

A nagy vöröseltolódású PKS 2215+020 kvazár rádiósugárzó plazmanyalábjának nagy felbontású vizsgálata

OTDK dolgozat

Készítette:

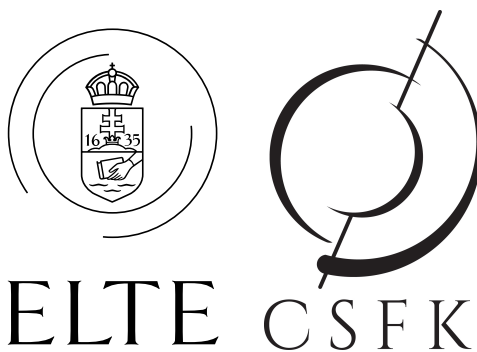
Koller Dávid

ELTE TTK Csillagász MSc 1. évfolyam

Témavezető:

Dr. Frey Sándor

HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege
Miklós Csillagászati Intézet



Eötvös Loránd Tudományegyetem Fizikai és Csillagászati Intézet
HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege
Miklós Csillagászati Intézet

Budapest, 2024. július 22.

Tartalomjegyzék

1. Bevezető	3
2. Elméleti áttekintés	3
2.1. Aktív galaxismagok	3
2.1.1. Felépítésük	3
2.1.2. Aktív galaxismagok egyesített modellje	7
2.1.3. AGN-ek csoportosítása	8
2.2. A vizsgált PKS 2215+020 kvazár	10
2.3. Rádióinterferometria	12
3. Mérések	13
3.1. VLBA	13
3.2. A mérések leírása	14
4. Adatfeldolgozás	15
4.1. Difmap	15
4.1.1. Térképek készítése	19
4.1.2. Gauss-modell illesztése	22
5. Eredmények	22
5.1. S sáv	22
5.2. Hibaszámítás	27
6. Diskusszió	28
7. Összegzés	28
A. Saját eredmények	33

Kivonat

Dolgozatomban vizsgálom egy $z = 3,572$ vöröseltolódású kvazár, a PKS 2215+020 rádiósugárzó plazmanyalábjának mozgását. Hasonló mértékű vöröseltolódással rendelkező kvazárból viszonylag keveset ismerünk, így kifejezetten érdekes objektumnak számít. A vizsgálat célja, hogy megállapítsam, hogyan változik a jet egyes komponenseinek helyzete az idő függvényében. A kvazárt interferométeres módszerrel, a Very Long Baseline Array (VLBA) műszereivel figyelték meg 1995 és 2020 között. A PKS 2215+020 egyike annak a mintegy 20 kvazárnak, amelyek esetében kellően hosszú időre kiterjedő mérések állnak rendelkezésre. A méréseket négy rádiófrekvencián végezték, ezek közül a dolgozatomban az S sávban, azaz 2,3 GHz-en végzett mérések adatsorait elemzem. Részben ezen eredményeknek a felhasználásával, a PKS 2215+020 kvazár többfrekvenciás VLBI térképezése alapján 2024 elején a Universe című folyóiratban egy publikáció jelent meg [9], amelynek a társszerzője voltam. A fent említetteken kívül bemutatom a nagyon hosszú bázisvonalú interferometria (VLBI) módszerét és az adatfeldolgozáshoz használt Difmap nevű programot. Továbbá ismertetem az aktív galaxismagok (AGN) szerkezetét és a különböző típusaikat, valamint az AGN-ekre vonatkozó egyesített modellt.

Abstract

Here I study the apparent proper motion of the jet in the quasar PKS 2215+020 at a redshift of $z = 3,572$. Quasars with similar redshifts are relatively rare, making this object particularly interesting. The purpose is to determine how the positions of various components change as a function of time. The quasar was monitored using interferometric technique with the radio telescopes of the Very Long Baseline Array (VLBA) between 1995 and 2020. PKS 2215+020 is one of approximately 20 quasars for which sufficiently long-term measurements are available. The measurements were made at four radio frequencies, of which I analyze the data from the S band, i.e. at 2.3 GHz. With the partial utilization of these results, a publication appeared in early 2024 in the journal Universe based on the multi-frequency VLBI mapping of the quasar PKS 2215+020 [9], of which I was a co-author. In addition to the above, I present the basics of the very long baseline interferometric (VLBI) method and the program called Difmap used for data processing. Furthermore, I introduce active galactic nuclei (AGN) and their different types, as well as the unified model for AGN.

1. Bevezető

A rádiócsillagászat születése [16] Karl Jansky nevéhez és munkásságához köthető. Történt ez úgy, hogy 1928-ban belépett a Bell céghez és feladatául kapta, hogy derítse ki, mi okozhat majd rádiófrekvenciás zavarokat a tervezett interkontinentális kommunikációs hálózatban. Ezért egy korábban krumplitermesztésre használt farm területén épített egy antennát, mellyel 20,5 MHz frekvencián (14,6 m-es hullámhosszon) tudott méréseket végezni. Az antenna bő kétszer olyan nagy volt, mint egy busz, és kerekeken lehetett körbeforgatni. Mérései során háromféle rádióforrást tudott megkülönböztetni, közeli mennydörgéssel és villámokkal járó viharokat, távoli zivatarzónákból érkező villámlások jeleit, valamint egy harmadikat, amelyet egy darabig nem sikerült beazonosítani. Hosszas, több hónapon át tartó kutatás után rájött, hogy az ismétlődő rádiójel a Nyilas csillagkép irányából érkezik, nagyjából onnan, ahol a Tejútrendszer középpontja van. Jansky 1933-ban a Nature folyóiratban tette közzé eredményeit [14]. Ez volt az első alkalom, amikor galaxismagból érkező rádiósugárzást sikerült beazonosítani.

Azóta mind a méréstechnika, mind a műszerek nagyon sokat fejlődtek, az interferencián alapuló, nagy felbontású és érzékeny mérések lehetővé teszik nagyon távoli objektumok vizsgálatát is. A legtávolabbi ma ismert kvazár kb. $z = 10$ -es vöröseltolódással rendelkezik [3], míg jettel rendelkező kvazárok csak $z < 7$ -nél ismertek [2]. A rádióhangos AGN-ek még $z \sim 4$ -nél is ritkának számítanak a jelenlegi mérések alapján. Így nem csoda, hogy a PKS 2215+020-hoz hasonló $z = 3,572$ vöröseltolódású, jettel rendelkező kvazárok, melyekről kellően hosszú időtartamot átölelő mérési adat áll rendelkezésünkre, szintén ritkák, összesen kb. 20 ilyen objektum van [33]. Azonban vizsgálatukkal választ kaphatunk arra a kérdésre, hogy vajon a korai Univerzumban ugyanúgy működtek-e az aktív galaxismagok jetjei, mint a hozzánk közelebb található képviselőikben.

A galaxismagok különböző tulajdonságaival kapcsolatos jelenlegi tudásunk vázlatos bemutatására a következő fejezetben keríték sort.

2. Elméleti áttekintés

2.1. Aktív galaxismagok

Az aktív galaxismagok olyan galaxisok központi régiói, amelyek jelentős energiaki-bocsátást mutatnak azon túlmenően, ami a csillagokból, a csillagközi anyagból és azok kölcsönhatásaiból eredő normál folyamatoknak tulajdonítható. A következő alfejezetben bemutatom ezen galaxismagok részletes felépítését, mely az 2. ábrán is látható.

2.1.1. Felépítésük

Központi szupernagy tömegű fekete lyuk

Szupernagy tömegű fekete lyukaknak (supermassive black hole, SMBH) azokat a fekete lyukakat nevezzük [25], amelyeknek tömege nagyságrendileg $10^6 - 10^{10} M_\odot$ közé esik. Ilyen fekete lyuk feltehetőleg minden nagyobb galaxis középpontjában jelen van. Aktív mag esetében az SMBH gravitációs hatása révén nagy mennyiségű anyagot nyel el, ennek

során a körülötte lévő gáz akkréciós korongba rendeződik és keringése során súrlódás révén veszít az energiájából. Az energiaveszteség miatt az anyag fokozatosan egyre közelebbi pályán kering a fekete lyukhoz, eközben az elvesztett energiáját kisugározza. Emiatt a galaxis magja akár ezerszer fényesebb lesz, mint egy normál galaxis egésze. Ez az eddig ismert leghatékonyabb energiatermelési folyamat, a gravitációs energia akár 29%-a is képes hőenergiává alakulni.

Mostanra már két feketelyuk-árnyék jelenséget is sikerült közvetlenül megfigyelni, az M87 galaxisban elhelyezkedő SMBH-ét, valamint a saját galaxisunk központjában elhelyezkedő Sgr A* objektumét. Mindkét esetben rádióinterferométeres módszerrel, az Event Horizon Telescope segítségével mérték. Ezek a mérések egyértelmű bizonyítékai a galaxisok közepén elhelyezkedő szupernagy tömegű fekete lyukaknak [7].

Akkréciós korong

Az aktív galaxismagokban található anyag egy része az SMBH gravitációs hatása és a súrlódási erők következtében spirális pályán zuhan a fekete lyukba. A folyamat során a gravitációs energia hőenergiává alakul és kisugárzódik. Bár a legtöbb AGN esetében megfigyelt bolometrikus fényesség a becslések szerint kisebb, mint az elektronszórás opacitás Eddington-értéke, sok esetben még mindig szuper-Eddington akkréciós sebességet várhatunk. Például széles körben úgy tartják, hogy a keskeny vonalas Seyfert-1 galaxisok (NLS1) olyan SMBH-kat tartalmaznak, amelyek akkréciós rátája közel van az Eddington-határhoz vagy meghaladja azt. A gyenge emissziós vonalas kvazárok szuper-Eddington akkréciós korongokat is tartalmaznak. A $\sim 10^9 M_\odot$ tömegű fekete lyukak létezése a $z \sim 7$ vöröseltolódás körül arra utal, hogy az SMBH-k körüli szuper-Eddington akkréció az aktív korszak legalább egy részében meg kell történjen annak érdekében, hogy ezek a fekete lyukak ekkora tömeget szerezzenek az Univerzum történetének ilyen korai szakaszában [15].

Por- és gáztórusz

Az aktív galaxismag által kisugárzott energia főként az akkréciós korongban keletkező ultraibolya (UV) és optikai hullámhosszú fotonokból adódik. A por elnyeli az akkréciós korong kibocsátásának egy részét, amely azután felmelegíti a tóruszban található port. A por az elnyelt energia egy részét infravörös sugárzásként újra kibocsátja. A korongban keletkező UV és optikai fotonok egy része az akkréciós korong feletti, forró elektronok plazmájából álló, optikailag vékony koronában az inverz Compton-szórás következtében a röntgentartományba kerülhet.

Az inverz Compton-szórás az aktív galaxismagban látható három fő komponens egyikét hozza létre röntgentartományban, ez a belső kontinuum. A második és harmadik komponens a belső kontinuum és a vas emissziós vonal visszaverődése 6,4 keV-on (Fe K α). Ez a két komponens a tórusz belső falain vagy a széles vonalas régióban (broad-line region, BLR) szóródó röntgensugárzás miatt keletkezik [6].

Jet

A fekete lyuk mágneses mezejének hatása miatt az akkréciós korongból származó plazma nem zuhan maradéktalanul bele a fekete lyukba, ehelyett az SMBH forgási tengelye mentén relativisztikus sebességgel kilövell. A feltekeredő mágneses tér ezt a kiáramlást egy egységes nyalábbá kollimálja. Ezekben a relativisztikus plazmanyalábokban (jetekben) lévő töltött részecskék a mágneses tér miatt fellépő Lorentz-erő hatására spirális pályán gyorsulnak tovább. A spirális pályán gyorsuló részecskék pedig szinkrotronsugárzást bocsátanak ki, amely a rádiótartományban is észlelhető.

A 100 kpc nagyságrendű kiterjedéssel rendelkező nagy teljesítményű jetek az esetek túlnyomó többségében olyan AGN-ekből indulnak ki, amelyek elliptikus galaxisokban helyezkednek el, nem pedig spirálgalaxisok magjából. Az aktív galaxismaggal rendelkező spirálgalaxisok tipikus sugárzási teljesítménye rádiótartományban körülbelül $10^3 - 10^4$ -szer kisebb, mint az elliptikusaké, így a legtöbb AGN-nel rendelkező spirálgalaxis viszonylag rádiócsendesnek mondható. Bár mind az elliptikus, mind a spirálgalaxisok tartalmazhatnak rádiócsendes AGN-eket, rádióhangos AGN-ek leginkább csak elliptikus galaxisokban találhatók. A kvazárok körülbelül 10%-a rádióhangos, ennek oka máig ismeretlen [13]. Valószínű, hogy a rádióhangos és a rádiócsendes AGN-ek közötti fő különbség a fekete lyuk alapvető tulajdonságaihoz kapcsolódik, nevezetesen a tömegéhez, a spinjéhez és az akkréciós rátájához.

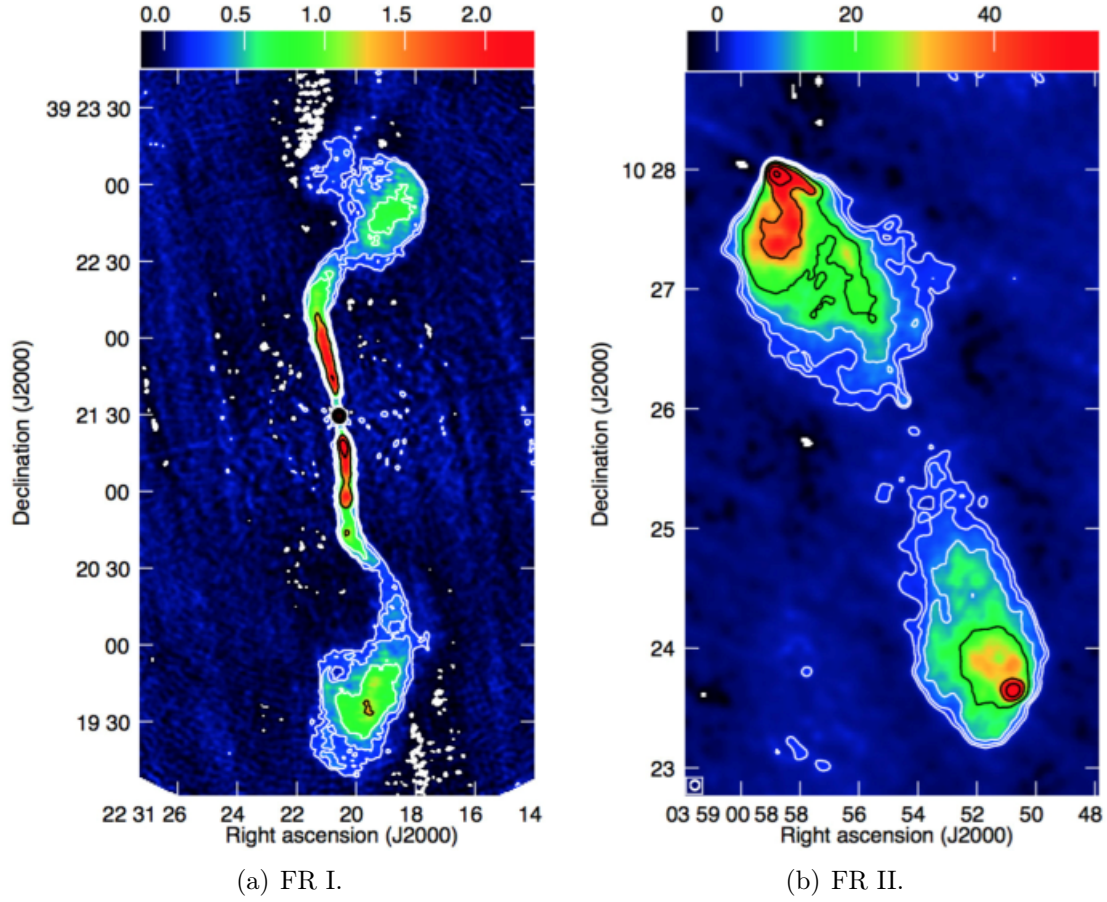
Sok esetben kétoldali, szimmetrikus jet helyett erősen aszimmetrikus jeteket tudunk megfigyelni. A különböző vizsgálatok során gyakran találkozhatunk olyannal is, hogy a galaxismagnak pusztán az egyik oldalán látható csak jet, nincs ellenjet. Ez a jelenség a Doppler-nyalábolás elnevezésű relativisztikus effektus számlájára írható. Ez alapján, az akár csak részlegesen felénk mutató jet sugárzása felerősödik, míg az ellenkező irányú jet sugárzása elhalványodik [21].

Rádiólebeny

A rádiógalaxisok kpc-es skálán számos kiterjedt komponenst mutatnak, mint például a fent említett jetek, valamint találhatunk még forró pontokat és lebenyeket. A lebenyek a rádióhangos aktív galaxismagok mindkét oldalán megtalálható nagy kiterjedésű kettős objektumok. Általában nagyjából szimmetrikusak és közelítőleg ellipszoid alakúak. Akkor alakulnak ki, amikor a jet beleütközik egy a galaxis körüli gázfelhőbe.

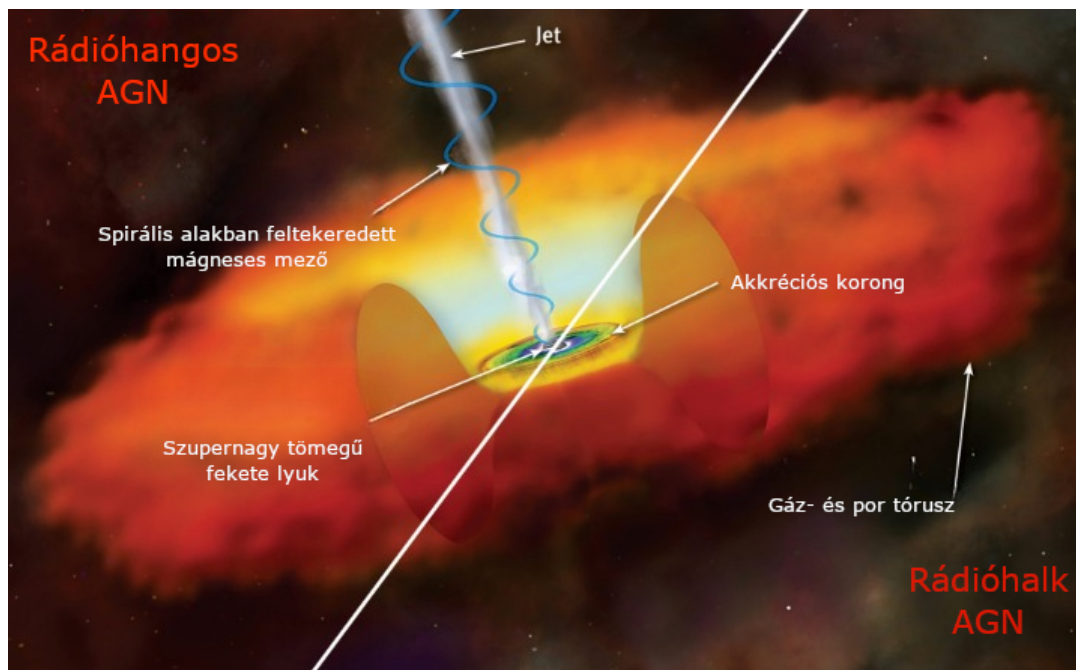
Fanaroff és Riley [8] vette észre először, hogy az extragalaktikus rádióforrások kiterjedt komponenseiben a magas és alacsony felületi fényességű területek egymáshoz viszonyított helyzete korrelál a rádiótartománybeli fényességükkel. Azt találták, hogy szinte minden $L_{178\text{MHz}} \leq 2 \cdot 10^{25} h_{100}^{-2} \text{ W Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$ forrás I. osztályú (azaz FR I), míg a fényesebb források szinte mindegyike II. osztályú (azaz FR II). Az FR I felületi fényessége nagyobb a mag felé, míg az FR II-eké a jetek végei felé. Kiderült, hogy a rádiógalaxisok morfológiája tükrözi a rádióforrásban történő energiaszállítás módját. Az FR I rádiógalaxisok középpontjában jellemzően fényes jetek találhatók, mint az 1(a) ábrán, míg az FR II-es galaxisoknak halvány nyalábjai, de fényes forró pontjai vannak a lebenyük végén, ez a 1(b) ábrán látható. A lebenyekből származó rádiósugárzást úgy értelmezik, hogy az a szinkrotronsugárzásnak köszönhető, míg a nagyenergiájú sugárzást sikeresen leírják inverz Compton-emisszióként

a kozmikus mikrohullámú háttérből (IC/CMB modell).



1. ábra. Példa a Fanaroff-Riley osztályozás két alosztályának jellemzőire valódi mérések alapján. (Az eredeti kép forrása: <https://www.semanticscholar.org/paper/Classification-of-Fanaroff-Riley-Radio-Galaxies-Becker-Grobler/1c2686be3e8b7548e6dfdfa6455c687dd1588303>)

A rádiólebenyek kiterjedése jellemzően 100 kpc nagyságrendű, ami azt jelenti, hogy növekedésük időskálája több tízmilliótól több százmillió évig terjed. Ha a lebenyekben lévő relativisztikus részecskék nem folyamatosan gyorsulnak, figyelembe véve a szinkrotronsugárzó elektronok hűlési idejét, $\tau_{\text{syn}} \sim 16,4 \cdot \gamma^{-1} B^{-2} \text{év}$, akkor a $\gamma \geq 10^6$ Lorentz-tényezővel rendelkező relativisztikus elektronok $B \sim 10^{-5}$ és 10^{-6} G közötti mágneses indukciójú térben nem sugározhatnak $\sim 10^6$ évnél hosszabb időn keresztül, ami rövidebb, mint a rádiólebenyek növekedésének kora [20].



2. ábra. Aktív galaxismagok felépítése. (Az eredeti kép forrása: NASA / CXC / M.Weiss, https://universemagazine.com/wp-content/uploads/2022/06/quiet-loud_uasar-1.jpg)

2.1.2. Aktív galaxismagok egyesített modellje

Az aktív galaxismagok egyesített modellje alapján úgy gondoljuk, hogy a megfigyelt különböző típusú AGN-ek abból adódnak, hogy az adott objektumokra más-más szögből látunk rá. Ez alapján értelmezhetővé válnak az AGN-ek spektrális eloszlásában (spectral energy distribution, SED), spektrális jellemzőiben és fényváltozásaiban megfigyelt különbségek. A különböző AGN típusok optikai színeképei a 3. ábrán láthatóak. Hiszen a rálátás szögétől függ, hogy az AGN-nek a 2.1.1. alfejezetben ismertetett részeiből mely komponenseket tudjuk megfigyelni.

Ha az adott aktív galaxismag úgy helyezkedik el, hogy rálátunk a központi régióra, akkor az akkréciós korongból származó sugárzás szabja meg a kontinuum és a vonalprofilok alakját. Ha a por- és gáztörusz irányából látunk rá, úgy a központi régiók takarásban lesznek, ekkor a gazdagalaxis fényéből származik a kontinuum, míg az emissziós vonalak a keskeny vonalas régióból (narrow-line region, NLR) származnak. Esetenként a kitakart széles vonalas régió (BLR) sugárzása szóródhat az NLR felhőin, amit széles vonalprofilú polarizált sugárzásként tudunk észlelni.

Vannak olyan esetek is, amikor a galaxismagból kiáramló jet közelítőleg felénk mutat, ekkor a jet sugárzása lesz a meghatározó. Ilyenkor nem látunk erős emissziós vonalakat, a SED maximuma pedig a gamma- és az infravörös tartományban lesz.

Ismeretes [31], hogy az aktív galaxismagok aktivitása összefügg a bennük található szupernagy tömegű fekete lyuk méretével és a belezuhanó anyag mennyiségével, melyet a behullási rátával jellemzünk. Ezen két tulajdonságon múlik, hogy az adott AGN rádióhangos vagy rádiócsendes. Minél nagyobb a behullási ráta az SMBH tömegéhez képest,

annál inkább lesz rádióhangos az adott AGN. A jelenség létrejöttében szerepet játszhat még a fekete lyuk forgási sebessége.

2.1.3. AGN-ek csoportosítása

Seyfert-galaxisok

A Seyfert-típusú galaxisok többségében spirálgalaxisok. Aktív galaxismagjuk általában nem rendelkezik jettel, esetleges kisebb energiájú kifúvások azonban előfordulhatnak esetükben. Emissziós vonalaik szélessége alapján két csoportra bonthatóak:

Seyfert-1:

Az 1-es típus esetén az infravörös tartománytól egészen a röntgentartományig erős kontinuumot tapasztalhatunk. Emellett spektrumukban láthatóak mind a széles megengedett emissziós vonalak (HI, HeI, HeII), mind a keskeny tiltott emissziós vonalak (OIII, NII, SII). Azért láthatunk széles emissziós vonalakat, mert ennél a típusnál rálátunk az aktív galaxismagra (face-on rálátás).

Bizonyos körülmények között az aktív galaxismag spektroszkópiailag és fotometriailag is SN IIn típusú szupernóvakhoz hasonlíthat. Például az SN 1987F és SN 1988I (később SN IIn-nek minősített) korai címkéje „Seyfert 1-like” volt. Az AGN szabálytalan fotometriai viselkedése (amit például a szupernagy tömegű fekete lyuk akkréciós sebességének változása okoz) optikai tartományban változó időszakokhoz vezethet, amelyek időtartama és amplitúdója összemérhető néhány SN IIn-nel [23].

Seyfert-2:

A 2-es típus esetén alapvetően a gazdagalaxis csillagaiból származó gyenge kontinuumot tapasztalhatunk. Emellett szinte csak a keskeny emissziós vonalak vannak jelen a spektrumukban, széles emissziós vonalak nem, vagy csak nagyon gyengén láthatóak. Ennek oka, hogy ez esetben oldalról, az aktív galaxis mag „élét” látjuk (edge-on rálátás), így a portórusz kitakarja a széles vonalakért felelős régiót.

Az 1-es és 2-es típus között megkülönböztetünk átmeneteket is [26]. Az 1.5-ös típusnál a $H\alpha$ és a $H\beta$ széles és keskeny vonalai hasonló erősségűek. Az 1.8-as típusnál a $H\alpha$ és a $H\beta$ széles vonalai már kevésbé láthatóak. Az 1.9-es típusban a $H\beta$ széles vonalai gyakorlatilag már nem is találhatók meg.

LINER-galaxisok

A LINER-galaxisok nevükhöz híven (low-ionization nuclear emission line regions) alacsony ionizált nukleáris emissziós vonalakkal rendelkeznek. Ezek a legalacsonyabb luminozitással rendelkező típusok, viszont színképük kifejezetten érdekes. Ugyanis spektrumukban számos erős tiltott vonalat találhatunk, mint például az OII, NiII, SII. Ezen kívül a széles emissziós vonalak is keskenyebbek, mint a keskeny vonalak a Seyfert-típusúaknál.

A mai napig vitatott [30], hogy ezekért a színeképükben található vonalakért valóban az aktív galaxismagjuk a felelős, vagy pusztán a jelentős csillagkeletkezésből származó sugárzást láthatjuk.

Rádiógalaxisok

A rádiógalaxisok jetjei rendkívül kiterjedtek, hosszuk elérheti a gazdagalaxisuk átmérőjét vagy akár jóval meg is haladhatja azt. Egyes esetekben akár a Mpc-es nagyságrendet is elérhetik. Luminozitásuk kisebb, mint a kvazároké, valamint gamma-tartományban is igen ritka esetekben sugároznak csak [10]. A kvazárokhoz és blazárokhoz hasonlóan gazdagalaxisuk elliptikus galaxis.

A Fanaroff–Riley-típusú osztályozásukat a 2.1.1. alfejezetben a rádiólebenyek ismertetésénél már bemutattam. Létezik azonban egy másfajta osztályozásuk is, az optikai spektrumuk alapján. A BLRG (broad-line radio galaxy) típus esetén széles és keskeny vonalakat is találhatunk a spektrumban, míg az NLRG (narrow-line radio galaxy) típusnál kizárólag keskeny vonalakat láthatunk. Ez a típusú osztályozás hasonlít a Seyfert-galaxisoknál bemutatotthoz.

Kvazárok

Nevük a quasi-stellar radio source kifejezésből ered, mely találó, hiszen rendkívüli fényességük egy aránylag kis térrészből érkezik. Látható tartományban csillagszerűnek tűnnek. A kvazárok a legfényesebb aktív galaxismagok, luminozitásuk akár ezerszeresen is meghaladhatja egy egész galaxisét, mint amilyen például a Tejútrendszer.

A nagy vöröseltolódású kvazárok egyedülálló nyomjelzők a legkorábbi szupernagy tömegű fekete lyukak kialakulásának és a kozmikus reionizáció történetének tanulmányozásához. A reionizáció az a korszak, amikor az ősrobbanás után létező ionizált anyag a semleges hidrogénné alakulása után elkezd csillagokat és más égitesteket alkotni, ezáltal újra ionizálódni. A kiterjedt erőfeszítések ellenére eddig csak kevés kvazárt találtak $z \geq 7,5$ -nél [32].

Bár először rádiósugárzásuk miatt figyeltek fel a kvazárokra, a legtöbb kvazár rádiócsendes. A kvazárok mintegy 10%-a rendelkezik jettel és sugároz rádiótartományban. A kvazárok túlnyomó többségének spektrumában erős és nagyon széles emissziós vonalak találhatók. Jelen vannak a Balmer-sorozat vonalai, a hidrogén Lyman α vonala, valamint a CIII, CIV és Mg II vonalak. Egyes képviselőik spektrumában pedig még a vas erős emissziós vonala is megtalálható.

Az emissziós vonalak mellett abszorpciós vonalak is megfigyelhetők színeképükben, ennek oka azonban nem az aktív galaxismag vagy a gazdagalaxis, hanem a látóirányba eső gáz, vagy köztes objektum elnyelése.

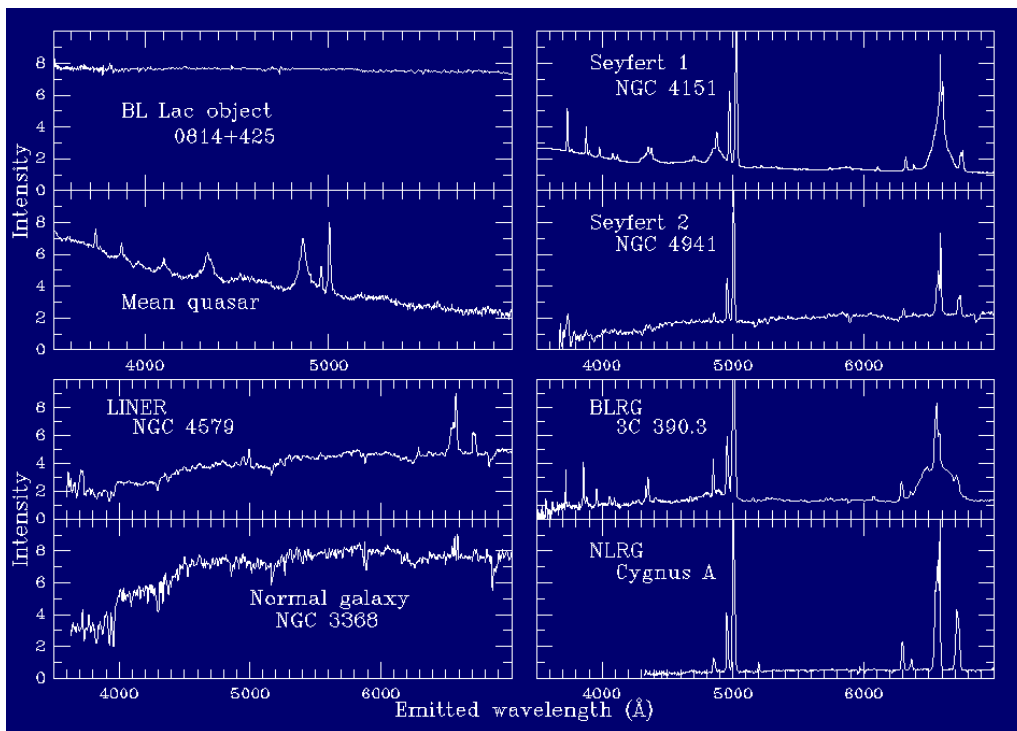
Blazárok

A blazároknak két kategóriáját különböztetjük meg, a BL Lac és az FSRQ (flat-spectrum radio quasar) típusokat. A BL Lac típus a BL Lacertae nevű objektumról kapta a nevét. Ezt kezdetben pár napos időskálán szabálytalanul változó csillagként kate-

gorizáltak. John L. Schmitt [28] mérései nyomán lett egy új osztály névadója. Az FSRQ-k erős és széles optikai emissziós vonalakkal rendelkeznek, míg a BL Lac típusban az optikai vonalak gyengék, Továbbá az FSRQ-k nagyobb bolometrikus fényerővel is rendelkeznek [27].

A BL Lac típusnál nem találhatók a spektrumban emissziós vonalak. Ennek oka, hogy ezekben az esetekben a jetre $\sim 10^\circ$ vagy még kisebb szög alatt látunk rá. Így a jet sugárzása dominálja a spektrumot, ahogy azt már az egyesített modell esetében ismertettem. A blazárok gazdagalaxisa a kvazárokhoz hasonlóan elliptikus galaxis.

Az általam a továbbiakban vizsgált objektum a fenti kategóriák alapján a kvazárok közé sorolható be.

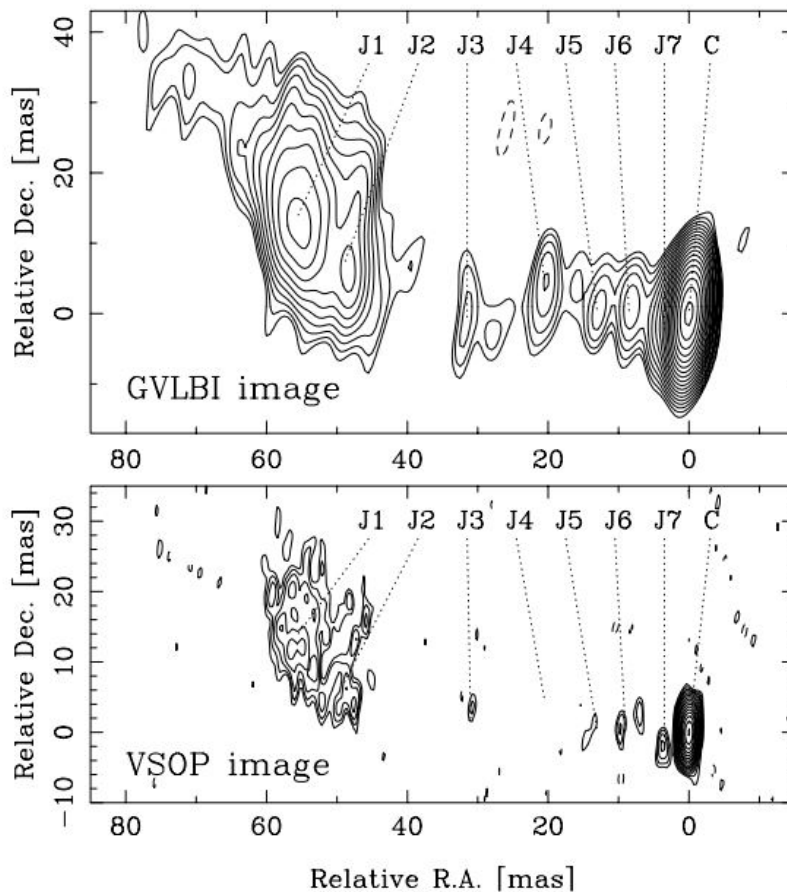


3. ábra. Az aktív galaxismagok főbb csoportjainak vöröseltolódásra korrigált optikai spektrumai. (Forrás: <https://pages.astronomy.ua.edu/keel/agn/spectra.html>)

2.2. A vizsgált PKS 2215+020 kvazár

A PKS 2215+020 rádiókvazárt 2001-ben vizsgálták Lobanov és munkatársai [19]. A kvazár optikai színekvonalainak vöröseltolódása $z = 3,572$ [5]. A mérési adataik két műszeregyüttesből származtak. Voltak földi VLBI (ground-based very long baseline interferometry, GVLBI) mérésen alapulóak, ezeket 15, különböző helyen elhelyezkedő teleszkóppal mérték a VLBI technikát felhasználva. Az adatgyűjtés ez esetben 10 órán keresztül tartott. Valamint voltak űr-VLBI mérésen alapuló mérések is (VLBI Space Observatory Programme, VSOP), melyekhez a földi antennahálózat mellett a HALCA műholdon telepített rádióteleszkópot használták. Ekkor csak 7 órán át zajlott az adatfelvétel.

Mindkét esetben 1,6 GHz frekvencián mérték. A mért adatokat az AIPS valamint a Difmap nevű program segítségével elemezték. A kutatásom során én is a Difmap programmal végeztem az adatfeldolgozást, így ennek részletes bemutatása a későbbiekben a dolgozat részét képezi. Az adatfeldolgozás során azt találták, hogy a VSOP mérések zajszintje négyszer nagyobb, mint a GVLBI méréseké, a kis (8 m-es átmérőjű) űrbeli antenna miatt. Az adatsorok kalibrálása után két képet készítettek, egy GVLBI mérésen és egy VSOP mérésen alapulót, ezek a 4. ábrán láthatóak.



4. ábra. Az 1997. szeptember 14-én végzett mérések térképei a PKS 2215+020 rádiókvazárról, 1,6 GHz frekvencián. A felső térkép a földi mérések, az alsó térkép az űr-VLBI mérések alapján készült [19].

A térképek érdekessége egyfelől az, hogy a jet J4-gyel jelzett komponense a VSOP képen eltűnt. Ennek oka, hogy az űr-VLBI mérések szögfelbontása nagyobb, és a jet ezen a ponton keresztirányban teljesen felbontottnak tűnik. A másik, hogy a J1-es komponens galaxismagtól való távolsága ~ 58 ezredívmásodpercnek (milliarcsecond, mas) adódott. Ez a jet ritka kiterjedtnek számít más hasonló vöröseltolódású kvazárokhoz képest.

Kutatásuk során, a felbontott J4 komponens mérete alapján megbecsülték a központi SMBH tömegét, erre $4 \cdot 10^9 M_{\odot}$ érték adódott. Továbbá meghatározták még az egyes komponensek méretét és fényességi hőmérsékletét.

2.3. Rádióinterferometria

A rádiócsillagászatban abba a problémába ütközzünk, hogy a vizsgálandó hullámhossz (λ) nagyon nagy. Így az elérhető szögfelbontás a Rayleigh-féle kritérium

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{D_{\text{obj}}} \quad (1)$$

alapján nagyon gyenge. Még ha egy $D_{\text{obj}} = 100$ méter átmérőjű teleszkóppal is mérünk, akkor is a látható fény tartományában a szemünkével megegyező szögfelbontást tudunk csak kapni. A hatalmas, több száz méter átmérőjű rádióantennák építése több szempontból is problémás lenne. Hiszen minél nagyobb az antennánk, annál nagyobb kihívás azt mozgatni, a hatalmas méretű teleszkópok alakja már képes jelentősen torzulni a saját súlyuk miatt is. A technikai kihívásokon kívül nagy az építési és karbantartási költség is, jó példa erre az Arecibo rádióteleszkóp, amely nemrég a sorozatos hurrikánkárok után olyan mértékben sérült meg, hogy már ésszerűtlen lett volna a felújítása [24].

Ahhoz, hogy növeljék a szögfelbontást rádiótartományban, inkább egymástól távoli teleszkópok jeleit kombinálják. Így a Rayleigh-féle kritérium az alábbi módon módosul, ahol B a bázisvonal hosszát, vagyis a két legtávolabbi antenna távolságát jelenti:

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{B}. \quad (2)$$

A módszer a gyakorlatban úgy néz ki, hogy az egymástól távoli antennák egy időben ugyanazt a forrást figyelik meg. A különböző antennákra érkező jel időkéésését nagyon pontos atomórák alapján mérik. A mért adatokat eljuttatják egy központi számítógéphez, ahol a jelek korrelációjával létrehozzák az interferenciát. Ezért amit mérünk, az valójában az objektumunk vizibilitása. Az alábbi levezetés is [4] alapján készült.

A térbeli koherenciafüggvény, azaz a vizibilitási függvény két megfigyelési pont (egy bázisvonal) esetén néhány egyszerűsítéssel a következőnek adódik. Itt ν a frekvencia, $\mathbf{r}_1$ és $\mathbf{r}_2$ a bázisvonalat alkotó két antennába mutató geocentrikus vektor, $\mathbf{s}$ a forrás adott pontja felé mutató geocentrikus egységvektor, I_ν a forrás intenzitásfüggvénye, c a fénysebesség, Ω a forrás égen elfoglalt térszöge:

$$V(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int I_\nu(\mathbf{s}) \cdot e^{2\pi i \nu \mathbf{s}(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)/c} d\Omega. \quad (3)$$

Vezessünk be egy új (u, v, w) koordinátarendszert úgy, hogy a harmadik tengely a rádióforrásunk egy kijelölt pontja ($\mathbf{s}_0$ fáziscentrum) felé mutasson, a másik két tengely pedig legyen erre merőleges. Ekkor jó közelítéssel $\mathbf{s} = (x, y, 1)$ és a hullámhosszakban mért bázisvonalhossz:

$$\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = \frac{c(u, v, w)}{\nu}. \quad (4)$$

Távoli rádióforrásokra egyszerűsíthetünk a w elhagyásával. A 3-as képlet így a következő alakra hozható:

$$V(u, v) = \iint I_\nu(x, y) \cdot e^{2\pi i (ux + vx)} dx dy. \quad (5)$$

Az 5-ös képlet Fourier-transzformációjával megkaphatjuk az intenzitásfüggvényt az alábbi alakban:

$$I_\nu(x, y) = \int \int V(u, v) \cdot e^{2\pi i(ux+vy)} du dv. \quad (6)$$

Mivel a bázisvonalak véges száma miatt az (u, v) sík lefedettsége hiányos, így az egyenletben figyelembe kell venni az $S(u, v)$ mintavételi függvényt. Ez a függvény úgy működik, hogy ha van mért vizibilitási értékünk az adott pontban, akkor 1-et vesz fel értékül, amennyiben nincs, akkor 0-t. Az alábbi összefüggés alapján már megkaphatjuk az ún. piszkos térképet:

$$I_\nu^D(x, y) = \int \int V(u, v) S(u, v) \cdot e^{2\pi i(ux+vy)} du dv. \quad (7)$$

A piszkos térkép (dirty map) a piszkos nyaláb (dirty beam) és a valódi intenzitásfüggvény konvolúciójaként kapható meg:

$$I_\nu^D(x, y) = I_\nu(x, y) * B(x, y), \quad (8)$$

ahol a piszkos nyaláb:

$$B(x, y) = \int \int S(u, v) \cdot e^{2\pi i(ux+vy)} du dv. \quad (9)$$

A piszkos nyaláb az interferométer válasza egy elképzelt pontszerű rádióforrásra, a piszkos térkép pedig a valódi rádióforrásra, amelynek intenzitástérképét szeretnénk megalkotni [4].

3. Mérések

3.1. VLBA

Az általam feldolgozott mérési adatokat az Észak-Amerikában található Very Long Baseline Array (VLBA) műszeregyüttes szolgáltatta, ennek illusztrációja a 5. ábrán látható. Ez egy 10 teleszkópból álló rendszer, az egyes rádióantennák átmérője 25 méter. Leghosszabb bázisvonala 8611 km, ennek segítségével akár 0,17 mas szögfelbontást is képes elérni. Észlelési tartománya 0,3 – 96 GHz frekvenciák között van, ez 90 cm – 3 mm közötti hullámhossztartományú lefedettséget jelent [22].



5. ábra. A VLBA rádióteleszkóp-rendszer. (Forrás: https://ieeexplore.ieee.org/mediastore_new/IEEE/content/media/9171629/10091703/10048701/kooi3-3237693-large.gif)

Mérési adatait a fentebb ismertetett VLBI módszer alapján állítja elő. A mért és kalibrált adatok egy részre az Astrogateo nevű archívumba (<http://astrogeo.org>) kerül fel FITS (Flexible Image Transport System) formátumban. Ezen a webhelyen közelítőleg 17 000 forrásról több mint 100 000 mérési adat található. A PKS 2215+020-ról 1995 és 2020 között végzett mérések közül 18-nak az adatsora található meg ezen a weboldalon.

3.2. A mérések leírása

A PKS 2215+020 kvazárról 4 frekvenciasávban végeztek megfigyeléseket. Megtalálható 8 mérés X sávban, amely 8,6 GHz körüli frekvenciát jelent. Fellelhető még 2–2 adatsor 15,4 GHz-en (U sáv) és 4,3 GHz (C sáv) frekvencián, valamint 5 mérés S sávban, 2,3 GHz-en. Az általam kiértékelt adatok az S sávban mért adatsorok. Az adatfeldolgozás során ezeket a méréseket elemeztem, a mérési időtartamok maximum pár perces nagyságrendbe estek. A mérések különböző paraméterei a 1. táblázatban láthatóak. Az adatfeldolgozáshoz a Difmap nevű programot [29] használtam.

epocha [év]	ν [GHz]	Antennák	t_f [s]	polarizáció
1995,535	2,27	VLBA	178	RR
2013,561	2,31	VLBA(-BR, -FD, -MK)	862	RR
2018,349	2,28	VLBA	110	RR
2018,617	2,28	VLBA	119	RR
2020,882	2,32	VLBA	3515	RR

1. táblázat. A dolgozatban kiértékelt mérések paraméterei. Az első oszlopban láthatóak a mérési időpontok évben, a második oszlopban a megfigyelt frekvencia, a harmadik oszlopban a mérésben résztvevő antennák, a negyedik oszlopban az adott célforráson töltött összes idő (t_f), az utolsó oszlopban, pedig a kiértékelt polarizáció.

4. Adatfeldolgozás

4.1. Difmap

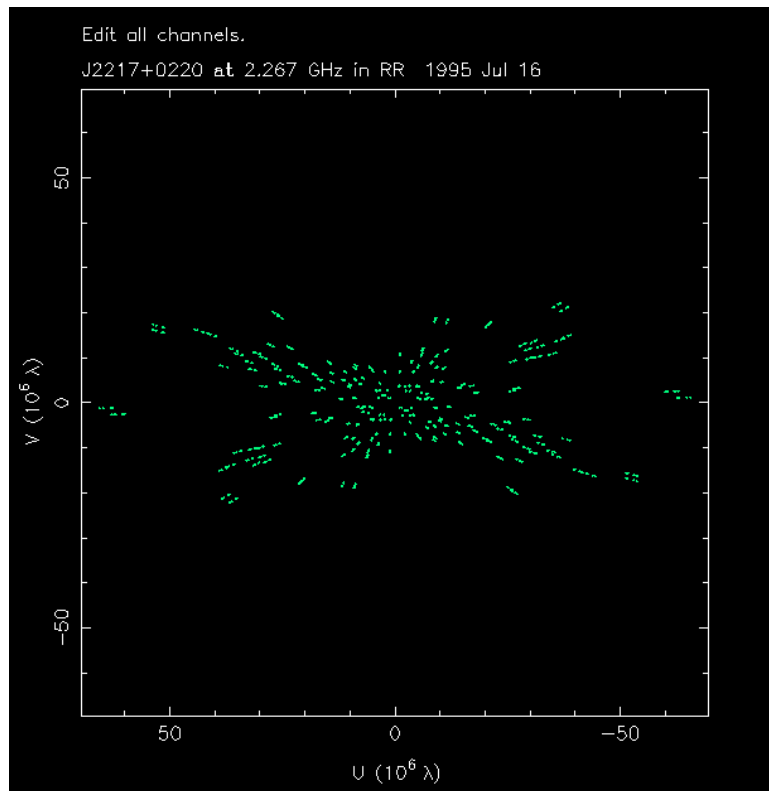
Martin C. Shepherd 1992 júniusában kapott felkérést, hogy írjon egy új programot a Caltech VLBI csomaghoz. Az új program egy iteratív térképezési technikán alapul, amelyet „különbségtérképezésnek” (difference mapping) neveznek. A program alapvetően a már korábban meglévő programokra támaszkodott az adatok ellenőrzése, adatszerkesztés és képmegjelenítés esetén. Így létrehozott egy környezetet, amely magába foglalja a Caltech VLBI csomagjának minden funkcióját. 1995 óta a programon pusztán csak karbantartást végeznek.

A difference mapping eljárás során a `clean` parancs segítségével a piszkos térképről lépésenként levonjuk az objektum komponenseit, egészen addig míg csak a háttérzaj marad. Az eljárás [12] során feltételezzük, hogy a rádióforrás előállítható véges számú pontforrás összegeként, az interferométer válaszát a pontforrásra (a piszkos térképet) pedig ismerjük.

Modellillesztéssel, a `modelfit` parancssal is készíthetünk térképeket, ez az eljárás Gauss-komponensek illesztésével történik a vizibilitás adatokra. A két módszert a dolgozat későbbi részeiben részletesen is kifejtem.

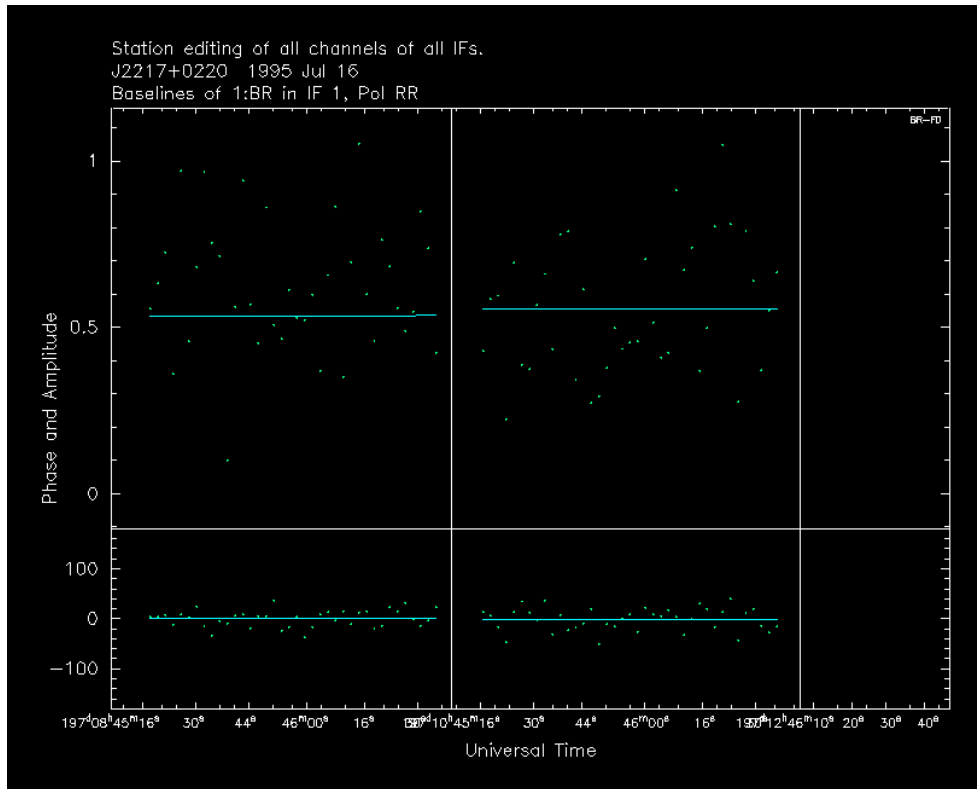
A program számos könnyen kezelhető, interaktív ábrát képes megjeleníteni. Egyszerű kattintásokkal vagy kijelöléssel eltüntethetünk hibás adatpontokat, más ablakokban pedig könnyedén válthatunk és vizsgálódhatunk különböző bázisvonalak és teleszkópok adatai között. Bármilyen ábra megjelenítése előtt, amennyiben a kiértékelés során először ábrázolunk, ki kell választani a megfelelő kimeneti eszközt. Én minden esetben az XWindow (`/xw`) segítségével dolgoztam.

A `uvplot` paranccsal lehet ábrázoltatni az adott méréshez tartozó (u, v) lefedettséget, ennek a képe az 1995-ös mérés esetében az 6-ös ábrán látható. Mivel a mérések minden esetben csak rövid ideig tartottak, így az ábrákon a bázisvonalak által leírt megszokott ellipszisívek nem láthatóak. Azok akkor jelennek meg látványosan, amikor egy hosszabb mérés során a Föld jelentős mértékben elfordul a tengelye körül.



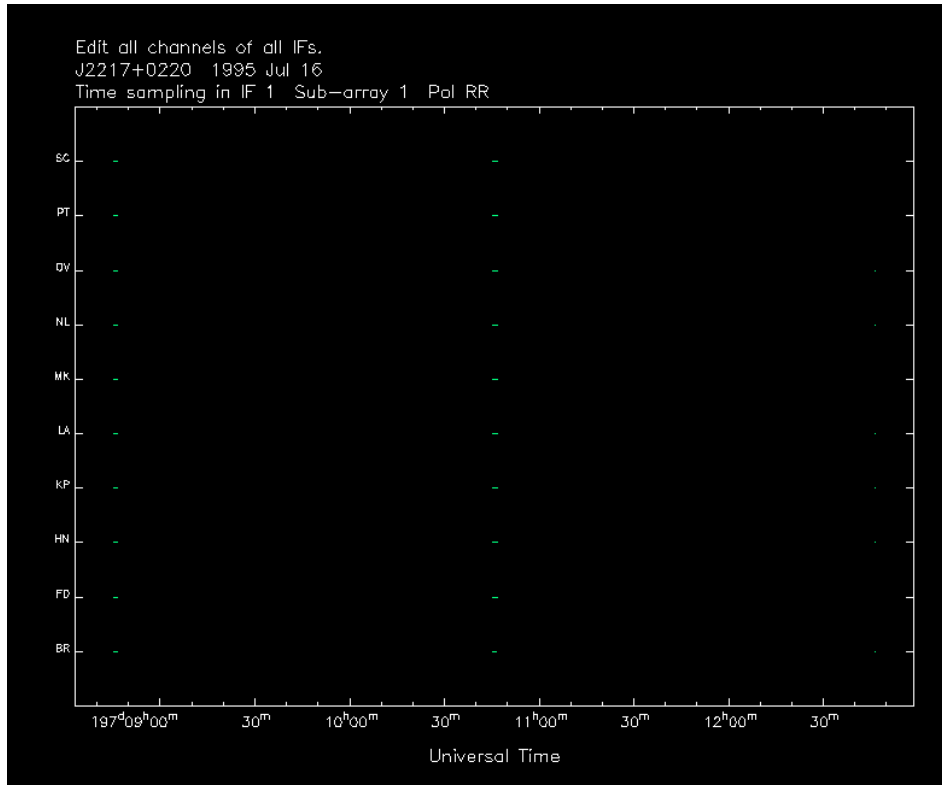
6. ábra. A 1995. július 15-ei mérés (u, v) lefedettsége. Az ábra az interferométeres bázisvonalaknak a rádióforrás irányára merőleges síkra eső vetületeit szemlélteti. A pont-halmaz kiterjedése a rendszer szögfelbontását, a sík kitöltöttsége a képalkotás minőségét határozza meg.

A különböző bázisvonalakon mért amplitúdók és fázisok megjelenítésére az idő függvényében a `vplot` parancs szolgál. A paranccsal akár egyszerre több bázisvonalhoz tartozó adatsort is meg tudunk tekinteni, valamint az n vagy p gomb lenyomásával váltani köztük. A 7-os ábrán látható esetben egy bázisvonal adatait ábrázoltam, a felső panel az amplitúdók, az alsó a fázisok mért értékeit (pontok) és az aktuális modellt (görbék) mutatja.



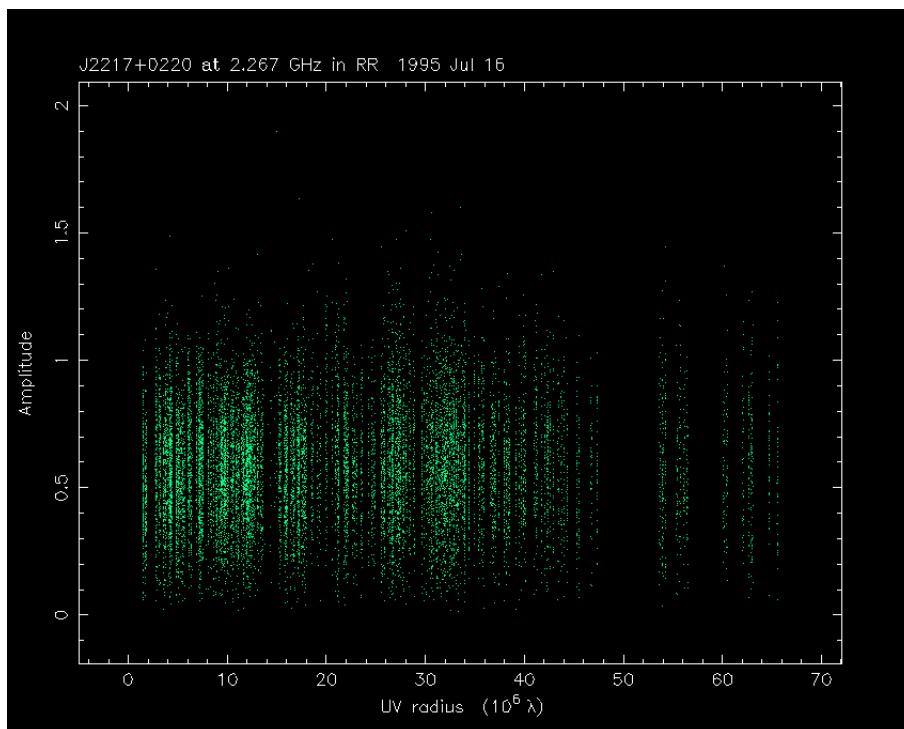
7. ábra. A 1995. július 15-ei mérés Brewster - Fort Davis bázisvonalához tartozó amplitúdó és fázis az idő (UT) függvényében.

A `tplot` parancs a mintavételezés idejét képes szemléltetni. A grafikon (8. ábra) függőleges tengelyén láthatóak a különböző, mérésben részt vevő rádióantennák kétbetűs kódjai. A VLBA tíz antennája a következő: Brewster (BR), Fort Davis (FD), Hancock (HN), Kitt Peak (KP), Los Alamos (LA), North Liberty (NL), Owens Valley (OV), Pie Town (PT), Mauna Kea (MK) és St. Croix (SC). Itt megfigyelhetjük, hogy az 1995-ös mérés 3×3 perces mérésekből tevődött össze.



8. ábra. 1995. július 15-ei mérés időbeli mintavételezése.

Végül, de nem utolsósorban ábrázolhatjuk a mért amplitúdókat és fázisokat a vetített bázisvonalhossz – az (u, v) sugár – függvényében, a `radplot` utasítás segítségével. Ezt a 9-as ábra szemlélteti. Miután megnyílt az ablak, a bal egérgombbal kattintva kivehetjük a hibás adatpontokat, ilyenkor a kattintáshoz legközelebbi pontot távolítja el a program. A `c` gomb lenyomása után, akár egy téglalap alakú ablakot is kijelölhetünk, arra az esetre, ha számos hibás adatot szeretnénk egyszerre eltávolítani. Amennyiben már az amplitúdó- és fázismodell megalkotásán túl vagyunk, itt és a `vplot` ábrán ellenőrizhetjük, milyen jól illeszkedik a modell az adatokhoz.



9. ábra. A 1995. júliusi mérés adataiból kapott amplitúdó–vetített bázisvonalhossz diagram.

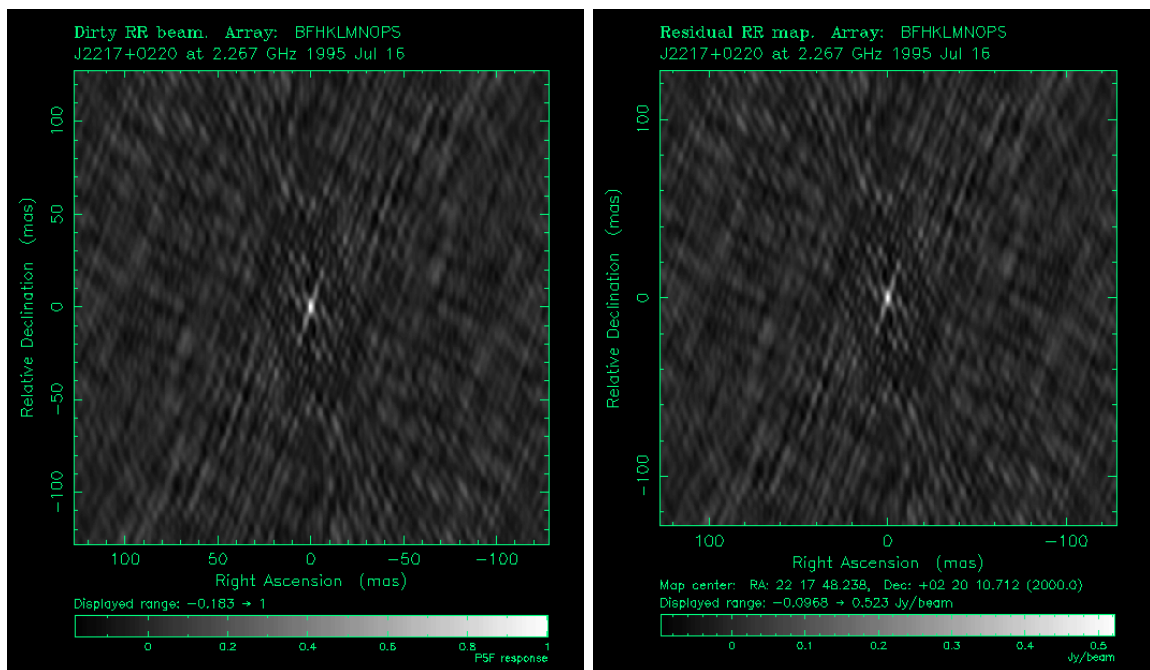
4.1.1. Térképek készítése

A megfelelően telepített Difmap programot a terminálból a `difmap` utasítással nyithatjuk meg. Az adatsor beolvasását az `observe [fájlnév]` paranccsal végeztem. Ezt követően a `select` utasítással kiválaszthatjuk az adatok bizonyos részhalmazát, a megfelelő polarizációt, a megfelelő frekvenciát vagy akár az egész adatsort. Az S sávon feldolgozott adatsorok esetében csak egy RR (jobb cirkuláris) polarizációt mértek, így a program automatikusan ezt választotta.

Az adatfeldolgozás megkezdése előtt a `mapsize` parancs segítségével be kell állítani az ábrázolni kívánt térkép- és pixelméretet. Amennyiben a pixelméretet túl nagyra állítjuk, elveszthetünk információkat, erre rossz érték esetén a program külön felhívja a figyelmünket. A térképméretet minden adatsor esetében 1024×1024 pixelesre állítottam, a pixelméret egyes mérések esetén eltérő volt, de az 1995-ös, 2, 3 GHz-es mérés esetében $0.5 \text{ mas} \times 0.5 \text{ mas}$ érték volt a megfelelő. Ezt követően a `mapplot` parancs segítségével megjelenítettem a piszkos térképet, mely a 10(b) képen látható. Itt kézzel is kijelölhetünk egy ablakot a legfényesebb pont köré, ahol a `clean` eljárás komponenseit keresheti majd a program. Ezt egyedül a 2013-as mérés kiértékelése során használtam, ugyanis a viszonylag magas zajszint miatt a program nem könnyen találta meg a megfelelő komponenst. Minden más esetben a `peakwin` utasítással kerestettem meg a csúcsot.

A kiértékelést a `clean` és `selfcal` parancsok segítségével folytattam. A clean algoritmus [12] egy pontforrás modell alapján dolgozó iteratív eljárás. A kijelölt ablakon belül a legfényesebb helyeken levonja a 10(a) ábrán látható piszkos nyalábot. A programban be-

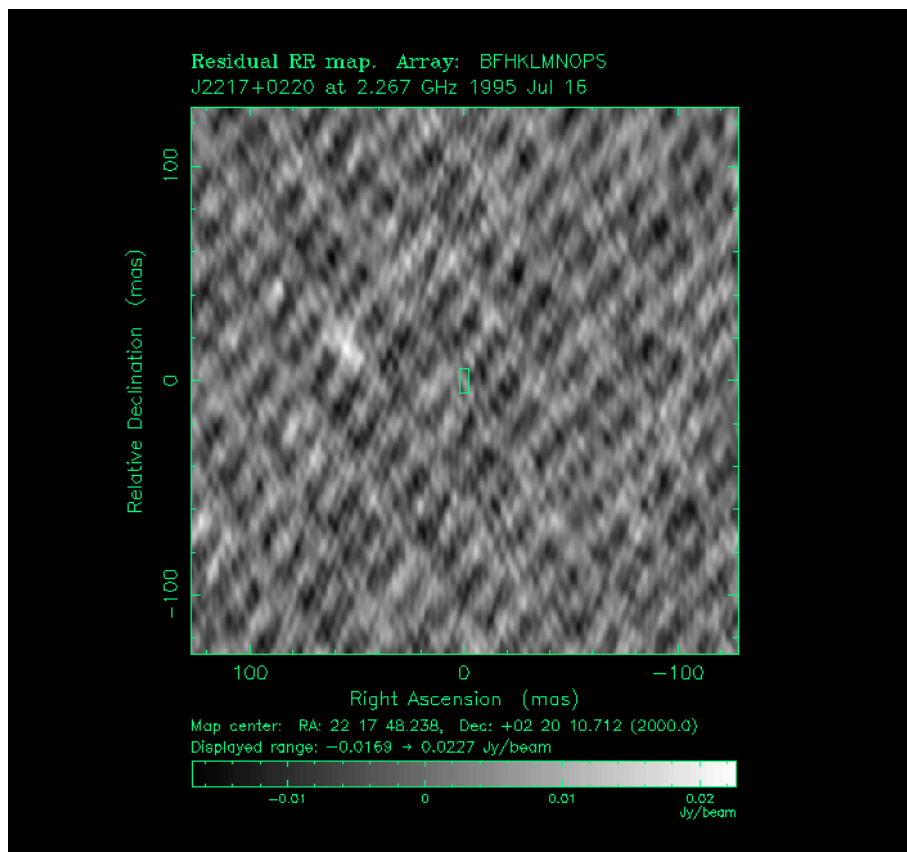
állíthatjuk, hány iterációt végezzon, és az adott térképen a csúcsfényesség hányad részét vonja le a piszkos térképből az adott lépéseknél. Én alapértelmezetten `clean 100, 0.05` paramétereket használtam (100 iteráció, a csúcsfényesség 5%-ának megfelelő pontforrás levonása). A `selfcal` az antennafüggő amplitúdó- és fáziskalibrációs hibák becslésére és korrekciójára szolgál. Ezt a folyamatot egyszer elvégezve, a 11-es ábrán látható maradványtérképhez jutottam. A folyamatot még egyszer elvégezve már nem tapasztaltam más kimutatható komponenset, ezt a `print peak(flux)/imstat(rms)` parancs segítségével ellenőriztem, mely a csúcsfényesség és a zaj arányát adja meg. Amennyiben ez az érték ~ 6 alatt van, nem érdemes további komponenseket keresni.



(a) Piszkos nyaláb

(b) Piszkos térkép

10. ábra. Az 1995-ös mérés kiértékelése során kapott piszkos nyaláb és piszkos térkép, bár elsőre hasonlóknak tűnhetnek a színskálákon jól látszik a különbség.



11. ábra. Az első clean iteráció után kapott maradéktérkép, amelyen a középső fényes, kompakt mag komponens eltávolítása után, balra (keleti irányban) feltűnik egy további diffúz, halvány emissziós komponens. A kis zöld téglalap azt az ablakot jelöli, amelyen belül a clean pontforrásokat kereste a program.

A fázis önkalkibrációját követően a `gscale` utasítással elvégeztem az amplitúdó önkalkibráció első lépését. A `gscale` minden antennához egy-egy amplitúdókorrekciós faktort rendelve dolgozik. Ezután elvégeztem az időfüggő amplitúdó-önkalkibrációt a `selfcal true,true,10` parancs segítségével. Itt érdemes első körben nagyobb időintervallumot megadni, ezt a harmadik paraméter helyén álló számmal lehet megtenni, perc egységekben. Témavezetőm javaslatára az értéket nagyjából harmadolva jutottam el végül 0-ig.

Az adatfeldolgozás utolsó lépéseként a `clean 1000, 0.01` paranccsal elvégeztem egy utolsó tisztítást. Fontos, hogy ezt a parancsot úgy írjuk be, hogy előtte az összes clean ablakot kitöröltük a térképen. Hiszen ezzel a paranccsal az a célunk, hogy a megmaradt zaj foltjait „elkenjük” a térképen. A végleges, tiszta térképeket a `mapplot clean` paranccsal kirajzoltattam, ezek a következő 5. fejezet 12–16, valamint 10 ábráin láthatóak. Az alsó szintvonalak intenzitás értékét kb. a térkép zajszint értékének 3-szorosára állítottam.

4.1.2. Gauss-modell illesztése

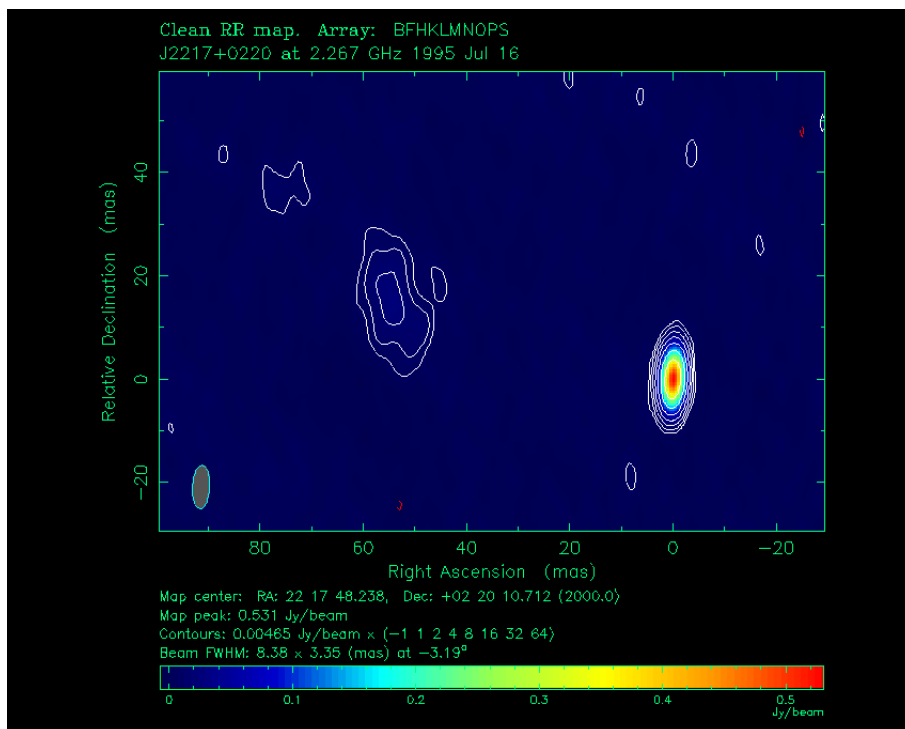
Az adatfeldolgozás részeként a komponensek adatait is meghatároztam. Ehhez a modellillesztés a legalkalmasabb módszer. A legfényesebb komponensekre kétdimenziós Gauss-függvényt illesztettem. Ez a legelterjedtebb modell, hiszen Fourier-transzformáltja is Gauss-függvény, így könnyen kezelhető. A Difmap program közvetlenül az előzőleg már kalibrált vizibilitás adatokon végzi el a modellillesztést, tehát nem a térképet használja erre a célra.

A kiértékelés ez esetben úgy zajlott, hogy fentiekben bemutatott clean térképezés végeredményét beolvastam, majd a `clrmod` utasítással töröltem a megalkotott pontforrásmodellt. Ezután megnyitottam a térképet a `mapplot` segítségével, itt az N gomb lenyomásával, interaktív módon egy megfelelő méretű körszimmetrikus Gauss-komponenszt helyeztem el az adott komponensre, mint kezdő modellt. Az ablakot bezárva, a terminálban a `modelfit 13` paranccsal, 13 iterációt alkalmazva végeztem el a modellillesztést, ezzel egyre pontosabb értékeket kapva. Ezt a folyamatot addig végeztem, amíg már nem maradt kimutatható komponens a zajszint felett. Két kör alapú Gauss komponens használata elegendőnek bizonyult a kalibrált vizibilitási adatok modellezésére. A későbbiekben a legpontosabb kapott értékekkel dolgoztam.

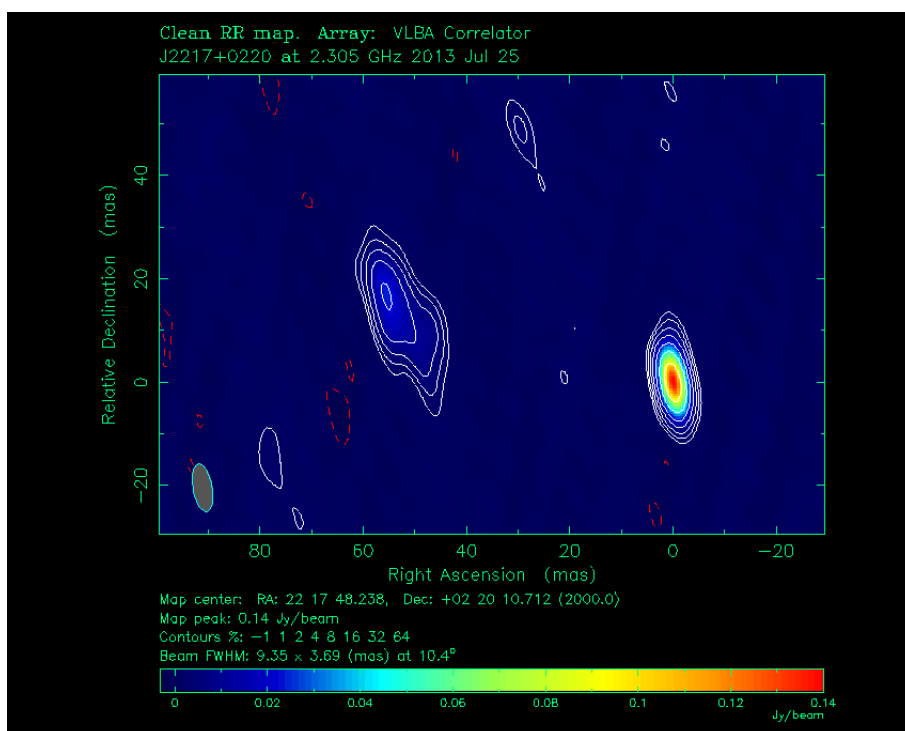
5. Eredmények

5.1. S sáv

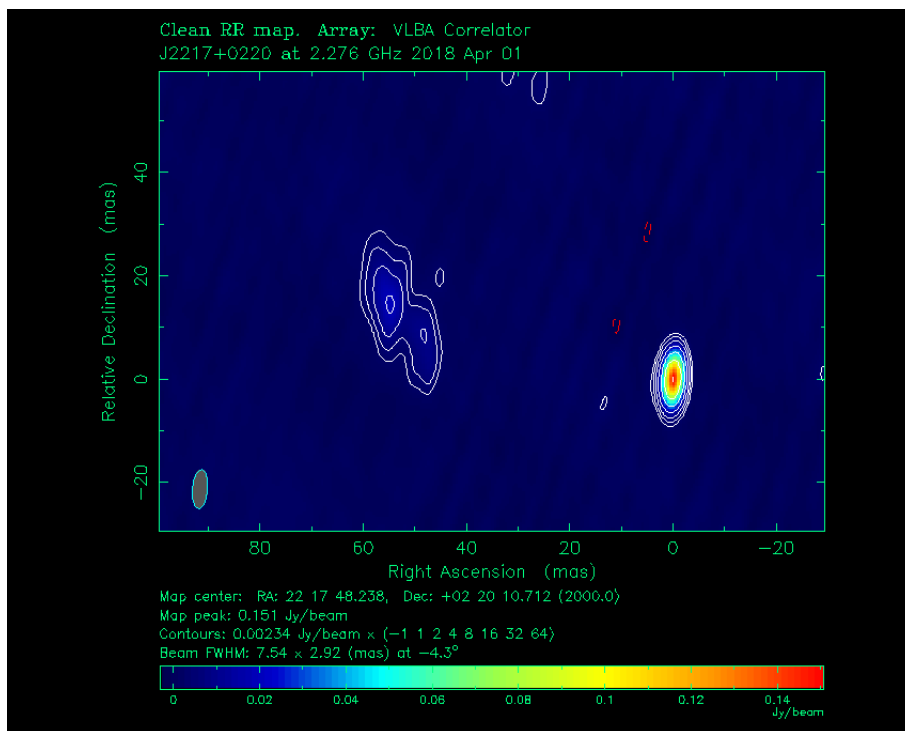
A clean térképkészítés végeredményeként a 12.–16. ábrákon látható térképeket kaptam. Minden térképen jól látható a kompakt, fényes aktív galaxismag, valamint a tőle ~ 56 mas szögtávolságra lévő, kiterjedtebb és halványabb jetkomponens [9]. A térképek vízszintes tengelyén a relatív rektaszcenzió, a függőleges tengelyükön a relatív deklináció látható, mas egységekben. A térképeken fel van tüntetve továbbá a térkép $(0,0)$ pontjának (a fáziscentrumnak) a pontos helyzete, a csúcsintenzitás értéke, az egyes kontúrszintek értéke, valamint a felbontást jelképező ideális nyaláb, mint elliptikus Gauss-függvény félértékszélessége (FWHM). Ez a nyaláb, amely a hasonló méretű ideális, vagyis teljesen kitöltött (u,v) síkkal rendelkező interferométeres hálózatra jellemző, a térkép bal alsó sarkában is látható. A térképek csúcsintenzitás(I_P) és kezdő kontúrszint értékeit (I_K), valamint az elliptikus Gauss függvény FWHM-ét a 2 táblázat tartalmazza.



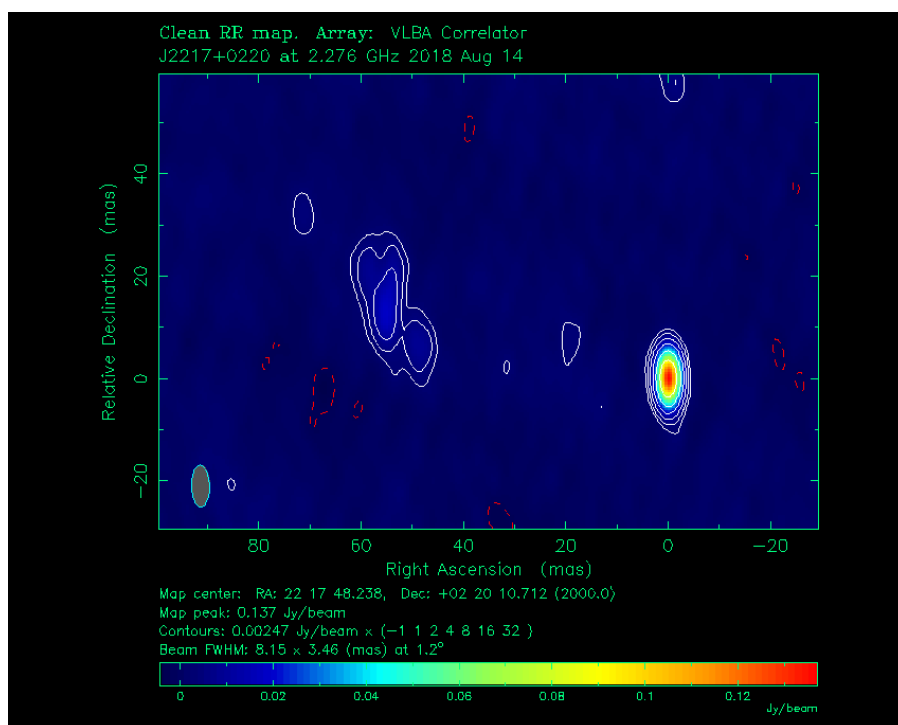
12. ábra. A 1995. júliusi mérés adataiból kapott rádiótérkép 2,3 GHz frekvencián.



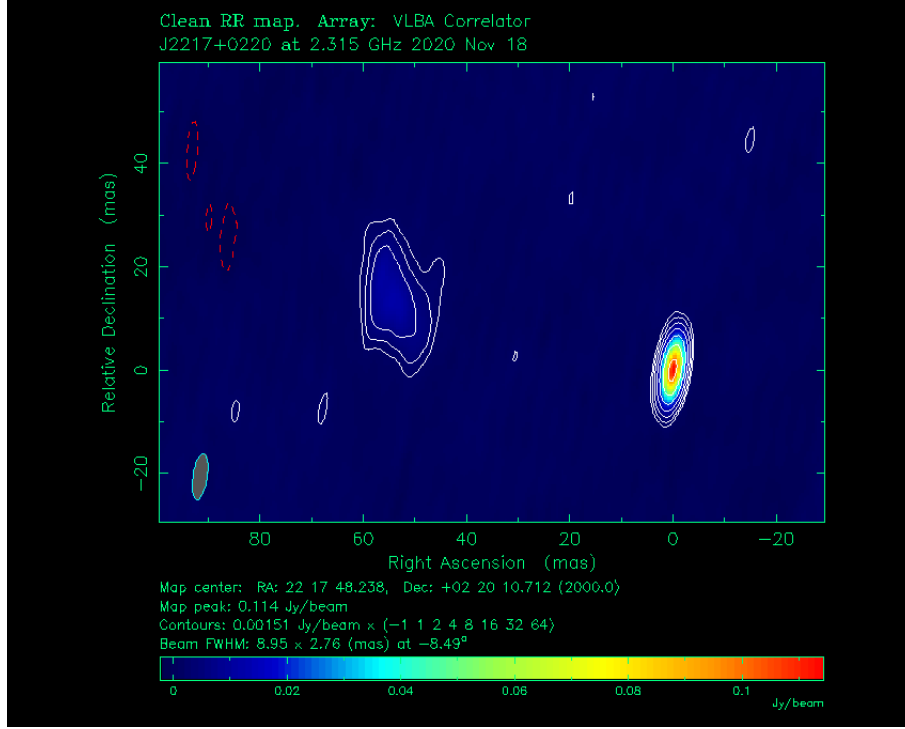
13. ábra. A 2013. júliusi mérés adataiból kapott rádiótérkép 2,3 GHz frekvencián.



14. ábra. A 2018. áprilisi mérés adataiból kapott rádiótérkép 2,3 GHz frekvencián.



15. ábra. A 2018. augusztusi mérés adataiból kapott rádiótérkép 2,3 GHz frekvencián.



16. ábra. A 2020. novemberi mérés adataiból kapott rádiótérkép 2,3 GHz frekvencián.

t [év]	1995,535	2013,561	2018,349	2018,617	2020,882
I_P [mJy/beam]	531	140	151	137	114
I_K [mJy/beam]	4,65	2,42	2,34	2,47	1,51
FWHM [mas]	$8,38 \times 3,35$	$9,35 \times 3,89$	$7,54 \times 2,92$	$8,15 \times 3,46$	$8,95 \times 2,76$

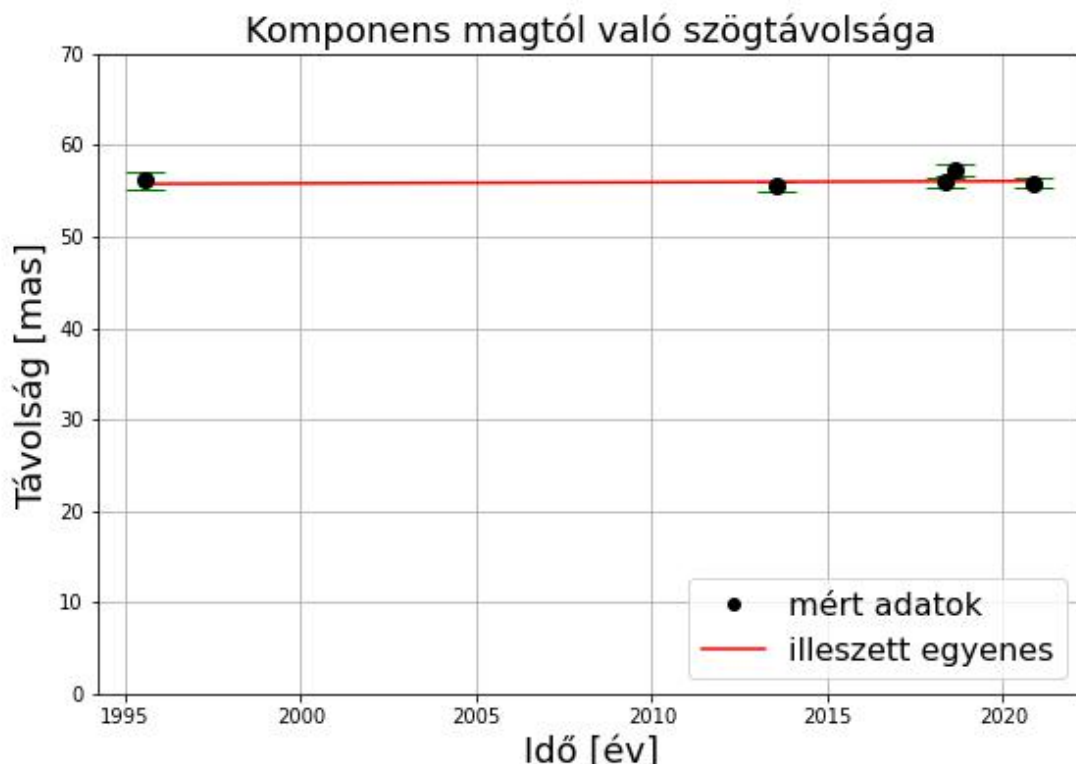
2. táblázat. Az S sáv kiértékelésének eredményei. Az első sorban láthatóak a mérési időpontok évben, a másodikban a térképek csúcsintenzitás értékei (I_P) millijansky per nyalábban, a harmadikban a kezdő kontúrszint értékei (I_K) szintén millijansky per nyalábban, a negyedik és egyben utolsó sorban a nyaláb félértékszélessége található milliív-másodpercben.

A Gauss-komponensek illesztéséből megkaptam a jet és a mag origótól való távolságát, valamint pozíciószögét, vagyis polárkoordinátáikat. A pozíciószöget a térkép „tetejétől” az óramutató járásával ellentétes irányban (vagyis északtól indulva kelet felé) mérve kapjuk. A kapott adatokat a magra vonatkozó polárkoordinátákba átszámítva meghatároztam a mag–jet távolságot mind az 5 vizsgált időpontban. A mag–jet távolságot (R), valamint a jet pozíciószögét (θ) a 3. táblázat tartalmazza.

A kapott mag–jet távolságokat Pythonban ábrázoltam az idő függvényében, majd egyenest illesztettem az adatpontokra. Lineáris változást feltételezve az illesztett egyenes meredeksége megadja a jet látszólagos mozgásának sebességét a vizsgált időszakban.

t [év]	1995,535	2013,561	2018,349	2018,617	2020,882
R [mas]	$56,2 \pm 0,9$	$55,5 \pm 0,5$	$56 \pm 0,5$	$57,3 \pm 0,6$	$55,9 \pm 0,5$
θ [°]	$74,43 \pm 0,02$	$74,78 \pm 0,01$	$74,58 \pm 0,01$	$74,31 \pm 0,01$	$75,37 \pm 0,01$

3. táblázat. Az S sáv kiértékelésének eredményei. Az első sorban láthatóak a mérési időpontok évben, a második sorban a mag–jet távolságok milliívmásodpercben, a harmadik és egyben utolsó sorban a jet pozíciószögei láthatóak fokban megadva.



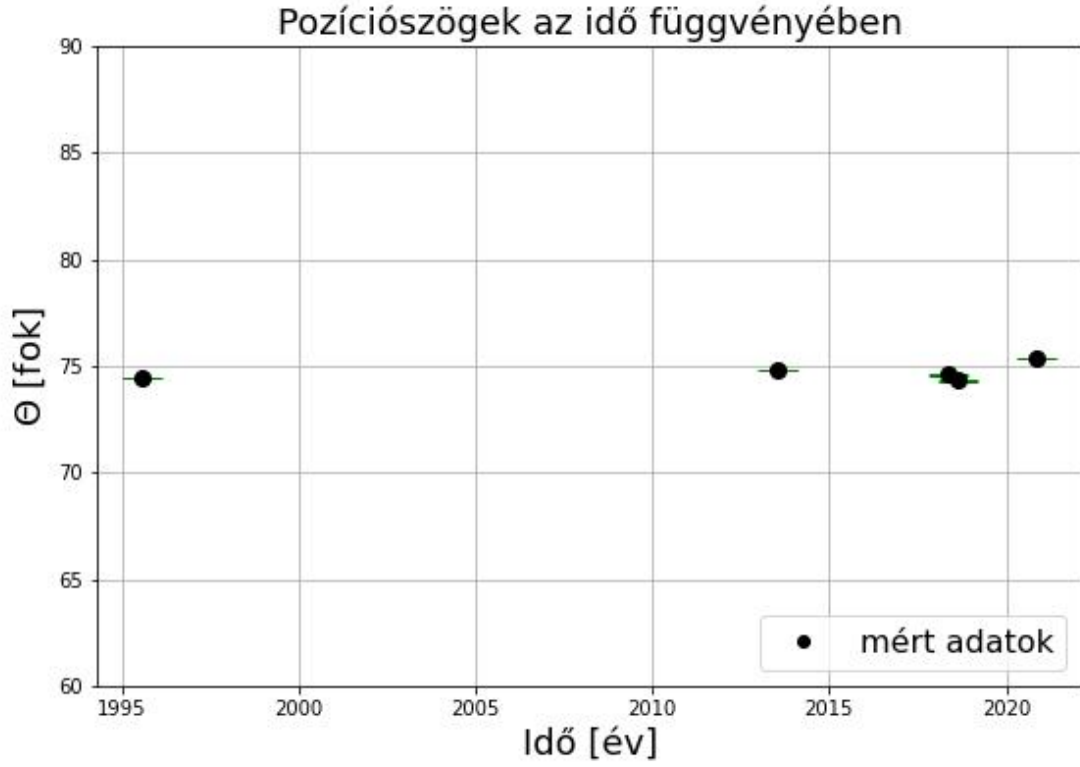
17. ábra. A J1-es jetkomponens szögtávolságának változása a magtól mérve. Az ábrázolt hibákat a hibaszámítás című fejezetben leírtak alapján számítottam ki.

Az illesztett egyenes meredeksége:

$$m = v_{J1} = (0,01 \pm 0,05) \frac{\text{mas}}{\text{év}}.$$

Mivel a meredekség hibán belül 0-át ad, a komponensnek nincs kimutatható mozgása.

A Gauss-modellek illesztése során a jetkomponensre (J1) kapott pozíciószögeket is ábrázoltam az idő függvényében.



18. ábra. A J1-es jetkomponens maghoz viszonyított pozíciószögének időfüggése.

5.2. Hibaszámítás

A 17-es és 18-as ábrákon látható hibákat az alábbi képletek alapján számítottam [17], ahol S az adott komponens fluxussűrűsége, σ_S annak hibája, S_{peak} a komponenshez tartozó csúcsintenzitás a térképen, σ_{rms} a térkép zajszintje, d az adott komponens átmérője, R pedig a magtól mért távolsága:

$$\sigma_{\text{peak}} = \sigma_{\text{rms}} \left(1 + \frac{S_{\text{peak}}}{\sigma_{\text{rms}}} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$\sigma_S = \sigma_{\text{peak}} \left(1 + \frac{S^2}{S_{\text{peak}}^2} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$\sigma_R = \frac{d}{2} \frac{\sigma_{\text{peak}}}{S_{\text{peak}}} \quad (12)$$

$$\sigma_{\theta} = \arctan \left(\frac{\sigma_R}{R} \right) \quad (13)$$

6. Diszkusszió

Ahogy a 17-os és 18-es ábrán is jól látszik, nincs szignifikáns változás a vizsgált időszakban (1995–2020) sem a jetkomponens pozíciószögének esetében, sem annak a magtól mért távolságában. További bizonyító erővel bír, hogy az illesztett egyenes meredeksége hibán belül nullát ad. A fentiek alapján egyértelműen kijelenthetjük, hogy a komponens a vizsgált időszakban nem végzett kimutatható mozgást. Érdekes azt is felidézni, hogy az 1997 szeptemberében végzett 1,6 GHz-es mérések [19] bár némileg eltérő frekvencián készültek, mégis hasonló értékeket adtak a J1 jelű komponens és a mag távolságára: $(59, 5 \pm 2, 1)$ mas (GVLBI) és $(57, 1 \pm 3, 0)$ mas (VSOP). Ugyanígy az ottani pozíciószögek is az általam kapottakhoz hasonlóak, a hibahatárokon belül megegyezők voltak: $(74 \pm 2)^\circ$ (GVLBI) és $(74 \pm 2)^\circ$ (VSOP).

A jetkomponens látszólagos mozdulatlanságának oka az lehet, hogy a központi szupernagy tömegű fekete lyuk környezetéből kiinduló, felénk mutató Doppler-nyalábolt jet ebben a távolságban (vagyis az égbolt síkjára vetítve ~ 56 mas szögtávolságban) beleütközik egy sűrű csillagközi anyagfelhőbe. Ennek folytán lökéshullámfront alakul ki, ami magyarázza a felerősödő rádióemissziót és a komponens kiterjedtebb, diffúz jellegét is. Ilyen álló vagy lassan mozgó lökéshullámfrontok más jettel rendelkező AGN-ekben is gyakran előfordulnak (pl. [11]).

A Lobanov és munkatársai [19] 1,6 GHz-en készült térképeivel (4. ábra) való összehasonlításban feltűnő, hogy míg az általam készített 2,3 GHz-es térképeken (12.–16. ábrák) lényegében csak a mag és egy jetkomponens (a Lobanov-féle cikkben a J1-nek, esetleg a J2-nek megfelelő) ismerhető fel, addig ott a kettő között elhelyezkedő további komponensek is láthatóak. A különbség elsődleges oka, hogy az általam feldolgozott adatok rövid, néhány perces észlelésekből származtak, így a térképek érzékenysége csak a legjelentősebb komponensek detektálását tette lehetővé. Továbbá az is igaz, hogy a kiterjedt jetkomponensek magasabb frekvenciákon általában halványabbak, valamint a földi hálózat felbontása a nagyobb hullámhossz miatt jobb, így az interferométer kevésbé érzékeny a kiterjedt emisszióra.

7. Összegzés

Dolgozatomban részletesen ismertettem az aktív galaxismagok (AGN) szerkezetét és a különböző típusaikat, valamint az AGN-ekre vonatkozó egyesített modellt. Majd a PKS 2215+020 kvazár kapcsán, más kutatásokban született eredmények bemutatása után, a rádióinterferometria alapjait vázoltam. Ezt követően röviden bemutattam a mérés technikai hátterét, ismertettem a mérőeszközként alkalmazott VLBA interferométeres hálózatot, valamint az adatok forrásaként szolgáló Astrogeo archívumot. Az adatfeldolgozást a Difmap nevű programmal végeztem, a folyamatot a főbb parancsokon keresztül ábrákkal illusztrálva mutattam be, külön kitérve a térképek készítésének és a modellillesztésnek az ismertetésére.

Az S sávú adatokon a modellillesztések eredményei az mutatják, hogy a J1-es komponens magtól való távolsága nem változik szignifikánsan a vizsgált időszakban. Ezt alátámasztja az illesztés során kapott meredekség, mely hibán belül nullát ad. A moz-

dulatlanság oka feltehetően az, hogy a komponens ~ 56 mas távolságban beleütközik egy sűrű galaktikus anyagfelhőbe. A pozíciószögek esetén szintén nem tapasztalható változás.

A továbbiakban tervezem más, hasonló archív adatokkal rendelkező rádiókvazár keresését, valamint az összes hasonló $z > 3$ kvazár összegyűjtését az irodalomból, melyek jetjeinek mozgását és paramétereit szintén elemezném.

Részben a jelen dolgozatban is bemutatott munkám eredményeinek felhasználásával, a PKS 2215+020 kvazár többfrekvenciás VLBI térképezése alapján 2024 elején a Universe című folyóiratban egy publikáció jelent meg [9], amelynek a társszerzője voltam.

Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani Frey Sándor témavezetőmnek a segítségéért és tanácsaiért, melyekkel munkám során ellátot. Köszönöm belső konzulensem, Szentirmayné Gabányi Krisztina Éva segítségét.

Szeretném megköszönni a HUN-REN Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézete demonstrátori programjának támogatását.

A kutatómunkát a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (OTKA K134213 pályázat) támogatta.

Hivatkozások

- [1] Bagchi, J., Vivek, M., Vikram, V., Hota, A., Biju, K. G., Sirothia, S. K., Sri-nand, R., Gopal-Krishna, Jacob, J. (2014): Megaparsec Relativistic Jets Launched from an Accreting Supermassive Black Hole in an Extreme Spiral Galaxy. *Astrophysical Journal*, 788, 174
- [2] Bañados, E.; Mazzucchelli, C.; Momjian, E.; Eilers, A.C.; Wang, F.; Schindler, J.T.; Connor, T.; Andika, I.T.; Barth, A.J.; Carilli, C.; et al. The Discovery of a Highly Accreting, Radio-loud Quasar at $z = 6$, 82. *Astrophys. J.* 2021, 909, 80.
- [3] Bogdán, Á.; Goulding, A.D.; Natarajan, P.; Kovács, O.E.; Tremblay, G.R.; Chadayammuri, U.; Volonteri, M.; Kraft, R.P.; Forman, W.R.; Jones, C.; et al. Evidence for heavy-seed origin of early supermassive black holes from a $z \sim 10$ X-ray quasar. *Nat. Astron.* 2024, 8, 126–133.
- [4] Clark, B. G. (1995): *Interferometers and Coherence Theory. Very Long Baseline Interferometry and the VLBA*, szerk. Zensus, J. A., Diamond, P. J., Napier, P. J., ASP Conference Series, 82, 3
- [5] Drinkwater, M. J., Webster, R. L., Francis, P. J., Condon, J. J., Ellison, S. L., Jauncey, D. L., Lovell, J., Peterson, B. A., Savage, A. (1997): The Parkes Half-Jansky Flat-Spectrum Sample. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 284, 85
- [6] Esparza-Arredondo, D., Gonzalez-Martín, O., Dultzin, D., Masegosa, J., Ramos-Almeida, C., García-Bernete, I., Fritz, J., Osorio-Clavijo, N. (2021): The dust-gas AGN torus as constrained from X-ray and mid-infrared observations. *Astronomy & Astrophysics*, 651, A91
- [7] Event Horizon Telescope Collaboration (2022): First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way. *Astrophysical Journal Letters*, 930, L12
- [8] 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
- [9] Frey, S., Fogasy, J., Perger, K., Kulish, K., Benke, P., Koller, D., Gabányi K. É. (2024): Revisiting a Core–Jet Laboratory at High Redshift: Analysis of the Radio Jet in the Quasar PKS 2215+020 at $z = 3.572$. *Universe*, 10, 2
- [10] Fermi-Lat collaboration (2022): The Fourth Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope: Data Release 3. *The Astrophysical Journal* 263, 24
- [11] Hardcastle, M. J., Worrall, D. M., Kraft, R. P., Forman, W. R., Jones, C., Murray, S. S. (2003): Radio and X-Ray Observations of the Jet in Centaurus A. *Astrophysical Journal*, 593, 169
- [12] Högbom, J. A. (1974): Aperture Synthesis with a Non-Regular Distribution of Interferometer Baselines. *Astronomy and Astrophysics Supplement*, 15, 417
- [13] Ivezić Ž., Menou K., Knapp G. R., Strauss M. A., Lupton R. H., Vanden Berk D. E., Richards G. T., Tremonti C., Weinstein M. A., Anderson S. (2002): Optical and Radio Properties of Extragalactic Sources Observed by the FIRST Survey and the Sloan Digital Sky Survey. *The Astronomical Journal*, 124, 2364

- [14] Jansky, K. G. (1933): Radio Waves from Outside the Solar System. *Nature*, 132, 66
- [15] Jiang, Y.-F., Stone, J. M., Davis, S. W. (2019): Super-Eddington Accretion Disks around Supermassive Black Holes. *Astrophysical Journal*, 880, 67
- [16] Kutrovatz, G. (2015): Muszerek es technikak a 19-20. szazad csillagaszataban, ELTE, https://kutrov.web.elte.hu/oktanyag/csilltort2/09_%20muszer.pdf
- [17] Lee, S.-S., Lobanov, A. P., Krichbaum, T. P., Witzel, A., Zensus, A., Bremer, M., Greve, A., Grewing, M. (2008): A Global 86 GHz VLBI Survey of Compact Radio Sources. *Astronomical Journal*, 136, 159
- [18] Lister M. L., Homan D. C., Kellermann K. I., Kovalev Y. Y., Pushkarev A. B., Ros E., and Savolainen T. (2021): Monitoring Of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. XVIII. Kinematics and Inner Jet Evolution of Bright Radio-loud Active Galaxies. *Astrophysical Journal*, 923, 30
- [19] Lobanov, A. P., Gurvits, L. I., Frey, S., Schilizzi, R. T., Kawaguchi, N., Pauliny-Toth, I. I. K. (2001): VLBI Space Observatory Programme Observation of the Quasar PKS 2215+020: A New Laboratory for Core-Jet Physics at $z = 3.572$. *Astrophysical Journal*, 547, 714
- [20] Massaro, F., Ajello, M. (2011): Fueling Lobes of Radio Galaxies: Statistical Particle Acceleration and the Extragalactic γ -ray Background. *Astrophysical Journal Letters*, 729, L12
- [21] Megan C., Padovani P. (1995): Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei. *PASP*, 107, 803
- [22] National Radio Astronomy Observatory: <https://public.nrao.edu/telescopes/vlba/>.
- [23] Nyholm, A., Sollerman, J., Tartaglia, L., Taddia, F., Fremling, C., Blagorodnova, N., Filippenko, A. V., Gal-Yam, A., Howell, D. A., Karamahmetoglu E., Kulkarni, S. R., Laher, R., Leloudas, G., Masci, F., Kasliwal, M. M. , Mora11, K., Moriya, T. J., Ofek, E. O., Papadogiannakis, S., Quimby, R., Rebbapragada, U., Schulze, S. (2020): Type IIIn supernova light-curve properties measured from an untargeted survey sample. *Astronomy & Astrophysics*, 637, A73
- [24] Oza, A. (2023): A new era for Arecibo: legendary observatory begins next phase. *Nature* 622, 19-20
- [25] Padovani, P., Alexander, D. M., Assef, R. J., De Marco, B., Giommi, P., Hickox, R. C., Richards, G. T., Smolcic, V., Hatziminaoglou, E., Mainieri, V., Salvato, M. (2017):Active Galactic Nuclei: what’s in a name? *The Astronomy & Astrophysics Review*, 25, 1
- [26] Pena-Herazo, H. A., Massaro, F., Chavushyan, V., Masetti, N., Paggi, A., Capetti, A. (2022): Turin-SyCAT: A multifrequency catalog of Seyfert galaxies. *Astronomy & Astrophysics*, 659, A32
- [27] Sambruna, R. M. (1997): Soft X-Ray Properties of Flat-Spectrum Radio Quasars. *The Astrophysical Journal*, 487, 536–554
- [28] Schmitt, J. L. (1968): BL Lac identified as a Radio Source. *Nature*, 218, 663

- [29] Shepherd, M. C. (1997): Difmap: an Interactive Program for Synthesis Imaging. Astronomical Data Analysis Software and Systems VI, szerk. Hunt, G., Payne, H. E., ASP Conference Series, 125, 77
- [30] Singh, R., van de Ven, G., Jahnke, K., Lyubenova, M., Falcón-Barroso, J., Alves, J., Fernandes, R. C., Galbany, L., García-Benito, R., Husemann, B., Kennicutt, R. C., Marino, R. A., Márquez, I., Masegosa, J., Mast, D., Pasquali, A., Sánchez S. F., Walcher, J., Wild11, V., Wisotzki, L., Ziegler, B., CALIFA collaboration (2013): The nature of LINER galaxies: Ubiquitous hot old stars and rare accreting black holes. *Astronomy & Astrophysics*, 558, A43
- [31] Tóth, L. V. (2013): A galaxisok világa
- [32] Wang, F., Yang, J., Fan, X., Hennawi, J. F., Barth, A. J., Banados, E., Bian, F., Boutsia, K., Connor, T., Davies, F. B., Decarli, R., Eilers, A.-C., Farina, E. P., Green, R., Jiang, L., Li, J.-T., Mazzucchelli, C., Nanni, R., Schindler, J.-To., Venemans, B., Walter, F., Wu, X.-B., Yue, M. (2021): A Luminous Quasar at Redshift 7.642. *Astrophysical Journal Letters*, 907, L1
- [33] Zhang, Y.; An, T.; Frey, S.; Gabányi, K.É.; Sotnikova, Y. Radio Jet Proper-motion Analysis of Nine Distant Quasars above Redshift 3,5. *Astrophys. J.* 2022, 937, 19.

A. Saját eredmények

Az általam megoldott tudományos kérdés:

- A jet egyes komponenseinek sajátmozgásának elemzése 2,3 GHz frekvencián

Az általam használt módszerek:

- Tiszta térképek készítése Difmap segítségével
- Gauss-modellek illesztése Difmap segítségével

Kutatómunkám eredménye:

- A legkülső J1 jelű komponens nem végez kimutatható mozgást
- A jet ~ 56 mas távolságban feltehetőleg beleütközik egy csillagközi gázfelhőbe