populáció tagjai közé tartoznak, minthogy meghaladják a $P_{1,4\text{GHz}} \geq 2 \times 10^{22,5} \text{ W Hz}^{-1}$ „rádióhangossági” határt, továbbá a szupernóvákat és az AGN-eket elválasztó elméleti korlátot ($P_{1,4\text{GHz}} = 2 \times 10^{21} \text{ W Hz}^{-1}$, Kewley és mtsai, 2000; Middelberg és mtsai, 2011). A becsült rádióteljesítmény-értékek emellett a jelentős csillagontó galaxisok sugárzását is meghaladják, mint pl. az Arp 220, az Arp 229A, és a Mrk 273 ($P_{1,4\text{GHz}} = 2 - 4,5 \times 10^{22} \text{ W Hz}^{-1}$, Alexandroff és mtsai, 2012).

A vizsgálat során kapott monokromatikus teljesítmények 2 – 5 nagyságrenddel nagyobbak adódtak, mint az alacsony vöröseltolódású ($z < 0,3$), alacsony teljesítményű forrásoknál, pl. a távoli Univerzum csillagontó galaxisaival megfeleltethető „Lyman-

analógoknál” (Lyman-break analogues – LBAs)²⁸ tapasztalt értékek. Összehasonlítá-
sul, nagyságrendekkel alacsonyabb teljesítményt ($\sim 10^{22}$ W Hz⁻¹) tapasztaltak pl. a
J0150+1308 jelű, aktív csillagkeletkezést mutató LBA, a J1029+4829 jelű AGN, és egy
AGN–csillagotó galaxis kompozit esetén is. További alacsony vöröseltolódású AGN-ek
(J1155+1507, SDSS J2104–0009, SDSS J2304–0933, Gabányi és mtsai 2016; NGC 3147,
Anderson és mtsai 2004) még ennél is gyengébb rádiósugárzással rendelkeznek, a 10^{21} –
 10^{22} W Hz⁻¹ tartományban, de akár az egészen alacsony, a 10^{19} – 10^{20} W Hz⁻¹ nagyság-
rendben is találunk rádiósugárzó forrásokat (Henize 2-10, Reines és Deller 2012; NGC 4203,
NGC 4535, Ulvestad és Ho 2002; Anderson és mtsai 2004; NGC 864, NGC 4123, Ulves-
tad és Ho 2002).

A legfényesebb AGN-ek rádióteljesítményei a 10^{24} – 10^{26} W Hz⁻¹ közötti tartományt
ölelik fel, mint azt Best és mtsai (2005); Sadler és mtsai (2008); Simpson és mtsai (2013)
és Rees és mtsai (2016) tárgyalták. A halmozási eljárásban megbecsült teljesítmények
összevethető nagyságúak a fényes AGN-ek rádióteljesítményeivel. A szakirodalom to-
vábbá arra is kitér, hogy azok az alacsony vöröseltolódású AGN anyaggalaxisok, amelyek-
nek a rádióteljesítménye meghaladja 10^{23} W Hz⁻¹ értéket, többnyire rádióhangos AGN-t
rejtnek a középpontjukban. Ez arra enged következtetni, hogy a halmozásban felhasz-
nált minta esetén is jelentős szerepet játszik az AGN aktivitás az 1,4 GHz-es teljesítmény
létrehozásában.

Nagy vöröseltolódásig kiterjedő mély égfelmérések az Extended Chandra Deep Field-
South (E-CDFS, Miller és mtsai, 2008, 2013) és a VLA-COSMOS 3 GHz Large Project
(Smolčić és mtsai, 2017b) égterületeken a legtávolabbi galaxisok tulajdonságait vizsgál-
ják nagy részletességgel. Az általam kapott teljesítményértékek vizsgálhatók ezen nagy
égbolgfelmérések eredményeinek fényében (Delvecchio és mtsai, 2017; Smolčić és mtsai,
2017a,c). A COSMOS felmérés $z \geq 6$ kvazármintáját Delvecchio és mtsai (2017) 3
különálló populációra bontották: rádiócsendes és rádióhangos AGN-ekre, valamint csil-
lagkeletkezést mutató galaxisokra. A rádiócsendes AGN-anyagalaxisok többségében –
az AGN aktivitás mellett – jelentős csillagkeletkezést is találtak. Hasonló eredményekre
jutottak Smolčić és mtsai (2017a): a $200 \mu\text{Jy}$ -nél erősebb 1,4 GHz-es rádióforrások több-
sége AGN, és a csökkenő fluxussűrűségekkel dominánssá válik az erős csillagkeletkezést
mutató galaxisok populációs fölénye. A legalacsonyabb fluxussűrűség-tartományokban a
teljes minta 60%-át a csillagkeletkezés által dominált galaxisok teszik ki.

²⁸Az LBA-k nevüket a spektrumukban megfigyelhető hirtelen leeső intenzitásukról, az ún. Lyman-
levágásról kapták. A levágás annak a következménye, hogy (a forrás vonatkoztatási rendszerében) a 912 Å-
nél rövidebb hullámhosszakon kibocsátott sugárzás teljes mértékben elnyelődik a galaxisban található csil-
lagközi, és a galaxisközi anyagban.

Másfelől, ha az 1,4 GHz-es, a csillagkeletkezéshez képesti rádiótöbbslettel rendelkező AGN-ek LF-ét vizsgáljuk különböző eljárások segítségével (pl. Smolčić és mtsai, 2017c), azt tapasztaljuk, hogy a forrás saját vonatkoztatási rendszerében megfigyelt rádióteljesítménye a $\sim 10^{24} - 10^{26} \text{ W Hz}^{-1}$ tartományban található, kizárólag a direkt észlelési adatok figyelembevételével. Evolúciós modellek alkalmazásával a teljesítmények $10^{22} - 10^{27} \text{ W Hz}^{-1}$ közötti értékeknek adódtak. A COSMOS terület galaxisainak empirikus tanulmányozása felfedte, hogy a nagy vöröseltolódású régióban vizsgált galaxisokban a rádiócsendes AGN-ek és a jelentős csillagkeletkezéssel rendelkező galaxisok dominálják a mintát. Egy másik, a $\sim 100 \mu\text{Jy}$ -nél gyengébb rádióforrásokra irányuló analízis – az E-CDFS felmérés adatai alapján – a csillagkeletkező galaxisok fölénye és a rádióhangos AGN-ek dominanciájának csökkenése mellett azt találta, hogy a rádiócsendes AGN-ek aránya is növekszik a csökkenő fluxussűrűség-értékekkel arányosan (Bonzini és mtsai, 2013). Bonzini és mtsai (2013) galaxismintájában a teljesítmények számbeli megoszlása alapján is levonható következtetés a halmozási eljárásomra: a rádiócsendes és rádióhangos AGN-ek esetén is vannak olyan jelentős elemszámú teljesítménytartományok, amelyek egybeesnek az általam meghatározott nagyságrenddel, míg a csillagkeletkezés által dominált galaxisok esetén az eloszlás csúcsa egy nagyságrenddel alacsonyabb.

Csillagkeletkezés a nagy vöröseltolódású AGN anyagaxisokban

A halmozási eljárás során felső határként becsült csillagkeletkezési ráták (4. táblázat) két-három nagyságrenddel nagyobbak, mint a bizonyos részletesen tanulmányozott egyedi AGN-anyagalaxisok esetén meghatározott SFR értékek: $0,5-2 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ (SDSS J2104–0009 és SDSS J2304–0933, Gabányi és mtsai, 2016), $5-8 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ (J0150+1308, J0921+4509 és J1029+4829, Alexandroff és mtsai, 2012). A H_{α} indikátorral számított SFR-ek ($\sim 1 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$, Ulvestad és Ho, 2002) és halmozási eljárással számított felső határok ($\leq 10 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$, pl. de Vries és mtsai, 2007; Hodge és mtsai, 2008) is a néhány $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ nagyságrendre mutatnak példát. Még a fényes infravörös galaxisokban is csupán néhány száz – néhány ezer $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ nagyságrendű csillagkeletkezés figyelhető meg (pl. Howell és mtsai, 2010), ami alapján az általam végzett halmozás eredményeképpen kapott értékek erősen túlbecslik a csillagkeletkezés 1,4 GHz-es rádiósugárzáshoz való hozzájárulását. Ezzel szemben vannak olyan nagy vöröseltolódású ($z \sim 6$) kvazár-anyagalaxisok, ahol CO és [CII] vonalak, valamint a por emissziójának észlelésével jelentős csillagkeletkezést figyeltek meg egyedi forrásokban, akár az $\sim 1000 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ nagyságrendben (pl. Bertoldi és mtsai, 2003; Willott és mtsai, 2013; Wang és mtsai, 2013; Shao és mtsai, 2019). Ezek a források a halmozásban nem vettek részt, mivel a FIRST felmérés lefedettségén kívül esnek. Található példa olyan kvazár-anyagalaxisokra, melyek részt

vettek a halmozási eljárásomban és rendelkeznek független módszerekkel – molekula- és/vagy atomi spektrumvonalak alapján – elvégzett csillagkeletkezési ráta meghatározással. Ezek tágas határok között változó SFR értékekkel rendelkeznek (SDSS J0129–0035, SDSS J20541–0005, CFHQS J0210–0456, CFHQS J2329–0301, ULAS J1120+0641). A nagy vöröseltolódású kvazárok galaxisaira meghatározott SFR-ek a néhány tíz $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ értéktől ($48 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – CFHQS J0210–0456, $< 40 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – CFHQS J2329–0301, Willott és mtsai 2013; $\sim 80 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – CFHQS J0055+0146, Willott és mtsai 2015), a néhány száz $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ értéken át ($\sim 200 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – ULAS J1120+0641, Venemans és mtsai 2017; $\sim 650 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – SDSS J0100+2800, Wang és mtsai 2016), egészen az ezer $M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ értéket megközelítő ($\sim 700 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – VIKING J2348–3054, $\sim 900 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ – VIKING J0109–3047, Venemans és mtsai 2016) vagy az azt meghaladó csillagkeletkezési rátáig (Walter és mtsai, 2004; Venemans és mtsai, 2019) terjedően változatos képet mutatnak.

Az általam megbecsült karakterisztikus SFR ($\lesssim 4000 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$, 4. táblázat) és az egyedi objektumok esetében mért szakirodalmi értékek közötti különbség természetesen magyarázható azzal, ha feloldjuk a feltételezést, miszerint a teljes rádiósugárzás az anyagaxisban zajló csillagkeletkezésből származik, és nincs járulékos AGN-aktivitás. Továbbá a becslés során jelentős egyszerűsítést tettem azt feltételezve, hogy minden kvazár esetén megegyezik a karakterisztikus teljesítmény. A megfigyelt rádiókibocsátás valódi természete azonban az AGN aktivitás és csillagkeletkezési folyamatok által közösen létrehozott hatás, az egyes rendszerekben eltérő arányban járulva hozzá a mért rádiófluxussűrűséghez.

A rádióteljesítményre kapott eredmények finomhangolásához szükséges az LF megfelelő alkalmazása, egészen a legnagyobb vöröseltolódásokig (pl. Smolčić és mtsai, 2017c; Ceraj és mtsai, 2018). A legkorábbi kozmológiai korokra vonatkozó LF-ek meghatározása és pontosítása jelenleg is folyamatban van, pl. a 2 – 4 GHz VLA Sky Survey (VLASS, Lacy és mtsai, 2020) felmérésben. A VLASS érzékenysége jóval magasabb lesz a három mérési időszak kumulatív térképein ($\sim 70 \mu\text{Jy}$), mint a FIRST felmérésben, és a finomabb felbontás ($2''/5$) is hozzájárul a rádióégbolt részletesebb megismeréséhez. Az új VLASS térképekkel elvégezve az általam bemutatott halmozási eljárást, a FIRST által nem detektált források vöröseltolódástól függő tulajdonságai is meghatározhatóvá válnak, ami a jelen kutatásban a különálló vöröseltolódás-tartományokra osztott minta esetében tapasztalt alacsony jel-zaj arányok miatt meghiúsult.

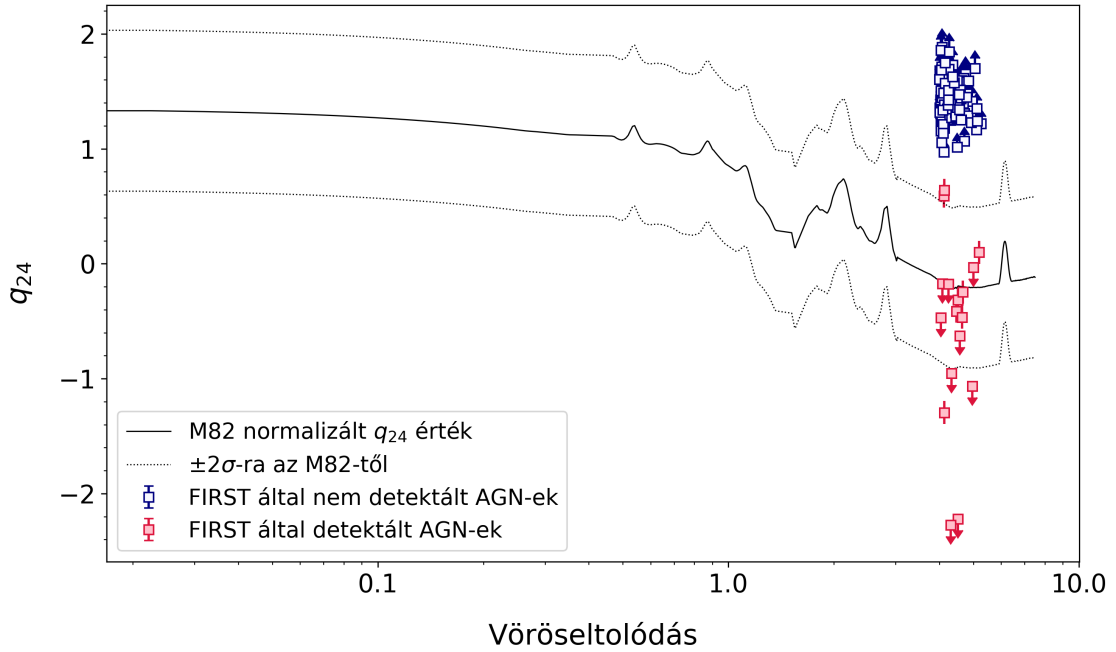
A mJy-nél gyengébb rádiósugárzás eredete

A csillagkeletkezésből és az AGN aktivitásból származó emisszió hozzájárulása a mJy-nél gyengébb rádiósugárzáshoz a FIRST észlelésektől független módszerek alkalmazásával ismerhető meg teljes bizonyossággal. Policiklikus aromás szénhidrogén (polycyclic aromatic hydrocarbon – PAH) vonalakat a közép-infravörös (mid infrared – MIR) hullámhossz-tartományban – kis vöröseltolódású galaxisokban – már a mag közvetlen környezetében, $\sim 1\text{--}20$ kpc-es távolságban is detektáltak (pl. Shi és mtsai, 2007; Martínez-Paredes és mtsai, 2019). Mivel a csillagkeletkezés nyomjelzőjeként is számon tartott PAH vonalak a középponti régióhoz ennyire közel is előfordultak, és a teljes minta halmozásával kapott medián térképre illesztett Gauss-modellkomponens egy felbontatlan pontforrást mutatott, a FIRST térképek felbontását (26 – 35 kpc lineáris méret, az egyes kvazárok vöröseltolódása szerint) tekintve nem dönthető el, hogy a rádiósugárzás eredete csillagkeletkezés vagy AGN aktivitás. A jövőbeni Négyzetkilométeres Hálózat (Square Kilometre Array – SKA) globális VLBI állomásokkal való együttműködésével történő mérések során ezredívmásodperc, vagy akár az ezredívmásodpercnél finomabb skálájú felbontás is elérhető (Godfrey és mtsai, 2012; Paragi és mtsai, 2015), egészen néhány μJy termikus érzékenységgel. Ezzel a kompakt AGN-ekhez köthető rádiósugárzás detektálhatóvá válik a mJy-nél gyengébb fluxussűrűségű kvazárpopuláció legnagyobb teljesítménnyel rendelkező tagjainál.

A csillagkeletkezés jelentőségének és a rádiósugárzáshoz való hozzájárulásának elemzése MIR észlelések alapján is megkísérelhető. A MIR és 1,4 GHz-es sugárzások közötti korrelációt felhasználva (Wu és mtsai, 2005) kiszámítottam a 8 és 24 μm -es MIR emisszió teljesítményét a halmozásból kapott karakterisztikus $P_{1,4\text{GHz}}$ értékek felhasználásával. Az összefüggés használhatóságát $z \sim 3,5$ vöröseltolódásig 5 nagyságrendet felölelő fluxussűrűsége bizonyították (Yun és mtsai, 2001; Ibar és mtsai, 2008), és μJy léptéken is megbízhatónak ítélték (Garn és Alexander, 2009). A halmozott AGN-ekre meghatározott karakterisztikus MIR fluxussűrűségeket az összeadott térképek karakterisztikus rádióteljesítménye alapján számítottam. A 8 és 24 μm -es fluxussűrűségekre rendre 10 – 15 mJy és 30 – 50 mJy adódott, 14 mJy és 45 mJy átlagértékkel.

Hogy megtudjam, mekkora a becsült csillagkeletkezési ráta értékére a mintában előforduló AGN-ek hatása, kiszámítottam a q_{24} értékeket a FIRST felső határok alkalmazásával és a 24 μm -es MIR sugárzással, amit a Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE,

²⁹A 24 μm -es fluxussűrűségek meghatározásához a Polletta és mtsai (2007) által létrehozott adatbázisában elérhető SED-mintát használtam fel, a rádió-fluxussűrűségeket a NASA/IPAC extragalaktikus adatbázisának (ned.ipac.caltech.edu) segítségével határoztam meg.



29. ábra. q_{24} értékek a vöröseltolódás függvényében a $z \geq 4$ AGN-ekre. A halmozásban felhasznált mintát kék, a FIRST felmérésben detektált AGN-eket piros színnel jelöltem (a nyílak a WISE magnitúdók < 3 -as jel-zaj arányú méréseit jelzik). A folytonos görbe az M 82 galaxisra meghatározott, normalizált q_{24} értékeket²⁹, a szaggatott görbék az ettől való $\pm 3\sigma$ eltérést jelzik (Bonzini és mtsai 2013 alapján)

Wright és mtsai, 2010) műholddal mért $22 \mu\text{m}$ -es emisszióból³⁰ (AllWISE catalog, Cutri és et al., 2014) vezettem le -1 -es spektrálindeks alkalmazásával. A q_{24} faktort a Bonzini és mtsai (2013) által leírt módon számítottam ki. A WISE adatbázisában 124 db, a halmozásba bevont kvazárt detektáltak $22 \mu\text{m}$ -en (> 3 -as jel-zaj arány mellett), melyek mindegyike az elméleti határ felett volt (29. ábra), amely a rádióhangos AGN-eket elválasztja a rádiócsendes AGN-ektől és a csillagkeletkező galaxisoktól, így a csillagkeletkezés/AGN megoszlásról nem szolgáltatott többletinformációt. Másrészt viszont az $1,4 \text{ GHz}$ -es sugárzásból számított MIR fluxussűrűségeket és a WISE által mért értékeket összevetve megfigyelhető, hogy a valós méréseken alapuló értékek ($\sim 2 - 11 \text{ mJy}$, átlaga 4 mJy) egy nagyságrenddel kisebbek. A valós MIR adatokhoz képesti rádiótöbblet alapján a halmozásban részt vett források – legalábbis a WISE által detektáltak – rádiósugárzása AGN aktivitásból ered.

³⁰wise2.ipac.caltech.edu/docs/release/allwise/

2.2.9. Összefoglalás

Felhasználva a FIRST felmérés adatait, átlag és medián módszerrel halmoztam 2229 optikailag azonosított, de 1,4 GHz-en nem detektált kvazár „üres” rádiótérképét. A vizsgált AGN-ek vöröseltolódása 4 és 7,6 közötti. A teljes minta halmozott térképére illesztett Gauss-modellkomponens egy felbontatlan pontforrást eredményezett, amelynek korrekció utáni fluxussűrűsége $52 \mu\text{Jy}$. A rádiótérképek középponti pixeljeinek összeadásával egy közepesen rádióhangos AGN populációt találtam, amelynek 1,4 GHz-es karakterisztikus rádióteljesítménye $P_{1,4\text{GHz}} \sim 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$ nagyságrendű. Azzal az egyszerű feltételezéssel élve, hogy a teljes rádiókibocsátás az anyagaxisban zajló csillagkeletkezési folyamatokból származik, megbecsültem a csillagkeletkezési ráta felső határát, ami néhány-szor $1000 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ -nek adódott. Egyrészt ez az érték meglehetősen nagy, másrészt egyedi AGN-ekre vonatkozó szakirodalmi források alapján az általam vizsgált minta rádiósugárzása a galaxisokban végbemenő csillagkeletkezés folyamatának és az AGN-nyalábok kumulatív hatásának lehet az eredménye. Minthogy a FIRST térképek szögfelbontása ($\sim 5''$) nem elegendő a különböző folyamatok közötti különbségtételhez, jövőbeni VLBI és SKA–VLBI mérések alapján eldönthetővé válik a csillagkeletkezés és az AGN aktivitás szerepének megoszlása az észlelt rádiósugárzás keletkezésében. További, érzékenyebb és jobb felbontású, VLASS mérésekre alkalmazott halmozási eljárásokkal pedig a korai Univerzum AGN-jeinek rádiósugárzása a vöröseltolódás függvényében is vizsgálhatóvá válik.

3. A PMN J2134–0419 jelű nagy vöröseltolódású aktív galaxismag rádiójet-sajátmozgásának vizsgálata

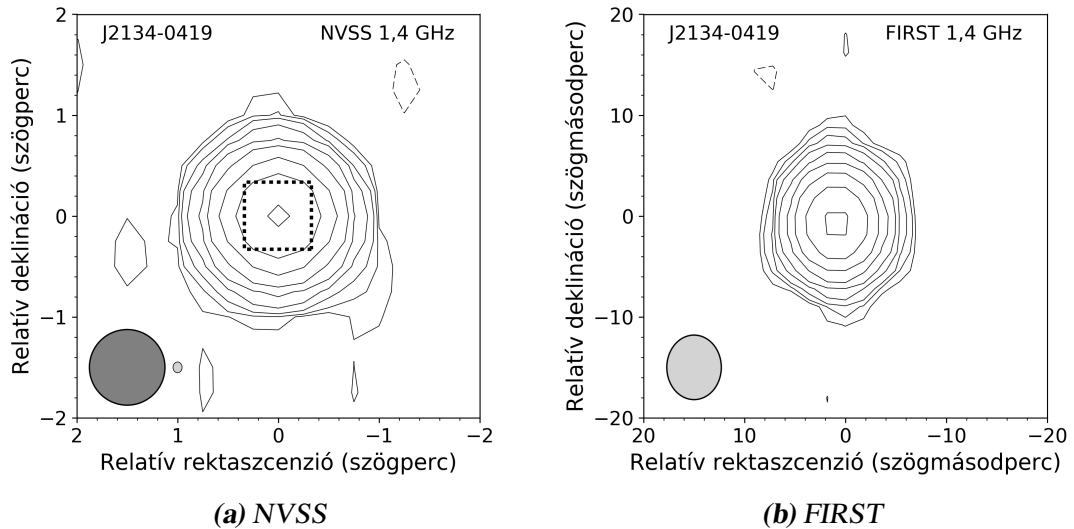
Bevezetés a fejezethez

A mai napig elenyésző azoknak a nagy vöröseltolódású aktív galaxismagoknak a száma, amelyekről rendelkezésünkre áll legalább kettő, egymástól elegendően nagy időkülönbséggel elvégzett VLBI mérés, valamint melyek szerkezete megfelelő a rádiójet-komponensek sajátmozgásának meghatározásához. A tanulmány készítésekor a második legátvolabbi, olyan ezredívmásodperces skálájú szerkezettel rendelkező AGN, amelyben a jet mozgása közvetlen módszerekkel meghatározható, a PMN J2134–0419 jelű kvazár volt (vöröseltolódása $z = 4,33$). A két, egymáshoz képest közel 16 év elteltével elvégzett VLBI észlelés felhasználásával meghatároztam a J2134–0419 rádiónyalábjának sajátmozgását. Az észlelések az EVN antennáival folytak 5 GHz-es frekvencián. A tanulmányban feltérképeztem a kvazár belső 10 parszek skálájú szerkezetének rádiónyalábját, továbbá a fényességeloszlás jellemzésére modellillesztést is végeztem.

A PMN J2134–0419 sajátmozgásának meghatározásáról a *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* folyóiratban jelent meg referált szakcikk (Perger és mtsai, 2018a).

3.1. Jetek sajátmozgásai a korai Univerzumban és a PMN J2134–0419 rádiósugárzása

Napjainkig kevés olyan többfrekvenciás VLBI észlelést végeztek, amelyek az Univerzum legkorábbi időszakában keletkezett aktív galaxismagokat vizsgálták. Ennek számos oka van. Elsősorban az, hogy jelenleg még csak hozzávetőleg 190 rádiósugárzó AGN-t ismerünk $z \gtrsim 4$ vöröseltolódásnál (pl. Perger és mtsai, 2017), és ezek többsége nagyon gyenge (néhány mJy fluxussűrűségű) rádiósugárzást bocsát ki a GHz frekvenciatartományban. Ezáltal nem lehetséges a részletes, nagy felbontású és nagy megbízhatóságú mérések elvégzése a jelenlegi érzékenység által limitált VLBI rendszerekkel. Másodsorban a rádiónyalábok spektruma általában meredek (t.i. a növekvő frekvenciával erősen csökken a fényességük), és a nagy vöröseltolódású tartományokban kevésbé prominens az általuk kibocsátott sugárzás (pl. Gurvits, 2000). A sugárzás „gyengeségét” az okozza, hogy a (források saját vonatkoztatási rendszerében) kibocsátott rádióhullámok frekvenciája (ν_{em}) és az észlelt frekvencia (ν_{obs}) a táguló Univerzumban a $\nu_{em} = (1 + z)\nu_{obs}$ módon függ egymástól. Valóban, ha megfigyeljük azt a 30 db $z \gtrsim 4,5$ vöröseltolódású rádiósugárzó AGN-t, amelyek belső rádiószerkezetéről rendelkezésünkre áll VLBI térképezéssel szerzett információ, azt látjuk, hogy a nagy többségük jellegtelen, kiterjedt szerkezetet nem mutató kompakt forrás, jól beazonosítható nyalábkomponensek nélkül az ezredívmásodperces, vagy néhányszor tíz ezredívmásodperces skálán (pl. Coppejans és mtsai, 2016, és



30. ábra. A J2134–0419 kvazár NVSS (a) és FIRST (b) felmérés során készített 1,4 GHz-es rádiótérképei. Jól látható, hogy a forrás felbontatlan, kompakt szerkezetű szögperc felbontással. A sötétszürke ellipszis az NVSS, míg a világosszürke ellipszisek (mindkét ábrán) a FIRST felbontását jelzik. Az NVSS térkép intenzitásmaximuma $288 \text{ mJy beam}^{-1}$, míg a FIRST esetében a maximális intenzitás $271 \text{ mJy beam}^{-1}$. A szintvonalak mindkét térképen $\pm 1 \text{ mJy beam}^{-1}$ -nél kezdődnek, és kettes faktossal növekednek. Az NVSS térképen szaggatott vonallal jelöltem a FIRST térképen ábrázolt területet.

a benne található hivatkozások). Végül pedig ahhoz, hogy a strukturális változások megfigyelhetőek legyenek ezekben a távoli objektumokban, sokkal hosszabb időnek kell eltelnie két mérés között, hiszen a kozmológiai idődilatació miatt bármely nyalábkomponens sajátmozgása $(1 + z)$ -szer lassabban jelenik meg az észlelő vonatkoztatási rendszerében, mint a forrással együtt mozgó rendszerben.

A tanulmány készítésekor az egyetlen AGN a $z > 4$ vöröseltolódás-tartományban, amelynek rádiójet-sajátmozgását direkt módszerekkel határozták meg, két egymástól megfelelően távoli időpontban végzett mérések alapján, a J1026+2542 jelű blazár volt. A $z = 5,3$ vöröseltolódású AGN-re vonatkozó 5 GHz-es VLBI méréseket több mint 7 év különbséggel végezték el (az észlelő vonatkoztatási rendszerében számítva, Frey és mtsai, 2015). A J1026+2542 rádiónyalábjának ezredívmásodperc-léptékű szerkezetében három jetkomponenst azonosítottak, melyekre a sajátmozgás $\mu \sim 0,1 \text{ mas év}^{-1}$ -nek adódott, ami $\beta_a \sim 10c$ látszó superluminális sebességnek felel meg. Egy további nagy vöröseltolódású blazár, a J1430+4204 ($z = 4,7$) esetében, szintén két időpontban elvégzett, 15 GHz-es VLBI észlelések alapján, indirekt módon határozták meg a sajátmozgás felső határát ($0,03 \text{ mas év}^{-1}$), egy nagy rádiókitörés után feltételezeten előbukkanó (bár nem detektált) jetkomponensre alapozva (Veres és mtsai, 2010).

Ebben a fejezetben a PMN J2134–0419 (a továbbiakban J2134–0419) jelű nagy vöröseltolódású rádiókvazár jetsajátmozgásának vizsgálatáról számolok be. A $z = 4,334 \pm$

0,007³¹ (Péroux és mtsai, 2001) aktív galaxismag parszekes skálájú rádiósugárzását az EVN antennáival észlelték 5 GHz-en, 1999. november 26-án és 2015. október 6-án. A J2134–0419 jelű kvazárról számos archív rádiómérés áll rendelkezésünkre. A Green Bank Northern Sky Survey (White és Becker, 1992), az NVSS³² (Condon és mtsai, 1998) és a FIRST³³ (White és mtsai, 1997) 1,4 GHz-es mérései konzisztens, hibahatáron belül egyező fluxussűrűségeket mutatnak, rendre 290 mJy, 294,4±8,8 mJy és 311,3±18,3 mJy értékeket. Az NVSS és FIRST felmérésekben egyaránt a VLA interferométerrel végezték az észleléseket, és mindkét rádióterképen felbontatlan a kvazár rádiósugárzása (30. ábra). Ez alapján a forrás struktúrája erősen kompaktnak tekinthető, minthogy a FIRST felmérés felbontása (~ 5'') egy nagyságrenddel finomabb, mint az NVSS-é (45''). A fent listázott 1,4 GHz-es mérések alapján nem mutat változékonyságot a forrás. További rádiófluxussűrűség-mérések érhetőek el 365 MHz-en (622 mJy a Texas felmérésben, Douglas és mtsai, 1996), 4,85 GHz-en (221 mJy a Parkes–MIT–NRAO, azaz a PMN felmérésben, Griffith és mtsai, 1995), valamint 20 GHz-en is (82 mJy az Australia Telescope Compact Array mérései alapján, Murphy és mtsai, 2010).

A közelmúltban Cao és mtsai (2017) számoltak be a J2134–0419 nagy felbontású EVN méréséről 1,7 és 5 GHz-en. Ezek közül az 5 GHz-es észlelés a második időpont adatait szolgáltatja az általam elvégzett sajátmozgás-vizsgálathoz. A forrás rádiósugárzása egy egyoldalú mag–jet struktúrát mutat, ami tipikus a blazárok körében. A szerkezet közel kelet–nyugat irányú, és legalább ~ 30 mas távolságig megfigyelhető. A feltételezetten önabszorbeáló „magot” a legfényesebb és legkompaktabb, lapos spektrumú nyugati komponenssel azonosítottam. A J2134–0419 koordinátái (rektaszcenzió 21^h34^m12^s.01074 és deklináció –04°19'09".8610) 0,5 mas-on belül pontosnak tekinthetőek (Cao és mtsai, 2017). Az 1,7 GHz-es EVN észlelés legrövidebb bázisvonalán megfigyelhető magasabb vizibilitás amplitúdó és a FIRST/NVSS felméréshez képesti jelentős fluxussűrűség-hiány az 0,1 – 1 szögmásodperc léptéken további jetstruktúra jelenlétére utal. Az EVN adatokon alapuló sajátmozgás-meghatározás mellett archív, 2004. október 22-én 1,4 és 4,8 GHz-en észlelt VLA adatok feldolgozásával a kvazár szögmásodperc léptékű szerkezetének vizsgálatát is elvégeztem.

A J2134–0419 röntgenforrásként is ismert. A *Swift* röntgenteleszkópjának (X-Ray Telescope – XRT) és ultraibolya/optikai teleszkópjának (UltraViolet Optical Telescope – UVOT) adatait felhasználva Sbarrato és mtsai (2015) modellezték a kvazár szélessávú spektrális energiaeloszlását, megbecsülve a központi fekete lyuk tömegét ($1,8 \times 10^9 M_{\odot}$),

³¹Egy másik munka alapján a kvazár vöröseltolódása $z = 4,346 \pm 0,005$ (Hook és mtsai, 2002), ami hibahatáron belül megegyezik az általam használt értékkel.

³²www.cv.nrao.edu/nvss/

³³sundog.stsci.edu/

továbbá megvizsgálták a jet tulajdonságait is. A modellillesztés alapján arra következtettek, hogy a forrás nyalábjában a Lorentz-faktor értéke $10 \lesssim \Gamma \lesssim 13$ közötti, a látóiránnyal bezárt szög pedig $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 6^\circ$. Ghisellini és mtsai (2015a) is hasonló jetparaméterekről számoltak be a $z > 4$ blazárok kiterjedt struktúráiból származó sugárzás detektálását megcélzó munkájukban.

Az analízis során a standard hideg sötét anyag (Λ CDM) kozmológiai modell paramétereit alkalmaztam: $H_0 = 70 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, $\Omega_M = 0,3$, $\Omega_\Lambda = 0,7$, amelyekkel a J2134–0419 vöröseltolódásánál egy ezredívmásodperc szög méret 6,72 pc lineáris távolságnak felel meg, a kvazár luminozitási távolsága 39,4 Gpc, valamint 1 mas év^{-1} sajátmozgás 116,8 c látszó transzverzális sebességgel egyenértékű (Wright, 2006).

3.2. Az Európai VLBI Hálózat mérései

A J2134–0419 első VLBI észlelését az EVN-nel végezték 1999. november 26-án, egy nagy vöröseltolódású kvazárminta megfigyelésének részeként (projektkód ES034B, vezető kutató: I.A.G. Snellen). A mérésben 9 rádiótávcső vett részt: Effelsberg (Németország), Jodrell Bank Mk2 (Egyesült Királyság), Medicina és Noto (Olaszország), Toruń (Lengyelország), Onsala (Svédország), Hartebeesthoek (Dél-afrikai Köztársaság), Seszhan (Kína), és a westerborki rádiótávcső-hálózat (Hollandia) 13 antennája. A J2134–0419 teljes nettó észlelési ideje 3,3 óra volt. A mérés adatrátája 256 Mbit s^{-1} volt, 4 frekvenciacsatornán (IF-en) végezték, jobb és bal cirkuláris polarizációban, 32 MHz-es sávszélességgel, melyek mindegyikében 16 spektrális csatorna található. A korrelálást az EVN adatfeldolgozó központjában (Joint Institute for VLBI ERIC – JIVE) végezték el, Dwingeloo-ban (Hollandia). A korrelátor integrációs ideje 4 másodperc volt.

A második észlelést 2015. október 6-án végezték (projektkód EC055B, vezető kutató: H.-M. Cao, Cao és mtsai, 2017). A résztvevő EVN állomások megegyeznek a korábbi mérés teleszkópjaival, azzal a kivétellel, hogy az új mérésekben Effelsberg nem vett részt, illetve a westerborki hálózatnak csak egy antennáját vonták be. A kvazár nettó észlelési ideje 2,5 óra volt, a megfigyeléseket valós idejű e-VLBI módszerrel végezték. Az adatrátája 1024 Mbit s^{-1} volt, polarizációnként 8 IF-fel és 128 MHz-es teljes sávszélességgel. Az azonos észlelési frekvenciának és a közel megegyező rádióteleszkóp-hálózatnak köszönhetően a két mérés felbontása nagyon hasonló, vagyis a clean térkép előállításához felhasznált Gauss-modell (clean-nyaláb) mérete és alakja közel megegyezik. Ez ideális lehetőséget teremt a forrás szerkezetében megfigyelhető változások vizsgálatára.

A második időpont mérésének kalibrációját és az adatok analízisét Cao és mtsai (2017) végezték el, és írták le részletesen. Az 1999-es kísérletből származó adatokat az AIPS (Gre-

isen, 2003) programcsomaggal kalibráltam a standard eljárást követve (1.3. fejezet). A kalibrált vizibilitás adatokat a DIFMAP programba (Shepherd, 1997) exportáltam, majd a teljes adatsort 30 másodperces intervallumokra átlagolva a kilógó adatpontokat eltávolítottam, bázisvonalak szerint. A Toruńban készült méréseket a továbbiakban elhagytam az amplitúdó kalibrációjának problémái miatt. Az önkalibrációt és a modellillesztést a 1.3. fejezetben leírt módon végeztem el.

3.3. A Very Large Array mérései

A J2134–0419 kvazárról a VLA 2004. október 22-én 1,4 és 4,8 GHz frekvencián végzett méréseket (projektkód: AC755C). A nyers mérési adatokat az NRAO archívumából töltöttem le³⁴. A kvazár VLA észlelései a hálózat legnagyobb kiterjedésű, legnagyobb szögfelbontást biztosító (A) konfigurációjában zajlottak. A forráson töltött nettó észlelési idő 38 és 12 perc volt rendre az 1,4 GHz-es és 4,8 GHz-es mérésekben, mindkét esetben 100 MHz-es teljes sáv szélességgel. A fázisokat és amplitúdókat az AIPS programcsomag felhasználásával kalibráltam a VLA adatokra előírt standard eljárás alapján³⁵, elsődleges fluxussűrűségkalibrátor-forrásként a 3C 48-at használtam. A térképezést és modellillesztést a VLBI mérésekkel megegyező módon a DIFMAPben végeztem.

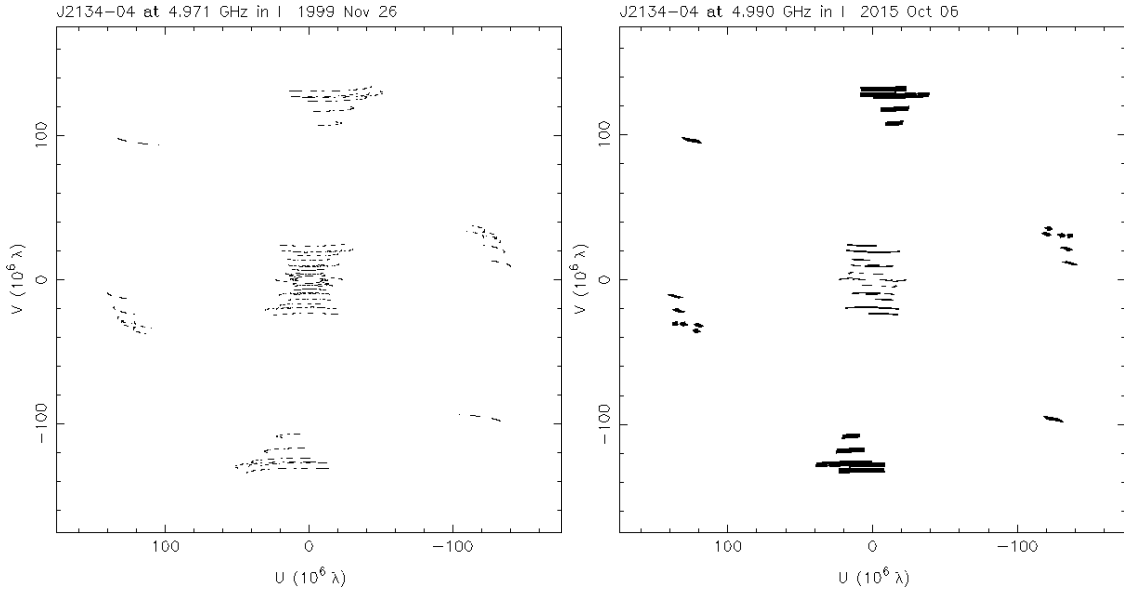
3.4. Eredmények

EVN adatok – a kvazár ezredívmásodperces szerkezete

A J2134–0419 természetes súlyozású EVN térképei a 32. ábrán láthatók. A relatív koordinátákat a csúcspénnyességre központosítva ábrázoltam. A két kép legegyszerűbb összehasonlítása érdekében azonos clean-nyalábot használtam. Minthogy a rádiótávcső-hálózatok és az észlelési idők hasonlóak voltak, továbbá a csillagidőben mért mérési intervallumok is egybeestek, így az (u, v) lefedettség is nagyon hasonló az 1999-es és a 2015-ös mérésekben (31. ábra). Megjegyzendő, hogy a 2015-ös képet kisebb clean-nyalábbal létrehozva a kvazár szerkezete és a térképet jellemző mennyiségek (csúcspénnyesség, zajszint) megfeleltethetők a mérés első publikációjában közölt értékekkel (Cao és mtsai, 2017, 2b ábrája). A 32. ábrán bemutatott térképeken egyértelműen beazonosítható két hangsúlyos szerkezeti egység: a nyugati oldalon található „mag” és a tőle keletre található „jet” komponens. Mindkét mérés vizibilitásadataira körszimmetrikus Gauss-modelleket illesztettem (pl. Pearson, 1995). A 32. ábrán továbbá egy harmadik strukturális elem jelenléte is sejthető kb. 30 mas távolságra a „magtól”. Ezt a legtávolabbi komponens

³⁴archive.nrao.edu

³⁵www.aips.nrao.edu/cook.html



(a) Az 1999-es mérés (u, v) lefedettsége. (b) A 2015-ös mérés (u, v) lefedettsége.

31. ábra. A J2134–0419 (u, v) lefedettsége a két EVN-mérés során.

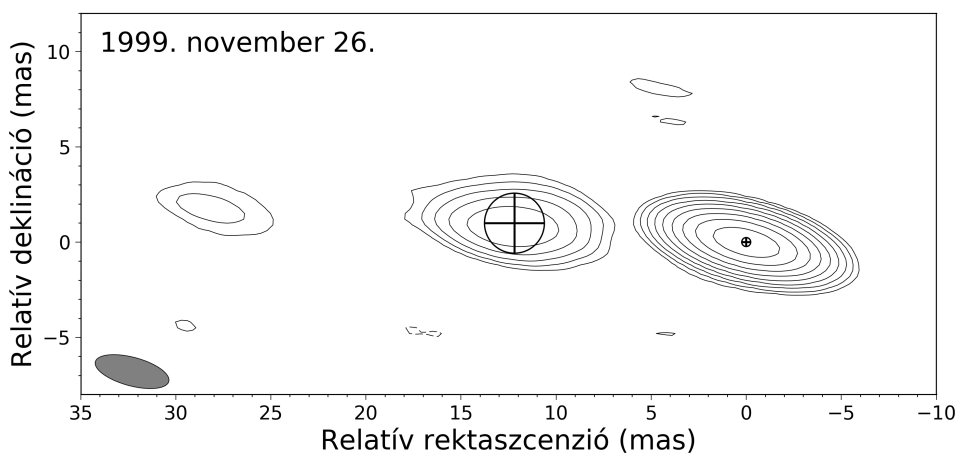
is megkíséreltem Gauss-moddal illeszteni, azonban a mögötte rejlő sugárzás diffúz és gyenge jellege miatt ez meghiúsult. A harmadik komponens hozzáadásának szükségességét az illesztés jóságát jellemző redukált χ^2 értékek vizsgálatával ellenőriztem: ezek nem csökkentek jelentősen az új komponens hozzáadásával, így azt elvetettem.

A modellparaméterek felhasználásával jellemezhető a nyaláb komponenseinek relatív pozíciójában megfigyelhető változás 1999 és 2015 között. Az illesztett modellkomponensek paramétereit az 5. táblázatban listáztam. A hibaszámítást a Lee és mtsai (2008) által tárgyalt módon végeztem el, további 5% hibát felszámolva az fluxussűrűségek amplitúdójához a VLBI amplitúdókalibráció bizonytalansága miatt. Megjegyzendő, hogy az 5. táblázat második mérési időpontra vonatkozó értékei hibahatáron belül megegyeznek a Cao és mtsai (2017) által ugyanezen az EVN mérések elemzésével kapott eredményekkel.

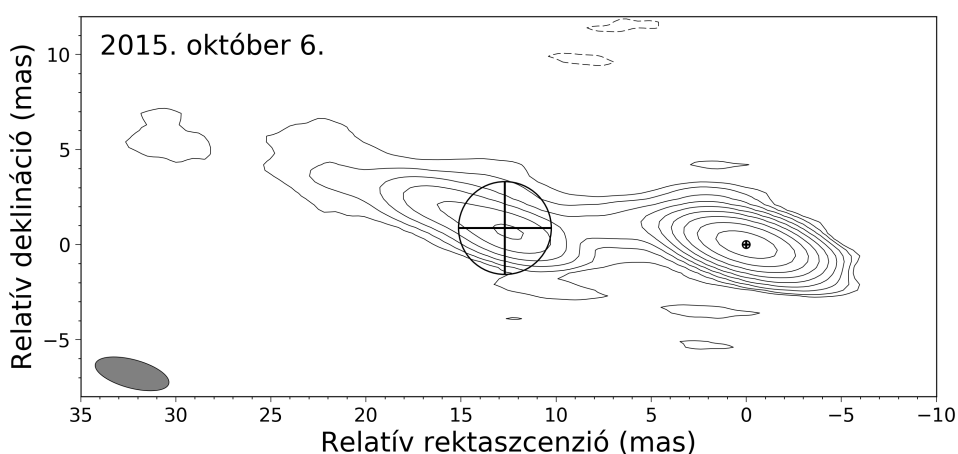
5. táblázat. A J2134–0419 térkép- és modellparaméterei 5 GHz-en

Komponens		P (mJy beam ⁻¹)	S (mJy)	ϑ (mas)	R (mas)	ϕ (°)
1999	mag	115,3±3,8	121,2±5,5	0,47±0,02	0	0
	jet	9,0±1,1	14,9±2,2	3,15±0,38	12,19±0,19	85,3±0,9
2015	mag	144,3±5,3	159,2±11,2	0,41±0,02	0	0
	jet	9,8±1,4	26,3±4,2	4,59±0,65	12,72±0,32	86,1±1,5

1. oszlop – az EVN mérés időpontja, 2. oszlop – a nyalábkomponens neve, 3. oszlop – a rádiótérkép csúcsintenzitása, 4. oszlop – a modellkomponens fluxussűrűsége, 5. oszlop – a modellkomponens mérete (félértékszélesség), 6. oszlop – a modell radiális szögtávolsága a „mag” komponenstől, 7. oszlop – a modell „mag” komponensre vonatkoztatott pozíciószöge (északtól kelet felé mérve).



(a) Az 1999-es EVN mérés térképe.

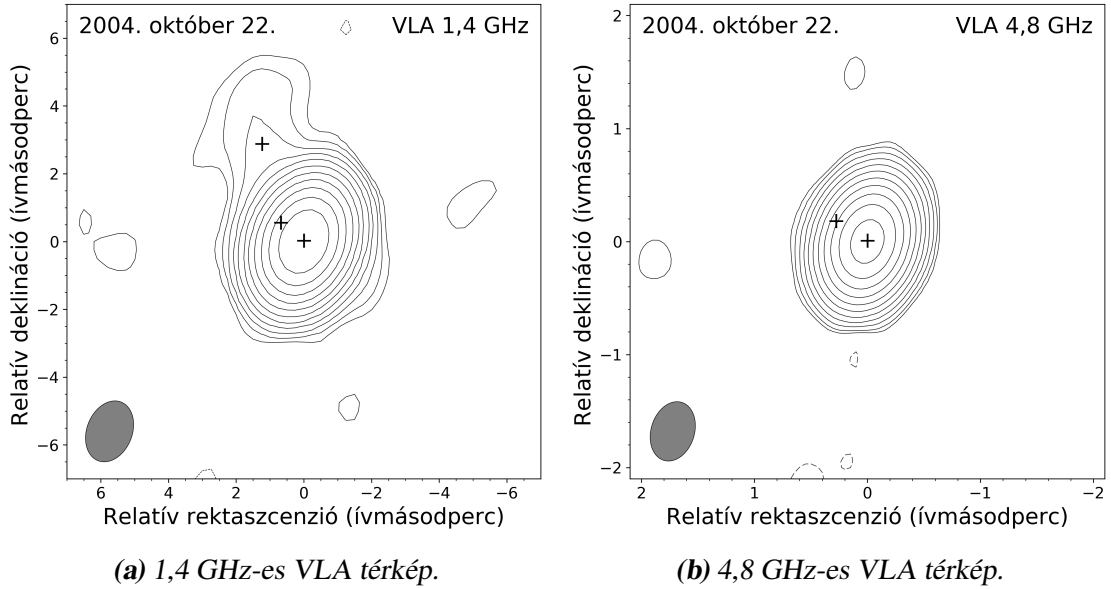


(b) A 2015-ös EVN mérés térképe.

32. ábra. A J2134–0419 kvazár természetes súlyozású 5 GHz-es clean térképei. Az elliptikus Gauss-függvény alakú clean-nyalábot egységesen $1,5 \text{ mas} \times 4,0 \text{ mas}$ (félértékszélesség) méretűre állítottam (75° -os pozíciószöggel, északról kelet felé irányban mérve), és a bal alsó sarokban lévő ellipszisszel szemléltetem. A legalsó kontúrvonalak az egyes képek rms zajszintjének ± 3 -szorosánál kezdődnek (az első és a második mérésre rendre $\pm 0,26 \text{ mJy beam}^{-1}$ és $\pm 0,38 \text{ mJy beam}^{-1}$). A további szintvonalak kettes faktorial növekednek. A csúcshintenzitás $115,3 \text{ mJy beam}^{-1}$ és $144,3 \text{ mJy beam}^{-1}$, rendre az 1999-es és a 2015-ös mérés adataira. Az illetékt modellkomponensek pozícióját és méretét (félértékszélességét) a fekete körökbe rajzolt keresztek szemléltetik.

VLA adatok – a kvazár ívmásodperces szerkezete

A kvazár természetes súlyozással készített 1,4 és 4,8 GHz-es rádiótérképei a 33. ábrán láthatók. Az 1,4 GHz-es térkép egy gyenge, nyalábjellegű szerkezeti elemre utal ~ 5 szög-másodpercig kiterjedően a „mag” észak-északkeleti oldalán. A 4,8 GHz-es térképen egy kompakt, gyakorlatilag felbontatlan rádióforrást láthatunk. A VLA vizibilitásadatokra illesztett körszimmetrikus modellkomponensek megerősítik a térképeken látható szerkezet jellegét, paramétereiket a 6. táblázatban részletezem.



33. ábra. A J2134–0419 kvazár természetes súlyozású 1,4 (a) és 4,8 GHz-es (b) VLA térképei. Az első kontúrokat mindkét térképen az rms zaj ± 3 -szorosánál ábrázoltam (rendre $\pm 0,14 \text{ mJy beam}^{-1}$, és $\pm 0,15 \text{ mJy beam}^{-1}$), a további színvonalak kettes faktor szerint növekednek. A csúcsfényességek az 1,4 és 4,8 GHz-es észlelésekre rendre $309,2 \text{ mJy beam}^{-1}$ és $224,1 \text{ mJy beam}^{-1}$. A *clean*-nyaláb $1',3 \times 1',9$ (-22° -os pozíciószöggel) és $0',4 \times 0',5$ (-17° pozíciószöggel). Az illesztett modellkomponensek pozícióját kereszt jelzi.

6. táblázat. A J2134–0419 kvazár VLA térképének és modellillesztésének paraméterei.

ν_{obs} (GHz)	Komponens	P (mJy beam^{-1})	S (mJy)	ϑ (mas)	R (mas)	ϕ ($^\circ$)
1,4	1	$309,2 \pm 6,8$	$308,7 \pm 9,6$	< 20	0	0
	2	$1,6 \pm 0,5$	$1,6 \pm 0,7$	< 270	864 ± 31	$52,2 \pm 2,0$
	3	$0,7 \pm 0,4$	$1,8 \pm 1,0$	2035 ± 1065	2856 ± 533	$23,4 \pm 9,7$
4,8	1	$224,1 \pm 6,2$	$225,8 \pm 8,8$	$39,2 \pm 1,1$	0	0
	2	$0,7 \pm 0,4$	$0,6 \pm 0,5$	< 130	$326,6 \pm 3,0$	$57,8 \pm 0,5$

1. oszlop – az észlelés frekvenciája, 2. oszlop – az illesztett modellkomponens száma, 3. oszlop – a rádiótérkép csúcsfényessége, 4. oszlop – az illesztett modell fluxussűrűsége, 5. oszlop – a modell mérete (félértékszélesség) vagy a legkisebb felbontható szögátmérőnek megfelelő felső határ, 6. oszlop – a „mag” komponensről mért szögtávolság, 7. oszlop – a „mag” komponensre vonatkoztatott pozíciószög.

3.5. Diszkusszió

A kvazár rádiószerkezete

Mindkét EVN észlelés adataiban egyértelmű jelei vannak a nyaláb folytatásának a „magtól” számítva $\sim 30 \text{ mas}$ -ig (ami megfelel 84 pc vetített távolságnak az égbolt síkjában, 32. ábra), bár ezek a távoli jetkomponensek alacsony felületi fényességgel rendelkeznek. Míg az 1999-es térképen a két fő komponens jól elkülönül, a 2015-ös kép egy sokkal inkább folytonosan kiáramló nyalábot mutat. A modellillesztés (5. táblázat) alapján szintén azt

a következtetést vontam le, hogy a „jet” komponens valamelyest kiterjedtebb lett az 1999 és 2015 közötti időszakban.

Nagyobb skálán megvizsgálva a szerkezetet, a VLA által végzett mérésekből előállított képek (33. ábra) és a vizibilitásadatokra illesztett modellek (6. táblázat) a jet ívmásodperces skálán való folytatását mutatják ~ 5 szögmásodperc távolságig, habár a pozíciószögek alapján a jet iránya jelentősen megváltozik, elfordulva az északi irány felé ($\sim 60^\circ$). Az ehhez hasonló belső (mas) és külső (ívmásodperc) nyaláb közötti eltérést a jet helikális geometriájának tulajdoníthatjuk, ami a blazárok esetén gyakorta előforduló sajátosság (pl. Conway és Murphy, 1993; Kharb és mtsai, 2010; Zhao és mtsai, 2011; Singal, 2016).

Az EVN két időpontban végzett észlelései során mért, 30%-kal eltérő fluxussűrűségek (5. táblázat) egyértelműen a forrás változékonyságát mutatják. A VLBI komponensek összegzett fluxussűrűség-értéke (136,1 mJy 1999-ben és 185,5 mJy 2015-ben) alacsonyabb, mint a teljes fluxussűrűség akár a PMN felmérésben (221 mJy, Griffith és mtsai, 1995), akár az általam feldolgozott VLA mérésekben ($224,8 \pm 6,2$ mJy, 6. táblázat), az 5 GHz-es frekvenciasávban. Ez a különbség köthető a változékonysághoz, azonban valószínűbb, hogy a 300 mas alatti léptéken a VLBI bázisvonalak részben felbontják a jetszerkezet sugárzását (ami a VLA térképeken felbontatlan). A VLA által mért 1,4 és 4,8 GHz-es fluxussűrűségek (6. táblázat) hibahatáron belül rendre megegyeznek a FIRST és a PMN felmérések által detektált értékekkel.

A jet sajátmozgása 1999 és 2015 között

A fényességeloszlásra illesztett modellek alapján meghatározott „jet” és „mag” komponensek közötti relatív távolságok alapján megbecsültem a „jet” komponens sajátmozgását a két mérés között eltelt 5793 nap (15,86 év) alatt. A $0,56 \pm 0,37$ mas szögtávolságnyi változás megfelel $\mu = 0,035 \pm 0,023$ mas év^{-1} sajátmozgásnak. A becslést két időpont mérései alapján végeztem, ezért megfontoltan kezelendő a kapott érték, azonban ez az eredmény még így is szinte egyedülálló a $z > 4$ vöröseltolódás-tartományban. A „jet” komponens sajátmozgása megfelel $\beta_a = (4,1 \pm 2,7) c$ szuperluminális látszó sebességnek, ami jó egyezést mutat a jelenleg elfogadott kozmológiai modellek (Vermeulen és Cohen, 1994; Kellermann és mtsai, 1999) által jósolt értékekkel, továbbá a kis vöröseltolódású AGN mintákon végzett VLBI méréseken alapuló, nagy vöröseltolódásra extrapolált értékekkel (Kellermann és mtsai, 2004; Britzen és mtsai, 2008; Hovatta és mtsai, 2009; Lister és mtsai, 2009). A kapott eredmény összevethető a többi ismert $z > 4$ vöröseltolódású kvazár esetében kapott sajátmozgásértékekkel ($\lesssim 0.2$ mas év^{-1} , Veres és mtsai, 2010; Frey és mtsai, 2015; An és mtsai, 2020; Zhang és mtsai, 2020). A J2134–0419 esetében

meghatározott sajátmozgás a kozmológiai modell által meghatározott felső határ burkolója alatt található a $\mu - z$ diagramon (Frey és mtsai 2015; valamint a 9. ábra).

A Lorentz-faktor és a jet inklinációja

A relativisztikus nyalábolásnak a J2134–0419 rádiójetjének legbelső régiójára gyakorolt hatását vizsgálándó, meghatároztam a „mag” komponens fényességi hőmérsékletét mindkét időpontra. Ehhez az 5. táblázatban listázott modellparamétereket az alábbi összefüggés szerint használtam fel (pl. Condon és mtsai, 1982):

$$T_b = 1.22 \times 10^{12} (1 + z) \frac{S}{\vartheta^2 \nu^2} \text{ K}, \quad (11)$$

ahol S a fluxussűrűség (Jy), ϑ a körszimmetrikus Gauss-modellkomponens szögátmérője (félérték szélessége, mas), és ν az észlelési frekvencia (GHz). A meghatározott látszó fényességi hőmérsékletek $T_{b,1999} = (1,5 \pm 0,2) \times 10^{11}$ K és $T_{b,2015} = (2,5 \pm 0,4) \times 10^{11}$ K, rendre az 1999-es és 2015-ös mérések esetében, melyekből a Doppler-faktorok meghatározhatók a következő egyenlettel:

$$\delta = \frac{T_b}{T_{b,int}}. \quad (12)$$

Itt $T_{b,int}$ a forrás saját (valós) fényességi hőmérséklete. A Doppler-faktorra alsó és felső határokat állapítottam meg a $T_{b,int} \approx 5 \times 10^{10}$ K (Readhead, 1994) és $T_{b,int} \approx 3 \times 10^{10}$ K (Homan és mtsai, 2006) értékekkel. Előbbi megfelel annak az ekvipartíciós állapotnak, amikor a sugárzó részecskék energiasűrűsége egyensúlyban van a mágneses térével, míg az utóbbi karakterisztikus értéket AGN-jetek parszek skálájú szerkezetének VLBI méréseivel határozták meg. Az ezeknek megfelelő Doppler-faktorok $3 \lesssim \delta_{1999} \lesssim 5$ és $5 \lesssim \delta_{2015} \lesssim 8,3$.

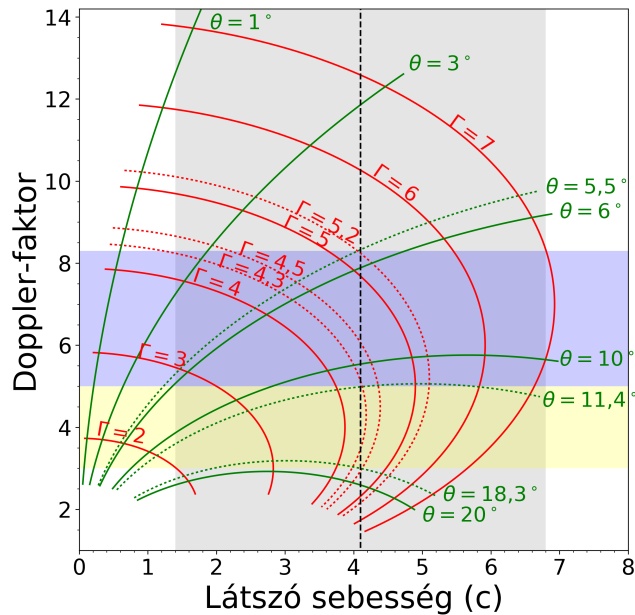
A jet paramétereit, vagyis a Γ Lorentz-faktort és a θ inklinációt az alábbi egyenletek felhasználásával számítottam ki (Urry és Padovani 1995 alapján):

$$\Gamma = \frac{\beta_a^2 + \delta^2 + 1}{2\delta} \quad (13)$$

$$\tan \theta = \frac{2\beta_a}{\beta_a^2 + \delta^2 - 1}. \quad (14)$$

A Doppler-faktorok és a látszó sebességek (a hibahatárokat figyelembe véve) a Lorentz-faktort a $2 \lesssim \Gamma \lesssim 7$ közötti értékre korlátozzák, míg a nyaláb az észlelőre vonatkoztatott látóiránnyal bezárt szögének értékére a $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 20^\circ$ határokat engedik meg. A $\beta_a = 4,1$ c látszó sebességet felhasználva a Lorentz-faktor és az inklináció értékei $4,3 \leq \Gamma_{1999} \leq 4,5$ és $11,4 \leq \theta_{1999} \leq 18,3$, továbbá $4,3 \leq \Gamma_{2015} \leq 5,2$ és $5,5 \leq \theta_{2015} \leq 11,4$, rendre az 1999-es

és 2015-ös mérések esetében. A J2134–0419 parszekes kiterjedésű rádiónyalábjának a méréseim alapján lehetséges paramétereit a 34. ábrán szemléltetem.



34. ábra. A J2134–0419-re meghatározott jetparaméterek. A különböző Lorentz-faktor értékeket vörös, az inklinációkat zöld színnel jelöltem. A pontozott vonalak a saját számításaimnak megfelelő határértékeket mutatják. A sárga és kék területek a Doppler-faktorok megengedett tartományát jelölik, a fekete szaggatott vonal és szürke terület a meghatározott látszó sebességet és annak hibáját ábrázolják.

Az általam megbecsült, nagyfelbontású rádióinterferométeres méréseken alapuló Lorentz-faktorok valamelyest alacsonyabbak, mint a Sbarrato és mtsai (2015) által SED modellezéssel meghatározott $10 \leq \Gamma \leq 13$ értékek. Az eltérés a különböző módszerek bizonytalanságából vagy az időbeli változékonyságból eredhet, továbbá abból, hogy a rádió- (VLBI) és röntgenmérések az AGN-jet más régióit tárták fel³⁶. Előfordulhat, hogy a legbelső VLBI „mag” komponens a korlátozott felbontás miatt összeolvadt egy felbonthatatlan jetkomponenssel, ezáltal az illesztett modell félértékszélessége nagyobb, mint a valódi „mag” mérete (lásd pl. Natarajan és mtsai, 2017). Bármelyik magyarázat is áll a háttérben, az általam meghatározott Lorentz-faktorok nem térnek el jelentősen a Volonteri és mtsai (2011) által $z > 3$ vöröseltolódású kvazárookra megállapított általános $5 \lesssim \Gamma \lesssim 15$ tartománytól.

³⁶A röntgenemisszió származhat az akkréciós korong koronasugárzásából, valamint a belső és kpc-es AGN-jet, továbbá a lebenyek sugárzása is fontos hozzájárulást jelenthet.

3.6. Összefoglalás és következtetések

Elemelve két, egymástól 15,86 év különbséggel, 1999. november 26-án és 2015. október 6-án (Cao és mtsai, 2017) elvégzett VLBI észlelés adatait, meghatároztam a J2134–0419 nagy vöröseltolódású kvazár rádiónyalábjának sajátmozgását. A kozmológiai idődilatació figyelembe vételével a forrás vonatkoztatási rendszerében 2,97 év telt el. A rádióintenzitás eloszlásának körszimmetrikus Gauss-modellkomponensekkel történő illesztésével modelleztem a kvazár 10 mas léptékű kompakt rádiószerkezetét (5. táblázat), aminek eredményeképpen $\mu = 0,035 \pm 0,023$ mas év^{-1} sajátmozgást állapítottam meg a rádiónyaláb külső komponensében. Ez megfeleltethető $\beta_a = 4,1 \pm 2,7$ c látszó szuperluminális sebességnek. A „jet” komponens sajátmozgása kisebb, mint az alacsonyabb vöröseltolódású blazárok esetén mért tipikus értékek, jó egyezésben a kozmológiai modellek elvárásával a távoli Univerzumra, továbbá konzisztens más, nagy vöröseltolódású AGN-ekkel, mivel a $\mu - z$ diagram burkolója alatt található (Frey és mtsai, 2015, és 9. ábra).

A mérésen alapuló fényességi hőmérsékletekből kiszámítottam a Doppler-erősítésre vonatkozó arányszámokat (Doppler-faktor), valamint megbecsültem a nyaláb Lorentz-faktorának és inklinációjának lehetséges tartományait. A mennyiségek értékei a $2 \lesssim \Gamma \lesssim 7$ és $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 20^\circ$ határok közöttiek (a határértékek egymástól nem függetlenek). A VLBI-mérés alapján meghatározott Lorentz-faktor valamelyest alacsonyabb, a látóiránnyal bezárt szög pedig magasabb a Sbarrato és mtsai (2015) által elvégzett SED modellezés eredményeképpen kapott értékeknél, mindazonáltal mindkét módszer a blazárok közé sorolja a J2134–0419-et, minthogy a meghatározott inklinációértékek eleget tesznek a blazárok $\theta < 1/\Gamma$ definíciójának (pl. Ghisellini és Sbarrato, 2016). Az eredményeim további finomítása és pontosítása újabb, nagy időkülönbséggel elvégzett VLBI mérésekkel valósítható meg. Az a tény, hogy az 1999-es és 2015-ös EVN észlelések összehasonlítása alapján a kvazár egyértelműen fluxussűrűség-változékonyságot mutatott, a forrás blazár mivoltának további bizonyítékát jelenti.

A szögmásodperc skálájú rádiószerkezet vizsgálata a korábban nem leközölt, a VLA „A” konfigurációval készült adatok alapján (1,4 és 4,8 GHz-en) azt mutatja, hogy a kvazár szerkezetét egy központi kompakt elem uralja, továbbá megfigyelhető egy gyengébb, ~ 5 szögmásodperces távolságig kiterjedő emisszió (33a. ábra). Az illesztett modellek alapján megállapítottam, hogy az EVN és VLA térképeken megfigyelhető jetek iránya eltérő, és ez a $\sim 60^\circ$ elfordulás a mas és szögmásodperc léptékek között összhangban van a blazárok anyagnyalábjaira gyakran jellemző helikális szerkezettel. A két méret-tartomány közötti hiányzó fluxussűrűség a ~ 100 és 300 mas méretek közötti további jetkomponensekre utal, amelyek jelenléte igazolható lenne közepesen finom felbontású

interferométeres térképezéssel, pl. az e-MERLIN vagy a jövőbeli SKA1-mid hálózatok segítségével.

A nagy vöröseltolódású kvazárok rádiónyalábjainak átfogó statisztikai vizsgálatához sokkal kiterjedtebb mintára van szükség. E fejezet írásakor (beleszámítva a J2134–0419-et) négy $z > 4$ kvazárról áll rendelkezésünkre két vagy több időpontban elvégzett VLBI méréseken alapuló sajátmozgás-analízis (Frey és mtsai, 2015; Perger és mtsai, 2018a; An és mtsai, 2020; Zhang és mtsai, 2020). A jetsajátmozgások vöröseltolódás szerinti függésének vizsgálata kellőképpen nagy minta segítségével, nagy vöröseltolódás mellett ($z > 3 - 4$) a kozmológiai modellek finomításához és igazolásához is hozzájárulna (Kellermann és mtsai, 1999). Másrészt, a nagy vöröseltolódású kvazárok kiterjedt mintája a Doppler-nyalábolást nem mutató, ám rádiójettel rendelkező kvazárok hiányának problémájára is választ adhat (Volonteri és mtsai, 2011; Ghisellini és mtsai, 2015a; Ghisellini és Sbarrato, 2016).

A kis sebességű sajátmozgások megbízható detektálásához a nagy vöröseltolódású AGN-jetek VLBI technikával való hosszadalmas monitorozása szükséges. Az általam, valamint a Frey és mtsai (2015), An és mtsai (2020) és Zhang és mtsai (2020) által meghatározott értékek mind az elmúlt néhány év eredményei, minthogy a VLBI méréseken alapuló rádiójet-sajátmozgások meghatározása a legnagyobb vöröseltolódások mellett csupán a közelmúltban vált lehetővé. Ezeknek a különleges és mindmáig igen ritka kvazároknak a vizsgálata bár jelentős, új eredmény, elengedhetetlen, hogy további AGN-ek esetén is meghatározzuk a jetek fizikai paramétereit. Az elmúlt évtizedek során feltérképezett néhány tíz kvazár (pl. Coppejans és mtsai, 2016 mintája) parszek skálájú szerkezetének feltárásával a rádiónyaláb-komponensek pozícióinak változása követhetővé válik új interferométeres mérések révén. Ezen ismert ezredívmásodperces szerkezetű kvazárok jetjeinek folytatódó vizsgálatával a korai Univerzum rádiósugárzó aktív galaxismagjait jellemző fizikai tulajdonságok statisztikailag is elemezhetővé válnak, segítségükkel a kozmológiai modellek jóslatai ellenőrizhetőek lesznek. A sajátmozgások meghatározásának pontossága emellett több jetkomponens detektálásával és modellezésével jelentős mértékben növelhető. Mint ahogy a J2134–0419 esetében is bemutattam, a „magtól” távoli külső komponens fluxussűrűsége bár mindkét mérési időpontban elérte a detektálási határt, nem haladta meg jelentősen a zajszintet, így alkalmatlan volt a modellillesztési eljárásra. A jövőbeni új interferométerek (pl. a SKA1-mid) nagyobb érzékenységgű teleszkópjainak köszönhetően a kevésbé fényes rádiónyaláboknak, valamint a J2134–0419-hez hasonló rádiójetek halványabb komponenseinek detektálása is megvalósíthatóvá válik, azonban a megbízható sajátmozgás-detektáláshoz elengedhetetlen hosszú időbázis miatt akár évtizedek is szükségesek lesznek a minta számottevő bővítéséhez.

4. A PMN J0909+0354 jelű röntgensugárzó rádiókvazár ezredívmásodperc felbontású térképezése

Bevezetés a fejezethez

A PMN J0909+0354 $z = 3,288$ vöröseltolódású kvazár *Chandra* űrtávcsővel végzett mérései komplex szerkezetet fedtek fel a forrás kpc-es röntgensugárzásában. A hasonló felbontású VLA rádiótérképeken is megfigyelhető központi mag és forrópont mellett egy további, a középponttól $\sim 6''$ -cel északkeletre található jetkomponens jelenléte is sejthető. Az archív, pc skálájú tartományokat bemutató, 5 GHz-es globális VLBI térkép szintén az észak–északkeleti forrópont irányába mutató szerkezetre utal, azonban a VLBI mérés észak–déli irányú alacsonyabb felbontása miatt nem erősíthető meg maradéktalanul a rádiónyaláb iránya. A pc léptékű szerkezet vizsgálatához és a jet irányának meghatározásához új EVN méréseket terveztem és végeztem ugyanezen a frekvencián.

A PMN J0909+0354 kvazár rádió- és röntgenszerkezetének vizsgálatáról D. Schwartz vezetésével és saját második szerzőségemmel, egy nemzetközi kutatócsoport közreműködésével folyamatban van a szakcikk publikációra való előkészítése.

4.1. Röntgensugárzás aktív galaxismagokban, a rádió- és röntgenmisszió kapcsolata

Az észlelési frekvencia növelésével az AGN-ek energiakibocsátó régiójához (az akkréciós koronghoz és a jet kialakulásának helyéhez) egyre közelebbi területek sugárzását detektáljuk. Az aktív galaxismagok röntgenkontinuum-sugárzása jellemzően a 0,1–300 keV energiatartományban figyelhető meg. Az akkréciós korongban keletkező, alacsonyabb energiájú (lágyabb, < 2 keV) fotonok relativisztikus elektronokon történő inverz Compton-szóródás következtében számottevően nagyobb energiákra tesznek szert (pl. Haardt és Maraschi, 1993). Minthogy a korong hőmérséklete és az elektronok energiaeloszlása véges, a hatványfüggvény alakú Compton-spektrum néhány száz keV energianál exponenciálisan lecsökken (pl. Haardt és Maraschi, 1993). A nyalábok relativisztikus részecskéi által létrehozott kemény (> 2 keV) röntgensugárzást kialakító folyamat természete vitatott, jelenleg két vezető elméletet tartanak számon. Az egyik hipotézis szerint a röntgenmisszió a jetek által kibocsátott szinkrotronsugárzás fotonjainak a nyaláb elektronjaiban történő inverz Compton-szóródása során jön létre (szinkrotron ön-Compton folyamat – synchrotron self-Compton process, SSC modell, Königl, 1981). A másik elmélet a röntgenkibocsátást a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás (cosmic microwave background – CMB) fotonjainak az AGN-nyaláb elektronjain végbemenő inverz Compton-

szóródásához köti (IC/CMB modell, Tavecchio és mtsai, 2000). A kemény röntgensugárzást leíró hatványfüggvény fotonindexe³⁷ jellemzően a $\gamma \approx 2$ érték körül mozog (az értékek szórása $\sim 0,15$, pl. Liu és mtsai, 2016).

A felfűtött akkréciós korong elnyeli a jetben keletkező kemény röntgenfotonokat, aminek eredményeképpen széles emissziós és abszorpciós vonalak (pl. a vas fluoreszcens vonalai) is létrejönnek (pl. Fabian és mtsai, 2000; Risaliti és Elvis, 2004). A korong és egyéb, a rendszert körülölelő közegek (pl. a tórusz) továbbá reprocesszálják a kemény röntgenfotonokat: ez az ún. reflexiós sugárzás a markáns $\sim 6,4$ keV-os vas K_{α} vonal-emisszióban, illetve a kontinuumra ráakódott többletsugárzás formájában („Compton-púp”) mutatkozik meg (pl. Ghisellini és mtsai, 1994; Reynolds, 1999; Risaliti és Elvis, 2004; Turner és Miller, 2009). A geometriától, kémiai összetételtől és az AGN-nek az észlelő látóirányára vonatkoztatott orientációjától függően a többletsugárzás alakja és erőssége eltérő, maximuma általában a $\sim 20 - 30$ keV energiákon figyelhető meg (pl. Ghisellini és mtsai, 1994; Matt és mtsai, 1997). Számos esetben detektáltak a kemény röntgenkontinuumra ráakódott < 2 keV-os lágy röntgentöbbletet, melynek eredete nem teljesen tisztázott. A lágy röntgenfotonok eredetét a koronában lezajló másodlagos Compton-folyamatok (pl. Dewangan és mtsai, 2007; Petrucci és mtsai, 2018), az akkréciós korong ionizált részecskéin végbemenő visszaverődés (pl. Crummy és mtsai, 2006; Middleton és mtsai, 2007), valamint az ionizált abszorpció (pl. Gierliński és Done, 2004) folyamataival magyarázzák a különböző modellek.

A rádióhangos és rádiócsendes AGN-ek röntgenspektruma hasonló, bár az előbbi osztály esetében az $E < 10$ keV tartományt jellemző hatványfüggvény valamelyest laposabb (pl. Williams és mtsai, 1992; Lawson és Turner, 1997; Piconcelli és mtsai, 2005; Zhou és Gu, 2020), továbbá a blazár alosztályba tartozó galaxismagok spektrumában nem jellemzők az abszorpciós alakzatok (Beckmann és Shrader 2012, és a benne található hivatkozások).

A rádiósugárzással ellentétben³⁸ a röntgenemisszió nem mutat jelentős evolúciót: a növekvő vöröseltolódás függvényében a fotonindexek ($\gamma \approx 1,9$) és a luminozítások ($L_X \approx 10^{39} - 10^{40}$ W Hz⁻¹) közel állandók, és megegyeznek az alacsonyabb vöröseltolódás mellett vizsgált AGN-ekre meghatározott értékekkel (pl. Siebert és mtsai, 1996; Padovani és mtsai, 1997; Page és mtsai, 2005; Langejahn és mtsai, 2020; Pons és mtsai, 2020).

³⁷A röntgensugárzásban a sugárzást leíró hatványfüggvényt a γ fotonindexszel szokás jellemezni. Ez definíció szerint az elektronok $N(E)$ energiaeloszlása és az E energiaszintek közötti kapcsolatot jellemző mennyiség, az $N(E) \propto E^{-\gamma}$ arányosság szerint. A fotonindex a spektrálindekszel az $\alpha = -(\gamma - 1)$ kapcsolatban áll. A szakirodalomban általában Γ -val jelölik a fotonindexet, azonban a Lorentz-faktorral való összekeverés elkerülése végett a γ jelölést használok a dolgozatban.

³⁸Növekvő vöröseltolódás mellett jelentősen megnövekszik a nagyobb luminozitással rendelkező AGN-ek számsűrűsége (Merloni és Heinz 2013, továbbá a 2.2.1. fejezet).

A *Chandra* űrtávcső felbocsátásával a röntgentartományban azonosított forrópontok és jetek száma jelentősen megemelkedett³⁹ (pl. Hardcastle és mtsai, 2001; Sambruna és mtsai, 2004; Marshall és mtsai, 2005; Worrall és mtsai, 2010; Marshall és mtsai, 2018). Bár a forrópontok többségének röntgensugárzása magyarázható az SSC modellel, számos eset ismert, ahol csak a modell jelentős módosítása, vagy további folyamatok bevonása esetén írható le a sugárzás az SSC folyamat eredményeképp (Harris és Krawczynski 2006 és a benne található hivatkozások). A relativisztikus jetek röntgenkibocsátásának modellezése kimutatta, hogy a különböző AGN-alosztályok jelentős eltérést mutatnak: az FR I rádiógalaxisok nyalábjai az SSC folyamattal, míg az FR II rádiógalaxisok és kvazárok nyalábjainak röntgenemissziója az IC/CMB modellel jellemezhető (Harris és Krawczynski 2006 és a benne található hivatkozások). Számos esetben a jetekben azonosított „csomók” és forrópontok rádió-, optikai és röntgensugárzásának pozíciói jelentős, akár ~10 pc–10 kpc távolságra figyelhetők meg egymástól, azonos szögfelbontású észlelések mellett (pl. Bai és Lee, 2003; Harris és Krawczynski, 2006; Siemiginowska és mtsai, 2007; Kataoka és mtsai, 2008; Marchenko és mtsai, 2017). Az SSC modell a „csomók” kialakulását a nyalábokban lokálisan megnövekedő mágneses térerősségnek és a lökéshullámfrontok eredményeképpen felgyorsított részecskéknek tulajdonítja (Harris és Krawczynski 2006 és a benne található hivatkozások). Ezekre a megnövekedett lokális intenzitáscsúcsokra az IC/CMB modell egyelőre nem rendelkezik egyértelmű megoldással (Harris és Krawczynski 2006, Boettcher és mtsai 2012 és a bennük található hivatkozások).

4.2. A PNM J0909+0354 kvazár rádió- és röntgenemissziója

A J0909+0354 kvazár rádiósugárzását számos felmérés során detektálták: az 1,4 GHz-es FIRST, NVSS és Green Bank felmérésekben rendre $134,50 \pm 0,136$ mJy (Becker és mtsai, 1995; White és mtsai, 1997), $113,6 \pm 3,4$ mJy (Condon és mtsai, 1998) és 213 mJy (White és Becker, 1992), 5 GHz-en a PMN felmérésben 127 ± 12 mJy (Griffith és mtsai, 1995), míg a Green Bank Teleszkóppal végzett 4,9 GHz-es felmérésekben rendre és 123 mJy (Becker és mtsai, 1991) és 111 ± 11 mJy (Gregory és mtsai, 1996), a 8,4 GHz-es VLA CLASS felmérésben pedig 137,5 mJy (Cosmic Lens All-Sky Survey, Myers és mtsai, 2003) értékeket mértek. A VLA nagy felbontású, „A” konfigurációjában 1,5, 4,9, 6,2 és 8 GHz-en végzett mérések a pontszerű rádióforrás sugárzását két komponensre („mag” és forrópont) bontották fel a szögmásodperces skálán: a másodlagos, a „maghoz” viszonyítva 2"-cel északnyugatra megfigyelhető emisszió vélhetőleg egy forrópontból ered (36.

³⁹Az azonosított röntgenkomponensek listája a hea-www.harvard.edu/XJET/ oldalon is elérhető (Massaro és mtsai, 2010).

ábra, Gobeille és mtsai, 2014). A VLBA 4,3 és 7,6 GHz-es mérésein alapuló térképeken a kvazár $\sim 10 - 20$ mas kiterjedésű, kompakt rádióemissziót mutat, rendre 111 mJy és 76 mJy teljes fluxussűrűséggel⁴⁰. A J0909+0354-et emellett a globális VLBI hálózat távcsöveivel is vizsgálták 5 GHz-en: már a jelentősen észak–déli irányban elnyúlt clean nyalábbal rendelkező 1992-es térkép is egy összetett szerkezetre utal: a kompakt „mag” mellett megjelenik egy másodlagos jetkomponens északkeleti irányban 10 mas-on belül⁴¹ (Paragi és mtsai, 1999).

A kvazár röntgenforrásként is ismert, először a *ROSAT* űrteleszkóp (ROentgen SATellite) égboltfelmérése során azonosították halvány pontforrásként a 2 – 4 keV-os energiatartományban, $F = 9,7 \pm 2,7 \times 10^{-13}$ erg s⁻¹ cm⁻² fluxussal (Brinkmann és mtsai, 1997). A *BeppoSAX* $1,9 \times 10^{-12}$ erg s⁻¹ cm⁻² ($\gamma = 1,16 \pm 0,2$, Donato és mtsai, 2005), a *Swift* $15,65 \times 10^{-12}$ erg s⁻¹ cm⁻² ($\gamma = 1,88^{+1,51}_{-2,28}$, Oh és mtsai, 2018), míg a *Chandra* űrteleszkóp $1,65 \pm 0,04 \times 10^{-12}$ erg s⁻¹ cm⁻² ($\gamma = 1,18 \pm 0,03$, D. Schwartz, személyes közlés) fluxust detektált, rendre a 0,1 – 50 keV, 14 – 195 keV és 0,5 – 7 keV energiatartományokban. Az eseti detektálások mellett a *Swift* teleszkópnak köszönhetően elérhető a kvazár röntgenfénygörbéje is, mely alapján megállapítható, hogy a kvazár a röntgenhullámhosszakon változó fényességet mutat (35. ábra).

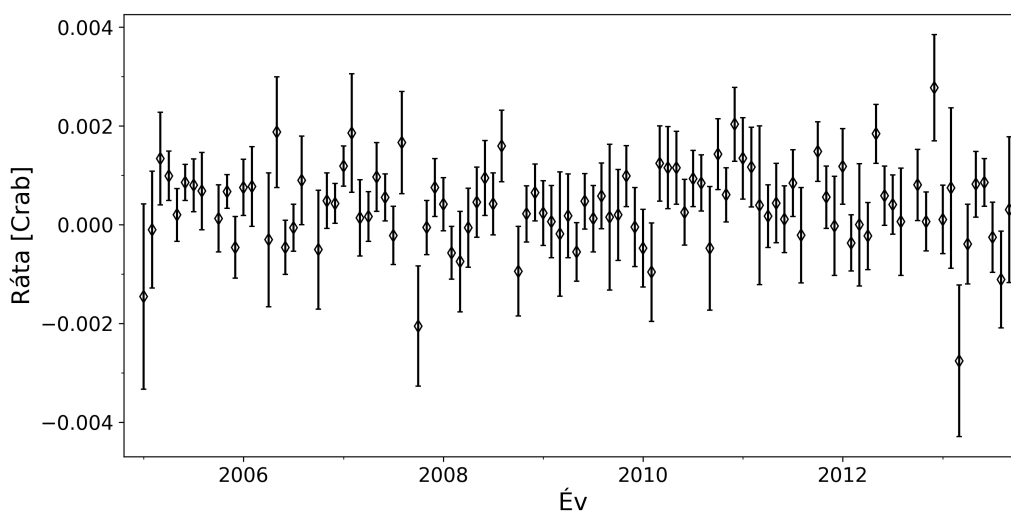
A VLA „A” konfigurációban elvégzett méréseivel megegyező, szögmásodperces felbontást lehetővé tévő *Chandra* űrteleszkóp mérései felfedték, hogy a kompakt röntgensugárzás szerkezete követi a rádiótartományban megfigyelt morfológiát, valamint egy harmadik, a középponttól kb. 6,5''-re északnyugatra található további lehetséges nyalábkomponens is kimutattak (36. ábra). A harmadik komponens irányából számos beütést detektáltak, így ez akár a pc-skálájú jet folytatását is jelentheti. Az északi forráspont rádió- és röntgendetektálása és az északnyugati „jetre” utaló röntgenadatok alapján a PMN J0909+0354 különös (és ellentmondásos) nyalábszerkezettel rendelkezik. Az ellentmondás feloldása érdekében megvizsgáltam a pc-skálájú rádiójetet archív globális és újonnan megtervezett és elvégzett EVN mérések segítségével.

Az analízisben a standard Λ CDM kozmológia paramétereit ($H_0 = 70$ km s⁻¹ Mpc⁻¹, $\Omega_M = 0.3$ és $\Omega_\Lambda = 0.7$) használtam fel, amivel a forrás $z = 3,288$ vöröseltolódásán⁴² (Lee és mtsai, 2013) 1 ezredívmásodperc szögátmérő 7,639 pc lineáris távolságnak felel meg.

⁴⁰Forrás: astrogeo.org/cgi-bin/imdb_get_source.csh?source=J0909%2B0354

⁴¹A mérésben nem vettek részt hosszú észak–déli bázisvonalak, ezért a hálózat ezirányú, gyengébb felbontása (13,8 mas \times 0,8 mas, 38d ábra) megnehezíti az észak–déli szerkezet megfelelő jellemzését és megbízható azonosítását.

⁴²A kvazár vöröseltolódását korábban $z = 3,20$ értékűnek állapították meg (Véron-Cetty és Véron, 1993).



35. ábra. A J0909+0354 röntgenfénygörbéje. (forrás: swift.gsfc.nasa.gov/results/bs105mon/445; Oh és mtsai, 2018). A Swift-BAT 105 hónapig tartó kemény röntgentartományú égboltfelmérése alapján a 14 – 195 keV energiatartományban elvégzett mérések másodpercenkénti beütésszámát (a rátát) a Rák-köd fluxusával normalva, Crab mértékegységben adták meg. 1 Crab $2,33 \times 10^{-8} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2}$ -nek felel meg a 14 – 195 keV energiatartományban (Oh és mtsai, 2018). A $> 325\%$ relatív hibával rendelkező, ezért megbízhatatlan y adatpontokat nem ábrázoltam.

4.3. A felhasznált mérések és az adatfeldolgozás

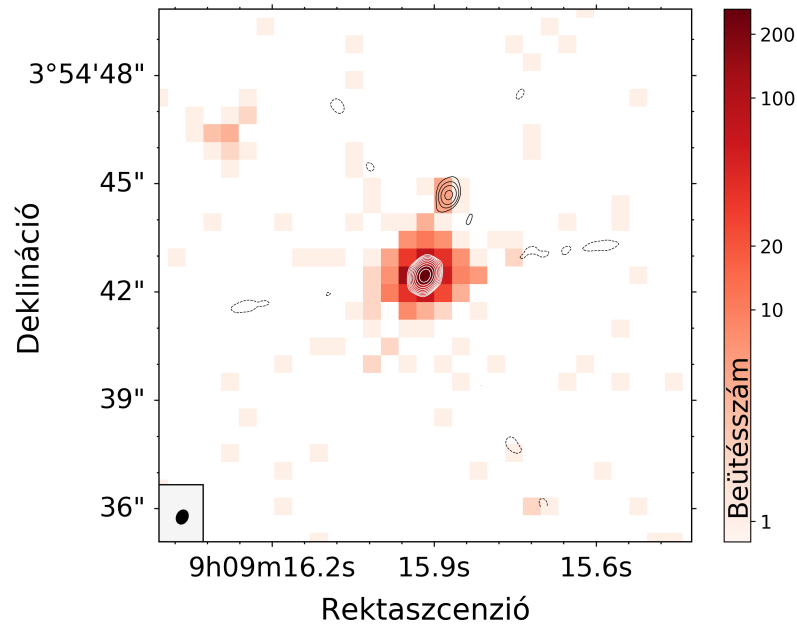
A szögmásodperces (kpc) léptékű szerkezet vizsgálatához a VLA „A” konfigurációjában elvégzett 6,2 GHz-es rádió-, továbbá a *Chandra* űrtávcső 0,5 – 7 keV-es röntgenméréseit használtam fel.

A J0909+0354 kvazár 6,2 GHz-es VLA mérését a legnagyobb bázisvonalú, „A” konfigurációban 2012. november 18-án végezték el. A szélessávú (128 MHz sávszélességű) észlelés összesen 16 IF-en, jobb és bal cirkuláris polarizációban történt, a mérés során a forráson töltött teljes időtartam 5,3 perc volt. Az adatokat a VLA archívumából⁴³ töltöttem le. Az amplitúdók és fázisok kalibrációját a CASA programcsomaggal (McMullin és mtsai, 2007) végeztem el, a J0831+0429 jelű kalibrátorforrás felhasználásával, az 1.3. fejezetben tárgyalt módon.

A kvazár röntgensugárzásának vizsgálatához a *Chandra* űrtávcső 2018. március 3-án elvégzett mérésének adatait használtam fel, melyeket a *Chandra* adatbázisából⁴⁴ töltöttem le. A mérés teljes időtartama 3,4575 óra volt. Az általam felhasznált elsődleges adatsomagot a *Chandra* automatikus adatfeldolgozási eljárása során kalibrálták és dolgozták fel. Az előzetes adatfeldolgozási eljárás során többek között elvégezték az instrumentális korrekciókat, kiküszöbölték a kozmikus sugárzás esetleges hatásait, valamint

⁴³archive.nrao.edu/archive/advquery.jsp

⁴⁴cda.harvard.edu/chaser/, az észlelés azonosítószáma: 20404.



36. ábra. A J0909+0354 Chandra (D. Schwartz, észlelési azonosító: 20404) és VLA mérésének (Gobeille és mtsai, 2014) kompozit térképe. Az általam újrafeldolgozott VLA mérés clean térképét fehér és fekete kontúrokkal jeleztem: a csúcshintenzitás $190 \text{ mJy beam}^{-1}$, a legalsó kontúrvonalak a zajszint ($0,4 \text{ mJy beam}^{-1}$) ± 3 -szorosánál kezdődnek, és kettes faktorial növekednek. A bal alsó sarokban elhelyezett fekete ellipszis a VLA felbontását jelképező ($0,3 \times 0,4$ méretű, -26° pozíciósögű) clean nyálábót szemlélteti. A Chandra beütésszámokat piros színnel jelöltem.

kiszűrték a nem megfelelő időszakokat, ami ún. L2 szintű⁴⁵ feldolgozást jelent. Az általam elvégzett analízis során az L2 adatcsomagban megtalálható, nagyfelbontású ($0,5$), FITS formátumban elérhető röntgentérképet használtam fel. Az adatfeldolgozást a PYTHON programnyelv astropy, scipy, sep, numpy és matplotlib csomagjainak segítségével végeztem. A három röntgenkomponens körüli ($10 \text{ px} \times 10 \text{ px}$ a „mag”, és $5 \text{ px} \times 5 \text{ px}$ a jetkomponensek esetén) területeket kétdimenziós Gauss-függvénnyel illesztettem, majd a függvény alatti területen integráltam a beütésszámokat. A mérés időtartamát felhasználva kiszámítottam a beütésszámrátákat, majd a Giacconi és mtsai (2001) által meghatározott $2,7 \pm 0,3 \times 10^{-11} \text{ erg s}^{-1} \text{ cm}^{-2} \text{ beütésszám}^{-1} \text{ s}^{-1}$ arányossági tényező felhasználásával kiszámítottam a fluxusokat.

A pc-skálájú rádiósugárzás vizsgálatához elsősorban az általam tervezett és vezetett, az Európai VLBI Hálózattal 2019. március 1-jén elvégzett 5 GHz-es észlelés (projektkód EP115) adatait használtam fel. A 6 órás mérésben 15 rádióteleszkóp⁴⁶ vett részt, a teljes észlelési időn belül a célforrást 5,24 óráig figyelték meg az antennák. Az ada-

⁴⁵cxc.harvard.edu/ciao/dictionary/sdp.html

⁴⁶Jodrell Bank, Westerbork, Effelsberg, Medicina, Noto, Onsala, Shanghai, Ürümcsi, Toruń, Yebes, Svetloe, Zelencsukszkaja, Badari, Hartebeesthoek és Irbene állomások.

tokat 1 Gbit s^{-1} -os rátával rögzítették, jobb és bal cirkuláris polarizációban. A teljes polarizációnkénti sáv szélesség 128 MHz , 32 spektrális csatornán és 8 IF-en. Az adatok korrelációját az Európai VLBI Intézetben (JIVE) végezték (Dwingeloo, Hollandia) 2 s-os átlagolási idővel. A kalibrálást az AIPS programcsomaggal végeztem a standard módon (1.3. fejezet), a J0909+0121 fényes kalibrátorforrás felhasználásával.

Az új EVN méréssel való kvalitatív összehasonlítás céljából felhasználtam a szintén 5 GHz -en, a globális VLBI hálózattal 1992. szeptember 27-én és 28-án elvégzett mérés adatait (Paragi és mtsai, 1999). A mérésben 9 távcső vett részt⁴⁷. A 24 órás észlelési szakaszban a forrásra 3 óra nettó észlelési idő jutott. A jobb és bal cirkuláris polarizációban, 28 MHz -es teljes sáv szélességgel elvégzett méréseket (7 IF-en) a Max Planck Rádiócsillagászati Intézetben korrelálták (MPIFR, Bonn, Németország). Az adatok kalibrációját Paragi és mtsai (1999) végezték el a VLBI észlelésekre meghatározott standard módon. Az összehasonlításhoz a Paragi és mtsai (1999) által kalibrált vizibilitásadatokat dolgoztam fel újra.

A pc-skálájú szerkezetben történt változások számbeli jellemzéséhez továbbá feldolgoztam a VLBA állomásai által egyidőben, 2013. április 28-án elvégzett $4,3 \text{ GHz}$ -es és $7,6 \text{ GHz}$ -es mérések adatait (projektkód: BP171AB, projektvezető: L. Petrov) is, melyeket az Astrogeo adatbázisából⁴⁸ töltöttem le. A mérésben 10 antenna vett részt. A VLBA 7. kalibrátorfelmérésének⁴⁹ részeként levezényelt 1 perces mérést 8 IF-en, 32 MHz teljes sáv szélességgel végeztek el, jobb cirkuláris polarizációban. Az adatokat a VLBA adatfeldolgozó központjában korrelálták. A kalibrált UVFITS adatokat a PIMA szoftver 2.03-as verziójával (Petrov és mtsai, 2011) hozták létre.

Az általam kalibrált VLA és az új EVN mérések adatait FITS formátumba exportáltam. A rádiótartományban végzett összes mérés (VLA, globális VLBI, EVN, VLBA) vizibilitásainak fázis- és amplitúdó-önkalibrációját, továbbá hibrid térképezését és a modellillesztését egyaránt a DIFMAP programcsomag segítségével végeztem el (1.3. fejezet). A modellillesztés paramétereinek hibáit a Lee és mtsai (2008) által tárgyalt módon számítottam ki, további 5% hibát felszámolva a fluxussűrűségekhez, a VLBI amplitúdókalibráció bizonytalansága miatt.

⁴⁷Effelsberg, Medicina, Onsala, Westerbork, Green Bank, Haystack, Owens Valley állomások és a VLA.

⁴⁸astrogeo.org/cgi-bin/imdb_get_source.csh?source=J0909%2B0354

⁴⁹astrogeo.org/vcs7/

4.4. Eredmények

4.4.1. A nyaláb kiloparszek skálájú szerkezete

A 6,2 GHz-es VLA adatsorban két jól beazonosítható szerkezeti elem figyelhető meg: a kompakt „mag” és egy tőle 2',28-cel északnyugatra ($\sim -16,5^\circ$ pozíciószög irányában) található valamelyest diffúzzabb jetkomponens (ÉNY, 37a ábra, 7. táblázat). A kiloparszek skálájú szerkezet komponenseinek teljes fluxussűrűsége $198,9 \pm 12,6$ mJy. Az illesztett körszimmetrikus Gauss-modell komponenseinek paramétereit a 7. táblázatban részletezem, a modellkomponensek pozícióit és méretét a 37a ábrán szemléltetem⁵⁰.

7. táblázat. A J0909+0354 kvazár VLA adatsorára illesztett modellparaméterek.

	α	δ	ϑ	S (mJy)	R (")	ϕ ($^\circ$)
mag	$9^{\text{h}}9^{\text{m}}15^{\text{s}}91 \pm 0^{\text{s}}001$	$3^\circ54'43''.0 \pm 0''.01$	$0''.048 \pm 0''.002$	$193,6 \pm 12,5$	0	0
ÉNY	$9^{\text{h}}9^{\text{m}}15^{\text{s}}87 \pm 0^{\text{s}}04$	$3^\circ54'45''.2 \pm 0''.07$	$0''.45 \pm 0''.13$	$5,3 \pm 1,2$	$2,33 \pm 0,04$	$-16,5 \pm 1,0$

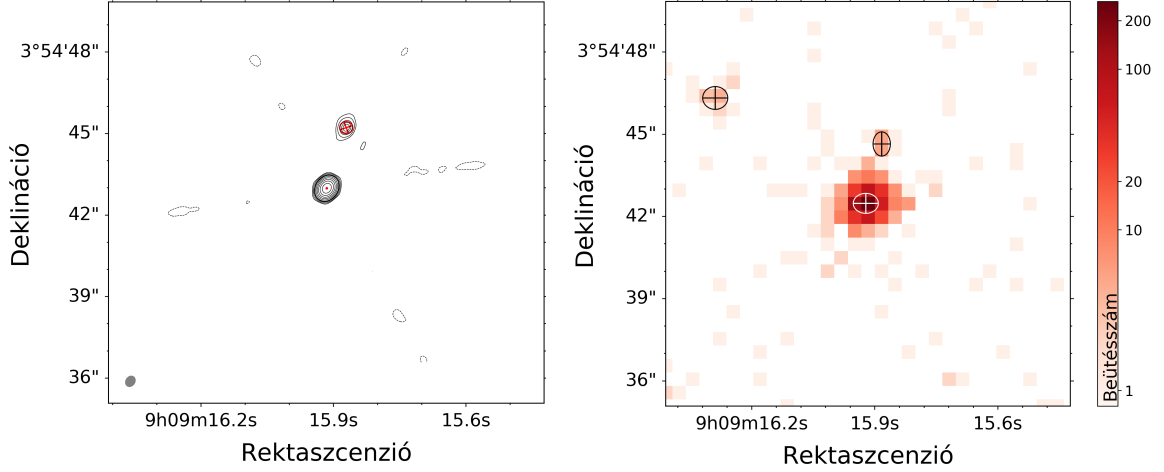
1. oszlop – a nyalábkomponens neve, 2. oszlop – a modellkomponens rektaszczenziója⁵¹, 3. oszlop – a modellkomponens deklinációja⁵¹, 4. oszlop – a körszimmetrikus Gauss-modellkomponens mérete (FWHM), 5. oszlop – a modellkomponens fluxussűrűsége, 6. oszlop – a modell radiális távolsága a „mag” komponens-től, 7. oszlop – a modell „mag” komponensre vonatkoztatott pozíciószöge (északtól kelet felé mérve).

A *Chandra* 0,5 – 7 keV-os röntgentérképén a VLA térképekhez hasonlóan a központi „mag” komponenstől északnyugatra, 2',24 távolságban azonosítható az ÉNY nyalábkomponens. A rádiótérképpel egybevethető szerkezeti elemeken túl, a „magtól” 6',71 távolságban, északkeleti irányban azonosítható egy további, 14 beütésszámú jetkomponens is (ÉK). Az adatokra elvégzett, Gauss-modellkomponenseket használó illesztés eredménye alapján meghatároztam a „mag”, ÉNY és ÉK komponensek röntgenfluxusait, melyek rendre $1,44 \pm 0,16 \cdot 10^{-12}$ erg s⁻¹ cm⁻², $3,03 \pm 0,45 \cdot 10^{-14}$ erg s⁻¹ cm⁻² és $2,99 \pm 0,48 \cdot 10^{-14}$ erg s⁻¹ cm⁻² értékűek. Az illesztett modellek paramétereit a 8. táblázatban részletezem, a modellkomponenseket a 37b ábrán mutatom be. Megjegyzendő, hogy a mag és az északnyugati komponensekre számolt fluxusok hibahatáron belül megegyeznek a *Chandra* saját képfeldolgozó szoftverével elvégzett modellillesztés eredményével

⁵⁰A modellillesztést elliptikus Gauss-modellkomponensekkel is elvégeztem. Az illesztés során kapott pozíciók és fluxussűrűségek megegyeznek a körszimmetrikus modellek alkalmazása mellett meghatározott értékekkel.

⁵¹A modellkomponens félértékszélességének kis mérete nem teszi lehetővé a pozíciók hibájának realisztikus számítását a Lee és mtsai (2008) által javasolt képletek alapján, ezért a „mag” komponens esetén a relatív asztrometriai pontosságból származó bizonytalanságot adtam meg Brogan és mtsai (2018) hibaszámítását követve. Megjegyzendő, hogy az alkalmazott érték nagyságrendileg megegyezik a VLA észlelési útmutatója (science.nrao.edu/facilities/vla/docs/manuals/oss/performance/positional-accuracy) szerint számított (a clean nyaláb mérete 10%-nak megfelelő) hozzávetőleges asztrometriai pontossággal.

(D. Schwartz, személyes közlés). Az energiatartományhoz tartozó közepes frekvencia felhasználásával kiszámítható a forrás fluxussűrűsége is, mely a „mag” komponens esetén $0,165 \pm 0,018 \mu\text{Jy}$.



(a) A J0909+0354 kvazár 6,2 GHz-es VLA clean térképe.

(b) A J0909+0354 kvazár 0,5 – 7 keV-es Chandra röntgenterképe.

37. ábra. A J0909+0354 kvazár szögmásodperc léptékű VLA és Chandra térképei. A VLA térkép csúcsintenzitása $190 \text{ mJy beam}^{-1}$, a legalsó kontúrvonalak a zajszint ($0,4 \text{ mJy beam}^{-1}$) ± 3 -szorosánál kezdődnek, és kettes faktossal növekednek. A bal alsó sarokban szürke ellipszis jelzi a clean nyaláb méretét ($0',3 \times 0',4$) és pozíciószögét (-26°). A vizibilitásokra illesztett körszimmetrikus Gauss-modellek méretét (FWHM) és pozícióit piros színnel jelöltem. A Chandra röntgenterképen a beütésszámokat piros színkóddal, az illesztett elliptikus Gauss-modellkomponensek méretét (FWHM) és pozícióit fehér, illetve fekete színnel jelöltem.

8. táblázat. A J0909+0354 kvazár Chandra adatsorára illesztett modellparaméterek.

	α	δ	ϑ_α	ϑ_δ	C	F ($\text{erg s}^{-1} \text{cm}^{-2}$)
mag	$9^{\text{h}}9^{\text{m}}15^{\text{s}}92 \pm 0^{\text{s}}01$	$3^\circ 54' 42''.5 \pm 0',2$	$3',2 \pm 0',2$	$3',0 \pm 0',2$	$663,2 \pm 1,4$	$1,44 \pm 0,16 \cdot 10^{-12}$
ÉNY	$9^{\text{h}}9^{\text{m}}15^{\text{s}}88 \pm 0^{\text{s}}01$	$3^\circ 54' 44''.6 \pm 0',2$	$2',6 \pm 0',2$	$3',6 \pm 0',2$	$14,0 \pm 1,4$	$3,03 \pm 0,45 \cdot 10^{-14}$
ÉK	$9^{\text{h}}9^{\text{m}}16^{\text{s}}29 \pm 0^{\text{s}}01$	$3^\circ 54' 46''.3 \pm 0',2$	$3',7 \pm 0',2$	$3',4 \pm 0',2$	$13,8 \pm 1,6$	$2,99 \pm 0,48 \cdot 10^{-14}$

1. oszlop – a modellkomponens neve, 2. oszlop – a modellkomponens rektaszciója⁵², 3. oszlop – a modellkomponens deklinációja⁵², 4-5. oszlop – a modellkomponens mérete (FWHM) a rektaszció és a deklináció irányában⁵², 6. oszlop – az integrált beütésszám, 7. oszlop – a modellkomponens fluxusa.

⁵²A modellkomponensek pozícióinak és modellméreteinek hibájaként a relatív asztrometriai pontosság értékét alkalmaztam (Wilkes és mtsai, 2019).

4.4.2. A rádiónyaláb parszek skálájú szerkezete

Az archív globális VLBI észlelés eredeti publikációjában több jetkomponenst azonosítottak (Paragi és mtsai, 1999). A legjobb illesztés eredményeképpen 3 komponenssel tudtam jellemezni a forrás fényességeloszlását (38d ábra és 9. táblázat). A pc-skálájú szerkezet teljes fluxussűrűségére $52,5 \pm 5,2$ mJy adódott. Mivel az 1992-es észlelés clean nyalábjának észak–déli irányú, rossz felbontása szerencsétlen módon egybeesik a keresett szerkezet irányával, a forrás pontos jellemzése csupán ezen észlelési időpont alapján nem lehetséges.

Az új EVN észlelésből származó adatok finomabb észak–déli felbontása (vagyis a hosszabb észak–déli bázisvonalak) következtében egy körszimmetrikust megközelítő clean nyalábbal tudtam előállítani a forrás fényességeloszlásának térképét. A kvazár szerkezete – hasonlóan az 1992-es adatsorhoz – három modellkomponens illesztésével jellemezhető legjobban. A finomabb észak–déli felbontásnak köszönhetően továbbá megfigyelhető az északi irányba nyúló, egyre diffúzabbá váló struktúra, egészen ~ 20 mas (~ 150 pc) távolságig, és ~ 10 mas-nál két „ágra” bomlik fel. A „mag” komponens csúcsintenzitása $64,1 \pm 1,5$ mJy beam⁻¹, az illesztett komponensek teljes fluxussűrűsége (60 pc-en belül) $70,2 \pm 3,6$ mJy (38b ábra és 9. táblázat). A szerkezeti hasonlóságok kvalitatív jellemzése érdekében az új EVN észlelés vizibilitásadatait a korábbi, 1992-es globális mérés clean nyalábjával is előállítottam: a kvazár nyalábjában megfigyelhető szerkezeti hasonlóságok szembetűnőek, továbbá az is látható, hogy a 2019-es rádiótérkép diffúzabb sugárzásról árulkodik a nyaláb legtávolabbi régióiban (38c és 38d ábrák). Ez annak tudható be, hogy az új mérések érzékenysége több mint egy nagyságrenddel meghaladja az 1992-esekét, így halványabb emisszió detektálása is lehetővé vált.

A VLBA mérés 4,3 GHz-es rádiótérképén a forrás szerkezete kevésbé felbontott, mint a globális és EVN észlelések esetében (38a ábra), azonban az EVN mérésénél kevésbé finom észak–déli felbontás mellett is sejthető a nyaláb északi irányba mutató terjedése. A VLBA adatsorra végzett modellillesztés szintén három modellkomponenst eredményezett (9. táblázat), melyek teljes fluxussűrűsége $108,9 \pm 7,2$ mJy, a térkép csúcsintenzitása $101,7 \pm 4,3$ mJy beam⁻¹.

Felhasználva a VLBI mérések adataira illesztett modellparamétereket (9. táblázat), kiszámítottam a kvazár „mag” komponensére vonatkozó látszó fényességi hőmérsékleteket a (11)-es összefüggés alkalmazásával, melyek értéke $T_{B,G} > 0,13 \times 10^{11}$ K, $T_{B,VLBA,4,3} = 3,2 \times 10^{11}$ K, $T_{B,VLBA,7,6} = 2,1 \times 10^{11}$ K és $T_{B,EVN} = 2,9 \times 10^{11}$ K, rendre a globális, VLBA és EVN észlelések esetén.

A (12)-es összefüggés alkalmazásával továbbá kiszámítottam a Doppler-faktorokat, mindhárom mérési időpontra: a forrás valós fényességi hőmérsékletére a $T_{b,int} \approx 5 \times 10^{10}$ K (Readhead, 1994) és $T_{b,int} \approx 3 \times 10^{10}$ K (Homan és mtsai, 2006) értékeket tételez-

tem fel (ekvipartíciós és karakterisztikus értékek, 3. fejezet). A VLBA és EVN mérések alapján számított Doppler-faktorok értékei $\delta_{\text{eq}} = 5 - 6$ és $\delta^* = 7 - 11$ közöttiek (9. táblázat 8. és 9. oszlop).

A Doppler-faktorra emellett megállapítható egy alsó határérték, feltételezve, hogy a röntgentartományban detektált fotonok kizárólag az SSC modell által leírt inverz Compton-szóródás során keletkeznek. Alkalmazva a

$$\delta_{\text{IC}} = f(\alpha) S_r \left(\frac{\ln \frac{\nu_b}{\nu_r}}{S_X \vartheta^{6-4\alpha} \nu_X^{-\alpha} \nu_r^{5-3\alpha}} \right)^{\frac{1}{4-2\alpha}} (1+z) \quad (15)$$

összefüggést⁵³ (Ghisellini és mtsai, 1993), ahol S_r , ν_r és ϑ rendre a VLBI észlelés „mag” komponensének fluxussűrűsége (Jy), frekvenciája (GHz) és mérete (mas), S_X és ν_X a röntgenmérés fluxussűrűsége (Jy) és frekvenciája (keV), $\alpha = -0,75$ ⁵⁴ az optikailag vékony spektrálindeks (feltételezett érték, pl. Ghisellini és mtsai 1993), $\nu_b = 10^5$ GHz a szinkrotronsugárzás nagyenergiás levágási frekvenciája, $f(\alpha) = -0,08\alpha + 0,14$. Az inverz-Compton Doppler-faktor értéke az EVN és VLBA észlelésekre egyaránt $\delta_{\text{IC}} > 2$, míg a globális mérés esetén $\delta_{\text{IC}} > 0,1$.

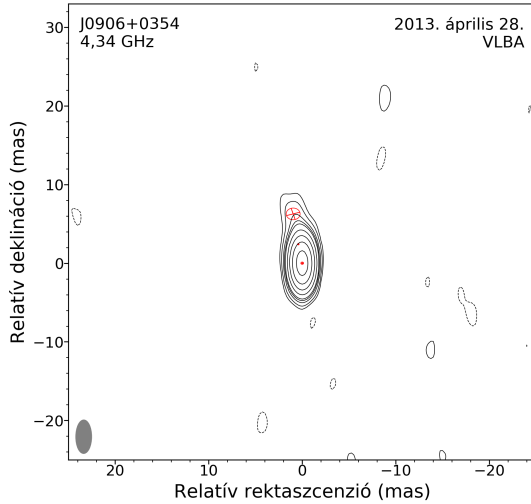
9. táblázat. A J0909+0354 VLBI észleléseinek térkép- és modellparaméterei.

		S (mJy)	R (mas)	ϕ (°)	ϑ (mas)	T_B (10^{11} K)	δ_{eq}	δ^*	
globális	mag	$35,9 \pm 4,6$	0	0	$< 0,77 \pm 0,09$	$> 0,13 \pm 0,04$	$> 0,3$	$> 0,4$	
	A1	$11,9 \pm 2,2$	$3,9 \pm 0,2$	$-0,5 \pm 2,6$	$< 1,6 \pm 0,4$				
	A2	$4,7 \pm 1,3$	$7,3 \pm 0,7$	$16,9 \pm 5,2$	$< 3,0 \pm 1,3$				
4,3 GHz	mag	$102,2 \pm 6,7$	0	0	$0,30 \pm 0,01$	$3,2 \pm 0,5$	6	11	
	B1	$3,9 \pm 2,5$	$2,5 \pm 0,1$	$9,8 \pm 0,2$	$< 0,2 \pm 0,1$				
	B2	$2,8 \pm 0,7$	$6,3 \pm 0,2$	$8,8 \pm 2,1$	$1,5 \pm 0,5$				
VLBA	7,6 GHz	mag	$67,4 \pm 4,8$	0	0	$0,17 \pm 0,01$	$2,1 \pm 0,4$	5	7
	B1*	$7,7 \pm 2,5$	$1,25 \pm 0,01$	$6,4 \pm 0,6$	$0,35 \pm 0,02$				
EVN	mag	$65,3 \pm 3,6$	0	0	$0,22 \pm 0,01$	$2,9 \pm 0,3$	5	10	
	C1	$3,4 \pm 0,3$	$4,2 \pm 0,1$	$10,5 \pm 1,8$	$1,4 \pm 0,3$				
	C2	$1,6 \pm 0,2$	$8,5 \pm 0,4$	$12,2 \pm 2,9$	$3,3 \pm 0,9$				

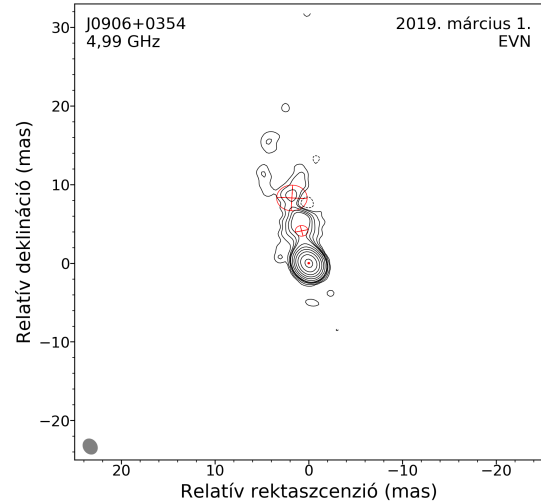
1. oszlop – a mérést végző hálózat, 2. oszlop – a nyálábkomponens neve, 3. oszlop – a modellkomponens fluxussűrűsége, 4. oszlop – a körszimmetrikus Gauss-modellkomponens mérete (FWHM) vagy a legkisebb felbontható szögátmérőnek megfelelő felső határ, 5. oszlop – a modell radiális szögtávolsága a „mag” komponensstől, 6. oszlop – a modell „mag” komponensre vonatkoztatott pozíciószöge (északtól kelet felé mérve), 7. oszlop – a „mag” komponens (látszó) fényességi hőmérséklete, 8. oszlop – ekvipartíciós Doppler-faktor (Readhead, 1994), 9. oszlop – $T_{\text{b,int}} = 3 \times 10^{10}$ K fényességi hőmérséklettel számított Doppler-faktor (Homan és mtsai, 2006).

⁵³A fenti képlet a diszkrét jetekre vonatkozik. Folytonos jet esetén a $\delta_{\text{IC,folyt}} = \delta_{\text{IC}}^{(4-2\alpha)/(3-2\alpha)}$ transzformáció alkalmazandó. A J0909+0354 esetében nincs jelentős különbség a kétféle modellel számított Doppler-faktorok között.

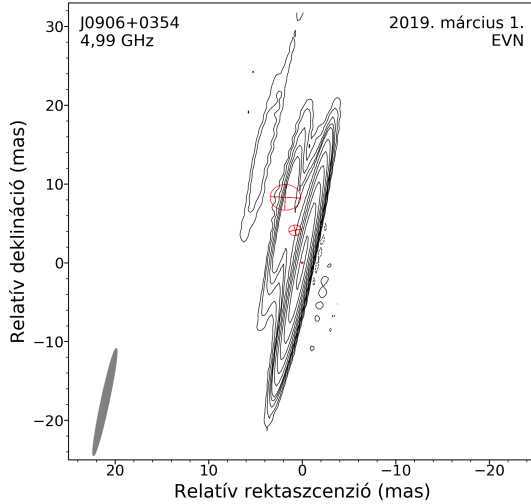
⁵⁴A dolgozatban a spektrálindeks az $S \propto \nu^\alpha$ konvenció szerint alkalmazom.



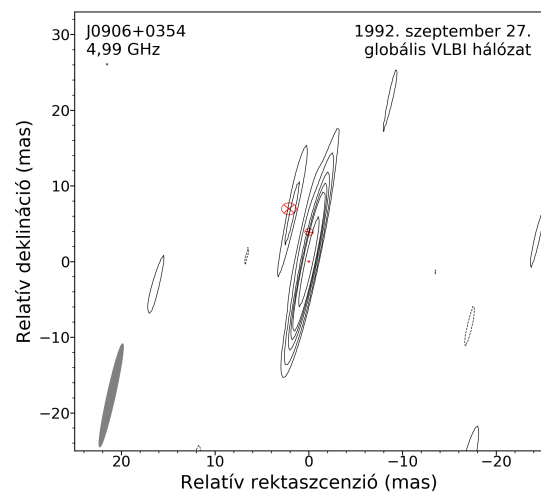
(a) A J0909+0354 természetes súlyozású 4,3 GHz-es rádiótérképe a 2013-as VLBA mérések alapján.



(b) A J0909+0354 természetes súlyozású 5 GHz-es rádiótérképe a 2019-es EVN mérések alapján.



(c) A J0909+0354 természetes súlyozású 5 GHz-es rádiótérképe a 2019-es EVN mérések alapján, az 1992-es mérés clean nyalábjával előállítva.



(d) A J0909+0354 természetes súlyozású 5 GHz-es rádiótérképe az 1992-es globális VLBI hálózat mérések alapján készült (Paragi és mtsai, 1999).

38. ábra. A J0909+0354 kvazár természetes súlyozású 4/5 GHz-es rádiótérképei. Az (a) ábrán látható VLBA térkép csúcstényessége $101,7 \text{ mJy beam}^{-1}$, zajszintje $0,2 \text{ mJy beam}^{-1}$. A felbontást jelző clean nyaláb mérete $1,7 \text{ mas} \times 4,2 \text{ mas}$, 0° -os pozíciószög mellett. A (b) panelen látható a 2019-es EVN mérés térképe, melynek csúcstényessége $64,09 \text{ mJy beam}^{-1}$, a zajszint $0,03 \text{ mJy beam}^{-1}$. Az EVN térkép clean nyalábjának mérete $1,4 \text{ mas} \times 1,9 \text{ mas}$, 18° -os pozíciószöggel. A (c) panelen a 2019-es EVN-térképet az 1992-es mérés clean nyalábjával állítottam elő. A (d) ábrán az 1992-es globális VLBI mérés térképét mutatom be, melynek zajszintje $0,47 \text{ mJy beam}^{-1}$, a csúcstényessége $36,98 \text{ mJy beam}^{-1}$. A (c) és (d) paneleken a clean nyaláb mérete $0,8 \text{ mas} \times 13,8 \text{ mas}$ -10° -os pozíciószöggel. A szintvonalak mind a négy térképen a zajszint ± 3 -szorosánál indulnak és kettes faktossal növekszenek. Az illesztett modellkomponenseket pirossal jelöltem.

4.5. Diszkusszió

4.5.1. Kiloparszek skálájú szerkezet

A kiloparszekes jetben azonosított komponensek esetén egyértelműen megfigyelhető a *Chandra* és VLA adatok közötti minimális pozíciókülönbség. A röntgenkomponens pozíciója a „mag” esetén $0',5 \pm 0',2$ -cel, míg az ÉNY jetkomponens esetében $0',6 \pm 0',2$ -cel északabbra található. Ezek a szögméretetek $3,97 \pm 1,53$ kpc és $4,74 \pm 1,61$ kpc lineáris távolságnak felelnek meg. A röntgensugárzásnak a rádióemisszióhoz képesti, az áramlás irányában megfigyelhető „elcsúszását” többek között az M87 (Wilson és Yang, 2002), a Centaurus A (Kraft és mtsai, 2002), a PKS 1127–145 (Siemiginowska és mtsai, 2002), a 3C 31 (Hardcastle és mtsai, 2002), a 3C 445 (Perlman és mtsai, 2010), a PKS B0106+013 és a 3C 345 (Kharb és mtsai, 2012), valamint a PKS 0349–27 és a PKS 1733–56 (Mingo és mtsai, 2017) jetjében is megfigyelték. A pc–kpc mértékű pozíciókülönbségre az SSC modell többféle magyarázattal szolgál. Az egyik feltevés szerint a helyi röntgenmaximumot kialakító nagyenergiás elektronok rövid élettartama miatt a röntgentartományú szinkrotronemisszió lokális, azonban az alacsonyabb energiájú populáció (hosszabb élettartama révén) tovább terjed, így a rádiómaximum a jet áramlásának irányában, a külsőbb régiókban figyelhető meg (pl. Harris és Krawczynski, 2002; Bai és Lee, 2003; Harris és Krawczynski, 2006). Más elmélet szerint a rádiócsúcs elcsúszását a mágneses térerősségnek a jet áramlása során bekövetkező helyi felerősödésével, és ennek következtében a rádióemisszivitás megnövekedésével is magyarázzák (pl. Harris és Krawczynski, 2006). A relativisztikus nyalábok sebességének nagymértékű csökkenését is javasolták a különbségek magyarázatára (Georganopoulos és Kazanas, 2004). Az IC/CMB modell egyelőre nem rendelkezik kielégítő magyarázattal a megfigyelt pozíciókülönbségekre (pl. Harris és Krawczynski, 2006; Marshall és mtsai, 2018). A J0909+0354 esetében a röntgentartományban azonosított modelkomponensek a rádiópozíciókhoz képest (a jet áramlási irányában) távolabb helyezkednek el. Ez kizárja az SSC modell rövidebb élettartamú elektronjainak magyarázatát. Minthogy a két tartományban azonosított jetkomponensek pozícióinak eltérése kisebb, mint egy szögmásodperc, a legvalószínűbb forgatókönyv szerint a különbséget az okozza, hogy a VLA mérésben az észak–déli felbontás mérsékeltebb, mint a kelet–nyugat irányú és az észlelést nem az asztrometriai pontosság növeléséhez szükséges ún. fázisreferencia⁵⁵ módszerével végezték, ezáltal a komponensek szögmásodpercnél finomabb pontosságú koordinátáinak megadása nem megbízható.

⁵⁵A fázisreferencia módú észlelés során a hálózat antennái rövid időnként váltakozva mérik a cél- és fáziskalibrátor-forrás rádiószugárzását.

4.5.2. Parszek skálájú szerkezet

Mind az 1992-es globális, mind a 2019-es EVN észlelés adatai egy összetett morfológiáról árulkodnak: egy kompakt „mag” és egy északi irányban megfigyelhető, kiterjedt rádiónyaláb (jet) formájában. Minthogy a globális mérés clean nyalábja pont a vizsgált szerkezet irányában gyengébb felbontású, a szerkezet lényegi tárgyalása csak az új EVN mérések alapján célravezető. A mas (pc) skálájú rádiószerkezet komplex képet mutat az 5 GHz-es rádióterképen: a központi „magtól” (vagyis az AGN-nyaláb sugárzásának kiindulópontjától) az északi irányba haladó, kiterjedt morfológia figyelhető meg kb. 20 mas-ig (~ 150 pc). A VLA adatok tükrében valószínűsíthető, hogy a nyaláb a VLA-ÉNY komponenséig folytonos, azonban az EVN hosszú bázisvonalai felbontják a sugárzást a kpc és pc skálák között. A forrás közepes felbontású VLBI hálózatokkal (pl. e-MERLIN), azonos frekvencián elvégzett észlelése további információval szolgálna a kvazár két lépték közötti szerkezetéről.

A nyaláb ~ 10 mas (~ 75 pc) távolságban egyre diffúzabbá válik, és – látszólag – két részre szakad. Hasonló struktúra figyelhető meg pl. az MRK 501 (Giroletti és mtsai, 2004), a 3C 66A és a J1829+4844 (Lister és mtsai, 2013), a 4C 76.03 (Dallacasa és mtsai, 2013), a 3C 84 (Nagai és mtsai, 2014), a 1308+326 (Britzen és mtsai, 2017) és az S5 0836+710 (Vega-García és mtsai, 2019) parszek skálájú jetjeiben is. A sugárzó anyagnyaláb ily módon történő szétválásának egyik oka lehet, hogy a rádiójet útja során az AGN-t körülvevő, sűrűbb csillagközi anyaggal kerül kölcsönhatásba (pl. Attridge és mtsai, 1999; Dallacasa és mtsai, 2013). A „kettéváló” jetmorfológia továbbá utalhat az ún. strukturált nyalábra. A modell szerint, melyet numerikus szimulációkkal is alátámasztanak (pl. McKinney, 2006; Komissarov és mtsai, 2007), a jet középső régiójában relativisztikus sebességgel haladó részecskeáramot körülöleli egy lassabb, szubrelativisztikus sebességgel rendelkező köpeny (spine-sheath modell, pl. Komissarov, 1990). A strukturált jet szerkezete megjelenik a jet lineárisan polarizált sugárzásának szerkezetében (pl. Pushkarev és mtsai, 2005; Murphy és mtsai, 2013), valamint a teljes polarizálatlan intenzitásban kirajzolódó, a jet (tengelytől távolabb eső) külső régiójának relatív kifényesedésben is (Giroletti és mtsai, 2004; Ghisellini és mtsai, 2005; Nagai és mtsai, 2014; Giovannini és mtsai, 2018; Ros és mtsai, 2020). Az összetett jetmodell esetében a külső környezet (pl. a nyalábot körülölelő csillagközi anyag) hatásainak hozzájárulása a megfigyelt tulajdonságokhoz elhanyagolható (pl. McKinney, 2006).

A vizibilitásadatok modellillesztése továbbá rámutatott, hogy az azonosítható jetkomponensek nem egy egyenes vonal mentén terjednek, hanem enyhén elfordulnak az északnyugati irány felé: 65 pc (C2 komponens) és 20 kpc (ÉNY komponens) között $\sim 30^\circ$ -kal. A J0909+0354 esetében megfigyelt helikális szerkezet nem ismeretlen a blazár típusú

AGN-ek esetén (Conway és Murphy 1993; Kharb és mtsai 2010; Zhao és mtsai 2011; Singal 2016; Perger és mtsai 2018a, e dolgozat 3. fejezete).

4.5.3. A kiloparszekes szerkezet és az északkeleti nyalábkomponens kapcsolata

A kiloparszek skálájú szerkezetet lefedő *Chandra* adatokban a „magtól” északkeleti irányban megfigyelhető harmadik szerkezeti elem (ÉK) valódisága a beütésszámok, valamint az azokra illesztett Gauss-modellkomponens paramétereinek alapján szignifikáns: a fluxus értéke hibahatáron belül megegyezik az ÉNY komponensével. A félértékszélességek és a fluxusok nagymértékű hasonlósága alapján sejthető, hogy az ÉK komponens röntgensugárzása szintén egy forrópont jellegű szerkezeti elemhez köthető, azonban az oksági kapcsolat ez alapján nem jelenthető ki egyértelműen.

Annak a megítélésére, hogy lehet-e két, egymással fizikai kapcsolatban nem levő, tehát csak közel azonos irányban látszó röntgenforrásról szó, hozzávetőlegesen megbecsültem ennek a valószínűségét. A High Energy Astrophysics Science Archive Research Center (HEASARC) egyesített röntgenkatalógusa⁵⁶ alapján – egyenletes eloszlást feltételezve – a teljes égbolt egy négyzetszögperc nagyságú területén $\sim 8 \times 10^{-3}$ darab röntgenforrás található. A számítást a *Chandra* pontforrás-katalógusának⁵⁷ elemeivel elvégezve egy négyzetszögperc égterületre (a halmozott röntgentérképeken azonosított források figyelembe vételével) $\sim 5 \times 10^{-3}$ darab ($F_X > 10^{-18}$ erg s⁻¹ cm⁻²) röntgenforrás esik. Vagyis nagyságrendileg megegyező értékhez jutunk mindkét katalógus alapján. Az alacsony felületi számsűrűséget figyelembe véve, annak a valószínűsége, hogy a 6'71 szeparációra elhelyezkedő ÉK komponensként megjelenő röntgensugárzás független a J0909+0354 kvazártól, kevesebb mint 1%.

A forrás parszek skálájú jetje egyértelműen a kiloparszekes ÉNY komponens irányába terjed, azonban nem kizárható, hogy az ÉK komponens szintén a J0909+0354 egy forrópontja, amit a két nyalábkomponens hasonló röntgenfluxusa is sejtet. Az ÉK komponens sugárzása ezáltal lehet a kvazár egy korábbi jetkomponense, mely az idők során drasztikusan megváltozott. Az irányváltozásnak számos oka lehet, többek között az akkréciós korong vetemedése a Lense–Thirring effektus hatására (pl. Lense és Thirring, 1918; King és Nixon, 2018), a fekete lyuk forgástengelyének átbillenése (pl. Gopal-Krishna és mtsai, 2012; Roberts és mtsai, 2015, 2018), vagy a galaxis magjában jelenlévő másodlagos fekete lyuk által okozott perturbáció (Green és mtsai, 2002; Gross és mtsai, 2019) és az általa indukált jetprecesszió (pl. Ekers és mtsai, 1978; Saripalli és Roberts, 2018). A komponens esetén hiányzó rádióemissziót magyarázhatja, hogy a régi jetkomponens rá-

⁵⁶heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/xray.html

⁵⁷cxc.harvard.edu/csc/char.html

diósugárzása az eltelt idő során túlságosan diffúzzá vált a VLA („A” konfigurációjában elérhető) finom felbontásával.

Bár az ÉK komponens, mint a J0909+0354-től független forrás valószínűsége meglehetősen alacsony, a rádiósugárzás hiányát és a parszekes jet irányát figyelembe véve elképzelhető, hogy a röntgensugárzás egy előtér- vagy háttérobjektumból (pl. alacsonyabb/nagyobb vöröseltolódás melletti kvazárból) származik, esetleg a J0909+0354 magjának vagy egy háttérobjektum sugárzásának gravitációsan lencsézett képeként interpretálható (pl. Sambruna és mtsai, 2004; Hardcastle és mtsai, 2005). Minthogy a „mag” és ÉK komponensek beütésszámainak aránya viszonylag jelentős (~ 50), illetve hogy a „magtól” való távolsága (50 kpc) miatt az ÉK komponens kívül esik a lencsézés által létrehozott mintázaton (kausztikán), ezért a kvazár saját „magjának” lencsézése kevésbé életképes elképzelés. A másik lehetőséget megvizsgálva, a háttérobjektum (egy másik galaxis közepén található szupernagy tömegű fekete lyuk vagy két összeolvadó galaxis) eshetőségének további bizonyítékaul szolgál, hogy a PanSTARRS katalógusban⁵⁸ azonosítható egy, az ÉK komponens koordinátáitól $\sim 0,4$ távolságra található, de még a komponens félértékszélessége által határolt területre eső, halvány (a halmozott fotometria alapján a g sávban $\sim 23,4^{\text{mag}} \pm 0,2^{\text{mag}}$ látszó fényességű) optikai-infravörös pontforrás. A tényleges megfeleltethetőség a felmérés $23,3^{\text{mag}}$ (5σ melletti) detektálási határa miatt nem állítható teljes bizonyossággal, annak azonosítása további célzott fotometriai és (a forrás távolságának meghatározása érdekében) spektroszkópiai mérések elvégzése alapján lehetséges.

4.5.4. A kvazár spektrális energiaeloszlása, röntgen- és rádióspektruma

A J0909+0354 kvazár spektrális energiaeloszlását a 39. ábrán szemléltetem, külön kiemelve a rádiótartományt. Megfigyelhető, hogy a *Chandra* méréseiből származtatott fluxussűrűség értéke összhangban van a röntgentartományú *BeppoSAX* és *Swift* mérések fluxussűrűségei alapján megbecsülhető értékkel. A három röntgentartományú mérés fluxussűrűségeinek logaritmusára illesztett egyenes alapján a röntgentartomány spektrálindexe a 0,5 – 195 keV energiatartományra $\alpha_X = -0,26 \pm 0,03$. Ebből megadható az energiatartományra vonatkozó fotonindex ($\gamma = 1,26 \pm 0,15$), melynek értéke hibahatáron belül egyezik a *BeppoSAX* (Donato és mtsai, 2005), *Swift* (Oh és mtsai, 2018) és *Chandra* (D. Schwartz, személyes közlés) mérések adataiból külön-külön számított értékekkel, és összhangban van a nagy vöröseltolódású AGN-minták lapos spektrumú rádiókvazárjai esetén tapasztalt értékekkel (pl. Page és mtsai, 2005; Fabian és mtsai, 2014; Ighina és mtsai, 2019).

⁵⁸catalogs.mast.stsci.edu/panstarrs/

A rádióspektrum, hasonlóan a röntgenspektrumhoz (*Swift* felmérés, 35. ábra, Oh és mtsai 2018) változékonyságot mutat mind a kpc, mind a pc skálájú szerkezet rádiósugárzásában (39. ábra, kiemelt rész). Az 1,4 GHz-es sugárzás változékonysága eléri az 50%-ot (FIRST, NVSS és Green Bank felmérések, White és Becker 1992; Becker és mtsai 1995; White és mtsai 1997; Condon és mtsai 1998), míg 5 GHz-en $\sim 10\%$ -ot változik a kvazár fluxussűrűsége (PMN és Green Bank felmérések, Becker és mtsai 1991; Griffith és mtsai 1995; Gregory és mtsai 1996). A rádió-fluxussűrűségek értékében pc léptéken a globális VLBI, EVN és VLBA mérési időpontjai között megfigyelhető változékonyság 35 – 50% az 5 GHz-es frekvenciasávban.

A kpc skálájú rádiószerkezetet változékonysága miatt a teljes fluxussűrűség-adatsort (39. ábra; log-log skálán) egyenessel illesztettem, hogy meghatározzam a teljes 365 MHz–8,4 GHz-es tartomány spektrálindeket, amely $\alpha_{\text{kpc}} = -0,11 \pm 0,13$ -nak adódott. A spektrum alakjából sejthető, hogy a forrás gigahertzen maximumot mutató kvazár (gigahertz peaked spektrum source – GPS, Stanghellini és mtsai, 1998), aminek lehetőségét már Paragi és mtsai (1999) is felvetették.

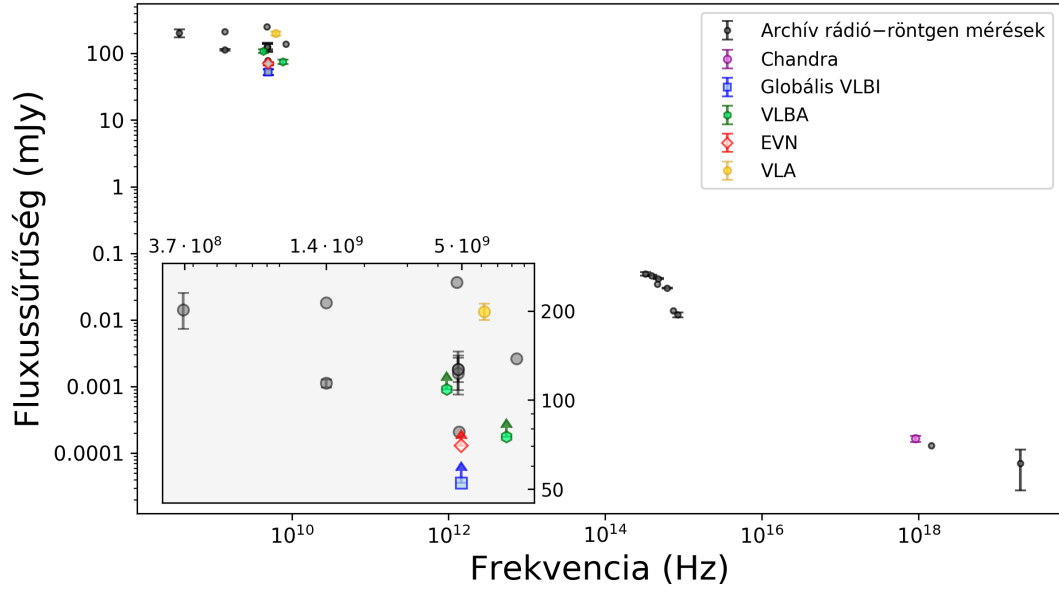
A pc skálájú szerkezet spektrálindeket meghatározásához a VLBA és az új EVN mérések fluxussűrűségeit használtam fel. A VLBA adatai alapján meghatározott 4,34 – 7,62 GHz-es tartomány spektrálindeket $\alpha_{4,34}^{7,62} = -0,66 \pm 0,17$, míg a három mérés bevonásával számított érték $\alpha_{\text{pc}} = -0,46 \pm 0,13$, az összes jetkomponens fluxussűrűségének felhasználásával. A „mag” komponensekre számolt értékek $\alpha_{4,34,\text{mag}}^{7,62} = -0,74 \pm 0,22$ és $\alpha_{\text{pc,mag}} = -0,55 \pm 0,15$, a két- és hárompontos illesztés esetén. Minthogy a VLBI mérések is rámutatnak a forrás változékonyságára, a fent meghatározott spektrálindeket óvatossággal kezelendők. Az egyidőben lefolytatott VLBA észlelések által sugallt spektrálindeket nem feltétlenül jelentenek meredek spektrumot: bár a változékonyság hatását kiküszöbölik, a két frekvenciasáv szögfelbontása eltérő, így a komponensek (és ezáltal a fluxussűrűségek) egymással való összevetése bizonytalan.

A kvazár rádióspektruma – a fenti elgondolások figyelembe vételével – mind a pc, mind a kpc léptékű skálán, a mérések által lefedett frekvenciatartományban laposnak tekinthető, mindkét esetben rádiónyaláb „mag” komponense dominálja a sugárzást.

4.5.5. Jetparaméterek

A VLBA és EVN mérésekből meghatározott fényességi hőmérsékletek jelentősen meghaladják mind a mágneses térrel ekvipartícióban lévő részecskék $T_{\text{b,int}} \approx 5 \times 10^{10}$ K (Readhead, 1994) elméleti határát, mind az empirikus $T_{\text{b,int}} \approx 3 \times 10^{10}$ K (Homan és mtsai, 2006) értéket. Ez alapján a jet sugárzásában hangsúlyos relativisztikus nyalábolás figyelhető

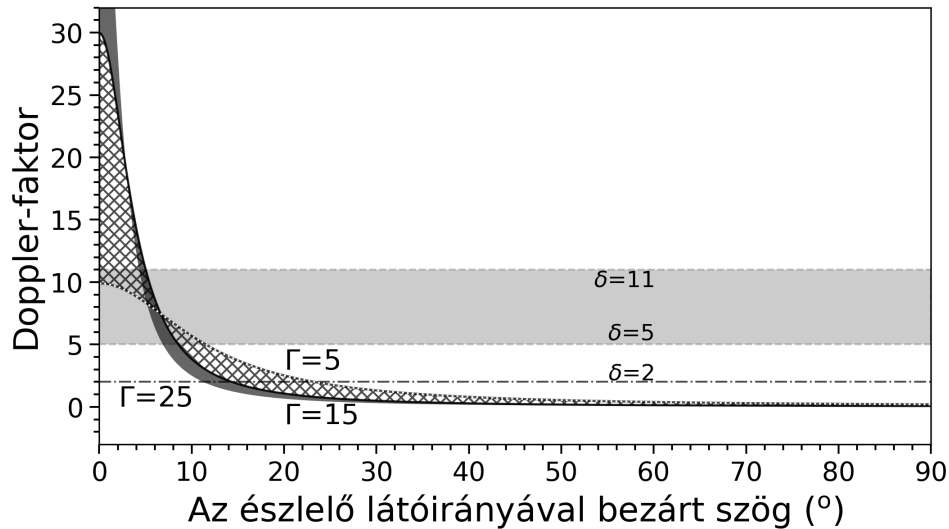
⁵⁹<https://ned.ipac.caltech.edu/>



39. ábra. A J0909+0354 kvazár spektrális energiaeloszlása. A fekete körök az archív rádió-röntgen tartományú mérési pontokat jelölik és a NASA/IPAC Extragalaktikus Adatbázisból származnak⁵⁹. A Chandra fluxusokból számolt fluxussűrűségeket lila körrel jelöltem. A globális VLBI, VLBA, EVN és VLA észlelések modellillesztéséből származó teljes fluxussűrűséget rendre kék, zöld, piros és sárga színnel jelöltem. A rádiótartományt külön is kiemeltem a spektrum jobb láthatósága érdekében.

meg ($\delta_{\text{eq}} = 5 - 6$, $\delta^* = 7 - 11$ és $\delta_{\text{IC}} > 2$ a VLBA és EVN komponensek esetén). Hasonlóan a spektrális energiaeloszlásnál megfigyelt fluxussűrűség-különbségekhez, a fényességi hőmérsékletekből számított Doppler-faktorokban is megjelenik a forrás rádiósugárzásának változékonysága. A globális VLBI észlelés modellparamétereiből számolt fényességi hőmérsékletekre és Doppler-faktorokra csupán egy alsó határérték határozható meg. Ez annak a következménye, hogy a viszonylag alacsony felbontás miatt a központra illesztett modellkomponens félértékszélességére (az interferométer véges felbontása miatt) csak felső korlát adható ($< 0,77$ mas). A globális mérés nem pontosan meghatározott jellege miatt a további tárgyalásban eltekintek az ezen adatsorból származtatott mennyiségek felhasználásától.

Az EVN észlelés vizibilitásaira illesztett modellekből meghatározott paraméterek segítségével megbecsültem a kvazár nyálábjának az észlelő látóirányára vonatkoztatott látószögét, a Lorentz-faktort $\Gamma = 5$ és $\Gamma = 15$ közöttinek (Volonteri és mtsai 2011 által meghatározott leggyakoribb értékek) feltételezve. A jet inklinációja a becslés alapján $\theta = 8 - 11^\circ$ közötti a δ_{eq} Doppler-faktor alkalmazásával. A δ^* Doppler-faktorokkal a $\theta < 12^\circ$ felső korlát adható a látószögre. $\Gamma = 25$ értékű Lorentz-faktor (pc skálájú jetekre empirikus módon meghatározott felső korlát, Kellermann és mtsai 2004) esetén a jet inklinációja a $\theta = 3^\circ$ és $\theta = 6^\circ$ a kétféle Doppler-faktor alkalmazása mellett.



40. ábra. A J0909+0354 esetében meghatározott Doppler-faktor értékei a plazmalyaláb-
nak az észlelő látóirányával bezárt szöge függvényében. A szürke terület a 2019-es EVN
észlelések alapján meghatározott lehetséges Doppler-faktor értékeket jelöli (9. táblázat 9-10.
oszlopa), míg a szaggatott-pontozott vonal a rádió-röntgen adatok alapján számított Doppler-
faktort szemlélteti. A négyzethálós és sötétszürke területek rendre a $\Gamma = 5 - 15$ és $\Gamma = 15 - 25$
Lorentz-faktor határokhoz tartozó megengedett paraméterteret jelölik.

Az inverz-Compton Doppler-faktor ($\delta_{IC} > 2$) felhasználásával az észlelő látóirányával
bezárt szög megengedett értékei $\theta \leq 23^\circ$, $\theta \leq 14^\circ$, és $\theta \leq 11^\circ$ rendre a $\Gamma = 5$, $\Gamma = 15$ és
 $\Gamma = 25$ Lorentz-faktorok feltételezésével.

A plazmalyalábra jellemző paraméterek értékeinek a mérések alapján lehetséges tar-
tományait a 40. ábra szemlélteti.

A rádiójet sajátmozgása a VLBA és az EVN adatok alapján

A 2013-as VLBA és a 2019-es EVN mérések adataira illesztett Gauss-modellkomponensek
pozícióinak felhasználásával megbecsültem a J0909+0354 kvazár plazmalyalábjában meg-
figyelhető sajátmozgás mértékét. A globális hálózattal végzett 1992-es mérés felhasználá-
sa – a hosszabb időbázis miatt – pontosabbá tehetné a számítást, a rossz észak–déli irányú
felbontás miatt azonban a modellkomponensek pozíciói bizonytalanok, továbbá pozíció-
szögei is jelentősen eltérnek a másik két mérésben azonosított jetkomponensek esetén
kapott értékektől (9. táblázat). Minthogy a 2013-as és 2019-es mérések időpontjában
egyaránt egy „mag” és két jetkomponenssel jellemezhető legjobban a kvazár pc-skálájú
jeterkezete, feltételeztem, hogy a VLBA térképen azonosított B1 és B2 komponensek a
későbbi EVN mérés C1 és C2 szerkezeti elemeinek feleltethetők meg. A két mérési idő-
pontban megfigyelt struktúra hasonlóságát tovább erősíti, hogy a középső és külső azo-
nosított modellkomponensek pozíciószögei hibahatáron belül megegyeznek (9. táblázat,

5. oszlop). A két mérés között eltelt 5,84 év alatt a forrás B1–C1 és B2–C2 komponensei rendre $\mu_1 = 0,30 \pm 0,03$ mas év^{-1} és $\mu_2 = 0,37 \pm 0,02$ mas év^{-1} mértékű sajátmozgást végeztek. Figyelembe véve a forrás saját vonatkoztatási rendszere és az észlelő együttmozgó rendszere közötti idődilatació hatását, valamint felhasználva a szögátmérő és lineáris méret közötti összefüggést, a sajátmozgások értékei $\beta_1 = 32 \pm 3$ c és $\beta_2 = 40 \pm 3$ c látszó szuperluminális sebességeknek feleltethetők meg.

A két mérés felbontása közötti különbség miatt elengedhetetlen, hogy az egyes komponensek egymással való megfeleltethetőségét ellenőrizzem. Az azonosítás (és így a sajátmozgás meghatározásának) igazolásához a lényegesen hosszabb mérési időtartamot felölelő (ld. 4.3. fejezet) EVN adatsorból leválasztottam tíz darab, a mérés során egyenletesen elosztott 1–1 perces almintát. Minden minta esetén lecsökkentettem a maximális bázisvonalméretet a VLBA mérések során elérttel megegyező nagyságúra, ezáltal biztosítva a hasonló felbontást. A minták mindegyikén külön-külön elvégeztem a fázis- és amplitúdó-önkalibrációt, valamint a modellillesztés lépéseit. A kiválasztott 1 perces adatsorok 20%-a esetén tudtam mindhárom modellkomponenst azonosítani, az esetek többségében csupán egy „mag” és egy „jet” komponens jelenléte volt igazolható, melyek közül utóbbi pozíciója a két VLBA jetkomponens közé esett. Megjegyzendő, hogy bár az európai hálózat felbontása meghaladja a VLBA esetén elérhető mértéket, viszont az utóbbi jóval érzékenyebb a kevésbé kompakt szerkezeti elemek detektálására. Bár a szakirodalom beszámol hasonlóan jelentős sajátmozgásértékekről (pl. 13 db AGN $\beta_{\text{app}} > 20$, 3 db AGN $\beta_{\text{app}} > 30$, Kellermann és mtsai, 2004), a különböző hálózatok méréseiben azonosított szerkezeti elemek egymással való egyeztetésének bizonytalansága miatt a meghatározott sajátmozgások érvényessége megkérdőjelezhető. A sajátmozgások megbízhatatlanságát alátámasztják továbbá a Urry és Padovani (1995) alapján meghatározott valószínűleg magas Lorentz-faktor értékek ($\Gamma_{\text{min}} = 50$ és $\Gamma_{\text{max}} = 160$), melyek jelentősen eltérnek a $z > 3$ vöröseltolódású kvazárookra megállapított $5 \lesssim \Gamma \lesssim 15$ tartománytól (Volonteri és mtsai, 2011), továbbá nagy mértékben meghaladják a $\Gamma = 25$ empirikus maximális értéket (pl. Kellermann és mtsai, 2004; Lister és mtsai, 2016; Pushkarev és mtsai, 2017). A látszó sebességek valótlanságához hozzájárulhat, hogy a két mérési időpont között nem telt el elegendő idő a komponensek sajátmozgásának megbízható detektálására. A valószínűleg magas Lorentz-faktorokat emellett okozhatja, hogy a komponensek (egy-egy mérési időpontokban történő) egymással való megfeleltetése a két mérés során használt, eltérő felbontású interferométeres hálózatok miatt bizonytalan. A kérdés megnyugtató tisztázásához az elkövetkező 5–10 éves időszakban, ideális esetben több alkalommal is megismételt 5 GHz-es VLBI mérésekre lenne szükség.

4.6. Összefoglalás és következtetések

A J0909+0354 jelű nagy vöröseltolódású kvazárról rádió- és röntgentartományban elvégzett mérések komplex morfológiájáról árulkodnak. A kiloparszekes skálájú VLA rádió-szerkezetben megfigyelhető „mag” és jet (forrópont) mellett a *Chandra* röntgentérképe egy további, északkeleti komponenst fedett fel. A három nagyságrenddel finomabb felbontást nyújtó VLBI módszerrel elvégzett rádiómérések alapján a pc skálájú jet az ÉNY forrópontot táplálja. Bár az égbolton található röntgenforrások felületi számsűrűsége és a röntgenfluxusok alapján valószínűsíthető a kvazár kapcsolata az ÉK komponenssel, az onnan érkező rádiósugárzás hiánya, valamint az optikai tartományban való marginális detektálás miatt feltételezhető, hogy az ÉK komponens egy előtér- vagy háttérobjektum (pl. aktív galaxismag vagy összeolvadó galaxispár), vagy annak gravitációsan lencsézett képe.

A magas fényességi hőmérsékletek (és ezáltal a jelentős relativisztikus Doppler-erősítés), a rádió- és röntgenspektrum változékonysága, a jet pc és kpc skálák közötti $\sim 30^\circ$ -os elfordulása, továbbá a nyalábnak az észlelő látóirányára vonatkoztatott kis inklinációja mind arra utal, hogy a forrás a blazárok csoportjába tartozik. A kpc-es skálára vonatkozó teljes rádió-fluxusűrűségek alapján a kvazár spektruma lapos, a sugárzást a „mag” dominálja. A pc-es rádiónyaláb spektruma az EVN és VLBA mérések alapján meredeknek tűnik, azonban ez bizonyára a változékonyságnak és a VLBA két frekvenciasávjában eltérő felbontásnak tudható be.

5. Összefoglalás

Különböző hullámhossztartományokban elvégzett mérések összehasonlításán alapuló becslések azt mutatják, hogy a korai Univerzum aktív galaxismag (AGN) populációját jelentős mértékben dominálják a blazárok, vagyis azok az AGN-ek, amelyek által kibocsátott relativisztikus plazmalyáb (jet) az észlelő látóirányával $1/\Gamma$ -nál kisebb szöget zár be (Volonteri és mtsai, 2011). Egyelőre elenyésző azoknak a nagy vöröseltolódású AGN-eknek a száma, melyek tényleges parszek skálájú szerkezete és fizikai paraméterei ismertek (pl. Coppejans és mtsai, 2016), még ritkábbak azok az objektumok, melyekre direkt mérésekkel meghatározott jetkomponens-sajátmozgással rendelkezünk (Frey és mtsai, 2015; Perger és mtsai, 2018a; An és mtsai, 2020; Zhang és mtsai, 2020). Ennek oka, hogy a komponensek pozícióiban bekövetkező változások pontos meghatározásához legalább két, megfelelően távoli időpontban elvégzett VLBI mérés szükséges, ami akár évtizedeket is felölelhet. A korai Univerzum rádiósugárzó aktív galaxismagjaira meghatározott Lorentz-faktorok a kis elemszámú mintában is többféle különböző értéket vehetnek fel ($\Gamma = 10 - 15$, pl. Veres és mtsai 2010; Frey és mtsai 2015; Zhang és mtsai 2020; $\Gamma = 3 - 6$, pl. Perger és mtsai 2018a; An és mtsai 2020), így a statisztikai értelemben vett alacsonyabb átlagos Lorentz-faktorok feltételezéséhez (és ezáltal a „túl sok blazár” problémája egyik lehetséges magyarázatának vizsgálatához) újabb kvazárok rádiónyalábjainak VLBI módszerrel történő vizsgálata szükséges.

A dolgozat első felében a bevezető fejezetet követően bemutattam az általam összeállított, $z \geq 4$ vöröseltolódású AGN-eket tartalmazó katalógust és annak egy alkalmazását.

Az alapkatalógust három nagy AGN-gyűjtemény felhasználásával hoztam létre. A katalógus aktuális verziója az alábbi információkat tartalmazza: II. egyenlítői koordináták (rektaszcenzió és deklináció), azonosító (név), rádió- és röntgenelnevezések (amennyiben ismertek), vöröseltolódás, optikai fényesség (és azok hibái), a felfedezésre és a vöröseltolódásra vonatkozó szakirodalmi hivatkozások a SAO/NASA szakirodalmi adatbázisának bibliográfiai formátumában, továbbá rádiótartományú fluxussűrűségek a FIRST és NVSS felmérésekben való azonosítás esetén, valamint egyedi VLBI észlelésekből származó fluxussűrűségek és azok szakirodalmi publikációi.

A katalógus a legutolsó bővítést követően (2020 májusában) 2823 db $z \geq 4$ vöröseltolódású AGN-t tartalmaz, melyek közül 185 forrás bocsát ki ~ 1 mJy-nél erősebb rádiósugárzást a FIRST vagy az NVSS felmérésekben. Közülük 47 AGN rendelkezik archív vagy folyamatban lévő VLBI méréssel. 2267 db található a FIRST felmérés által vizsgált égbolterületen, de nem bocsát ki számottevő (> 1 mJy) rádiósugárzást 1,4 GHz frekvencián, és további 371 AGN kívül esik a mind a FIRST, mind az NVSS felmérések égboltlefedettségén. A katalógus a szakirodalomban mindmáig egyedinek számít, és további kutatások kiindulópontja lehet a közeljövőben.

A katalógus egyik alkalmazásaként 2229 db ~ 1 mJy-nél halványabb AGN pozíciójára középpontozott FIRST rádiótérképének átlag és medián halmozását végeztem el. A halmozás eredményeképp megállapítottam, hogy a populáció karakterisztikus 1,4 GHz-es monokromatikus rádióteljesítménye a $2,9 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1} \leq P_{1,4\text{GHz}} \leq 6,8 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$ tartományba esik. Amennyiben a rádiósugárzás eredetét kizárólag AGN aktivitásnak tulajdonítjuk, a populáció a mérsékeltén rádióhangos osztályba tartozik. A másik végletet feltételezve, miszerint a sugárzás kizárólag az anyaggalaxisokban lezajló csillagkeletkezés eredménye, a csillagkeletkezési ráta $370 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ és $4200 M_{\odot} \text{ év}^{-1}$ közötti értékeket vehet fel. Infravörös tartományban elvégzett mérések adatainak bevonásával arra a következtetésre jutottam, hogy a vizsgált források halmozásával felfedett rádiósugárzás rádiócsendes AGN-ek és jelentős csillagkeletkezést mutató galaxisok együttes eredménye.

A vizsgálat jelentősége, hogy jelenleg még szinte alig van olyan egyedi objektum ebből a populációból, amelynek rádiótulajdonságait egyedileg, részletesen megvizsgálták volna.

A dolgozat második felében két, nagy vörösetolódással rendelkező AGN parszek és kiloparszek skálájú szerkezetét vizsgáltam rádióinterferométeres mérések felhasználásával.

A PMN J2134–0419 jelű, $z = 4,3$ vörösetolódású kvazár kpc skálájú morfológiáját a VLA archívumában elérhető, korábban nem publikált 1,4 és 4,8 GHz-es adatsorok alapján vizsgáltam. A 4,8 GHz-es térképen egy kompakt, felbontatlannak tűnő rádióforrást láthatunk, a vizibilitásadatokra illesztett körszimmetrikus modellkomponensek alapján azonban egy „mag” és egy nyalábkomponens azonosítható, melyek teljes fluxussűrűsége $224,8 \pm 6,2$ mJy. Az 1,4 GHz-es rádiótérképen megfigyelhető egy ~ 5 szögmásodpercig (~ 35 kpc) kiterjedő jetszerkezet, amit a vizibilitásadatokra illesztett Gaussmodellkomponensek is megerősítenek: a mag mellett további két jetkomponenst azonosítottam. A teljes integrált fluxussűrűség 1,4 GHz-en $311,5 \pm 6,8$ mJy.

A kvazár parszek skálájú rádiószerkezete összetett: megfigyelhető a hangsúlyos mag komponens, és az attól távolodva egyre diffúzabbá váló jet. A mag rádiósugárzását relativisztikus Doppler-nyalábolás jellemzi. A kvazár teljes integrált fluxussűrűsége az 1999-es ($136,1 \pm 5,9$ mJy) és 2015-ös ($185,5 \pm 12,0$ mJy) EVN mérések között mintegy 30%-kal megváltozott.

A mindkét mérési időpontban azonosított jetkomponens pozícióváltozása alapján a sajátmozgás $\mu = 0,035 \pm 0,023$ mas év^{-1} , mely megfeleltethető $\beta_a = (4,1 \pm 2,7) c$ látszó superluminális sebességnek. A nyaláb a parszek és kiloparszek léptékek között $\sim 60^\circ$ -kal elfordul. A jet áramlási sebességét jellemző Lorentz-faktor $2 \lesssim \Gamma \lesssim 7$, míg a jetnek az észlelő látóirányára vonatkoztatott inklinációja $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 20^\circ$ határok közötti érték. A fentiek alapján a forrás a blazárok csoportjába tartozik.

A tanulmány megjelenésének idején a PMN J2134–0419 volt a második legtávolabbi rádiókvazár, amelyben a relativisztikus plazmanyaláb komponensének sajátmozgását sikerült közvetlenül megmérni.

A PMN J0909+0354 $z = 3,288$ vöröseltolódású kvazár jelentős rádió- és röntgensugárzást bocsát ki. A kiloparszekes rádiómorfológiát egy mag és egy északnyugati nyaláb komponens (ÉNY), a röntgenszerkezetet ezeken kívül egy további, északkeleti irányban megfigyelhető komponens (ÉK) alkotja. Az ÉNY rádió- és röntgenkomponens a kvazár forrópontja, míg az ÉK röntgenkomponens vélhetően egy előtér- vagy háttérobjektum, esetleg egy háttérforrás gravitációsan lencsézett képe – pontos mibenléte a jelenleg rendelkezésre álló mérések alapján még nem tisztázott. A kpc-es szerkezet mag komponensének fluxussűrűsége 6,2 GHz-en $193,6 \pm 12,5$ mJy, míg a 0,5 – 7 keV-os energiasávban $0,165 \pm 0,018$ μ Jy. A kvazár mind rádió-, mind röntgentartományban jelentős változékonyságot mutat. A kpc-es rádiónyaláb spektrálindexe $\alpha_{\text{kpc}} = -0,11 \pm 0,13$, aminek alapján a J0909+0354 spektruma lapos, továbbá sejthető, hogy a forrás gigahertz körüli frekvencián maximumot mutató kvazár (gigahertz peaked spektrum source – GPS, Stanghellini és mtsai, 1998). A 0,5 – 195 keV energiatarományra meghatározott fotonindex $\gamma = 1,26 \pm 0,15$.

A PMN J0909+0354 kvazár parszek skálájú szerkezetében a mag mellett több nyalábkomponenst azonosítottam. A nyaláb a magtól távolodva, északi irányban ~ 10 mas (~ 75 pc) távolsáig megfigyelhető. A kvazár integrált fluxussűrűsége az illesztett VLBI modellkomponensek alapján (60 pc-en belül) $70,2 \pm 3,6$ mJy. A parszekes nyaláb az ÉNY komponens irányába terjed, miközben egyre diffúzabbá válik és a két lépték között $\sim 30^\circ$ -kal elfordul. A nyaláb észlelő látóirányára vonatkoztatott inklinációja különböző lehetséges Lorentz-faktorok alkalmazása mellett $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 23^\circ$ határok közötti érték. A fentiek alapján a forrás a blazárok csoportjába tartozik.

Az általam vizsgált J0909+0354 egyike a viszonylag kis számú nagy vöröseltolódású kvazárnak, amelyek esetében kpc-es röntgenjetet detektáltak (pl. Fabian és mtsai, 2003; Simionescu és mtsai, 2016; Schwartz és mtsai, 2019; Worrall és mtsai, 2020). A kvazár, és további, hozzá hasonló új források felfedezése és vizsgálata hozzájárulhat az AGN-nyalábok kemény röntgenemisszióját létrehozó fizikai folyamatok valós természetét – szinkrotron ön-Compton folyamat (Königl, 1981) vagy a kozmikus háttérsugárzáson történő Compton-szóródás folyamata (Tavecchio és mtsai, 2000) – magyarázó elméletek közötti ellentmondás feloldásában (pl. Snios és mtsai, 2020; Worrall és mtsai, 2020; Schwartz, 2020).

A bevezetésben bemutatott problémák megoldásához és a kutatási téma nyitott kérdéseinek megválaszolásához – bár számottevően hozzájárulnak az értekezésben bemutatott tézisekben foglaltak – további mérések szükségesek, lehetőleg minél több hullámhossztartományban. A rádiótartományú vizsgálatok elvégzéséhez a részvételemmel dolgozó kutatócsoportnak rendelkezésére állnak folyamatban lévő (projektkód: EC073, EF029 és EG102, vezető kutató: Hongmin Cao, Frey Sándor és Gabányi Krisztina) mérésorozatok az Európai VLBI Hálózattal. A programok mindegyikében $z > 4$ vöröseltolódású AGN-ekre vonatkozó méréseket céloztunk meg. Az EC073 jelű projektben három meredek rádióspektrumú (azaz az észlelő látóirányával feltételezhetően nagyobb szöget bezáró jettel rendelkező), de jelentős röntgensugárzást kibocsátó kvazár rádiósugárzását vizsgáljuk 1,7 és 5 GHz-en. Az EF029 projektben a J2102+6015 jelű, jelentős sajátmozgást mutató fiatal kvazár polarizált (5 és 22 GHz-es) rádiósugárzását célzó méréseket terveztünk és folytatunk. A még folyamatban lévő mérési sorozatban (EG102) nem kevesebb, mint tizenhárom új blazárjelölt pc skálájú szerkezetének és spektrumának felfedését céloztuk meg (1,7 és 5 GHz-en). A jövőben újabb mérési pályázatok beadását tervezzük a korai Univerzum rádiósugárzó aktív galaxismagjainak megismerése céljából. Ezekben többek között $z \sim 6$ vöröseltolódású halvány kvazárok, forró porba burkolózó galaxisok, fiatal, kompakt szimmetrikus rádiónyalábokkal rendelkező AGN-ek, valamint $z > 3$ vöröseltolódású fényes kvazárok parszek skálájú szerkezetének feltárását és megismerését tervezzük földi és (a *RadioAstron* űrteleszkóp bevonásával megalkotott) űr-VLBI hálózatok méréseinek felhasználásával.

6. Summary

Number density estimations based on observations conducted in various wavebands showed that blazars, i.e. active galactic nuclei (AGNs) with a jet inclination angle to the line of sight smaller than $1/\Gamma$ dominate the population at high redshifts (Volonteri et al., 2011). The number of high-redshift AGNs for which the detailed parsec-scale structure and physical parameters are known (e.g. Coppejans et al., 2016) is still small. Sources with jet component proper motions determined using direct observations are even rarer (Frey et al., 2015; Perger et al., 2018; An et al., 2020; Zhang et al., 2020). This is due to the fact that at least two (or more) VLBI observational epochs (with sufficient time span between the individual measurements) are required to detect the subtle changes in the jet component positions, which could last for decades. Despite the small sample, the bulk Lorentz factors determined for radio-emitting AGNs in the early Universe span a wide ($\Gamma = 10 - 15$, e.g. Veres et al. 2010; Frey et al. 2015; Zhang et al. 2020; $\Gamma = 3 - 6$, e.g. Perger et al. 2018; An et al. 2020), therefore to assume statistically smaller values for Γ (and thus providing a solution to the problem of “too many blazars”), further examination using new VLBI observations of additional quasars is needed.

Following a general introduction, in the first half of the dissertation, I describe the construction and the properties of my catalogue consisting of AGNs with redshifts $z \geq 4$, and I present one of its possible applications.

To construct the base catalogue, I cross-correlated three large AGN lists. After the latest update (May 2020), the catalogue consists of 2823 $z \geq 4$ AGNs, from which 185 source was detected in either FIRST or NVSS and has flux densities greater than ~ 1 mJy. From these, 47 AGNs have archival or currently ongoing VLBI measurements. 2267 objects are in the footprint of FIRST which do not show significant radio emission (> 1 mJy) at 1.4 GHz, and further 371 are outside the sky coverage of both FIRST and NVSS. As of now, this catalogue is unique in the literature, and could facilitate further studies in the near future.

As a utilization of the catalogue, I applied mean and median image stacking on FIRST radio maps centred on the positions of 2229 AGNs with flux densities less than ~ 1 mJy. I found that the characteristic monochromatic 1.4-GHz radio power of the population is in the range of $2.9 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1} \leq P_{1.4\text{GHz}} \leq 6.8 \times 10^{24} \text{ W Hz}^{-1}$. Assuming that the only process responsible for the radio emission is AGN activity, the population consists of moderately radio-loud AGNs. On the other hand, if the radio emission originates solely from the ongoing star formation in the central region of the host galaxy, the value of the characteristic star formation rate is between $370 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$ and $4200 \text{ M}_{\odot} \text{ yr}^{-1}$. Including data from infrared measurements, I concluded that the radio emission found from the results of the image stacking is the cumulative effect of a population of both radio-quiet

AGNs and galaxies with enhanced star formation. The importance of this stacking analysis lies in the fact that so far very few individual objects from this population are studied in details in the radio.

In the second half of the dissertation, I present studies on the parsec- and kiloparsec-scale structures of two high- redshift AGNs using radio interferometric measurements.

I examined the kpc-scale structure of the quasar PMN J2134–0419 at redshift $z = 4.3$ using archival, but previously not published VLA datasets observed at 1.4 and 4.8 GHz. The 4.8 GHz radio map shows a compact, apparently unresolved radio source, however fitting the visibility data with circular Gaussian model components revealed a ‘core’ and a jet component, with a total flux density of 224.8 ± 6.2 mJy. On the 1.4 GHz radio map, an extended jet structure is visible as far as ~ 5 arcseconds (~ 35 kpc), which is confirmed by the Gaussian model components fitted to the visibilities: alongside the core, I identified two additional jet components. The total integrated flux density at 1.4 GHz is 311.5 ± 6.8 mJy.

The parsec-scale structure of the quasar is complex: it has an emphasised core and an extended jet that becomes more diffuse downstream. The radio emission of the core is relativistically Doppler boosted. The total integrated flux density of the quasar varies approximately by 30% between the 1999 (136.1 ± 5.9 mJy) and 2015 epoch (185.5 ± 12.0 mJy) EVN observations. Based on the positional differences of jet components identified at both epochs, the proper motion is $\mu = 0.035 \pm 0.023$ mas yr⁻¹, which corresponds to $\beta_a = (4.1 \pm 2.7)c$ apparent superluminal speed. The jet bends by $\sim 60^\circ$ between the pc and kpc scales. The value of the bulk Lorentz factor characterising the jet propagation speed spans the range $2 \lesssim \Gamma \lesssim 7$, while the jet inclination angle with respect to the line of sight of the observer is in the range of $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 20^\circ$. Based on the properties above, the source is classified as a blazar.

At the time of publishing these results, PMN J2134–0419 was the second most distant radio quasar with direct measurements of jet component proper motion.

The quasar PMN J0909+0354 ($z = 3.288$) shows prominent radio and X-ray emission. The kiloparsec-scale radio morphology consists of a core and a north-western jet component (NW), while the X-ray structure has an additional component on the north-eastern side of the core (NE). The NW radio and X-ray component is the hot spot of the quasar, while the NE X-ray component is presumably a foreground or background object, or the gravitationally lensed image of a background source– currently available data do not reveal the exact nature of this feature. The flux density of the core component in the kpc-scale structure at 6.2 GHz is 193.6 ± 12.5 mJy, and it is 0.165 ± 0.018 μ Jy in the 0.5 – 7 keV energy range. The quasar shows significant variability in both its radio and X-ray emission. The spectral index of the kpc radio jet is $\alpha_{\text{kpc}} = -0.11 \pm 0.13$, making

the spectrum of J0909+0354 flat, furthermore it is implied that the quasar is a gigahertz peaked spectrum source (GPS, Stanghellini és mtsai, 1998). The photon index determined in the 0.5 – 195 keV energy range is $\gamma = 1.26 \pm 0.15$.

I identified a core and multiple jet components in the parsec-scale radio structure of the quasar PMN J0909+0354. The jet is visible up to ~ 10 mas (~ 75 pc) away from the core northwards. The integrated flux density based on the VLBI model components (up to ~ 60 pc) is 70.2 ± 3.6 mJy. The parsec-scale jet proceeds towards the NW component, becomes more diffuse with increasing distance, and it bends by $\sim 30^\circ$ between the two scales. The inclination angle of the jet with respect to the line of sight of the observer – applying various values of bulk Lorentz factors – is in the range of $3^\circ \lesssim \theta \lesssim 23^\circ$. Based on the properties above, the source is a blazar.

The high-redshift quasar J0909+0354 is one of the few sources with detection of an X-ray jet at kpc scales (e.g. Fabian et al., 2003; Simionescu et al., 2016; Schwartz et al., 2019; Worrall et al., 2020). Discovery of quasars like J0909+0354 can contribute to reveal the true nature of the hard X-ray emission of AGN jets, and can resolve the debate (e.g. Snios et al., 2020; Worrall et al., 2020; Schwartz, 2020) over the current theories (synchrotron self-Compton process, Königl 1981, or inverse Compton scattering on the Cosmic Microwave Background, Tavecchio et al. 2000).

Solving the problems detailed in the introduction and answering the open questions of the research topic – besides the contribution the theses presented in the dissertation – require further measurements, preferably in multiple wavebands. For studies in the radio waveband, the research team I am participating in, has ongoing observing projects (project code: EC073, EF029, and EG102, PI: Hongmin Cao, Sándor Frey, and Krisztina Gabányi) with the European VLBI Network. In all of these projects we proposed measurements targeting $z > 4$ AGNs. In project EC073 we study three quasars (at 1.7 and 5 GHz) that have steep spectrum (and presumably misaligned jets), and show unusually strong X-ray emission. In the project EF029, we observe the polarised (5 and 22 GHz) emission of the young quasar J2102+6015, which seems to have a remarkably large proper motion. In the still ongoing project (EG102) we targeted as many as thirteen new blazar candidates (at 1.7 and 5 GHz) to reveal their pc-scale structures and to study their radio spectra. In the future, we plan to propose further observations targeting radio-emitting active galactic nuclei in the early Universe. The aim of these projects is to reveal and understand the parsec-scale structure of faint quasars at redshifts ~ 6 , hot dust-obscured galaxies, compact symmetric objects, and bright $z > 3$ quasars, using observations conducted by ground-based and (with the inclusion of the *RadioAstron* space telescope) space-VLBI arrays.

Ábrák jegyzéke

1.	Az AGN-ek egyesített modellje.	4
2.	Egy BL Lac típusú AGN optikai színeképe.	5
3.	Az 1. és 2. típusú Seyfert-galaxisok, valamint egy kvazár optikai színeképe.	7
4.	Fanaroff–Riley I és II típusú rádiógalaxisok.	8
5.	Az impulzusmomentum–akkréciós ráta szerinti egyesített modell.	9
6.	A radiatív és jetmódban lévő AGN-ek.	11
7.	A „sötét buborék” modell.	14
8.	A nagy vöröseltolódású AGN-ek számsűrűsége.	16
9.	AGN-sajátmozgások a vöröseltolódás függvényében.	17
10.	A 300 m-es Arecibo és az 500 m-es FAST rádióantennák.	18
11.	A rádióforrás és rádióantenna elhelyezkedése	19
12.	Az (u, v) sík elhelyezkedése.	21
13.	Az Európai VLBI Hálózat rádióantennái.	22
14.	A VLBA rádióantennái.	24
15.	A Very Large Array.	25
16.	A VLA FIRST felmérés égboltlefedettsége.	26
17.	A VLBI technika alapfogalmai I.	31
18.	A VLBI technika alapfogalmai II.	32
19.	Amplitúdó- és fázisadatok az (u, v) síkra vetített bázisvonalhossz és az idő függvényében.	34
20.	A VLA adatok feldolgozásának folyamatábrái az AIPS, CASA és DIFMAP programcsomagok használatával.	39
21.	Nagy vöröseltolódású AGN-ek eloszlása az égbolton.	41
22.	Nagy vöröseltolódású AGN-ek eloszlása a vöröseltolódás függvényében	43
23.	A $z \geq 4$ AGN-ek piros és zöld sávú szűrővel mért magnitúdóinak eloszlása	44
24.	A halmozott AGN-ek eloszlása a vöröseltolódás függvényében.	47
25.	A hagyományos átlag módszerével halmozott térképek a $z \geq 4$ AGN-ekre.	49
26.	Medián módszerrel halmozott térképek a $z \geq 4$ AGN-ekre.	50
27.	A medián módszerrel halmozott térképek fluxussűrűség-eloszlása a közép-ponttól való távolság függvényében.	52
28.	Mesterséges AGN-pozíciók térképeinek halmozása átlag és medián módszerrel.	54
29.	q_{24} értékek a vöröseltolódás függvényében a $z \geq 4$ AGN-ekre	62
30.	A J2134–0419 kvazár NVSS és FIRST térképei.	65

31.	A J2134–0419 (u, v) lefedettsége a két EVN-mérés során.	69
32.	A J2134–0419 kvazár EVN térképei.	70
33.	A J2134–0419 kvazár 1,4 és 4,8 GHz-es VLA térképei.	71
34.	A J2134–0419-re meghatározott jetparaméterek.	74
35.	A J0909+0354 röntgenfénygörbéje.	81
36.	A J0909+0354 <i>Chandra</i> és VLA méréseinek kompozit térképe.	82
37.	A J0909+0354 kvazár szögmásodperc léptékű VLA és <i>Chandra</i> térképei.	85
38.	A J0909+0354 kvazár természetes súlyozású 4/5 GHz-es rádiótérképei.	88
39.	A J0909+0354 kvazár spektrális energiaeloszlása.	94
40.	A J0909+0354 Doppler-faktor értékei a plazmanyalábnak az észlelő látóirányával bezárt szöge függvényében.	95
B.1.	A kalibrátorforrás amplitúdói és fázisai a kalibráció során.	vii
B.2.	A célforrás amplitúdói és fázisai a kalibráció során.	ix

Táblázatok jegyzéke

1.	Az AGN-ek egyesített elmélet szerinti csoportosítása.	3
2.	A halmozás során felhasznált 2229 AGN listájának első 5 eleme.	48
3.	A hagyományos átlag és a medián módszerrel halmozott térképek tulajdonságai.	51
4.	A megbecsült 1,4 GHz-es rádióteljesítmények és csillagkeletkezési ráták az összeadott 2229 FIRST térkép középponti pixeljeire.	56
5.	A J2134–0419 térkép- és modellparaméterei 5 GHz-en	69
6.	A J2134–0419 kvazár VLA térképének és modellillesztésének paraméterei.	71
7.	A J0909+0354 kvazár VLA adatsorára illesztett modellparaméterek.	84
8.	A J0909+0354 kvazár <i>Chandra</i> adatsorára illesztett modellparaméterek.	85
9.	A J0909+0354 VLBI észleléseinek térkép- és modellparaméterei.	87

Függelék

A. Rövidítések, betűszók, idegen kifejezések

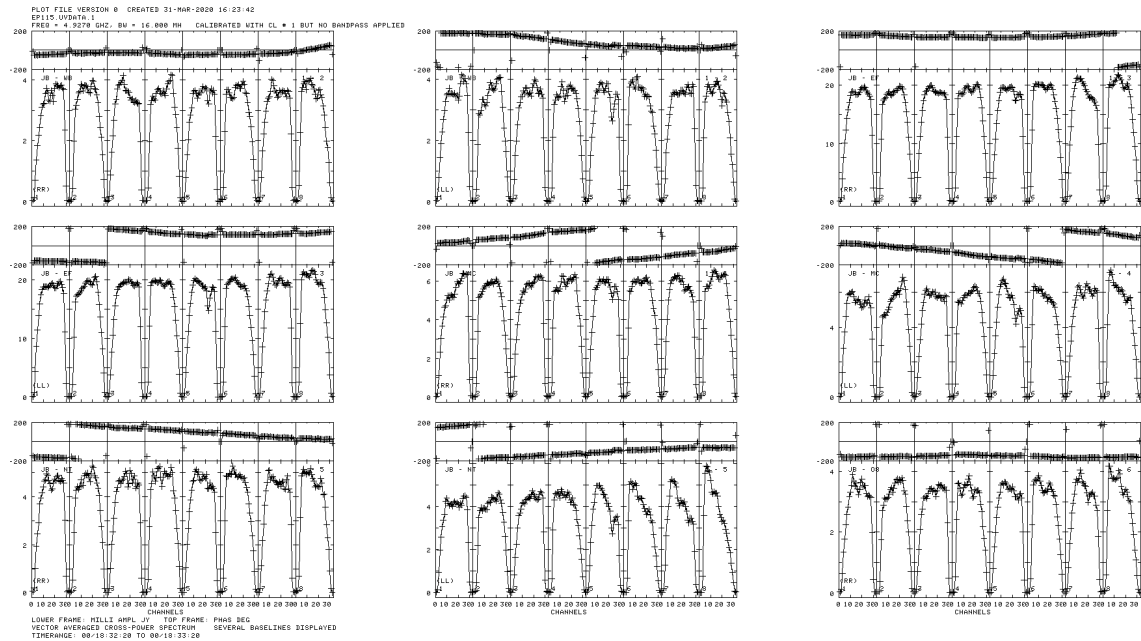
ADAF	advection dominated accretion flow – advekció által dominált akkréciós áramlás
AGN	active galactic nucleus – aktív galaxismag
AIPS	Astronomical Image Processing System – csillagászati képfeldolgozó rendszer
BAL QSO	broad absorption line quasi stellar object – széles abszorpciós vonalas kvazár
blazár	BL Lac típusú aktív galaxismag kvazárokra hasonlító névalkotása
BLR	broad line region – széles vonalak keletkezési régiója
BLRG	broad line radio galaxy – széles vonalú rádiógalaxis
CASA	Common Astronomy Software Applications – általános csillagászati szoftveralkalmazások
CLASS	Cosmic Lens All Sky Survey – az NRAO 8,5 GHz-es égboltfelmérése
clean map	clean térkép – a rádióforrás clean dekonvolúciós eljárással előállított intenzitáseloszlásának térképe
COSMOS	Cosmic Evolution Survey – több hullámhossztartományban elvégzett méréseket összefoglaló projekt; rádiótartományban a VLA 3 GHz-es felmérése
difmap	differential mapping – differenciális térképezés
dirty beam	piszkos nyaláb – az interferométer pontválaszfüggvénye
dirty map	piszkos térkép – a forrás sugárzásának az interferométer pontválaszfüggvényével eltorzított térképe
Doppler-faktor	az AGN-nyaláb relativisztikus felerősítését vagy gyengítését jellemző paraméter
E-CDFS	Extended Chandra Deep Field-South – a <i>Chandra</i> űrteleszkóp déli égboltfelmérése
EVN	European VLBI Network – Európai VLBI Hálózat
FAST	Five-hundred-meter Aperture Spherical Telescope – ötszáz méter apertúrájú rádióteleszkóp

fényességi hőmérséklet	egy adott hullámhossztartományban kibocsátott, adott intenzitású sugárzásnak megfelelő feketetest-sugárzás hőmérséklete
FIRST	Faint Images of the Radio Sky at Twenty-Centimeters – halvány képek a 20 cm-es rádióégboltról (felmérés)
FITS	Flexible Image Transport System – rugalmas képátviteli rendszer
fotonindex	a röntgenspektrum meredekségét jellemző paraméter
FR I	Fanaroff–Riley I típusú rádiógalaxis
FR II	Fanaroff–Riley II típusú rádiógalaxis
fringe	az egymást erősítő és kioltó hullámfrontok mintázata az interferométer antennapárjai között
FSRQ	flat spectrum radio quasar – lapos spektrumú rádiókvazár
FWHM	full width at half maximum – félértékszélesség
gain curve	nyereségi görbe – az antennanyereségnek a megfigyelt rádióforrás horizont feletti magasságától való függését leíró paraméter
HEASARC	High Energy Astrophysics Science Archive Research Center – a NASA nagyenergiás asztrofizikai kutatásainak archívuma
HMQ	Half Million Quasars catalogue – a Félmillió Kvazár katalógus
IAU	International Astronomical Union – Nemzetközi Csillagászati Unió
IC/CMB	inverse Compton scattering of cosmic microwave background photons – a kozmikus mikrohullámú háttérsugárzás fotonjainak az AGN-nyaláb elektronjain végbemenő inverz Compton-szóródása
IF	intermediate frequency – közbenső frekvencia
IR QSO	infrared quasi stellar object – infravörös (rádiócsendes) kvazár
jet	az aktív galaxismagok relativisztikus nyalábja
JIVE	Joint Institute for VLBI ERIC – Európai VLBI Intézet
JVLA	Karl G. Jansky Very Large Array – Karl G. Jansky Nagyon Nagy Hálózat
kpc	kiloparsec – kiloparszek
kvazár	quasi stellar radio source, quasar – csillagszerű rádióforrás
LBA	Lyman-break analogue – a spektrumukban hirtelen leeső intenzitást, ún. Lyman-levágást mutató galaxisok

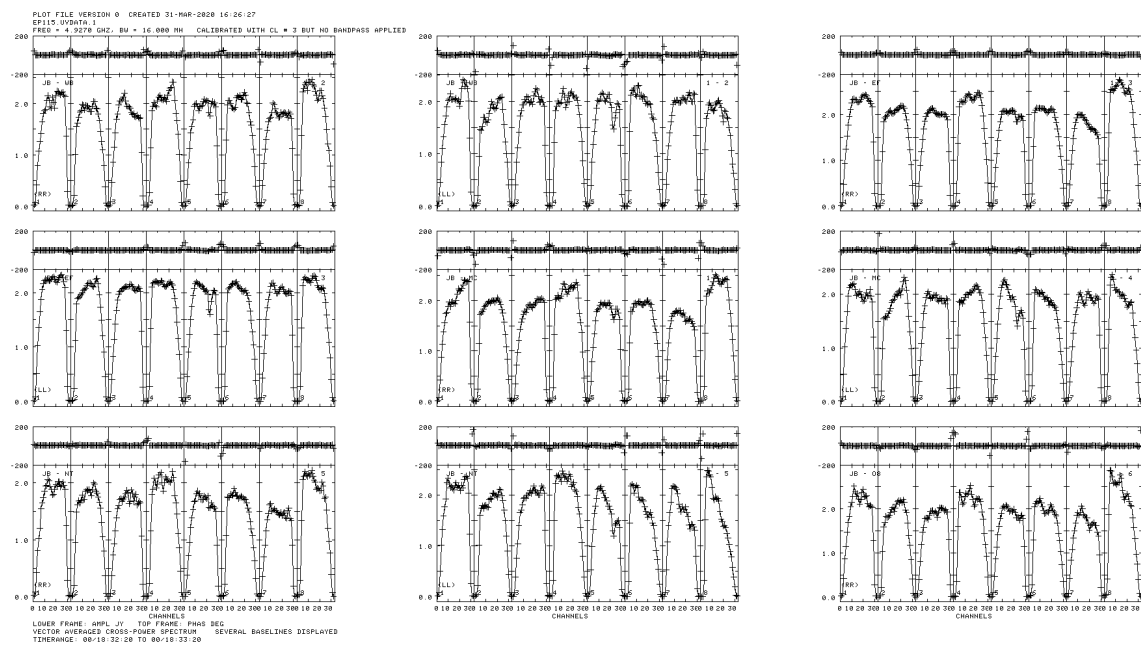
LF	luminosity function – luminozításfüggvény
LINER	low ionization nuclear emission line region – alacsony ionizációs fokú nukleusz
Lorentz-faktor	a relativisztikus nyaláb anyagának sebességét jellemző fizikai paraméter
mas	milliarcsecond – ezredívmásodperc
MIR	mid-infrared – közép-infravörös
MPIfR	Max Planck Institut für Radioastronomie – Max Planck Rádiócsillagászati Intézet
ms	measurement set – mérési összeállítás
NELG	narrow emission line X-ray galaxy – keskeny vonalú röntgengalaxis
NLR	narrow line region – keskeny vonalak keletkezési régiója
NLRG	narrow line radio galaxy – keskeny vonalú rádiógalaxis
NRAO	National Radio Astronomy Observatory – USA Rádiócsillagászati Obszervatóriuma
NVSS	NRAO VLA Sky Survey – az NRAO VLA égboltfelmérése
OVV	optical violent variable – optikai violens változó kvazár
PAH	polycyclic aromatic hydrocarbon – policiklikus aromás szénhidrogén
Pan-STARRS	a Panoramic Survey Telescope and Rapid Response System felmérés
pc	parsec – parszek
PMN	a Parkes–MIT–NRAO felmérés
POSS	Palomar Observatory Sky Survey – a Palomar Obszervatórium Égboltfelmérése
RIAF	radiatively inefficient accretion flow – radiatíván nem hatékony akkréciós áramlás
ROSAT	ROentgen SATellite – Röntgen Űrteleszkóp
RQ QSO	radio-quiet quasi stellar object – rádiócsendes kvazár
rms	root mean square – négyzetes közép (zajszint)
scan	egybefüggő mérési szakasz a VLBI észlelés során
SED	spectral energy distribution – spektrális energiaeoszlás
SDSS	Sloan Digital Sky Survey – Sloan Digitális Égboltfelmérés

SFR	star formation rate – csillagkeletkezési ráta
SKA	Square Kilometre Array – Négyzetkilométeres Hálózat
SNR	signal-to-noise ratio – jel-zaj arány
spektrálindex	a rádióspektrum meredekségét jellemző paraméter
spine-sheath model	strukturált nyaláb modell
SSC	synchrotron self-Compton process – szinkrotron ön-Compton folyamat
SSRQ	steep spectrum radio quasar – meredek spektrumú rádiókvazár
Swift/BAT	Burst Alert Telescope – a <i>Swift</i> űrteleszkóp gamma-kitörések észlelésére tervezett eszköze
Swift/UVOT	UltraViolet Optical Telescope – a <i>Swift</i> ultraibolya/optikai teleszkópja
Swift/XRT	X-Ray Telescope – a <i>Swift</i> röntgenteleszkópja
(u,v) lefedettség	az egyes bázisvonalak vetületei az (u,v) síkon az idő függvényében
(u,v) sík	az észlelő–rádióforrás látóirányra merőleges koordináta-rendszer
vizibilitás	az adott bázisvonalon lévő antennák általi mérés egy-egy mintavételezési pontja
VLA	Very Large Array – Nagyon Nagy Hálózat
VLASS	VLA Sky Survey – VLA égboltfelmérés 2 – 4 GHz-en
VLBA	Very Long Baseline Array – nagyon hosszú bázisvonalú hálózat (USA)
VLBI	very long baseline interferometry – nagyon hosszú bázisvonalú interferometria
WISE	Wide-field Infrared Survey Explorer – infravörös tartományban felmérést végző űreszköz
WLRG	weak line radio galaxy – gyengevonalú rádiógalaxis

B. További ábrák

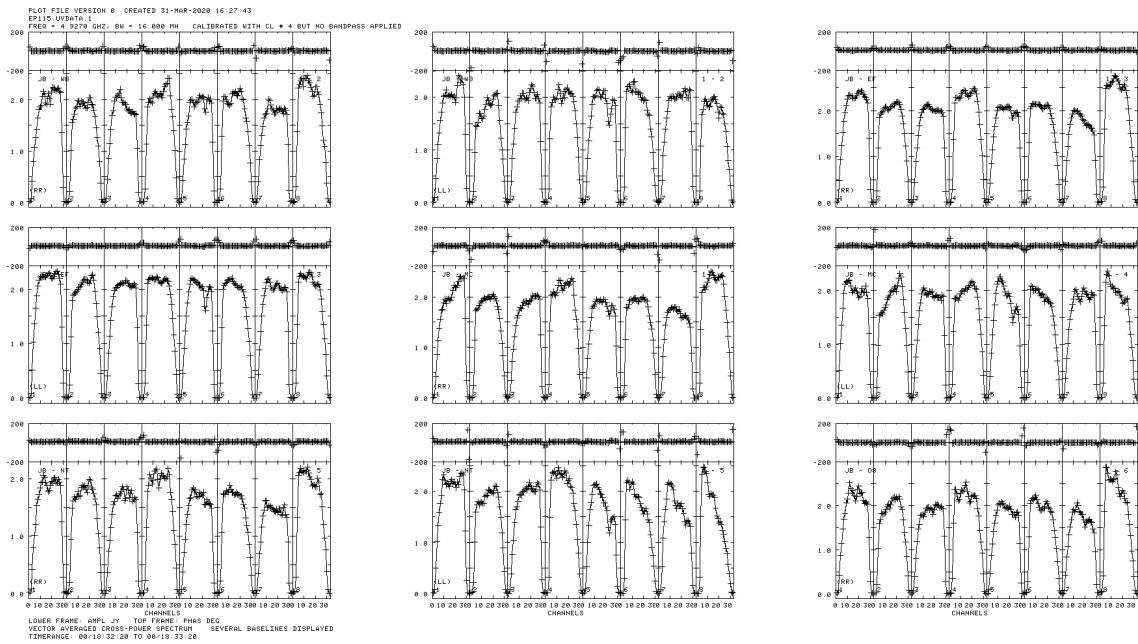


(a) Kalibrátorforrás – az előzetes (a priori) kalibráció alkalmazásával.

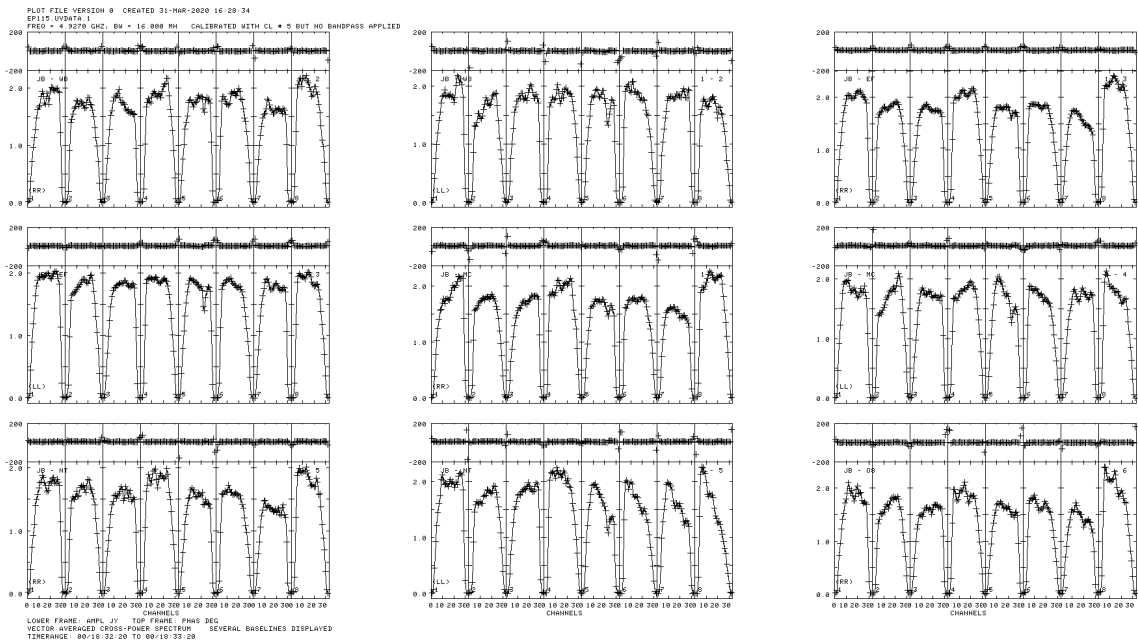


(b) Kalibrátorforrás – manuális fáziskalibrációt követően.

B.1. ábra. Az észlelés során kalibrátorforrásként észlelt J0909+0121 forrás fázisainak és amplitúdóinak változása az AIPS-ben elvégzett kalibráció során. A manuális fáziskalibrációt ezzel a forrással végeztem el, az ábrán feltüntetett 1 perces időintervallum adatait felhasználva.

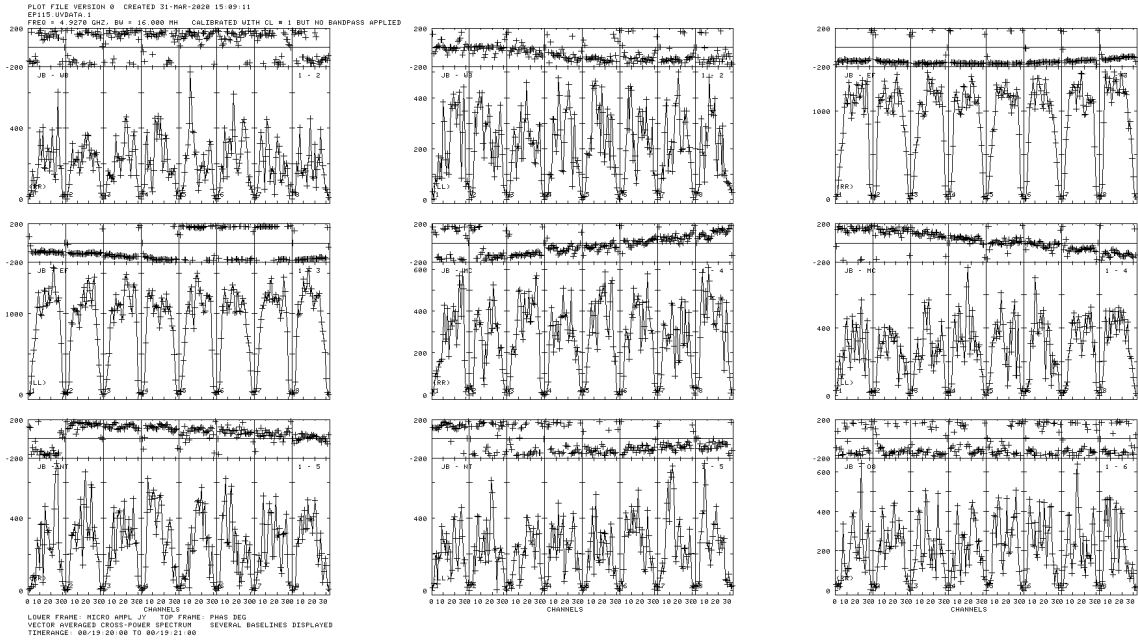


(c) Kalibrátorforrás – interferenciamintázat-illesztést követően.

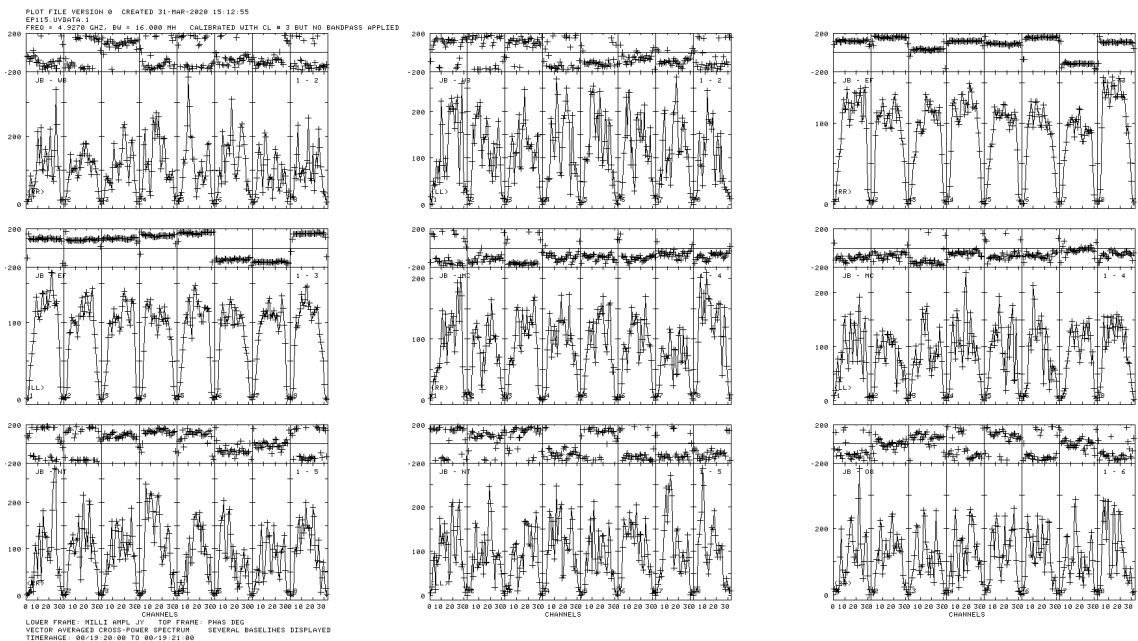


(d) Kalibrátorforrás – amplitúdókalibrációt követően.

B.1. ábra. Az észlelés során kalibrátorforrásként észlelt J0909+0121 forrás fázisainak és amplitúdójának változása az AIPS-ben elvégzett kalibráció során. (folytatás)

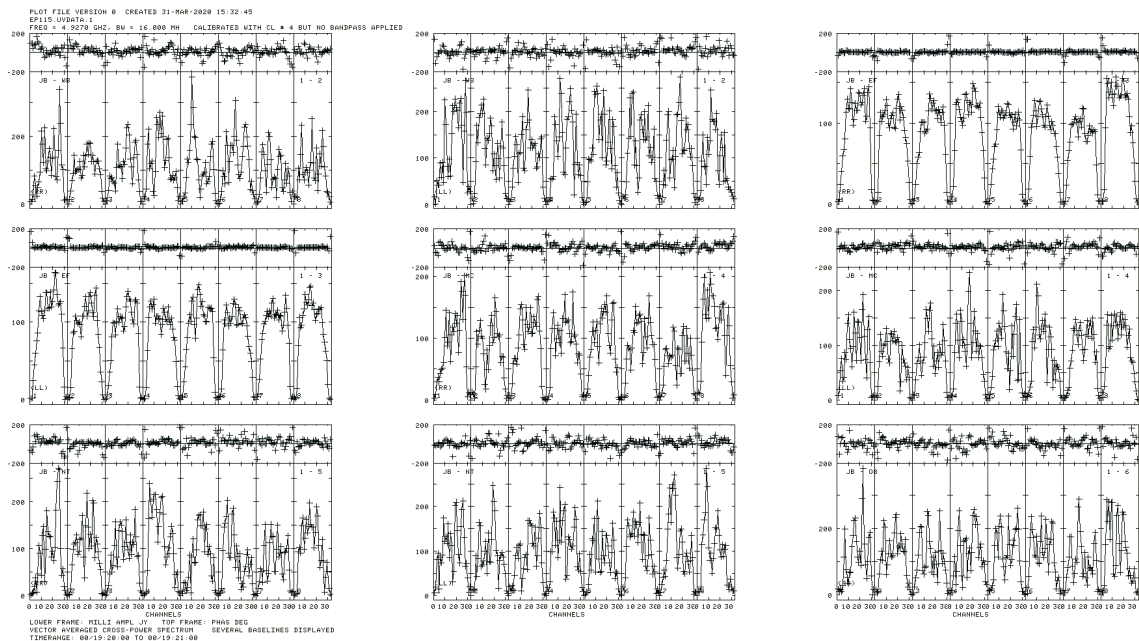


(a) Célforrás – az előzetes (a priori) kalibráció alkalmazásával.

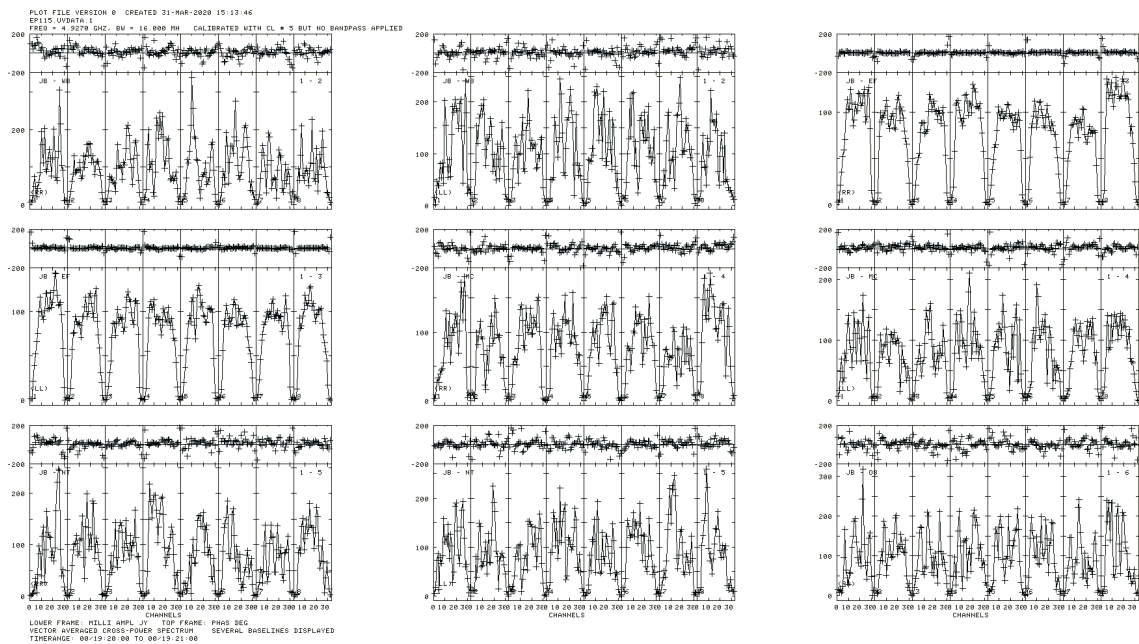


(b) Célforrás – manuális fáziskalibrációt követően.

B.2. ábra. Az észlelés során célforrásként észlelt J0909+0354 forrás fázisainak és amplitúdóinak változása az AIPS-ben elvégzett kalibráció során. A manuális fáziskalibrációt a J0909+0121 jelű kalibrátorforrással végeztem el.



(c) Célforrás – interferenciamintázat-illesztést követően.



(d) Célforrás – amplitúdókalibrációt követően.

B.2. ábra. Az észlelés során célforrásként észlelt J0909+0354 forrás fázisainak és amplitúdójának változása az AIPS-ben elvégzett kalibráció során. (folytatás)

Irodalomjegyzék

- Agarwal B., Khochfar S., Johnson J. L., és mtsai, 2012, *Ubiquitous seeding of supermassive black holes by direct collapse*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 425, 4, 2854
- Agarwal B., Smith B., Glover S., és mtsai, 2016, *New constraints on direct collapse black hole formation in the early Universe*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 459, 4, 4209
- Ahumada R., Allende Prieto C., Almeida A., és mtsai, 2020, *The 16th Data Release of the Sloan Digital Sky Surveys: First Release from the APOGEE-2 Southern Survey and Full Release of eBOSS Spectra*, The Astrophysical Journal Supplement, 249, 1, 3
- Ajello M., Costamante L., Sambruna R. M., és mtsai, 2009, *The Evolution of Swift/BAT Blazars and the Origin of the MeV Background*, The Astrophysical Journal, 699, 1, 603
- Alexandroff R., Overzier R. A., Paragi Z., és mtsai, 2012, *A search for active galactic nuclei in the most extreme UV-selected starbursts using the European VLBI Network*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 423, 2, 1325
- An T., Mohan P., Zhang Y., és mtsai, 2020, *Evolving parsec-scale radio structure in the most distant blazar known*, Nature Communications, 11, 143
- Anderson J. M., Ulvestad J. S., Ho L. C., 2004, *Low-Luminosity Active Galactic Nuclei at the Highest Resolution: Jets or Accretion Flows?*, The Astrophysical Journal, 603, 1, 42
- Antonucci R., 1993, *Unified models for active galactic nuclei and quasars*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 31, 473
- Antonucci R. R. J., 1984, *Optical spectropolarimetry of radio galaxies*, The Astrophysical Journal, 278, 499
- Antonucci R. R. J., Miller J. S., 1985, *Spectropolarimetry and the nature of NGC 1068*, The Astrophysical Journal, 297, 621
- Attridge J. M., Roberts D. H., Wardle J. F. C., 1999, *Radio Jet-Ambient Medium Interactions on Parsec Scales in the Blazar 1055+018*, The Astrophysical Journal Letters, 518, 2, L87
- Bañados E., Venemans B. P., Decarli R., és mtsai, 2016, *The Pan-STARRS1 Distant $z > 5.6$ Quasar Survey: More than 100 Quasars within the First Gyr of the Universe*, The Astrophysical Journal Supplement, 227, 1, 11
- Bañados E., Venemans B. P., Mazzucchelli C., és mtsai, 2018, *An 800-million-solar-mass black hole in a significantly neutral Universe at a redshift of 7.5*, Nature, 553, 7689, 473
- Bai J. M., Lee M. G., 2003, *Radio/X-Ray Offsets of Large-Scale Jets Caused by Synchrotron Time Lags*, The Astrophysical Journal Letters, 585, 2, L113
- Baloković M., Smolčić V., Ivezić Ž., és mtsai, 2012, *Disclosing the Radio Loudness Distribution Dichotomy in Quasars: An Unbiased Monte Carlo Approach Applied to the SDSS-FIRST Quasar Sample*, The Astrophysical Journal, 759, 1, 30

- Barro G., Pérez-González P. G., Gallego J., és mtsai, 2011, *UV-to-FIR Analysis of Spitzer/IRAC Sources in the Extended Groth Strip. I. Multi-wavelength Photometry and Spectral Energy Distributions*, The Astrophysical Journal Supplement, 193, 1, 13
- Beasley A. J., Gordon D., Peck A. B., és mtsai, 2002, *The VLBA Calibrator Survey-VCS1*, The Astrophysical Journal Supplement, 141, 1, 13
- Becker R. H., White R. L., Edwards A. L., 1991, *A New Catalog of 53,522 4.85 GHz Sources*, The Astrophysical Journal Supplement, 75, 1
- Becker R. H., White R. L., Helfand D. J., 1995, *The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters*, The Astrophysical Journal, 450, 559
- Beckmann V., Shrader C. R., 2012, *Active Galactic Nuclei*, Wiley-VCH, Weinheim
- Bell E. F., 2003, *Estimating Star Formation Rates from Infrared and Radio Luminosities: The Origin of the Radio-Infrared Correlation*, The Astrophysical Journal, 586, 2, 794
- Belladitta S., Moretti A., Caccianiga A., és mtsai, 2019, *An extremely X-ray weak blazar at $z = 5$* , Astronomy & Astrophysics, 629, A68
- Bellovary J., Volonteri M., Governato F., és mtsai, 2011, *The First Massive Black Hole Seeds and Their Hosts*, The Astrophysical Journal, 742, 1, 13
- Bennett A. S., 1962, *The revised 3C catalogue of radio sources*, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 68, 163
- Bentz M. C., Katz S., 2015, *The AGN Black Hole Mass Database*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 127, 947, 67
- Bertoldi F., Cox P., Neri R., és mtsai, 2003, *High-excitation CO in a quasar host galaxy at $z = 6.42$* , Astronomy & Astrophysics, 409, L47
- Best P. N., Heckman T. M., 2012, *On the fundamental dichotomy in the local radio-AGN population: accretion, evolution and host galaxy properties*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 421, 2, 1569
- Best P. N., Kauffmann G., Heckman T. M., és mtsai, 2005, *The host galaxies of radio-loud active galactic nuclei: mass dependences, gas cooling and active galactic nuclei feedback*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 362, 1, 25
- Best P. N., Ker L. M., Simpson C., és mtsai, 2014, *The cosmic evolution of radio-AGN feedback to $z = 1$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, 1, 955
- Blandford R., Meier D., Readhead A., 2019, *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 57, 467
- Blandford R. D., Netzer H., Woltjer L., és mtsai, 1990, *Active Galactic Nuclei*, in *Active Galactic Nuclei*, vol. XII of Saas-Fee Advanced Course Lecture Notes, Swiss Society for Astrophysics and Astronomy
- Boettcher M., Harris D. E., Krawczynski H., 2012, *Relativistic Jets from Active Galactic Nuclei*, Wiley, Berlin

- Bolton J. G., Stanley G. J., 1948, *Variable Source of Radio Frequency Radiation in the Constellation of Cygnus*, *Nature*, 161, 4087, 312
- Bonzini M., Padovani P., Mainieri V., és mtsai, 2013, *The sub-mJy radio sky in the Extended Chandra Deep Field-South: source population*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 436, 4, 3759
- Bouchy F., Lestrade J. F., 1998, *Two Stationary Components in the High-Redshift Quasar 1338+381*, in *IAU Colloq. 164: Radio Emission from Galactic and Extragalactic Compact Sources*, edited by J. A. Zensus, G. B. Taylor, J. M. Wrobel, vol. 144 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 57
- Bouchy F., Lestrade J. F., Ransom R. R., és mtsai, 1998, *Possible superluminal motion between two stationary components in the high-redshift quasar 1338+381*, *Astronomy & Astrophysics*, 335, 145
- Briggs D. S., Schwab F. R., Sramek R. A., 1999, *Imaging*, in *Synthesis Imaging in Radio Astronomy II*, edited by G. B. Taylor, C. L. Carilli, R. A. Perley, vol. 180 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 127
- Brinkmann W., Yuan W., Siebert J., 1997, *Broad band energy distribution of ROSAT detected quasars. I. Radio-loud objects*, *Astronomy & Astrophysics*, 319, 413
- Britto R. J., Bottacini E., Böttcher M., és mtsai, 2016, *Multiwavelength Study of Fermi-LAT blazars Variability and Radiation Production Mechanisms*, in *SF2A-2016: Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, edited by C. Reylé, J. Richard, L. Cambrésy, M. Deleuil, E. Pécontal, L. Tresse, I. Vauglin, 93
- Britzen S., Qian S. J., Steffen W., és mtsai, 2017, *A swirling jet in the quasar 1308+326*, *Astronomy & Astrophysics*, 602, A29
- Britzen S., Vermeulen R. C., Campbell R. M., és mtsai, 2008, *A multi-epoch VLBI survey of the kinematics of CFJ sources. II. Analysis of the kinematics*, *Astronomy & Astrophysics*, 484, 1, 119
- Brogan C. L., Hunter T. R., Fomalont E. B., 2018, *Advanced Gain Calibration Techniques in Radio Interferometry*, arXiv e-prints, arXiv:1805.05266
- Burbidge G. R., Burbidge E. M., Sandage A. R., 1963, *Evidence for the Occurrence of Violent Events in the Nuclei of Galaxies*, *Reviews of Modern Physics*, 35, 4, 947
- Burke B. F., Graham-Smith F., 2014, *An Introduction to Radio Astronomy*, 3rd edition, Cambridge University Press, Cambridge
- Burtscher L., Meisenheimer K., Tristram K. R. W., és mtsai, 2013, *A diversity of dusty AGN tori. Data release for the VLTI/MIDI AGN Large Program and first results for 23 galaxies*, *Astronomy & Astrophysics*, 558, A149
- Caccianiga A., Moretti A., Belladitta S., és mtsai, 2019, *The space density of $z > 4$ blazars*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 484, 1, 204

- Cao H. M., Frey S., Gabányi K. É., és mtsai, 2017, *VLBI observations of four radio quasars at $z > 4$: blazars or not?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 467, 1, 950
- Ceraj L., Smolčić V., Delvecchio I., és mtsai, 2018, *The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Star formation properties and radio luminosity functions of AGN with moderate-to-high radiative luminosities out to $z \sim 6$* , Astronomy & Astrophysics, 620, A192
- Clark B. G., 1995, *Very Long Baseline Interferometry and the VLBA*, in Interferometers and Coherence Theory, edited by J. A. Zensus, P. J. Diamond, P. J. Napier, vol. 82 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 3
- Condon J. J., 1991, *Radio luminosity functions*, in The Interpretation of Modern Synthesis Observations of Spiral Galaxies, edited by N. Duric, P. C. Crane, vol. 18 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 113
- Condon J. J., 1992, *Radio emission from normal galaxies*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 30, 575
- Condon J. J., Condon M. A., Gisler G., és mtsai, 1982, *Strong radio sources in bright spiral galaxies. II. Rapid star formation and galaxy-galaxy interactions*, The Astrophysical Journal, 252, 102
- Condon J. J., Cotton W. D., Greisen E. W., és mtsai, 1998, *The NRAO VLA Sky Survey*, The Astronomical Journal, 115, 5, 1693
- Condon J. J., Kellermann K. I., Kimball A. E., és mtsai, 2013, *Active Galactic Nucleus and Starburst Radio Emission from Optically Selected Quasi-stellar Objects*, The Astrophysical Journal, 768, 1, 37
- Constantin A., Green P., Aldcroft T., és mtsai, 2009, *Probing the Balance of AGN and Star-forming Activity in the Local Universe with ChaMP*, The Astrophysical Journal, 705, 2, 1336
- Conway J. E., Murphy D. W., 1993, *Helical Jets and the Misalignment Distribution for Core-dominated Radio Sources*, The Astrophysical Journal, 411, 89
- Coppejans R., Frey S., Cseh D., és mtsai, 2016, *On the nature of bright compact radio sources at $z > 4.5$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 463, 3, 3260
- Cornwell T. J., Wilkinson P. N., 1981, *A new method for making maps with unstable radio interferometers*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 196, 1067
- Crummy J., Fabian A. C., Gallo L., és mtsai, 2006, *An explanation for the soft X-ray excess in active galactic nuclei*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 365, 4, 1067
- Cutri R. M., et al., 2014, *VizieR Online Data Catalog: AllWISE Data Release (Cutri+ 2013)*, VizieR Online Data Catalog, II/328
- Dallacasa D., Orienti M., Fanti C., és mtsai, 2013, *A sample of small-sized compact steep-spectrum radio sources: VLBI images and VLA polarization at 5 GHz*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 433, 1, 147

- Davies R. I., Hicks E. K. S., Erwin P., és mtsai, 2017, *The role of host galaxy for the environmental dependence of active nuclei in local galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 466, 4, 4917
- de Vries W. H., Hodge J. A., Becker R. H., és mtsai, 2007, *Star Formation in Low Radio Luminosity Active Galactic Nuclei from the Sloan Digital Sky Survey*, The Astronomical Journal, 134, 2, 457
- Delvecchio I., Smolčić V., Zamorani G., és mtsai, 2017, *The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: AGN and host-galaxy properties out to $z \lesssim 6$* , Astronomy & Astrophysics, 602, A3
- Dewangan G. C., Griffiths R. E., Dasgupta S., és mtsai, 2007, *An Investigation of the Origin of Soft X-Ray Excess Emission from Ark 564 and Mrk 1044*, The Astrophysical Journal, 671, 2, 1284
- Donato D., Sambruna R. M., Gliozzi M., 2005, *Six years of BeppoSAX observations of blazars: A spectral catalog*, Astronomy & Astrophysics, 433, 3, 1163
- Douglas J. N., Bash F. N., Bozyan F. A., és mtsai, 1996, *The Texas Survey of Radio Sources Covering -35.5 degrees $<$ declination $<$ 71.5 degrees at 365 MHz*, The Astronomical Journal, 111, 1945
- Edelson R. A., Alexander T., Crenshaw D. M., és mtsai, 1996, *Multiwavelength Observations of Short-Timescale Variability in NGC 4151. IV. Analysis of Multiwavelength Continuum Variability*, The Astrophysical Journal, 470, 364
- Edge D. O., Shakeshaft J. R., McAdam W. B., és mtsai, 1959, *A survey of radio sources at a frequency of 159 Mc/s*, Memoirs of the Royal Astronomical Society, 68, 37
- Edwards P. G., Tingay S. J., 2016, *The Parsec-Scale Morphology of Southern GPS Sources*, Publications of the Astronomical Society of Australia, 33, e060
- Ekers R. D., Fanti R., Lari C., és mtsai, 1978, *NGC326 - A radio galaxy with a precessing beam*, Nature, 276, 588
- Fabian A. C., 2012, *Observational Evidence of Active Galactic Nuclei Feedback*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 50, 455
- Fabian A. C., Celotti A., Johnstone R. M., 2003, *Chandra reveals X-rays along the radio axis in the quasar 3C 9 at $z= 2.012$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 338, 1, L7
- Fabian A. C., Iwasawa K., Reynolds C. S., és mtsai, 2000, *Broad Iron Lines in Active Galactic Nuclei*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 112, 775, 1145
- Fabian A. C., Walker S. A., Celotti A., és mtsai, 2014, *Do high-redshift quasars have powerful jets ?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, L81
- Fan J. H., Kurtanidze O., Liu Y., és mtsai, 2014, *Optical Monitoring of Two Brightest Nearby Quasars, PHL 1811 and 3C 273*, The Astrophysical Journal Supplement, 213, 2, 26
- Fan X., Hennawi J. F., Richards G. T., és mtsai, 2004, *A Survey of $z>5.7$ Quasars in the Sloan Digital Sky Survey. III. Discovery of Five Additional Quasars*, The Astronomical Journal, 128, 2, 515

- Fanaroff B. L., Riley J. M., 1974, *The morphology of extragalactic radio sources of high and low luminosity*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 167, 31P
- Fath E. A., 1909, *The spectra of some spiral nebulae and globular star clusters*, Lick Observatory Bulletin, 149, 71
- Flesch E. W., 2015, *The Half Million Quasars (HMQ) Catalogue*, Publications of the Astronomical Society of Australia, 32, e010
- Fomalont E. B., 1999, *Image Analysis*, in Synthesis Imaging in Radio Astronomy II, edited by G. B. Taylor, C. L. Carilli, R. A. Perley, vol. 180 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 301
- Fomalont E. B., Petrov L., MacMillan D. S., és mtsai, 2003, *The Second VLBA Calibrator Survey: VCS2*, The Astronomical Journal, 126, 5, 2562
- Fossati G., 2014, *On the relationship between jet and broad emission lines variability in Flat Spectrum Radio Quasars*, in American Astronomical Society Meeting Abstracts #223, vol. 223 of American Astronomical Society Meeting Abstracts, 210.01
- Frey S., Gurvits L. I., Kellermann K. I., és mtsai, 1997, *High resolution radio imaging of the extremely distant quasars 1251-407, 1351-018, 1354-174 and 1508+572.*, Astronomy & Astrophysics, 325, 511
- Frey S., Paragi Z., Fogasy J. O., és mtsai, 2015, *The first estimate of radio jet proper motion at $z > 5$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 446, 3, 2921
- Frey S., Paragi Z., Gurvits L. I., és mtsai, 2010, *High-resolution images of five radio quasars at early cosmological epochs*, Astronomy & Astrophysics, 524, A83
- Frey S., Titov O., Melnikov A. E., és mtsai, 2018, *High-resolution radio imaging of two luminous quasars beyond redshift 4.5*, Astronomy & Astrophysics, 618, A68
- Gabányi K. É., An T., Frey S., és mtsai, 2016, *Four Dual AGN Candidates Observed with the VLBA*, The Astrophysical Journal, 826, 2, 106
- Gabányi K. É., Frey S., Gurvits L. I., és mtsai, 2018a, *High-resolution Radio Image of a Candidate Radio Galaxy at $z = 5.72$* , Research Notes of the American Astronomical Society, 2, 4, 200
- Gabányi K. É., Frey S., Paragi Z., és mtsai, 2018b, *Three little radio galaxies in the early Universe*, in 14th European VLBI Network Symposium & Users Meeting (EVN 2018), 31
- Galeev A. A., Rosner R., Vaiana G. S., 1979, *Structured coronae of accretion disks*, The Astrophysical Journal, 229, 318
- Garn T., Alexander P., 2009, *Radio source stacking and the infrared/radio correlation at μJy flux densities*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 394, 1, 105
- Gavin H. P., 2011, *The Levenberg-Marquardt method for nonlinear least squares curve-fitting problems*, Department of Civil and Environmental Engineering, Duke University, 1
- Georganopoulos M., Kazanas D., 2004, *Witnessing the Gradual Slowdown of Powerful Extragalactic Jets: The X-Ray-Optical-Radio Connection*, The Astrophysical Journal Letters, 604, 2, L81

- Ghisellini G., Haardt F., Ciardi B., és mtsai, 2015a, *CMB quenching of high-redshift radio-loud AGNs*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 452, 4, 3457
- Ghisellini G., Haardt F., Della Ceca R., és mtsai, 2013, *The role of relativistic jets in the heaviest and most active supermassive black holes at high redshift*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 432, 4, 2818
- Ghisellini G., Haardt F., Matt G., 1994, *The contribution of the obscuring torus to the X-ray spectrum of Seyfert galaxies: a test for the unification model*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 267, 743
- Ghisellini G., Padovani P., Celotti A., és mtsai, 1993, *Relativistic Bulk Motion in Active Galactic Nuclei*, The Astrophysical Journal, 407, 65
- Ghisellini G., Sbarrato T., 2016, *Dark bubbles around high-redshift radio-loud active galactic nucleus*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 461, 1, L21
- Ghisellini G., Tagliaferri G., Foschini L., és mtsai, 2011, *High-redshift Fermi blazars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 411, 2, 901
- Ghisellini G., Tagliaferri G., Sbarrato T., és mtsai, 2015b, *SDSS J013127.34-032100.1: a candidate blazar with an 11 billion solar mass black hole at $z = 5.18$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 450, L34
- Ghisellini G., Tavecchio F., Chiaberge M., 2005, *Structured jets in TeV BL Lac objects and radiogalaxies. Implications for the observed properties*, Astronomy & Astrophysics, 432, 2, 401
- Giacconi R., Rosati P., Tozzi P., és mtsai, 2001, *First Results from the X-Ray and Optical Survey of the Chandra Deep Field South*, The Astrophysical Journal, 551, 2, 624
- Gierliński M., Done C., 2004, *Is the soft excess in active galactic nuclei real?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 349, 1, L7
- Giovannini G., Savolainen T., Orienti M., és mtsai, 2018, *A wide and collimated radio jet in 3C84 on the scale of a few hundred gravitational radii*, Nature Astronomy, 2, 472
- Giroletti M., Giovannini G., Feretti L., és mtsai, 2004, *Parsec-Scale Properties of Markarian 501*, The Astrophysical Journal, 600, 1, 127
- Gobelle D. B., Wardle J. F. C., Cheung C. C., 2014, *VLA Observations of a Complete Sample of Radio Loud Quasars between redshifts 2.5 and 5.28: I. high-redshift sample summary and the radio images*, arXiv e-prints, arXiv:1406.4797
- Godfrey L. E. H., Bignall H., Tingay S., és mtsai, 2012, *Science at Very High Angular Resolution with the Square Kilometre Array*, Publications of the Astronomical Society of Australia, 29, 1, 42
- Goldschmidt P., Kukula M. J., Miller L., és mtsai, 1999, *A Comparison of the Optical Properties of Radio-loud and Radio-quiet Quasars*, The Astrophysical Journal, 511, 2, 612
- Gopal-Krishna, Biermann P. L., Gergely L. Á., és mtsai, 2012, *On the origin of X-shaped radio galaxies*, Research in Astronomy and Astrophysics, 12, 2, 127

- Gordon D., Jacobs C., Beasley A., és mtsai, 2016, *Second Epoch VLBA Calibrator Survey Observations: VCS-II*, *The Astronomical Journal*, 151, 6, 154
- Green P. J., Kochanek C., Siemiginowska A., és mtsai, 2002, *Chandra Observations of the QSO Pair Q2345+007: Binary or Massive Dark Lens?*, *The Astrophysical Journal*, 571, 2, 721
- Greenstein J. L., Matthews T. A., 1963, *Redshift of the Radio Source 3C 48*, *The Astronomical Journal*, 68, 279
- Gregory P. C., Scott W. K., Douglas K., és mtsai, 1996, *The GB6 Catalog of Radio Sources*, *The Astrophysical Journal Supplement*, 103, 427
- Greisen E. W., 2003, *AIPS, the VLA, and the VLBA*, in *Information Handling in Astronomy - Historical Vistas*, edited by A. Heck, vol. 285 of *Astrophysics and Space Science Library*, 109
- Griffith M. R., Wright A. E., Burke B. F., és mtsai, 1995, *The Parkes-MIT-NRAO (PMN) Surveys. VI. Source Catalog for the Equatorial Survey (-9.5 degrees < delta < +10.0 degrees)*, *The Astrophysical Journal Supplement*, 97, 347
- Gross A. C., Fu H., Myers A. D., és mtsai, 2019, *X-Ray Properties of Radio-selected Dual Active Galactic Nuclei*, *The Astrophysical Journal*, 883, 1, 50
- Groves B., 2007, *The Narrow-line Region: Current Models and Future Questions*, *The Central Engine of Active Galactic Nuclei*, vol. 373 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 511
- Gürkan G., Hardcastle M. J., Best P. N., és mtsai, 2019, *LoTSS/HETDEX: Optical quasars. I. Low-frequency radio properties of optically selected quasars*, *Astronomy & Astrophysics*, 622, A11
- Gurvits L. I., 2000, *Toward Sub-Millijansky Radio Astronomy with Sub-Milliarcsecond Angular Resolution (or SKA as Seen from Space)*, in *Perspectives on Radio Astronomy: Science with Large Antenna Arrays*, edited by M. P. van Haarlem, 183
- Gurvits L. I., Frey S., Paragi Z., 2015, *Jets in AGN at extremely high redshifts*, in *Extragalactic Jets from Every Angle*, edited by F. Massaro, C. C. Cheung, E. Lopez, A. Siemiginowska, vol. 313 of *IAU Symposium*, 327
- Gurvits L. I., Kardashev N. S., Popov M. V., és mtsai, 1992, *The compact radio structure of the high redshift quasars 0642+449, 1402+044, 1614+051*, *Astronomy & Astrophysics*, 260, 82
- Gurvits L. I., Kellermann K. I., Frey S., 1999, *The „angular size - redshift” relation for compact radio structures in quasars and radio galaxies*, *Astronomy & Astrophysics*, 342, 378
- Gurvits L. I., Schilizzi R. T., Barthel P. D., és mtsai, 1994, *Milliarcsecond structures of extremely distant quasars: 0336-017, 0636+680, 1442+101, and 2048+312*, *Astronomy & Astrophysics*, 291, 737
- Haardt F., Maraschi L., 1993, *X-Ray Spectra from Two-Phase Accretion Disks*, *The Astrophysical Journal*, 413, 507

- Hardcastle M. J., Birkinshaw M., Worrall D. M., 2001, *Chandra observations of the X-ray jet in 3C 66B*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 326, 4, 1499
- Hardcastle M. J., Evans D. A., Croston J. H., 2007, *Hot and cold gas accretion and feedback in radio-loud active galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 376, 4, 1849
- Hardcastle M. J., Worrall D. M., Birkinshaw M., és mtsai, 2002, *A Chandra observation of the X-ray environment and jet of 3C 31*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 334, 1, 182
- Hardcastle M. J., Worrall D. M., Birkinshaw M., és mtsai, 2005, *A Chandra observation of the X-ray environment and jet of 3C 296*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 358, 3, 843
- Harris D. E., Krawczynski H., 2002, *X-Ray Emission Processes in Radio Jets*, The Astrophysical Journal, 565, 1, 244
- Harris D. E., Krawczynski H., 2006, *X-Ray Emission from Extragalactic Jets*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 44, 1, 463
- Heckman T. M., Best P. N., 2014, *The Coevolution of Galaxies and Supermassive Black Holes: Insights from Surveys of the Contemporary Universe*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 52, 589
- Helfand D. J., White R. L., Becker R. H., 2015, *The Last of FIRST: The Final Catalog and Source Identifications*, The Astrophysical Journal, 801, 1, 26
- Hey J. S., Parsons S. J., Phillips J. W., 1946, *Fluctuations in Cosmic Radiation at Radio-Frequencies*, Nature, 158, 4007, 234
- Hills J. G., 1975, *Possible power source of Seyfert galaxies and QSOs*, Nature, 254, 5498, 295
- Hodge J. A., Becker R. H., White R. L., és mtsai, 2008, *Radio Detection of Radio-Quiet Galaxies*, The Astronomical Journal, 136, 3, 1097
- Högbom J. A., 1974, *Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines*, Astronomy & Astrophysics Supplement, 15, 417
- Homan D. C., Kovalev Y. Y., Lister M. L., és mtsai, 2006, *Intrinsic Brightness Temperatures of AGN Jets*, The Astrophysical Journal Letters, 642, 2, L115
- Hook I. M., McMahon R. G., Shaver P. A., és mtsai, 2002, *Discovery of radio-loud quasars with redshifts above 4 from the PMN sample*, Astronomy & Astrophysics, 391, 509
- Hopkins A. M., Miller C. J., Nichol R. C., és mtsai, 2003, *Star Formation Rate Indicators in the Sloan Digital Sky Survey*, The Astrophysical Journal, 599, 2, 971
- Hovatta T., Valtaoja E., Tornikoski M., és mtsai, 2009, *Doppler factors, Lorentz factors and viewing angles for quasars, BL Lacertae objects and radio galaxies*, Astronomy & Astrophysics, 494, 2, 527
- Howell J. H., Armus L., Mazzarella J. M., és mtsai, 2010, *The Great Observatories All-sky LIRG Survey: Comparison of Ultraviolet and Far-infrared Properties*, The Astrophysical Journal, 715, 1, 572

- Hwang H.-C., Zakamska N. L., Alexander R. M., és mtsai, 2018, *Winds as the origin of radio emission in $z = 2.5$ radio-quiet extremely red quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 477, 1, 830
- Hyvönen T., Kotilainen J. K., Örndahl E., és mtsai, 2007, *The host galaxies of radio-quiet quasars at $0.5 < z < 1.0$* , Astronomy & Astrophysics, 462, 2, 525
- Ibar E., Cirasuolo M., Ivison R., és mtsai, 2008, *Exploring the infrared/radio correlation at high redshift*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 386, 2, 953
- Ighina L., Caccianiga A., Moretti A., és mtsai, 2019, *X-ray properties of $z > 4$ blazars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 489, 2, 2732
- Inayoshi K., Visbal E., Haiman Z., 2019, *The Assembly of the First Massive Black Holes*, arXiv e-prints, arXiv:1911.05791
- Inayoshi K., Visbal E., Haiman Z., 2020, *The Assembly of the First Massive Black Holes*, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 58, 1
- Ivezić Ž., Menou K., Knapp G. R., és mtsai, 2002, *Optical and Radio Properties of Extragalactic Sources Observed by the FIRST Survey and the Sloan Digital Sky Survey*, The Astronomical Journal, 124, 5, 2364
- Jackson N., 2008, *Principles of Interferometry*, Jets from Young Stars II, vol. 742, 193, Springer-Verlag Berlin Heidelberg
- Jahnke K., Kuhlbrodt B., Wisotzki L., 2004, *Quasar host galaxy star formation activity from multicolour data*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 352, 2, 399
- Jansky K. G., 1933a, *Electrical phenomena that apparently are of interstellar origin*, Popular Astronomy, 41, 548
- Jansky K. G., 1933b, *Radio Waves from Outside the Solar System*, Nature, 132, 3323, 66
- Jiang L., McGreer I. D., Fan X., és mtsai, 2016, *The Final SDSS High-redshift Quasar Sample of 52 Quasars at $z > 5.7$* , The Astrophysical Journal, 833, 2, 222
- Jiang Y.-F., Ciotti L., Ostriker J. P., és mtsai, 2010, *Synchrotron Emission from Elliptical Galaxies Consequent to Active Galactic Nucleus Outbursts*, The Astrophysical Journal, 711, 1, 125
- Kalfountzou E., Civano F., Elvis M., és mtsai, 2014, *The largest X-ray-selected sample of $z > 3$ AGNs: C-COSMOS and ChaMP*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 445, 2, 1430
- Karim A., Schinnerer E., Martínez-Sansigre A., és mtsai, 2011, *The Star Formation History of Mass-selected Galaxies in the COSMOS Field*, The Astrophysical Journal, 730, 2, 61
- Kataoka J., Stawarz Ł., Harris D. E., és mtsai, 2008, *Chandra Reveals Twin X-Ray Jets in the Powerful FR II Radio Galaxy 3C 353*, The Astrophysical Journal, 685, 2, 839
- Kellermann K. I., Lister M. L., Homan D. C., és mtsai, 2004, *Sub-Milliarcsecond Imaging of Quasars and Active Galactic Nuclei. III. Kinematics of Parsec-scale Radio Jets*, The Astrophysical Journal, 609, 2, 539

- Kellermann K. I., Sramek R., Schmidt M., és mtsai, 1989, *VLA Observations of Objects in the Palomar Bright Quasar Survey*, The Astronomical Journal, 98, 1195
- Kellermann K. I., Vermeulen R. C., Zensus J. A., és mtsai, 1999, *Kinematics of quasars and AGN*, New Astronomy Reviews, 43, 8-10, 757
- Kewley L. J., Heisler C. A., Dopita M. A., és mtsai, 2000, *Compact Radio Emission from Warm Infrared Galaxies*, The Astrophysical Journal, 530, 2, 704
- Kharb P., Lister M. L., Cooper N. J., 2010, *Extended Radio Emission in MOJAVE Blazars: Challenges to Unification*, The Astrophysical Journal, 710, 1, 764
- Kharb P., Lister M. L., Marshall H. L., és mtsai, 2012, *Chandra and HST Imaging of the Quasars PKS B0106+013 and 3C 345: Inverse Compton X-Rays and Magnetized Jets*, The Astrophysical Journal, 748, 2, 81
- Kharb P., O’Dea C. P., Baum S. A., és mtsai, 2006, *A Radio Study of the Seyfert Galaxy Markarian 6: Implications for Seyfert Life Cycles*, The Astrophysical Journal, 652, 1, 177
- Kim Y., Im M., Jeon Y., és mtsai, 2018, *The Infrared Medium-deep Survey. IV. The Low Eddington Ratio of A Faint Quasar at $z \sim 6$: Not Every Supermassive Black Hole is Growing Fast in the Early Universe*, The Astrophysical Journal, 855, 2, 138
- King A., Nixon C., 2018, *Misaligned Accretion and Jet Production*, The Astrophysical Journal Letters, 857, 1, L7
- Komissarov S. S., 1990, *Emission by Relativistic Jets with Boundary Layers*, Soviet Astronomy Letters, 16, 284
- Komissarov S. S., Barkov M. V., Vlahakis N., és mtsai, 2007, *Magnetic acceleration of relativistic active galactic nucleus jets*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 380, 1, 51
- Kovalev Y. Y., Petrov L., Fomalont E. B., és mtsai, 2007, *The Fifth VLBA Calibrator Survey: VCS5*, The Astronomical Journal, 133, 4, 1236
- Kraft R. P., Forman W. R., Jones C., és mtsai, 2002, *Chandra Observations of the X-Ray Jet in Centaurus A*, The Astrophysical Journal, 569, 1, 54
- Kurk J. D., Walter F., Fan X., és mtsai, 2007, *Black Hole Masses and Enrichment of $z \sim 6$ SDSS Quasars*, The Astrophysical Journal, 669, 1, 32
- Königl A., 1981, *Relativistic jets as X-ray and gamma-ray sources*, The Astrophysical Journal, 243, 700
- Lacy M., Baum S. A., Chandler C. J., és mtsai, 2020, *The Karl G. Jansky Very Large Array Sky Survey (VLASS). Science Case and Survey Design*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 132, 1009, 035001
- Langejahn M., Kadler M., Wilms J., és mtsai, 2020, *Hard X-ray properties of radio-selected blazars*, Astronomy & Astrophysics, 637, A55
- Laor A., Baldi R. D., Behar E., 2019, *What drives the radio slopes in radio-quiet quasars?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 4, 5513

- Laor A., Behar E., 2008, *On the origin of radio emission in radio-quiet quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 390, 2, 847
- Lawrence A., 1987, *Classification of active galaxies and the prospect of a unified phenomenology*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 99, 309
- Lawson A. J., Turner M. J. L., 1997, *GINGA observations of the X-ray spectra of quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 288, 4, 920
- Leahy J. P., Perley R. A., 1991, *VLA Images of 23 Extragalactic Radio Sources*, The Astronomical Journal, 102, 537
- Lee K.-G., Bailey S., Bartsch L. E., és mtsai, 2013, *The BOSS Ly α Forest Sample from SDSS Data Release 9*, The Astronomical Journal, 145, 3, 69
- Lee S.-S., Lobanov A. P., Krichbaum T. P., és mtsai, 2008, *A Global 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources*, The Astronomical Journal, 136, 1, 159
- Lense J., Thirring H., 1918, *Über den Einfluß der Eigenrotation der Zentralkörper auf die Bewegung der Planeten und Monde nach der Einsteinschen Gravitationstheorie*, Physikalische Zeitschrift, 19, 156
- Liang E. P. T., 1979, *On the hard X-ray emission mechanism of active galactic nuclei sources*, The Astrophysical Journal Letters, 231, L111
- Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., és mtsai, 2013, *MOJAVE. X. Parsec-scale Jet Orientation Variations and Superluminal Motion in Active Galactic Nuclei*, The Astronomical Journal, 146, 5, 120
- Lister M. L., Aller M. F., Aller H. D., és mtsai, 2016, *MOJAVE: XIII. Parsec-scale AGN Jet Kinematics Analysis Based on 19 years of VLBA Observations at 15 GHz*, The Astronomical Journal, 152, 1, 12
- Lister M. L., Cohen M. H., Homan D. C., és mtsai, 2009, *MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets*, The Astronomical Journal, 138, 6, 1874
- Liu Z., Merloni A., Georgakakis A., és mtsai, 2016, *X-ray spectral properties of the AGN sample in the northern XMM-XXL field*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 459, 2, 1602
- Lobanov A. P., Gómez J. L., Bruni G., és mtsai, 2015, *RadioAstron space VLBI imaging of polarized radio emission in the high-redshift quasar 0642+449 at 1.6 GHz*, Astronomy & Astrophysics, 583, A100
- Lobanov A. P., Gurvits L. I., Frey S., és mtsai, 2001, *VLBI Space Observatory Programme Observation of the Quasar PKS 2215+020: A New Laboratory for Core-Jet Physics at $z=3.572$* , The Astrophysical Journal, 547, 2, 714
- Mahajan S., Ashby M. L. N., Willner S. P., és mtsai, 2019, *The Star Formation Reference Survey - III. A multiwavelength view of star formation in nearby galaxies*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 482, 1, 560

- Mahony E. K., Sadler E. M., Croom S. M., és mtsai, 2012, *Is the Observed High-frequency Radio Luminosity Distribution of QSOs Bimodal?*, The Astrophysical Journal, 754, 1, 12
- Mao P., Urry C. M., Marchesini E., és mtsai, 2017, *Radio Luminosity Function of Flat-spectrum Radio Quasars*, The Astrophysical Journal, 842, 2, 87
- Marchenko V., Harris D. E., Ostrowski M., és mtsai, 2017, *Novel Analysis of the Multiwavelength Structure of the Relativistic Jet in Quasar 3C 273*, The Astrophysical Journal, 844, 1, 11
- Marshall H. L., Gelbord J. M., Worrall D. M., és mtsai, 2018, *An X-Ray Imaging Survey of Quasar Jets: The Complete Survey*, The Astrophysical Journal, 856, 1, 66
- Marshall H. L., Schwartz D. A., Lovell J. E. J., és mtsai, 2005, *A Chandra Survey of Quasar Jets: First Results*, The Astrophysical Journal Supplement, 156, 1, 13
- Martínez-Aldama M. L., del Olmo A., Marziani P., és mtsai, 2018, *Extreme quasars at high redshift*, Astronomy & Astrophysics, 618, A179
- Martínez-Paredes M., Aretxaga I., González-Martín O., és mtsai, 2019, *Quantifying Star Formation Activity in the Inner 1 kpc of Local MIR Bright QSOs*, The Astrophysical Journal, 871, 2, 190
- Marziani P., Sulentic J. W., 2014, *Highly accreting quasars: sample definition and possible cosmological implications*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, 2, 1211
- Massaro F., Cheung C. C., Harris D. E., 2010, *Xjet: X-Ray Emission from Extragalactic Radio Jets*, in X-ray Astronomy 2009; Present Status, Multi-Wavelength Approach and Future Perspectives, edited by A. Comastri, L. Angelini, M. Cappi, vol. 1248 of American Institute of Physics Conference Series, 475
- Matt G., Fabian A. C., Reynolds C. S., 1997, *Geometrical and chemical dependence of K-shell X-ray features*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 289, 1, 175
- Matthews T. A., Morgan W. W., Schmidt M., 1964, *A Discussion of Galaxies Identified with Radio Sources*, The Astrophysical Journal, 140, 35
- Mazzucchelli C., Bañados E., Venemans B. P., és mtsai, 2017, *Physical Properties of 15 Quasars at $z \gtrsim 6.5$* , The Astrophysical Journal, 849, 2, 91
- McKinney J. C., 2006, *General relativistic magnetohydrodynamic simulations of the jet formation and large-scale propagation from black hole accretion systems*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 368, 4, 1561
- McMullin J. P., Waters B., Schiebel D., és mtsai, 2007, *CASA Architecture and Applications*, in Astronomical Data Analysis Software and Systems XVI, edited by R. A. Shaw, F. Hill, D. J. Bell, vol. 376 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 127
- Meier D. L., 2002, *Grand unification of AGN and the accretion and spin paradigms*, New Astronomy Reviews, 46, 2-7, 247
- Merloni A., Heinz S., 2007, *Measuring the kinetic power of active galactic nuclei in the radio mode*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 381, 2, 589

- Merloni A., Heinz S., 2013, *Evolution of Active Galactic Nuclei*, Planets, Stars and Stellar Systems. Volume 6: Extragalactic Astronomy and Cosmology, vol. 6, 503, Springer Science+Business Media Dordrecht
- Middelberg E., Deller A., Morgan J., és mtsai, 2011, *Wide-field VLBA observations of the Chandra deep field South*, *Astronomy & Astrophysics*, 526, A74
- Middleton M., Done C., Gierliński M., 2007, *An absorption origin for the soft excess in Seyfert 1 active galactic nuclei*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 381, 4, 1426
- Miller N. A., Bonzini M., Fomalont E. B., és mtsai, 2013, *The Very Large Array 1.4 GHz Survey of the Extended Chandra Deep Field South: Second Data Release*, *The Astrophysical Journal Supplement*, 205, 2, 13
- Miller N. A., Fomalont E. B., Kellermann K. I., és mtsai, 2008, *The VLA 1.4 GHz Survey of the Extended Chandra Deep Field-South: First Data Release*, *The Astrophysical Journal Supplement*, 179, 1, 114
- Mingo B., Hardcastle M. J., Ineson J., és mtsai, 2017, *An X-ray survey of the 2 Jy sample - II. X-ray emission from extended structures*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 470, 3, 2762
- Miraghaei H., Best P. N., 2017, *The nuclear properties and extended morphologies of powerful radio galaxies: the roles of host galaxy and environment*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 466, 4, 4346
- Moran E. C., Barth A. J., Kay L. E., és mtsai, 2000, *The Frequency of Polarized Broad Emission Lines in Type 2 Seyfert Galaxies*, *The Astrophysical Journal Letters*, 540, 2, L73
- Mortlock D. J., Warren S. J., Venemans B. P., és mtsai, 2011, *A luminous quasar at a redshift of $z = 7.085$* , *Nature*, 474, 7353, 616
- Murphy E., Cawthorne T. V., Gabuzda D. C., 2013, *Analysing the transverse structure of the relativistic jets of active galactic nuclei*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 430, 3, 1504
- Murphy T., Sadler E. M., Ekers R. D., és mtsai, 2010, *The Australia Telescope 20 GHz Survey: the source catalogue*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 402, 4, 2403
- Myers S. T., Jackson N. J., Browne I. W. A., és mtsai, 2003, *The Cosmic Lens All-Sky Survey - I. Source selection and observations*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 341, 1, 1
- Nagai H., Haga T., Giovannini G., és mtsai, 2014, *Limb-brightened Jet of 3C 84 Revealed by the 43 GHz Very-Long-Baseline-Array Observation*, *The Astrophysical Journal*, 785, 1, 53
- Nanni R., Vignali C., Gilli R., és mtsai, 2017, *The X-ray properties of $z \approx 6$ luminous quasars*, *Astronomy & Astrophysics*, 603, A128
- Narayan R., Yi I., 1995, *Advection-dominated Accretion: Underfed Black Holes and Neutron Stars*, *The Astrophysical Journal*, 452, 710
- Natarajan I., Paragi Z., Zwart J., és mtsai, 2017, *Resolving the blazar CGRaBS J0809+5341 in the*

- presence of telescope systematics*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 464, 4, 4306
- Natarajan P., 2011, *The formation and evolution of massive black hole seeds in the early Universe*, Bulletin of the Astronomical Society of India, 39, 145
- Netzer H., 2015, *Revisiting the Unified Model of Active Galactic Nuclei*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 53, 365
- Oh K., Koss M., Markwardt C. B., és mtsai, 2018, *The 105-Month Swift-BAT All-sky Hard X-Ray Survey*, The Astrophysical Journal Supplement, 235, 1, 4
- Ojha R., Kadler M., Böck M., és mtsai, 2010, *TANAMI: tracking active galactic nuclei with austral milliarcsecond interferometry. I. First-epoch 8.4 GHz images*, Astronomy & Astrophysics, 519, A45
- Orsi Á. A., Fanidakis N., Lacey C. G., és mtsai, 2016, *The environments of high-redshift radio galaxies and quasars: probes of protoclusters*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 456, 4, 3827
- O’Sullivan S. P., Gabuzda D. C., Gurvits L. I., 2011, *Multifrequency polarization properties of 10 quasars on decaparsec scales at $z > 3$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 415, 4, 3049
- Padovani P., 2011, *The microjansky and nanojansky radio sky: source population and multiwavelength properties*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 411, 3, 1547
- Padovani P., 2016, *The faint radio sky: radio astronomy becomes mainstream*, Astronomy & Astrophysics Reviews, 24, 1, 13
- Padovani P., Giommi P., Fiore F., 1997, *Are the X-ray spectra of flat-spectrum radio quasars and BL Lacertae objects different?*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 284, 3, 569
- Page K. L., Reeves J. N., O’Brien P. T., és mtsai, 2005, *XMM-Newton spectroscopy of high-redshift quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 364, 1, 195
- Panessa F., Baldi R. D., Laor A., és mtsai, 2019, *The origin of radio emission from radio-quiet active galactic nuclei*, Nature Astronomy, 3, 387
- Paragi Z., Frey S., Gurvits L. I., és mtsai, 1999, *VLBI imaging of extremely high redshift quasars at 5 GHz*, Astronomy & Astrophysics, 344, 51
- Paragi Z., Godfrey L., Reynolds C., és mtsai, 2015, *Very Long Baseline Interferometry with the SKA*, in *Advancing Astrophysics with the Square Kilometre Array (AASKA14)*, 143
- Pâris I., Petitjean P., Aubourg É., és mtsai, 2012, *The Sloan Digital Sky Survey quasar catalog: ninth data release*, Astronomy & Astrophysics, 548, A66
- Pâris I., Petitjean P., Ross N. P., és mtsai, 2017, *The Sloan Digital Sky Survey Quasar Catalog: Twelfth data release*, Astronomy & Astrophysics, 597, A79
- Pearson T. J., 1995, *Non-Imaging Data Analysis*, in *Very Long Baseline Interferometry and the*

- VLBA, edited by J. A. Zensus, P. J. Diamond, P. J. Napier, vol. 82 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 267
- Pedlar A., Kukula M. J., Longley D. P. T., és mtsai, 1993, *The radio nucleus of NGC 4151 at 5 and 8 GHz.*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 263, 471
- Pérez-Torres M. A., De Breuck C., van Breugel W., és mtsai, 2006, *Very high-resolution radio observations of HzRGs*, *Astronomische Nachrichten*, 327, 245
- Perger K., Frey S., Gabányi K. É., és mtsai, 2017, *A catalogue of active galactic nuclei from the first 1.5 Gyr of the Universe*, *Frontiers Astronomy and Space Sciences*, 4, 9
- Perger K., Frey S., Gabányi K. É., és mtsai, 2018a, *Constraining the radio jet proper motion of the high-redshift quasar J2134-0419 at $z = 4.3$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 477, 1, 1065
- Perger K., Frey S., Gabányi K. É., és mtsai, 2019, *Unveiling the weak radio quasar population at $z \geq 4$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 490, 2, 2542
- Perger K., Pinter S., Frey S., és mtsai, 2018b, *Fine structure of Galactic foreground ISM towards high-redshift AGN - utilizing Herschel PACS and SPIRE data*, in *Peering towards Cosmic Dawn*, edited by V. Jelić, T. van der Hulst, vol. 333 of *IAU Symposium*, 166–167
- Perlman E. S., Georganopoulos M., May E. M., és mtsai, 2010, *Chandra Observations of the Radio Galaxy 3C 445 and the Hot Spot X-Ray Emission Mechanism*, *The Astrophysical Journal*, 708, 1, 1
- Péroux C., Storrie-Lombardi L. J., McMahon R. G., és mtsai, 2001, *Absorption Systems in the Spectra of 66 $Z > 4$ Quasars*, *The Astronomical Journal*, 121, 4, 1799
- Petrov L., 2016, *VLBA Calibrator Survey 9 (VCS-9)*, arXiv e-prints, arXiv:1610.04951
- Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E., és mtsai, 2005, *The Third VLBA Calibrator Survey: VCS3*, *The Astronomical Journal*, 129, 2, 1163
- Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., és mtsai, 2006, *The Fourth VLBA Calibrator Survey: VCS4*, *The Astronomical Journal*, 131, 3, 1872
- Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., és mtsai, 2008, *The Sixth VLBA Calibrator Survey: VCS6*, *The Astronomical Journal*, 136, 2, 580
- Petrov L., Kovalev Y. Y., Fomalont E. B., és mtsai, 2011, *The Very Long Baseline Array Galactic Plane Survey—VGaPS*, *The Astronomical Journal*, 142, 2, 35
- Petrucci P. O., Ursini F., De Rosa A., és mtsai, 2018, *Testing warm Comptonization models for the origin of the soft X-ray excess in AGNs*, *Astronomy & Astrophysics*, 611, A59
- Piconcelli E., Jimenez-Bailón E., Guainazzi M., és mtsai, 2005, *The XMM-Newton view of PG quasars. I. X-ray continuum and absorption*, *Astronomy & Astrophysics*, 432, 1, 15
- Pierce C. M., Ballantyne D. R., Ivison R. J., 2011, *Radio Stacking Reveals Evidence for Star Formation in the Host Galaxies of X-Ray-selected Active Galactic Nuclei at $z < 1$* , *The Astrophysical Journal*, 742, 1, 45

- Polletta M., Tajer M., Maraschi L., és mtsai, 2007, *Spectral Energy Distributions of Hard X-Ray Selected Active Galactic Nuclei in the XMM-Newton Medium Deep Survey*, The Astrophysical Journal, 663, 1, 81
- Pons E., McMahon R. G., Banerji M., és mtsai, 2020, *X-ray properties of $z \geq 6.5$ quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 491, 3, 3884
- Pracy M. B., Ching J. H. Y., Sadler E. M., és mtsai, 2016, *GAMA/WiggleZ: the 1.4 GHz radio luminosity functions of high- and low-excitation radio galaxies and their redshift evolution to $z = 0.75$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 460, 1, 2
- Pushkarev A. B., Gabuzda D. C., Vetukhnovskaya Y. N., és mtsai, 2005, *Spine-sheath polarization structures in four active galactic nuclei jets*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 356, 3, 859
- Pushkarev A. B., Kovalev Y. Y., Lister M. L., és mtsai, 2017, *MOJAVE - XIV. Shapes and opening angles of AGN jets*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 468, 4, 4992
- Rawlings S., 2003, *High-redshift radio galaxies: at the crossroads*, New Astronomy Reviews, 47, 4-5, 397
- Readhead A. C. S., 1994, *Equipartition Brightness Temperature and the Inverse Compton Catastrophe*, The Astrophysical Journal, 426, 51
- Reber G., 1940, *Cosmic Static*, Proceedings of the IRE, 28, 68
- Reber G., 1944, *Cosmic Static.*, The Astrophysical Journal, 100, 279
- Rees G. A., Spitler L. R., Norris R. P., és mtsai, 2016, *Radio galaxies in ZFOURGE/NMBS: no difference in the properties of massive galaxies with and without radio-AGN out to $z = 2.25$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 455, 3, 2731
- Reimer A., Böttcher M., 2013, *Studies of active galactic nuclei with CTA*, Astroparticle Physics, 43, 103
- Reines A. E., Deller A. T., 2012, *Parsec-scale Radio Emission from the Low-luminosity Active Galactic Nucleus in the Dwarf Starburst Galaxy Henize 2-10*, The Astrophysical Journal Letters, 750, 1, L24
- Reynolds C. S., 1999, *Compton Reflection and Iron Fluorescence in Active Galactic Nuclei and Galactic Black Hole Candidates*, in High Energy Processes in Accreting Black Holes, edited by J. Poutanen, R. Svensson, vol. 161 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 178
- Rimoldini L., Dubath P., Süveges M., és mtsai, 2012, *Automated classification of Hipparcos unsolved variables*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 427, 4, 2917
- Risaliti G., Elvis M., 2004, *A Panchromatic View of AGN*, in Supermassive Black Holes in the Distant Universe, edited by A. J. Barger, vol. 308 of Astrophysics and Space Science Library, 187
- Roberts D. H., Cohen J. P., Lu J., és mtsai, 2015, *The Abundance of X-shaped Radio Sources. I.*

- VLA Survey of 52 Sources with Off-axis Distortions*, The Astrophysical Journal Supplement, 220, 1, 7
- Roberts D. H., Saripalli L., Wang K. X., és mtsai, 2018, *What are “X-shaped” Radio Sources Telling Us? I. Very Large Array Imaging of a Large Sample of Candidate XRGs*, The Astrophysical Journal, 852, 1, 47
- Ros E., Kadler M., Perucho M., és mtsai, 2020, *Apparent superluminal core expansion and limb brightening in the candidate neutrino blazar TXS 0506+056*, Astronomy & Astrophysics, 633, L1
- Rosario D. J., Burtscher L., Davies R., és mtsai, 2013, *The Mid-infrared Emission of Narrow-line Active Galactic Nuclei: Star Formation, Nuclear Activity, and Two Populations Revealed by Wise*, The Astrophysical Journal, 778, 2, 94
- Ross N. P., Cross N. J. G., 2020, *The near and mid-infrared photometric properties of known redshift $z \geq 5$ quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 494, 1, 789
- Roy A. L., Wrobel J. M., Wilson A. S., és mtsai, 2001, *Parsec-scale jets and tori in seyfert galaxies*, vol. 205 of IAU Symposium, 70
- Roy N., Bundy K., Cheung E., és mtsai, 2018, *Detecting Radio AGN Signatures in Red Geysers*, The Astrophysical Journal, 869, 2, 117
- Ryle M., Smith F. G., Elsmore B., 1950, *A preliminary survey of the radio stars in the Northern Hemisphere*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 110, 508
- Sadler E. M., Jackson C. A., Cannon R. D., és mtsai, 2002, *Radio sources in the 2dF Galaxy Redshift Survey - II. Local radio luminosity functions for AGN and star-forming galaxies at 1.4 GHz*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 329, 1, 227
- Sadler E. M., Johnston H. M., Cannon R. D., és mtsai, 2008, *The Cosmic Evolution of Massive Galaxies and Their Radio-Loud AGN*, in Panoramic Views of Galaxy Formation and Evolution, edited by T. Kodama, T. Yamada, K. Aoki, vol. 399 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 413
- Salpeter E. E., 1964, *Accretion of Interstellar Matter by Massive Objects.*, The Astrophysical Journal, 140, 796
- Sambruna R. M., Gambill J. K., Maraschi L., és mtsai, 2004, *A Survey of Extended Radio Jets with Chandra and the Hubble Space Telescope*, The Astrophysical Journal, 608, 2, 698
- Sandage A., 1964, *Intensity Variations of 3C 48, 3C 196, and 3C 273 in Optical Wavelengths*, The Astrophysical Journal, 139, 416
- Sandage A., 1965, *The Existence of a Major New Constituent of the Universe: the Quasistellar Galaxies*, The Astrophysical Journal, 141, 1560
- Saripalli L., Roberts D. H., 2018, *What Are “X-shaped” Radio Sources Telling Us? II. Properties of a Sample of 87*, The Astrophysical Journal, 852, 1, 48
- Saxena A., Marinello M., Overzier R. A., és mtsai, 2018, *Discovery of a radio galaxy at $z = 5.72$* , Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 480, 2, 2733

- Sbarrato T., Ghisellini G., Tagliaferri G., és mtsai, 2015, *Blazar candidates beyond redshift 4 observed by Swift*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 446, 3, 2483
- Schilizzi R. T., Gurvits L. I., Miley G. K., és mtsai, 1999, *VLBI observations of galaxies at high redshift*, in The Most Distant Radio Galaxies, edited by H. J. A. Röttgering, P. N. Best, M. D. Lehnert, Proceedings of the colloquium, 139
- Schmidt M., 1963, *3C 273 : A Star-Like Object with Large Red-Shift*, Nature, 197, 4872, 1040
- Schmitt H. R., Calzetti D., Armus L., és mtsai, 2006, *Ultraviolet-to-Far-Infrared Properties of Local Star-forming Galaxies*, The Astrophysical Journal, 643, 1, 173
- Schmitt J. L., 1968, *BL Lac identified as a Radio Source*, Nature, 218, 5142, 663
- Schwab F. R., Cotton W. D., 1983, *Global fringe search techniques for VLBI*, The Astronomical Journal, 88, 688
- Schwartz D., Siemiginowska A., Worrall D., és mtsai, 2019, *Relativistic X-ray jets at high redshift*, Astronomische Nachrichten, 340, 30, 30
- Schwartz D. A., 2020, *The High-energy emission of jetted AGN*, in Astronomy in Focus XXX, edited by V. Beckmann, C. Ricci, vol. 14 of Proceedings of the International Astronomical Union, 53
- Secrest N. J., Dudik R. P., Dorland B. N., és mtsai, 2015, *Identification of 1.4 Million Active Galactic Nuclei in the Mid-Infrared using WISE Data*, The Astrophysical Journal Supplement, 221, 1, 12
- Sesana A., Volonteri M., Haardt F., 2007, *The imprint of massive black hole formation models on the LISA data stream*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 377, 4, 1711
- Seyfert C. K., 1943, *Nuclear Emission in Spiral Nebulae.*, The Astrophysical Journal, 97, 28
- Shakeshaft J. R., Ryle M., Baldwin J. E., és mtsai, 1955, *A survey of radio sources between declinations -38° and $+83^\circ$* , Memoirs of the Royal Astronomical Society, 67, 106
- Shakura N. I., Sunyaev R. A., 1973, *Black holes in binary systems. Observational appearance*, Astronomy & Astrophysics, 500, 33
- Shao Y., Wang R., Carilli C. L., és mtsai, 2019, *Star Formation and ISM Properties in the Host Galaxies of Three Far-infrared Luminous Quasars at $z \sim 6$* , The Astrophysical Journal, 876, 2, 99
- Shen Y., Brandt W. N., Richards G. T., és mtsai, 2016, *The Sloan Digital Sky Survey Reverberation Mapping Project: Velocity Shifts of Quasar Emission Lines*, The Astrophysical Journal, 831, 1, 7
- Shen Y., Richards G. T., Strauss M. A., és mtsai, 2011, *A Catalog of Quasar Properties from Sloan Digital Sky Survey Data Release 7*, The Astrophysical Journal Supplement, 194, 2, 45
- Shepherd M. C., 1997, *Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging*, in Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, edited by G. Hunt, H. Payne, vol. 125 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 77

- Shi Y., Ogle P., Rieke G. H., és mtsai, 2007, *Aromatic Features in AGNs: Star-forming Infrared Luminosity Function of AGN Host Galaxies*, *The Astrophysical Journal*, 669, 2, 841
- Siebert J., Matsuoka M., Brinkmann W., és mtsai, 1996, *ASCA observations of high redshift quasars*, *Astronomy & Astrophysics*, 307, 8
- Siemiginowska A., Bechtold J., Aldcroft T. L., és mtsai, 2002, *Chandra Discovery of a 300 Kiloparsec X-Ray Jet in the Gigahertz-peaked Spectrum Quasar PKS 1127-145*, *The Astrophysical Journal*, 570, 2, 543
- Siemiginowska A., Stawarz Ł., Cheung C. C., és mtsai, 2007, *The 300 kpc Long X-Ray Jet in PKS 1127-145, $z = 1.18$ Quasar: Constraining X-Ray Emission Models*, *The Astrophysical Journal*, 657, 1, 145
- Simionescu A., Stawarz Ł., Ichinohe Y., és mtsai, 2016, *Serendipitous Discovery of an Extended X-Ray Jet without a Radio Counterpart in a High-redshift Quasar*, *The Astrophysical Journal Letters*, 816, 1, L15
- Simpson C., Westoby P., Arumugam V., és mtsai, 2013, *The prevalence of AGN feedback in massive galaxies at $z \approx 1$* , *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 433, 3, 2647
- Singal A. K., 2016, *Relativistic Doppler Beaming and Misalignments in AGN Jets*, *The Astrophysical Journal*, 827, 1, 66
- Slee O. B., 1977, *Culgoora-3 list of radio source measurements.*, *Australian Journal of Physics Astrophysical Supplement*, 43, 1
- Slipher V. M., 1917, *The spectrum and velocity of the nebula N.G.C. 1068 (M 77)*, *Lowell Observatory Bulletin*, 3, 59
- Smolčić V., Delvecchio I., Zamorani G., és mtsai, 2017a, *The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Multiwavelength counterparts and the composition of the faint radio population*, *Astronomy & Astrophysics*, 602, A2
- Smolčić V., Novak M., Bondi M., és mtsai, 2017b, *The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Continuum data and source catalog release*, *Astronomy & Astrophysics*, 602, A1
- Smolčić V., Novak M., Delvecchio I., és mtsai, 2017c, *The VLA-COSMOS 3 GHz Large Project: Cosmic evolution of radio AGN and implications for radio-mode feedback since $z \sim 5$* , *Astronomy & Astrophysics*, 602, A6
- Snios B., Siemiginowska A., Sobolewska M., és mtsai, 2020, *X-Ray Properties of Young Radio Quasars at $z > 4.5$* , *The Astrophysical Journal*, 899, 2, 127
- Stanghellini C., O’Dea C. P., Dallacasa D., és mtsai, 1998, *A complete sample of GHz-peaked-spectrum radio sources and its radio properties*, *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 131, 303
- Strittmatter P. A., Hill P., Pauliny-Toth I. I. K., és mtsai, 1980, *Radio observations of optically selected quasars*, *Astronomy & Astrophysics*, 88, 3, L12
- Tadhunter C., 2008, *An introduction to active galactic nuclei: Classification and unification*, *New Astronomy Reviews*, 52, 6, 227

- Tavecchio F., Maraschi L., Sambruna R. M., és mtsai, 2000, *The X-Ray Jet of PKS 0637-752: Inverse Compton Radiation from the Cosmic Microwave Background?*, The Astrophysical Journal Letters, 544, 1, L23
- Taylor M. B., 2005, *TOPCAT & STIL: Starlink Table/VOTable Processing Software*, in Astronomical Data Analysis Software and Systems XIV, edited by P. Shopbell, M. Britton, R. Ebert, vol. 347 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 29
- Tenneti A., Wilkins S. M., Di Matteo T., és mtsai, 2019, *A tiny host galaxy for the first giant black hole: $z = 7.5$ quasar in BlueTides*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 483, 1, 1388
- Trakhtenbrot B., 2020, *What do observations tell us about the highest-redshift supermassive black holes?*, arXiv e-prints, arXiv:2002.00972
- Trakhtenbrot B., Lira P., Netzer H., és mtsai, 2017, *Fast-growing SMBHs in Fast-growing Galaxies, at High Redshifts: the Role of Major Mergers as Revealed by ALMA*, Frontiers in Astronomy and Space Sciences, 4, 49
- Trakhtenbrot B., Netzer H., Lira P., és mtsai, 2011, *Black Hole Mass and Growth Rate at $z \sim 4.8$: A Short Episode of Fast Growth Followed by Short Duty Cycle Activity*, The Astrophysical Journal, 730, 1, 7
- Trump J. R., Impey C. D., Kelly B. o. C., és mtsai, 2011, *Accretion Rate and the Physical Nature of Unobscured Active Galaxies*, The Astrophysical Journal, 733, 1, 60
- Turner T. J., Miller L., 2009, *X-ray absorption and reflection in active galactic nuclei*, Astronomy & Astrophysics Reviews, 17, 1, 47
- Turnshek D. A., 1984, *Properties of the broad absorption-line QSOs*, The Astrophysical Journal, 280, 51
- Uchiyama H., Toshikawa J., Kashikawa N., és mtsai, 2018, *Luminous quasars do not live in the most overdense regions of galaxies at $z \sim 4$* , Publications of the Astronomical Society of Japan, 70, S32
- Ulvestad J. S., Ho L. C., 2002, *A Search for Active Galactic Nuclei in Sc Galaxies with H II Spectra*, The Astrophysical Journal, 581, 2, 925
- Urry C., 2004, *AGN Unification: An Update*, in AGN Physics with the Sloan Digital Sky Survey, edited by G. T. Richards, P. B. Hall, vol. 311 of Astronomical Society of the Pacific Conference Series, 49
- Urry C. M., Padovani P., 1995, *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107, 803
- Vega-García L., Lobanov A. P., Perucho M., és mtsai, 2019, *Multiband RadioAstron space VLBI imaging of the jet in quasar S5 0836+710*, arXiv e-prints, arXiv:1912.00925
- Venemans B. P., Neeleman M., Walter F., és mtsai, 2019, *400 pc Imaging of a Massive Quasar Host Galaxy at a Redshift of 6.6*, The Astrophysical Journal Letters, 874, 2, L30

- Venemans B. P., Walter F., Decarli R., és mtsai, 2017, *The Compact, ~ 1 kpc Host Galaxy of a Quasar at a Redshift of 7.1*, *The Astrophysical Journal*, 837, 2, 146
- Venemans B. P., Walter F., Zschaechner L., és mtsai, 2016, *Bright [C II] and Dust Emission in Three $z > 6.6$ Quasar Host Galaxies Observed by ALMA*, *The Astrophysical Journal*, 816, 1, 37
- Veres P., Frey S., Paragi Z., és mtsai, 2010, *Physical parameters of a relativistic jet at very high redshift: the case of the blazar J1430+4204*, *Astronomy & Astrophysics*, 521, A6
- Vermeulen R. C., Cohen M. H., 1994, *Superluminal Motion Statistics and Cosmology*, *The Astrophysical Journal*, 430, 467
- Véron-Cetty M. P., Véron P., 1993, *A catalogue of quasars and active nuclei: 6th edition*, ESO Scientific Report, No. 13
- Véron-Cetty M. P., Véron P., 2010, *A catalogue of quasars and active nuclei: 13th edition*, *Astronomy & Astrophysics*, 518, A10
- Vito F., Brandt W. N., Bauer F. E., és mtsai, 2019, *The X-ray properties of $z > 6$ quasars: no evident evolution of accretion physics in the first Gyr of the Universe*, *Astronomy & Astrophysics*, 630, A118
- Volonteri M., Haardt F., Ghisellini G., és mtsai, 2011, *Blazars in the early Universe*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 416, 1, 216
- Volvach O., 2003, *VLBI Observations of High Red Shift Quasar 0642+449*, in *IAU Joint Discussion*, vol. 25 of *IAU Joint Discussion*, E8
- Wals M., Boyle B. J., Croom S. M., és mtsai, 2005, *Radio-quiet objects in the 2QZ survey*, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 360, 2, 453
- Walter F., Carilli C., Bertoldi F., és mtsai, 2004, *Resolved Molecular Gas in a Quasar Host Galaxy at Redshift $z=6.42$* , *The Astrophysical Journal Letters*, 615, 1, L17
- Wang R., Momjian E., Carilli C. L., és mtsai, 2017, *Milliarcsecond Imaging of the Radio Emission from the Quasar with the Most Massive Black Hole at Reionization*, *The Astrophysical Journal Letters*, 835, 2, L20
- Wang R., Wagg J., Carilli C. L., és mtsai, 2013, *Star Formation and Gas Kinematics of Quasar Host Galaxies at $z \sim 6$: New Insights from ALMA*, *The Astrophysical Journal*, 773, 1, 44
- Wang R., Wu X.-B., Neri R., és mtsai, 2016, *Probing the Interstellar Medium and Star Formation of the Most Luminous Quasar at $z = 6.3$* , *The Astrophysical Journal*, 830, 1, 53
- Wells D. C., Greisen E. W., Harten R. H., 1981, *FITS - a Flexible Image Transport System*, *Astronomy & Astrophysics Supplement*, 44, 363
- White R. L., Becker R. H., 1992, *A New Catalog of 30,239 1.4 GHz Sources*, *The Astrophysical Journal Supplement*, 79, 331
- White R. L., Becker R. H., Helfand D. J., és mtsai, 1997, *A Catalog of 1.4 GHz Radio Sources from the FIRST Survey*, *The Astrophysical Journal*, 475, 2, 479

- White R. L., Helfand D. J., Becker R. H., és mtsai, 2007, *Signals from the Noise: Image Stacking for Quasars in the FIRST Survey*, The Astrophysical Journal, 654, 1, 99
- Wilkes B. J., D’Abrusco R., Martínez-Galarza R., 2019, *Chandra X-ray Observatory Overview*, The Chandra X-ray Observatory, chap. 2., IOP Publishing
- Williams O. R., Turner M. J. L., Stewart G. C., és mtsai, 1992, *The X-Ray Spectra of High-Luminosity Active Galactic Nuclei Observed by Ginga*, The Astrophysical Journal, 389, 157
- Willott C. J., Bergeron J., Omont A., 2015, *Star Formation Rate and Dynamical Mass of 10^8 Solar Mass Black Hole Host Galaxies At Redshift 6*, The Astrophysical Journal, 801, 2, 123
- Willott C. J., Delorme P., Reylé C., és mtsai, 2010, *The Canada-France High-z Quasar Survey: Nine New Quasars and the Luminosity Function at Redshift 6*, The Astronomical Journal, 139, 3, 906
- Willott C. J., Omont A., Bergeron J., 2013, *Redshift 6.4 Host Galaxies of 10^8 Solar Mass Black Holes: Low Star Formation Rate and Dynamical Mass*, The Astrophysical Journal, 770, 1, 13
- Willott C. J., Rawlings S., Blundell K. M., és mtsai, 1998, *The radio luminosity function of radio-loud quasars from the 7C Redshift Survey*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 300, 3, 625
- Wilson A. S., Yang Y., 2002, *Chandra X-Ray Imaging and Spectroscopy of the M87 Jet and Nucleus*, The Astrophysical Journal, 568, 1, 133
- Wolf C., Bian F., Onken C. A., és mtsai, 2018, *Discovery of the Most Ultra-Luminous QSO Using GAIA, SkyMapper, and WISE*, Publications of the Astronomical Society of Australia, 35, e024
- Woods T. E., Agarwal B., Bromm V., és mtsai, 2019, *Titans of the early Universe: The Prato statement on the origin of the first supermassive black holes*, Publications of the Astronomical Society of Australia, 36, e027
- Worrall D. M., Birkinshaw M., Marshall H. L., és mtsai, 2020, *Inverse-Compton scattering in the resolved jet of the high-redshift quasar PKS J1421-0643*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 497, 1, 988
- Worrall D. M., Birkinshaw M., O’Sullivan E., és mtsai, 2010, *The jet and counterjet of 3C270 (NGC4261) viewed in the X-ray with Chandra*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 408, 2, 701
- Wright E. L., 2006, *A Cosmology Calculator for the World Wide Web*, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 118, 850, 1711
- Wright E. L., Eisenhardt P. R. M., Mainzer A. K., és mtsai, 2010, *The Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE): Mission Description and Initial On-orbit Performance*, The Astronomical Journal, 140, 6, 1868
- Wu H., Cao C., Hao C.-N., és mtsai, 2005, *PAH and Mid-Infrared Luminosities as Measures*

- of Star Formation Rate in Spitzer First Look Survey Galaxies*, The Astrophysical Journal Letters, 632, 2, L79
- Wu X.-B., Wang F., Fan X., és mtsai, 2015, *An ultraluminous quasar with a twelve-billion-solar-mass black hole at redshift 6.30*, Nature, 518, 7540, 512
- Yun M. S., Reddy N. A., Condon J. J., 2001, *Radio Properties of Infrared-selected Galaxies in the IRAS 2 Jy Sample*, The Astrophysical Journal, 554, 2, 803
- Zakamska N. L., Greene J. E., 2014, *Quasar feedback and the origin of radio emission in radio-quiet quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 442, 1, 784
- Zakamska N. L., Lampayan K., Petric A., és mtsai, 2016, *Star formation in quasar hosts and the origin of radio emission in radio-quiet quasars*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 455, 4, 4191
- Zamfir S., Sulentic J. W., Marziani P., 2008, *New insights on the QSO radio-loud/radio-quiet dichotomy: SDSS spectra in the context of the 4D eigenvector1 parameter space*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 387, 2, 856
- Zensus J. A., 1997, *Parsec-Scale Jets in Extragalactic Radio Sources*, Annual Review of Astronomy & Astrophysics, 35, 607
- Zhang Y., An T., Frey S., 2020, *Fast jet proper motion discovered in a blazar at $z=4.72$* , Science Bulletin, 65, 7, 525
- Zhang Y., An T., Frey S., és mtsai, 2017, *J0906+6930: a radio-loud quasar in the early Universe*, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, 468, 1, 69
- Zhao W., Hong X. Y., An T., és mtsai, 2011, *Radio structure of the blazar 1156 + 295 with sub-pc resolution*, Astronomy & Astrophysics, 529, A113
- Zhou M., Gu M., 2020, *The Composite X-Ray Spectrum of 3CRR Quasars*, The Astrophysical Journal, 893, 1, 39
- Zwicky F., 1965, *Blue Compact Galaxies*, The Astrophysical Journal, 142, 1293

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani témavezetőimnek, *Dr. Frey Sándornak* és *Dr. Tóth L. Viktornak*, akik fontos elméleti és gyakorlati ismeretekkel segítették munkámat, valamint irányt mutattak a doktori értekezés és az értekezéshez kapcsolódó szakirodalmi publikációk elkészítése során.

Köszönöm *Dr. Daniel A. Schwartznak* (Smithsonian Astrophysical Observatory, USA) a J0909+0354 jelű kvazár röntgentartományú vizsgálata során nyújtott segítségét és szakmai tanácsait. Hálával tartozom továbbá társszerzőimnek, elsősorban *Dr. Gabányi Krisztinának* (ELTE TTK, Csillagászati Tanszék), *Dr. Paragi Zsoltnak* (JIVE, Hollandia) és *Dr. Leonid I. Gurvitsnak* (JIVE, Hollandia; Department of Astrodynamics and Space Missions, Delft University of Technology, Hollandia), akik jelentős mértékben elősegítették az e dolgozatban felhasznált publikációk elkészülését és az általam benyújtott mérési pályázatok megvalósítását.

Külön köszönet illeti meg *Dr. Eduardo Bañadost* (Max Planck Institute for Astronomy, Németország; Observatories of the Carnegie Institution for Science, USA; Department of Astrophysical Sciences of Princeton University, USA), valamint *Dr. Nicholas P. Rosst* és *Dr. Nicholas J. G. Crosst* (Institute for Astronomy, University of Edinburgh, Egyesült Királyság), akik hozzájárultak a nagy vöröseltolódású AGN-eket tartalmazó katalógus pontosításához és a kérdéses bejegyzések javításához.

Köszönöm munkatársaimnak, *Császár Annának*, *Hajdu Tamásnak*, *Kovács Tímea Orsolyának*, *Dr. Nagy Melindának*, *Pintér Sándornak* és *Sztakovics Jánosnak* a folyóiratcikkek és az e dolgozat írása közben nyújtott tudományos-elméleti meglátásait és tanácsait.

Köszönöm *Vágvölgyi-Szenyán Szendrának*, aki külső szemléletével és javaslataival elősegítette e dolgozat elkészülését.

Köszönettel tartozom az Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai Doktori Iskolája által nyújtott ösztöndíjért, továbbá a Nemzetközi Csillagászati Unió XXX. Csillagászati Világkongresszusán való részvétel támogatásáért. Köszönöm a Fizika Doktori Iskola oktatóinak és adminisztratív dolgozóinak a doktori képzés során nyújtott segítségét.

Az értekezésben bemutatott kutatómunka a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) NN110333 és NN111016 számú OTKA pályázatainak, továbbá a magyar–kínai tudományos és technológiai (TÉT) együttműködés 2018-2-1.14.-TÉT-CN-2018-00001 számú pályázatának támogatásával készült.

A 333. és 342. számú IAU szimpóziumokon való részvételem a Nemzetközi Csillagászati Unió által nyújtott utazási támogatással valósult meg.

Köszönöm a Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós

Csillagászati Intézetének, hogy önkéntes kutatási szerződés útján rendelkezésemre bocsátotta kutatási infrastruktúrája használatának lehetőségét.

Az EVN független európai, afrikai, ázsiai és észak-amerikai rádiócsillagászati intézetek egyesített létesítménye. A dolgozatban felhasznált adatok az ES034, EC054 és az EP115 jelű projektek eredményei. Külön köszönet illeti az ES034 projekt vezetőjét, *Dr. Ignas Snellent*, illetve a mérési pályázat további résztvevőit a 3. fejezetben leírt tanulmányban való együttműködésükért.

Az NRAO az Associated Universities Inc. által, a National Science Foundation támogatásával vezetett intézmény.

E dolgozat létrejöttéhez jelentős mértékben hozzájárult az Astrogeo VLBI FITS adatbázis (astrogeo.org/vlbi_images/), amelyet *Dr. Leonid Petrov* tart fenn.

A kutatás a *Chandra* röntgenteleszkóp, valamint a Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) mérési adatainak felhasználásával készült. A WISE a Kaliforniai Egyetem (Los Angeles) és a Jet Propulsion Laboratory/California Institute of Technology (NASA) közös projektje.

Az SDSS-III projektet az Alfred P. Sloan Foundation, az együttműködő intézetek, a National Science Foundation és az Egyesült Államok Energetikai Minisztériumának Tudományos Irodája finanszírozta. Az SDSS-III honlapja a <http://www.sdss3.org/>. Az SDSS-III-at az SDSS-III kollaborációban részt vevő Astrophysical Research Consortiummal együttműködő intézmények működtetik, beleértve a következőket: a University of Arizona, a Brazilian Participation Group, a Brookhaven National Laboratory, a Carnegie Mellon University, a University of Florida, a French Participation Group, a German Participation Group, a Harvard University, az Instituto de Astrofísica de Canarias, a Michigan State/Notre Dame/JINA Participation Group, a Johns Hopkins University, a Lawrence Berkeley National Laboratory, a Max Planck Institute for Astrophysics, a Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, a New Mexico State University, a New York University, a Ohio State University, a Pennsylvania State University, a University of Portsmouth, a Princeton University, a Spanish Participation Group, a University of Tokyo, a University of Utah, Vanderbilt University, a University of Virginia, a University of Washington, és a Yale University.

A Pan-STARRS1 felmérés (PS1) és a PS1 nyilvános archívuma az Institute for Astronomy (University of Hawaii), a Pan-STARRS Project Office, a Max-Planck Society és együttműködő intézményei (Max Planck Institute for Astronomy, Heidelberg; Max Planck Institute for Extraterrestrial Physics, Garching), a Johns Hopkins University, a Durham University, a University of Edinburgh, a Queen's University Belfast, a Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics, a Las Cumbres Observatory Global Telescope Net-

work Incorporated, a National Central University of Taiwan, a Space Telescope Science Institute, a National Aeronautics and Space Administration (a NASA Science Mission Directorate által kivitelezett NNX08AR22G számú pályázat útján), a National Science Foundation AST-1238877 számú pályázata, a University of Maryland, az Eötvös Loránd Tudományegyetem, a Los Alamos National Laboratory és a Gordon and Betty Moore Foundation közreműködésével jött létre.

E dolgozat a SWIRE Template Library, a NASA/IPAC Infrared Science Archive (IRSA) és a NASA/IPAC extragalaktikus adatbázisának (NED) felhasználásával készült. Az IRSA-t és az NED-t a National Aeronautics and Space Administration alapította és a California Institute of Technology üzemelteti.

Az értekezésben közölt saját készítésű ábrákat, valamint az egyes tanulmányok során alkalmazott programkódokat a (2.7-es verziószámú) PYTHON programnyelvben hoztam létre, a astropy, collections, glob, scipy, sep, sys, numpy, math, matplotlib, mpl_toolkits, os, pandas, pylab, statistics csomagok felhasználásával. Az interferométeres hálózatok mérési adatait az AIPS, CASA, DIFMAP programcsomagokkal dolgoztam fel, míg a katalógus létrehozása során a TOPCAT katalóguskezelő szoftvert alkalmaztam.

E dolgozatot édesanyámnak és édesapámnak ajánlom.

ADATLAP

a doktori értekezés nyilvánosságra hozatalához*

I. A doktori értekezés adatai

A szerző neve: Perger Krisztina

MTMT-azonosító: 10062542

A doktori értekezés címe és alcíme: Rádiósugárzó aktív galaxismagok a korai Univerzumban

DOI-azonosító⁴⁶: 10.15476/ELTE.2020.161

A doktori iskola neve: Fizika Doktori Iskola

A doktori iskolán belüli doktori program neve: Részecskefizika és csillagászat program

A témavezető neve és tudományos fokozata: Frey Sándor, PhD; Tóth László Viktor, PhD

A témavezető munkahelye: Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet; Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Csillagászati Tanszék

II. Nyilatkozatok

1. A doktori értekezés szerzőjeként

a) hozzájárok, hogy a doktori fokozat megszerzését követően a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban. Felhatalmazom a Természettudományi kar Dékáni Hivatali Doktori, Habilitációs és Nemzetközi Ügyek Csoportjának ügyintézőjét, hogy az értekezést és a téziseket feltöltse az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba, és ennek során kitöltse a feltöltéshez szükséges nyilatkozatokat.

b) kérem, hogy a mellékelt kérelemben részletezett szabadalmi, illetőleg oltalmi bejelentés közzétételéig a doktori értekezést ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;

c) kérem, hogy a nemzetbiztonsági okból minősített adatot tartalmazó doktori értekezést a minősítés (dátum)-ig tartó időtartama alatt ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban;

d) kérem, hogy a mű kiadására vonatkozó mellékelt kiadó szerződésre tekintettel a doktori értekezést a könyv megjelenéséig ne bocsássák nyilvánosságra az Egyetemi Könyvtárban, és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban csak a könyv bibliográfiai adatait tegyék közzé. Ha a könyv a fokozatszerzést követően egy évig nem jelenik meg, hozzájárlok, hogy a doktori értekezésem és a tézisek nyilvánosságra kerüljenek az Egyetemi Könyvtárban és az ELTE Digitális Intézményi Tudástárban.


2. A doktori értekezés szerzőjeként kijelentem, hogy

a) az ELTE Digitális Intézményi Tudástárba feltöltendő doktori értekezés és a tézisek saját eredeti, önálló szellemi munkám és legjobb tudomásom szerint nem sértem vele senki szerzői jogait;

b) a doktori értekezés és a tézisek nyomtatott változatai és az elektronikus adathordozón benyújtott tartalmak (szöveg és ábrák) mindenben megegyeznek.

3. A doktori értekezés szerzőjeként hozzájárlok a doktori értekezés és a tézisek szövegének plágiumkereső adatbázisba helyezéséhez és plágiumellenőrző vizsgálatok lefuttatásához.

Kelt: Budapest, 2020. október 6.

.....

a doktori értekezés szerzőjének aláírása

*ELTE SZMSZ SZMR 12. sz. melléklet