

HI kiáramlások a 4C12.50 rádióforrásban

FOGASY O. JUDIT

Csillagász MSc.

Témavezetők:

Dr. Paragi Zsolt

tudományos főmunkatárs

JIVE (Joint Institute for VLBI in Europe)

Dr. Raffaella Morganti

Csillagász csoport vezetője

ASTRON (Netherlands Institute for Radio Astronomy)



Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar

Budapest

2012

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőimnek, Paragi Zsoltnak és Raffaella Morgantinak, amiért részt vehettem a tíz hetes ASTRON/JIVE által szervezett nyári programban és munkám során mindvégig segítségemre voltak.

Köszönöm Dr. Frey Sándornak, hogy hasznos észrevételeivel segítette a dolgozat megírását.

Budapest, 2012. december 3.

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	4
2. Gázkiáramlások	5
3. A forrás bemutatása	7
3.1. HI abszorpció megfigyelése	10
3.2. A keskeny HI abszorpció eredete	12
4. Újabb megfigyelés	13
5. Az adatfeldolgozás elméleti háttere és lépései	13
5.1. A VLBI technika és az apertúraszintézis	13
5.2. Adatfeldolgozás	17
5.2.1. Beolvasás, adat vizsgálat	18
5.2.2. Amplitúdókalibráció	18
5.2.3. Fáziskalibráció	19
5.2.4. Végső kalibráció	20
5.2.5. Doppler-korrekción	20
5.2.6. Kontinuum levonás, adattömb létrehozása	20
5.2.7. A forrás térképezése	21
5.2.8. A vonalprofilok és abszorpció helyének meghatározása	23
6. Eredmények	23
7. Összefoglalás	28

1. Bevezetés

A rádiógalaxisoknak a semleges hidrogén (HI) 21 cm-es hullámhosszú színképvonalának tartományában való megfigyelése sok szempontból hasznos lehet számunkra. Korai típusú (E, S0) galaxisok esetében, melyek feltehetőleg hierarchikus egyesülések révén jöttek létre, a kiterjedt HI jelenléte és annak alakja árulkodhat a galaxis kialakulásának mikéntjéről és későbbi fejlődéséről. A korai típusú galaxisok közül különösen érdekesek a rádiógalaxisok, hiszen a rádió aktivitás elfogadott magyarázata, hogy azt egy korábbi galaxisegyesülés vagy kölcsönhatás idézi elő. A HI megfigyelések nagyon jól használhatóak arra, hogy ezekben a gázban gazdag rendszerekben tanulmányozhassuk a központi rádióforrást beindító/tápláló folyamatokat [1].

Nagy skálán nézve, folyamatban lévő galaxis-kölcsönhatásokról tudhatunk meg többet, amit például optikai tartományban könnyen lekészhetünk. Hevesebben lezajló ütközés esetén, a 21 cm-es mérésekből kapott térbeli és kinematikai információk felhasználásával hosszabb időskálán keresztül nyomon követhetjük ezeket az eseményeket. A gáz egy része ugyanis gyakran árapálycsóva vagy híd, héj formájában kerül kijebbe a galaxis belső részéből. Amennyiben a környezet nem túl barátságtalan, turbulens, ezen szerkezetek egy része kötött maradhat a szülő galaxishoz, jóval azután is, hogy az optikai tartományban megfigyelhető jelenségek elhalványulnak. Ezeket megfigyelve tulajdonképpen a galaxis mozgalmas múltjába pillanthatunk be.

Több tanulmány is kimutatta, hogy több száz millió év is eltelhet az egyesülés és a jelenlegi AGN¹ aktivitás kezdete között, emiatt ezen az időskálán a HI megfigyelések különösen fontosak az ütközések bizonyítására. A semleges hidrogén vonalát a fényes rádiókontinuumban, mint abszorpciót detektálhatjuk, ezáltal a galaxisban lévő HI kinematikáját is vizsgálhatjuk, egészen a legbelső régiókig.

Egy másik hasznos alkalmazási terület a rádió jetek és a csillagközi anyag (ISM) kölcsönhatásának tanulmányozása, ami nagy sebességű gázkiáramlásokat is létrehozhat. Ilyen kiáramlásokat sok helyen megfigyelhetünk, például csillagontó fázisban lévő galaxis esetén, ahol azt a keletkező nagy tömegű csillagok csillagszele idézi elő,

¹aktív galaxismag

emellett a rádió jeteknek is fontos szerepük lehet ilyen kiáramlások létrehozásában. Mind ionizált, mind semleges gázkiáramlásokat is detektáltak az elmúlt években, utalva arra, hogy gyakori jelenségről van szó fiatal, erőteljes rádióforrások esetén. Mivel a kiáramló tömeg akár $100 M_{\odot}/\text{év}$ is lehet, fontos szerepük lehet a galaxis fejlődésében [2].

Dolgozatomban részletesebben ismertetem ezen kiáramlások eredetét, az eddigi eredményeket, valamint az általam választott, 4C12.50 jelzésű rádióforrásról származó, 2006-os VLBI adatok feldolgozásának lépéseit és annak eredményeit.

2. Gázkiáramlások

A galaxismag aktivitásának fontos szerepe van a szülő galaxis fejlődésében. Különösen fontosak a gázkiáramlások, melyek ezen aktivitás következményei. A gázkiáramlások nem egyedi jelenségek, sok galaxis esetén megfigyelhetők. Sokféle hatásuk lehet, mint például a mag körüli régió gáztól való megtisztítása, a központi szupermasszív fekete lyuk növekedésének megállítása, fémek és energia kijuttatása az ISM-be vagy akár a csillagkeletkezés leállítása. Az AGN hajtotta kiáramlásoknak egyfajta visszacsatoló hatása is lehet, ezáltal szabályozva a szülő galaxis és a szupermasszív fekete lyuk tömege közötti korrelációt, így megakadályozva, hogy túl sok nagy tömegű galaxis jöjjön létre a korai Univerzumban [3].

Elméletek tehát vannak, de mindezt megfigyelésekkel is alá kell támasztani. Eddig főleg ultraibolya és röntgen megfigyelések által rendelkezésünkre, melyekkel a mag körüli ionizált gázt lehetett kimutatni. Emellett gyors, jet hajtotta ionizált kiáramlásokat is megfigyeltek 1-100 kpc skálán. Ezek a megfigyelések azonban több szempontból sem ideálisak, a tömegkiáramlási ráta nehezen határozható meg.

A Westerbork Synthesis Radio Telescope (WSRT) segítségével 2005-ben 11 galaxisból álló minta esetén detektáltak HI kiáramlást. A célforrások mindegyike gazdag ISM-mel rendelkezik, feltehetőleg fiatal objektumok vagy nemrégiben újrainduló rádióforrások. Az addigi megfigyelésekkel ellentétben széles megfigyelési sávot válasz-

tottak (20 MHz, 1024 csatorna), a centrális sebességhez képest ± 2000 km/s-ot fedtek le a mérések.

Minden forrás esetén látható volt egy keskeny és mély abszorpciós komponens, hat forrásnál pedig egy sekélyebb, de jóval szélesebb, a rendszersebességhez képest kékeltolódott komponens is. Mivel az abszorpciót létrehozó gáznak a rádióforrás előtt kell elhelyezkednie, a gáz nyilvánvalóan kifelé áramlik.

A nagy detektálási ráta arra enged következtetni, hogy a széles HI komponens jelenléte nem kivételes dolog, habár lehetséges, hogy egy bizonyos galaxisfejlődési szakaszhoz köthető, ugyanis mindig olyan galaxisban detektáltak ilyen gyors HI kiáramlásokat, amelyek rádió aktivitásuk kezdeti szakaszában vannak. Valószínűleg a rádió jetnek a szülő galaxis dudorán való korai terjedési fázisáról van szó.

A felmérés eredményeként a legvalószínűbb mechanizmus ilyen kiáramlások létrehozására a rádió jet és a környező ISM kölcsönhatása. Erre vonatkozóan erős bizonyítékot találtak két forrás esetén is (IC5062 és 3C305), melyeket további, részletesebb mérésekkel nagy felbontás mellett is megfigyeltek. Azt találták, hogy a kiáramlás területe 200 pc-1.6 kpc skálán felbontott, térben mind a jet mentén lévő úgynevezett csomókkal (knot), mind meleg gázkiáramlásokkal kapcsolatban van [4].

Optikai tartományban nagy sebességű ionizált kiáramlásokat is találtak, esetükben kézenfekvő magyarázat, hogy kialakulásukért a jet-ISM kölcsönhatás által létrejött lökéshullámok felelősek. Az ionizált gáz kinematikája hasonló a semleges gázéhoz, feltehetőleg a gáz két fázisa egyazon kiáramlás része.

Mindebből több fontos következtetést is levonhatunk. Elsőként a kiáramló tömeg a fent említett hat galaxis esetén 1-50 $M_{\odot}$ között alakul, ami igen jelentősnek mondható. A jet teljesítményének csupán kis hányada kell ilyen kiáramlások létrehozásához. A HI kiáramlások kinetikus teljesítménye elegendő ahhoz, hogy a galaxis központi részéről (bulge) eltávolítsa a gázt.

A masszív HI kiáramlások sokkal egyértelműbben mutatják meg az optikai megfigyeléseknél, hogy az AGN-nek mennyire jelentős hatása van a mag körüli gázra. Az AGN aktivitás rádióhangos fázisában a jet hatására felmelegedhet és fémben

feldúsulhat az ISM, megállhat a csillagkeletkezés, csakúgy, mint a csillagontó galaxisokban található szuper szelek hatására. A rádió jet-ISM kölcsönhatás a jet útját is megzavarhatja, lelassíthatja annak tágulását.

Fontos kérdés a gáz hűlési mechanizmusa. Amikor a jet nekiütközik az ISM-beli molekulafelhőknek, a gáz egy része ionizálódik, mozgását a keletkező lökeshullámok megzavarják. Ahogy a lökeshullám elvonul, a gáz egy része ismét rekombinálódhat, semlegessé válhat, miközben nagy sebességgel mozog. Erre vonatkozó modellt készítettek Mellema és társai, melyben erős lökeshullám hatását vizsgálták molekulafelhők fejlődésére [5].

Ahogy a lökeshullám végighalad a felhőn, egy ún. összenyomódási szakasz kezdődik, mivel az beágyazódik egy túlnyomásos burokba. A lökeshullám terjedni kezd a burokban, miközben a felhők feldarabolódnak, a felhődarabok pedig nagy sebességgel mozognak. Azt találták, hogy a felhő fragmentumok hűlési ideje nagyon rövid, összehasonlítva a rádióforrás élettartamával, többlet energiájuk hamar kisugárzódik. Ezen folyamat eredményeképpen pedig nagy sebességgel mozgó sűrű, hideg fragmentumokat kapunk.

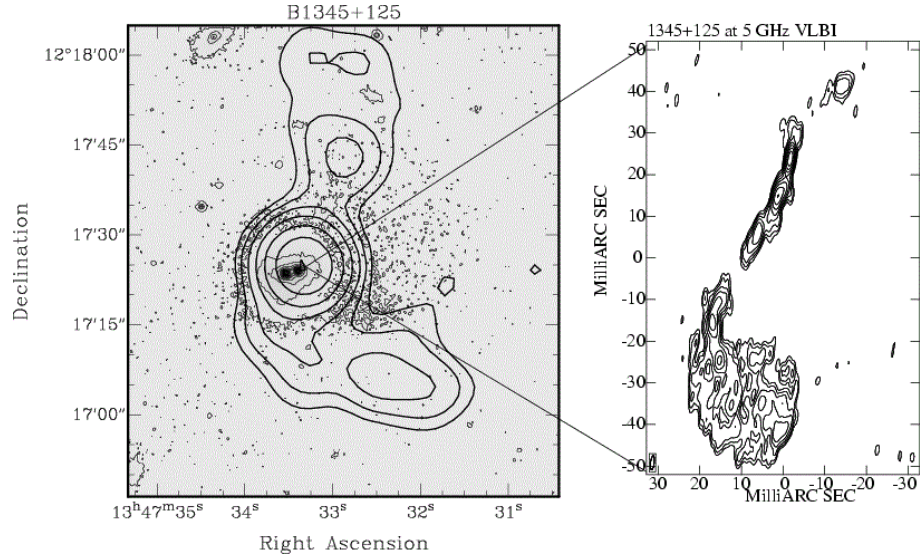
3. A forrás bemutatása

Az általam későbbiekben vizsgált galaxis jelzése IRAS 13451+1232, mely egy igen erőteljes rádióforrást tartalmaz, ez a 4C12.50, a legközelebbi ($z=0.122$) ismert GPS (GHz Peaked Spectrum)/CSS (Compact Steep-Spectrum) forrás. A GPS/CSS források rádió aktivitásuk kezdeti szakaszában vannak, kis méretűek (≤ 10 kpc), rádió spektrumuk meredek vagy konvex, gyakran dupla rádió lebenyük van. Méretük fiatal koruknak köszönhető [6].

Néhány ilyen forrásban széles optikai (tiltott) emissziós vonalakat figyeltek meg. Ez zavart kinematikájú gáz jelenlétére utal, ami a rádió plazma és az ISM kölcsönhatásából eredhet.

Parszek skálán nézve CSO (Compact Symmetric Object) típusú a morfológiája, ez

jelentheti, hogy hosszú inaktivitás után indultak el ismét a jetek, ugyanakkor gyenge, kiterjedt rádiósugárzással is rendelkezik, mely valószínűleg a mag korábbi aktivitásának maradványa.



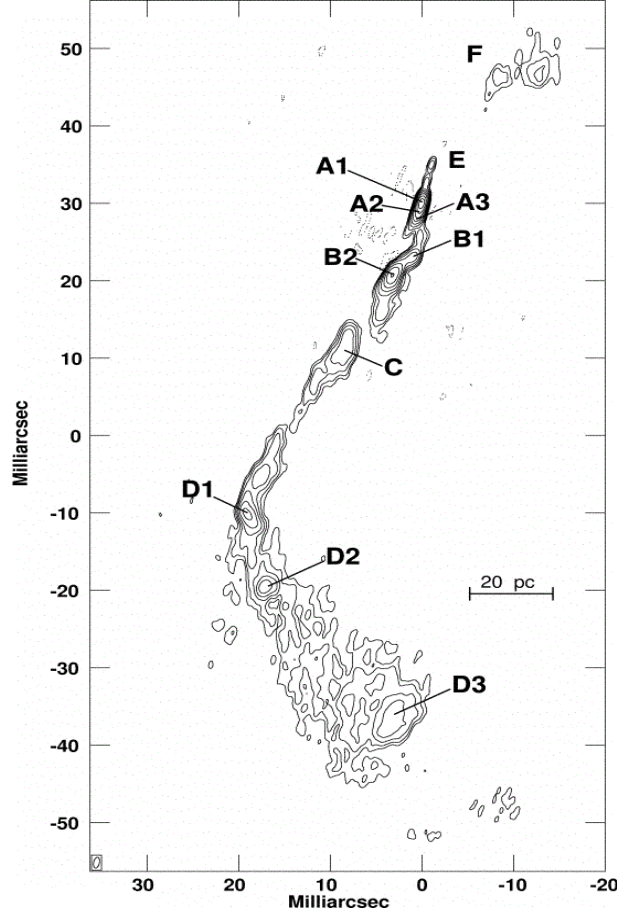
1. ábra. Az IRAS 13451+1232 rádiógalaxis optikai képére helyezett, 1.6 GHz-en (VLA) végzett megfigyelésből származó rádió kontúrtérkép (bal). A galaxis ÉNy-i magjáról 5 GHz-en készült VLBI térkép (jobb).[7]

A galaxis dupla maggal rendelkezik, szeparációjuk 3.5 kpc, optikai felvételeken árapály-csóva is látható, mindez arra utal, hogy nemrégiben mehetett át galaxisegyesülésen (ld 1. ábra). Az ÉNy-i mag tartalmazza a viszonylag erős ($L_{408MHz} = 2.7 \cdot 10^{26} \frac{W}{Hz}$) rádióforrást [8].

Ívmásodperces skálán nézve kompaktnak tekinthető, a fluxussűrűség nagy része a belső 220 pc-ből származik. A VLA D-konfigurációjában végzett 6 cm-es megfigyelés során két gyenge (néhány mJy), diffúz sugárzó régiót detektáltak.

Milliívmásodperces skálán vizsgálva az objektumot, több komponenst is elkülöníthetünk (ld. 2. ábra). Elsőként szembetűnő a kompakt mag komponens (A1), ez tartalmazza az aktív nukleuszt. Ugyancsak figyelemre méltó a dél felé terjedő, jól definiálható jetkomponens. A déli jet csomós, keskeny és kollimált egészen addig, míg el nem éri a D1 komponenst, ahol elhajlik. A magtól északra a délinél halvá-

nyabb jetet láthatunk, ami erősen kollimált a magnál, majd eltűnik, csak mint egy diffúz sugárzó régió jelenik meg ismét ÉNy-ra [8].



2. ábra. A 4C12.50 forrásról 2 cm-es hullámhosszon készült VLBA kontúrtérkép [8]

A 4C12.50 forrás érdekes abból a szempontból, hogy egyfajta lehetséges átmenetnek tekinthető a rádiógalaxisok és a ULIRG-ok (Ultraluminous Infrared Galaxy, ultrafényes infravörös galaxis) között. Gazdag ISM-mel rendelkezik, minthogy ez a legfényesebb távoli infravörös rádiógalaxis ($L_{IR} = 2.7 \cdot 10^{12} L_{\odot}$), nagy molekuláris gáz tömege van ($\sim 10^{10} M_{\odot}$) és fiatal (0.5-1.5 milliárd év) csillagpopulációval is rendelkezik [9]. Mindez ugyancsak arra utal, hogy a rendszer egy nemrég végbement nagy egyesülésből eredeztethető.

3.1. HI abszorpció megfigyelése

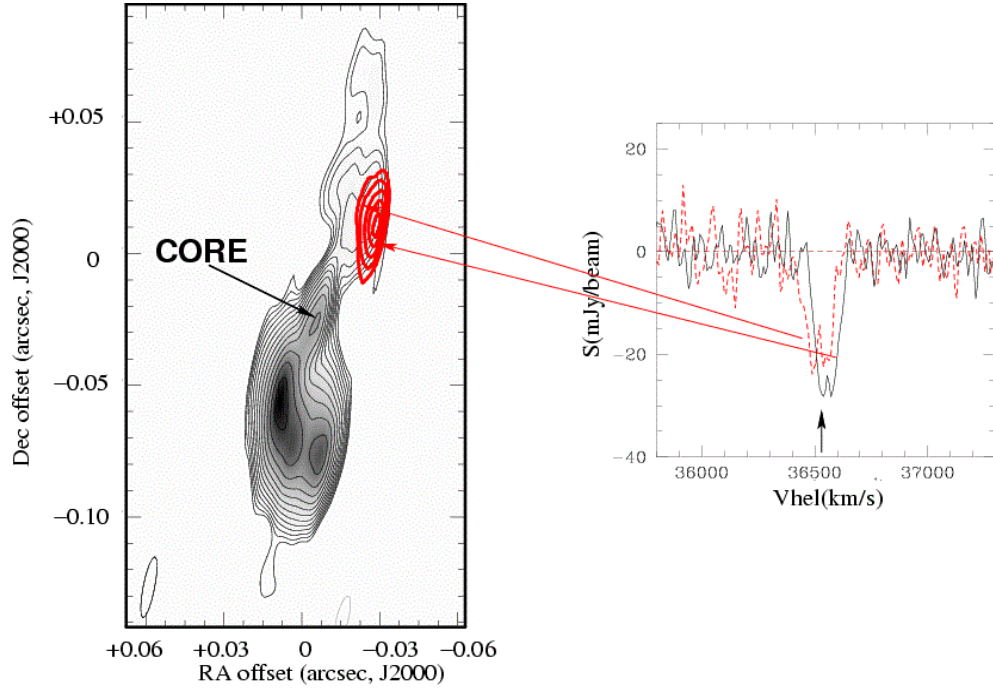
Elsőként Mirabel detektált HI abszorpciót az Arecibo teleszkóp segítségével 1989-ben. Egy viszonylag mély ($\tau=0.01$ optikai mélységű) és keskeny (~ 200 km/s félértékszélességű, FWHM) komponenst talált a rendszersebességhez közel, valamint egy sekélyebb ($\tau=0.002$), szélesebb (FWHM ~ 700 km/s) kékeltolódott komponenst [10]. A WSRT széles sávú rendszerével 2003-ban végzett megfigyelések kimutatták, hogy a széles abszorpciós komponens szélesebb, mint a Mirabel által kapott érték, az FWHM kb. 2000 km/s.

2001-ben globális VLBI hálózat segítségével vizsgálták a forrást 1266 MHz-en. Ebbe beletartozott a VLBA, a VLA egy antennája és három EVN teleszkóp is². Ekkor még nem ismerték a széles abszorpciós komponens valódi szélességét, így a megfigyelést 8 MHz-es sáv szélességgel végezték el, ez azonban nem ideális a széles komponens megfigyelésére. Emiatt csak a keskeny komponenst tudták alaposabban megvizsgálni, illetve a galaxison belüli helyzetét meghatározni a VLBI térképen. A megfigyelést 256 spektrális csatorna felhasználásával végezték, így a sebességfelbontás 8 km/s volt [9].

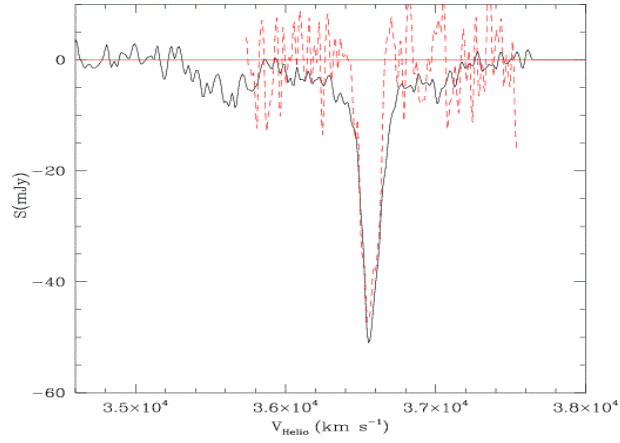
A kontinuum térkép (3. ábra) alapján a forrás teljes mérete kb. 150 mas (325 pc). Magát a keskeny abszorpciót nem a magnál vagy a fényesebb déli jetnél figyelték meg, hanem az északi jet végénél, ahol egy felhőszerű képződmény található, a magtól mintegy 20-50 mas-ra (43-108 pc). A felhő kiterjedése kb. 10x30 mas (22x65 pc).

A 4. ábrán a WSRT-vel 2003-ban mért vonalprofil látható (mind a keskeny és a széles) összehasonlítva a 2001-es VLBI megfigyelésből származó keskeny abszorpciós komponens vonalprofiljával. Az összehasonlításból látszik, hogy VLBI skálán a teljes keskeny komponenst detektálták, akárcsak a későbbi WSRT megfigyelés alatt.

²VLBA: Very Long Baseline Array (USA); VLA: Very Large Array (USA); EVN: European VLBI Network



3. ábra. A forrásról globális VLBI hálózattal 21 cm-es hullámhosszon végzett megfigyelésből származó kontinuum térkép (bal). A keskeny abszorpciós komponenst előidéző HI felhő (piros kontúr) két oldalán vizsgált vonalprofil (jobb). [9]



4. ábra. A WSRT (fekete) és a VLBI (piros) megfigyelésből származó vonalprofilok összehasonlítása [9]

3.2. A keskeny HI abszorpció eredete

A rendszersebességnél detektált HI abszorpció tehát egy nagy optikai mélységű felhőből származik, mely a magtól 40-100 pc-re helyezkedik el. Sok esetben, ha HI abszorpciót detektálnak a rendszer sebességnél, egy mag körüli koronggal/tóruzzsal magyarázzák annak megjelenését, ez azonban e forrás esetében nem egyértelmű.

Az abszorpció gyenge rádiókontinuumnál látszik, ez arra utalhat, hogy az abszorpciót létrehozó közeg inhomogén, különben máshol is detektáltak volna abszorpciót. A HI oszlopsűrűsége a rádióforrás szélé felé nő, tehát még több atomos gáz van dél és nyugat felé, ám a háttérből jövő rádiósugárzás hiányában az nem látszik. Ezért a felhő valódi mérete sokkal nagyobb is lehet.

Mint említettem, egy lehetséges magyarázata az abszorpció megjelenésének egy mag körüli tórusz jelenléte, melyen áthatolnak a jetek. Lehetséges, hogy az északnyugati részen csupán egy bizonyos területen belül elég hatékony a rádiósugárzás és elég nagy a HI oszlopsűrűsége ahhoz, hogy megfigyelhető abszorpció jöjjön létre. Ez esetünkben nem valószínű, mivel alacsony felbontás mellett a fluxus nagy részét lefedték, ezért a további abszorpció hiánya nem az érzékenység hiányából fakad. Emellett olyan rendszerekben, ahol találtak ilyen toroidális szerkezetet, ott sokkal homogénebb volt a HI eloszlása.

Egy másik magyarázat szerint egy izolált HI felhő került az északi jet elé. Előfordulhat, hogy csupán vetítési jelenségről van szó. A felhő transzverz vetítési távolsága 50 pc körüli, ám a látóirány mentén a felhő radiális távolsága ennél jóval nagyobb is lehet. Mivel nem látunk máshol ilyen abszorpciót, tehát nem egy felhőcsoport tagjáról van szó, igen véletlenszerűnek tűnik a HI felhő elhelyezkedése. Ugyanakkor a Tejútrendszer középpontjánál mért FWHM-hez (20 km/s) képest a felhőre vonatkozó érték jóval nagyobb, ezért nem valószínű, hogy az csupán a központi rádióforrás látóirányába esik.

2003-ban Lister és társai kinematikai analízisnek vetették alá a forrást, így megállapították, hogy jetje kúp alakú, csavarvonalas [8]. Ez eredhet a központi fekete lyuk mozgásából és/vagy a jet kiinduló szakaszának precessziójából.

A keskeny HI abszorpciós komponens, tehát a HI felhő elhelyezkedése arra enged következtetni, hogy a jet és a felhő között fizikai kapcsolat van, elképzelhető, hogy a jet elhajlásáért a felhő felelős. Ez esetben a felhő jelenléte arra utal, hogy a rádióforrás központi része körüli közeg sűrű, csomós szerkezetű.

4. Újabb megfigyelés

Mivel a korábbi megfigyelések nem tették lehetővé, hogy a széles abszorpciós komponens előidéző gázkiáramlás helyzetét és jellemzőit is pontosan meghatározzák, 2006. június 5-6. között ismét globális VLBI megfigyelést végeztek 21 cm-en. A forrást 14 órán keresztül észlelték 15 antenna segítségével (EVN, VLBA, VLA). A spektrális csatonák száma 512, a használt sáv szélesség 16 MHz volt, ezzel garantálva a széles komponens detektálását. A sebességfelbontás 7 km/s volt.

Bár a megfigyelést 2006-ban végezték, az adatok feldolgozása sokáig váratott magára, ugyanis igen erős zavaró jelek figyelhetők meg a teljes lefedett rádióspektrumban. Bár többen megkísérelték az adatfeldolgozást, a nagymértékű zaj miatt ez kevésbé volt sikeres.

2012. nyarán lehetőségem volt a holland ASTRON/JIVE intézet tíz hetes nyári programjában részt venni, Paragi Zsolt és Raffella Morganti témavezetésével. Feladatom a 2006-os adatsor feldolgozása és térképezése volt. Ennek menetét és eredményét a következő fejezetekben mutatom be.

5. Az adatfeldolgozás elméleti háttere és lépései

5.1. A VLBI technika és az apertúraszintézis

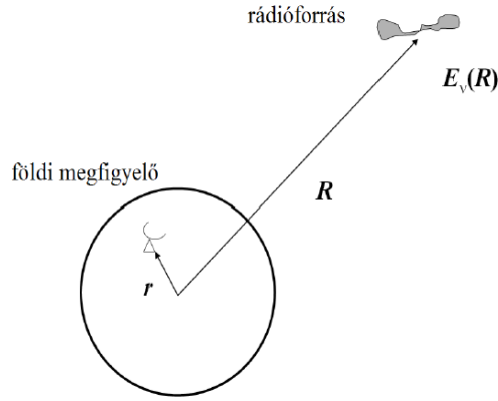
A VLBI (Very Long Baseline Interferometry) technika a rádiócsillagászatban használatos módszer, melynek segítségével olyan képzeletbeli rádióteleszkópot hozhatunk létre, melynek átmérője a legnagyobb bázistávolsággal egyenlő, tehát a szögfelbontást (Θ) a leghosszabb bázisvonal (b) határozza meg (1. egyenlet).

Ezáltal milliívmásodperces nagyságrendű felbontást érhetünk el. Az érzékenységet az antennák összfelülete határozza meg.

$$\Theta = 1.22 \frac{\lambda}{b} \quad (1)$$

Alább röviden ismertetem az apertúraszintézis elméleti alapjait [11].

Vegyünk egy nagyon távoli rádióforrást, mely az $\mathbf{R}$ helyvektorú pontban helyezkedik el. A forrás időben változó elektromos teret bocsát ki, ezt $\mathbf{E}(\mathbf{R}, t)$ -vel jelöljük. A Maxwell-egyenletekből ismeretes, hogy az elektromágneses hullámok a forrásukból kiindulva tovább terjednek, esetünkben az $\mathbf{r}$ helyvektorú megfigyelőig (5. ábra).



5. ábra. A rádióforrás-antenna elrendezés [12]

Véges időintervallumot nézve az elektromos mezőt Fourier-sorok összegének valós részével fejezhetjük ki, így az egyetlen időfüggő függvények egyszerű exponenciálisok lesznek. Ez azért hasznos, mert így csak a Fourier-sorok együtthatóit kell figyelembe vennünk, a tér teljes időbeli változása helyett. A Fourier-sorok együtthatóit az elektromos tér kvázi-monokromatikus komponenseinek nevezzük és $\mathbf{E}_\nu(\mathbf{R})$ -rel jelöljük. A továbbiakban csupán egy kvázi-monokromatikus komponenst vegyünk figyelembe. A Maxwell-egyenletek linearitása lehetővé teszi, hogy a megfigyelő $\mathbf{r}$ helyén összegezzük a forrás egyes pontjaiból származó teret.

$$\mathbf{E}_\nu(\mathbf{r}) = \int P_\nu(\mathbf{R}, \mathbf{r}) \mathbf{E}_\nu(\mathbf{R}) dS \quad (2)$$

A fenti integrált a teljes rádióforrásra kell elvégezni. A $P_\nu(\mathbf{R}, \mathbf{r})$ függvényt propagátornak nevezzük, mely azt írja le, hogy befolyásolja az $\mathbf{R}$ helyen lévő elektromos tér az $\mathbf{r}$ helyen lévő elektromos teret. Feltéve, hogy a forrás és a megfigyelő közötti tér üres, az alábbi egyszerű formát ölti a propagátor függvény:

$$\mathbf{E}_\nu(\mathbf{r}) = \int \frac{\mathbf{E}(\mathbf{R}) e^{2i\pi\nu|\mathbf{R}-\mathbf{r}|/c}}{|\mathbf{R}-\mathbf{r}|} dS \quad (3)$$

Ez a kozmikus rádióforrásból származó elektromos tér kvázi-monokromatikus komponense ν frekvenciánál.

$\mathbf{E}_\nu(\mathbf{r})$ egyik fontos tulajdonsága a tér korrelációja két különböző pontban ($\mathbf{r}_1$ és $\mathbf{r}_2$).

$$\mathbf{V}_\nu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle \mathbf{E}_\nu(\mathbf{r}_1) \mathbf{E}_\nu^*(\mathbf{r}_2) \rangle \quad (4)$$

A $*$ a komplex konjugáltat jelöli. Ide behelyettesítve a 3. egyenletet, szükséges néhány átalakítást elvégezni (ld. [11]), illetve figyelembe kell venni, hogy a csillagászati objektumból érkező sugárzás térben nem koherens.

A megfigyelt intenzitást az alábbi alakban írhatjuk fel:

$$I = |\mathbf{R}|^2 \langle |\mathbf{E}_\nu|^2 \rangle \quad (5)$$

Az $\mathbf{R}$ irányában mutató $\mathbf{s}$ egységvektor bevezetésével ($\mathbf{s} = \mathbf{R}/|\mathbf{R}|$) és a $d\Omega$ térszög szerinti integrálásra áttérve a következő kifejezést kapjuk:

$$\mathbf{V}_\nu(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \int I_\nu(s) e^{-2i\pi\nu\mathbf{s}(\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_2)/c} d\Omega \quad (6)$$

A 6. egyenlet csak a $\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2$ vektortól, azaz a bázisvonal hosszától és irányától függ, az antenna pozícióktól nem ($\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$). A $\mathbf{V}_\nu(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2)$ vizibilitás függvényt térbeli koherencia függvénynek vagy az $\mathbf{E}_\nu(\mathbf{r})$ térbeli autokorrelációs függvényének hívjuk.

A sugárzás intenzitás-eloszlását, mint az $\mathbf{s}$ irány függvényét megkaphatjuk, ha megmérjük a vizibilitás függvényt és invertáljuk azt. Új koordináta-rendszer bevezetésével, a bázisvonal vektorok hullámhossz egységekben való megadásával ($\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}_2 = c(u, v, w)/\nu$), továbbá az $\mathbf{s}=(x, y, 1)$ közelítéssel a vizibilitás függvény új alakban írható fel:

$$\mathbf{V}_\nu(u, v) = \int \int I_\nu(x, y) e^{-2i\pi(xu+vy)} dx dy \quad (7)$$

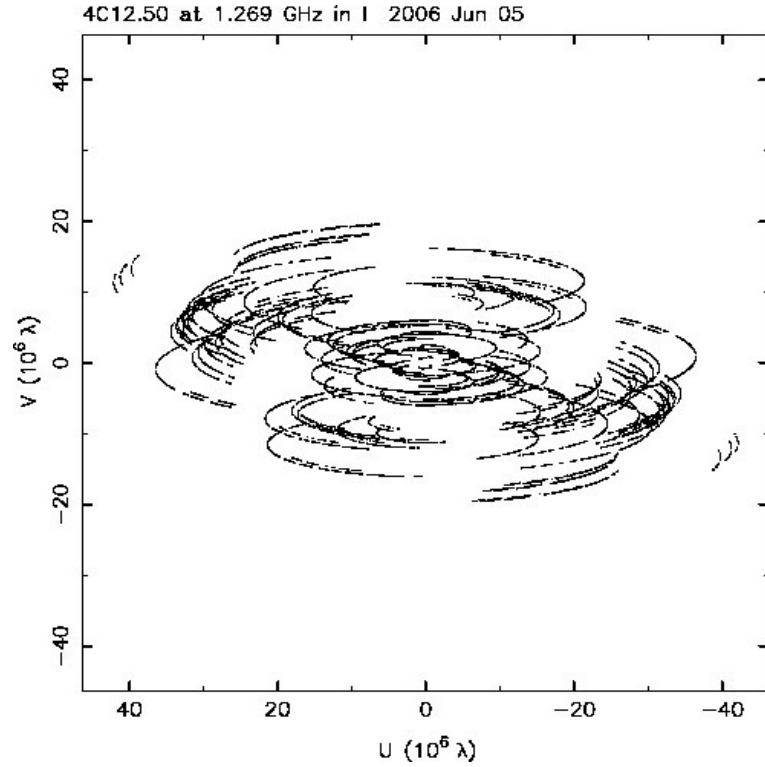
Ezen Fourier-transzformáció inverze adja meg az intenzitás-eloszlást:

$$\mathbf{I}_\nu(x, y) = \int \int V_\nu(u, v) e^{2i\pi(ux+vy)} du dv \quad (8)$$

A vizibilitás függvény valójában nem ismert mindenhol, csak az u - v sík bizonyos pontjaiban (ld. 6. ábra), ezért célszerű bevezetni egy mintavételi függvényt ($S(u, v)$), melynek értéke nulla, ahol nem volt mintavételezés. Így a 8. egyenlet helyett az alábbi kifejezést használhatjuk:

$$\mathbf{I}_\nu^D(x, y) = \int \int V_\nu(u, v) S(u, v) e^{2i\pi(ux+vy)} du dv \quad (9)$$

Az így számított $\mathbf{I}_\nu^D(x, y)$ -t szokás piszkos térképnek nevezni.



6. ábra. A 4C12.50 jelű forrás esetén a hálózat u - v lefedettsége. Az u - v tengelyek hullámhossz egységekben vannak megadva.

5.2. Adatfeldolgozás

A nyers adatokat az AIPS (Astronomical Image Processing System) segítségével kalibráltam. Nagy előnye ennek a szoftvernek, hogy a nyers adatok gyakorlatilag érintetlenek maradnak a feldolgozás során, minden kalibrációs információt a fájlhoz csatolt kalibrációs táblázatokban találhatunk meg. A feldolgozás során ezeket a táblázatokot lehet változtatni, a kalibráció legvégén pedig ezeket alkalmazzuk az adatokra. Alább láthatóak a legfontosabb kalibrációs táblázatok:

- AN: antenna táblázat; az antennák nevei, sorszámuk, az egyes állomások koordinátái stb. találhatók meg benne
- FQ: frekvencia táblázat; az IF frekvenciákról, a sávszélességről stb. tartalmaz információkat
- CL: kalibrációs táblázat; minden amplitúdó, fázis, időkésés (delay) kalibrációs információt tartalmaz
- SN: megoldás táblázat; a különböző AIPS alaprogramok (az AIPS angol szóhasználatával: taskok) által végzett időkésés, fázis és amplitúdó korrekciókat tartalmazza
- FG: flag táblázat; az adatok egy részének törlésére vonatkozó információk vannak benne
- TY: rendszerhőmérséklet táblázat; minden antenna és IF esetén tartalmazza a rendszer amplitúdó-kalibrációhoz szükséges paramétereit, mint az idő függvényét
- GC: erősítés táblázat; erősítés-magasság görbéket tartalmaz minden antennára vonatkozóan ³

³Az antennák erősítése és hatékonysága függ a megfigyelt forrás horizont feletti magasságától, mivel azok nem teljesen merevek, gyűjtőfelületük változik a magasság függvényében a gravitáció deformáló hatása miatt.

Adatfeldolgozáskor célszerű követni az e-VLBI User Guide-ot⁴, ahol lépésről lépésre megtalálható a felhasználandó taskok listája és a szükséges task paraméterek beállításai is. Az adatfeldolgozás ezen része hosszadalmas és a forrás típusától is függ, ezért csak a legfontosabb lépéseket fogom a továbbiakban részletezni.

5.2.1. Beolvasás, adat vizsgálat

A nyers adatot az AIPS-be a **FITLD** task segítségével lehet beolvasni, amennyiben több adasorunk is van, beolvasáskor össze kell azokat fűzni. Beolvasás után célszerű meggyőződni arról, hogy minden adatunk megvan és rendben van, meg kell nézni az adatsor fejlécét. Grafikus formában a **POSSM** task használatával vizsgálhatjuk meg az adatainkat, a **SNPLT** task futtatásával pedig az SN, CL, TY táblákat jeleníthetjük meg az idő vagy akár az óraszög függvényében.

Ebben a szakaszban még sok probléma lehet az adatsorral, a fázisok még nincsenek sorba állítva stb., viszont az már ilyenkor is észrevehető, ha pl. túl erős rádiófrekvenciás interferenciát (RFI) tartalmaz, köszönhetően valamilyen külső, zavaró hatásnak a megfigyelés ideje alatt.

Amennyiben már itt találunk problémát az adatokban, érdemes azokat egy flag táblázatban megjelölni, így a későbbi kalibrálásnál alkalmazva az FG táblázatot, megszabadulhatunk a problémás részekről. A választott forrás esetén a legnagyobb problémát az RFI okozta, emiatt ezeket a problémás részeket ki kellett írni egy FG táblázatba. Sajnos a Fort Davis (VLBA) antenna esetén annyira erős volt az RFI, hogy az ettől származó adatokat mind ki kellett vennem az adatsorból.

5.2.2. Amplitúdókalibráció

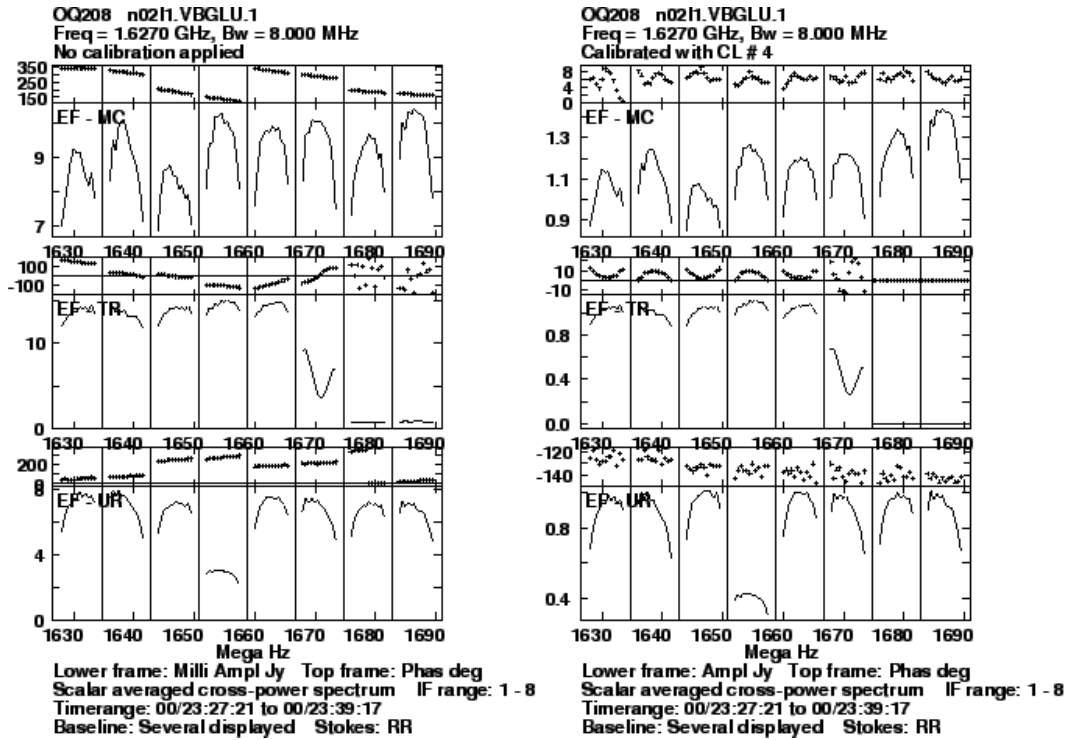
Bár később még szükség lesz amplitúdó-önkalibrációra, már ilyenkor fontos egy elsődleges amplitúdókalibrációt elvégezni az **APCAL** task segítségével. Ez a task, felhasználva a TY és a GC táblázatokat, létrehoz egy SN táblázatot, ami tartalmazni fogja az amplitúdó kalibrációs megoldásokat.

⁴http://www.evlbi.org/user_guide/guide/userguide.html

5.2.3. Fáziskalibráció

Ez a kalibrációs lépés két részből áll. Elsőként az időzéses kalibrációját kell elvégezni, amikor is a fázis frekvenciákhoz képesti emelkedését szüntethetjük meg. Ezt a **FRING** taskkal tehetjük meg. Ezután a **FRING** task újbóli futtatásával mind az időzéses, a fázisváltozás (rate) és a fázis kalibrációját elvégezhetjük, ezt a lépést hívják a szakirodalomban fringe-illesztésnek (fringe-fitting) ⁵.

A 7. ábrán egy példa forrás esetén látható, hogy az időzéses kalibrációja előtt a fázisoknak dőlése van (a frekvencia függvényében nem állandók), az egyes IF-ek (frekvenciasávok) között pedig különböző mértékű eltolódás figyelhető meg. A kalibráció elvégzése után a fázisok a teljes frekvenciatartományban laposabbak, az IF-ek közötti eltolódás pedig megszűnik [13].



7. ábra. Amplitúdó (alsó grafikon) és fázis (felső grafikon) a frekvencia függvényében az OQ208 jelű rádióforrás esetén, az időzéses kalibrációja előtt (bal) és után (jobb)

⁵A fringe interferenciajelnek, interferencia mintának fordítható.

5.2.4. Végső kalibráció

A végső kalibráció elvégzése előtt még el kell végezni az ún. bandpass (áteresztési függvény) kalibrációt. Ezt a **BPASS** task teszi lehetővé, amely futtatásával megoldást kapunk az antenna erősítés frekvencia- és időfüggésére.

Erre azért van szükség, mert a frekvenciában lévő változások felerősödhetnek annak eredményeképp, hogy nem egységesek a szűrő áteresztési sávok (filter passband) vagy a jelátvitelben egyéb frekvenciafüggő hatások is vannak.

A bandpass kalibráció során kalibrációs forrást használunk az áteresztési függvény alakjának megbecsüléséhez és korrekciójához. Ehhez egy erős, vonalmentes kontinuum forrást kell észlelnünk, így meghatározhatjuk az egyes antenna-jellevő kombinációk áteresztési jellemzőit. Az általam vizsgált forrás bandpass kalibrációját a 3C286 rádióforrással végeztem el.

A legutolsó lépés az összes kalibrációs táblázat alkalmazása, amit a **SPLAT** taskkal végezhetünk el. Ezáltal egy olyan kalibrált adatsort kapunk, amit már könnyedén felhasználhatunk a forrás térképezésére, spektrális vonalak vizsgálatára, más szoftverekkel történő feldolgozásra.

5.2.5. Doppler-korrekció

Mivel a célforrás esetén HI abszorpciós vonalakat szeretnénk vizsgálni, fontos elvégezni az ún. Doppler-korrekciót. A megfigyelés alatt a spektrumvonal frekvenciája (Doppler-sebessége) változik, köszönhetően annak, hogy fix helyi oszcillátorokat alkalmazunk, valamint a Föld forgása és Nap körüli keringése miatti frekvenciaváltozásnak. Enélkül a spektrumvonal idővel végighaladna a teljes spektrumon, ezáltal csökkentve a spektrális felbontást [14]. Ezt elkerülhetjük a **CVEL** task alkalmazásával.

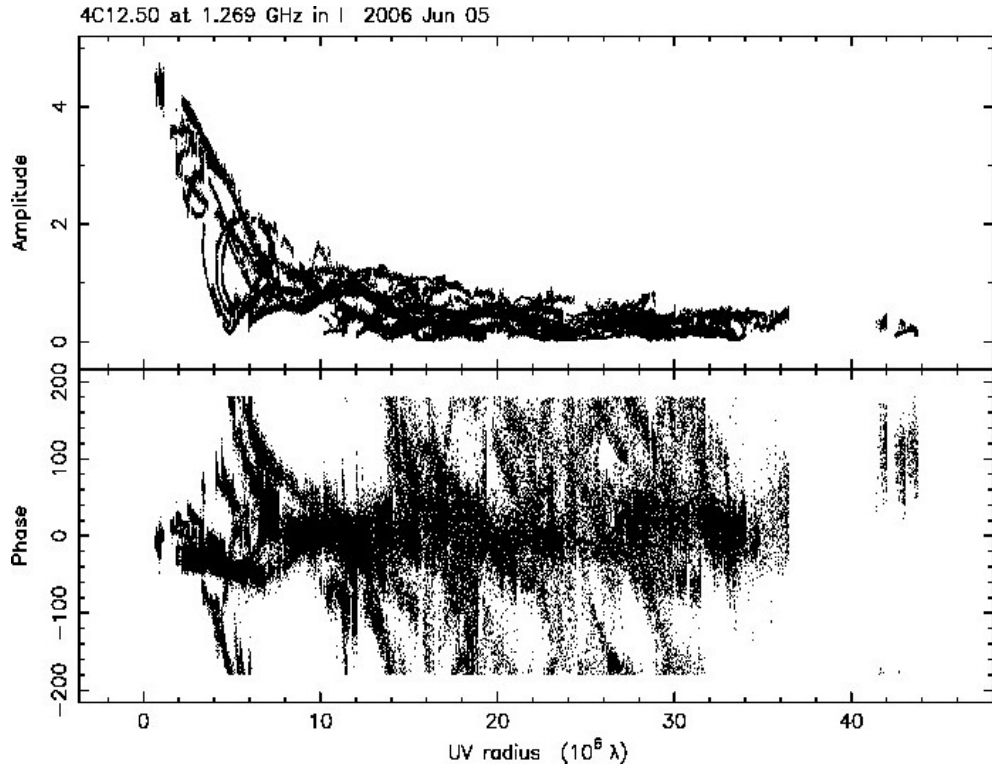
5.2.6. Kontinuum levonás, adattömb létrehozása

A spektrumvonalak vizsgálatához elegendhetetlen a kontinuum levonása. Ezt az **UVLSF** task alkalmazásával végeztük el, mely paraméterei között beállíthatjuk az

illeszteni kívánt görbe rendjét, kiválaszthatjuk mely tartományra illesszen.

A kontinuum levont adatsorból az **IMAGR** task segítségével egy ún. adattömböt (data cube) hoztunk létre, mivel a továbbiakban használt KVIS nevű szoftver ilyen típusú adatokkal tud dolgozni. Az adattömb tulajdonképpen háromdimenziós térkép, amelynek három tengelye a rektaszcenziót, a deklinációt és a spektrális csatornát (frekvencia) adja meg.

5.2.7. A forrás térképezése

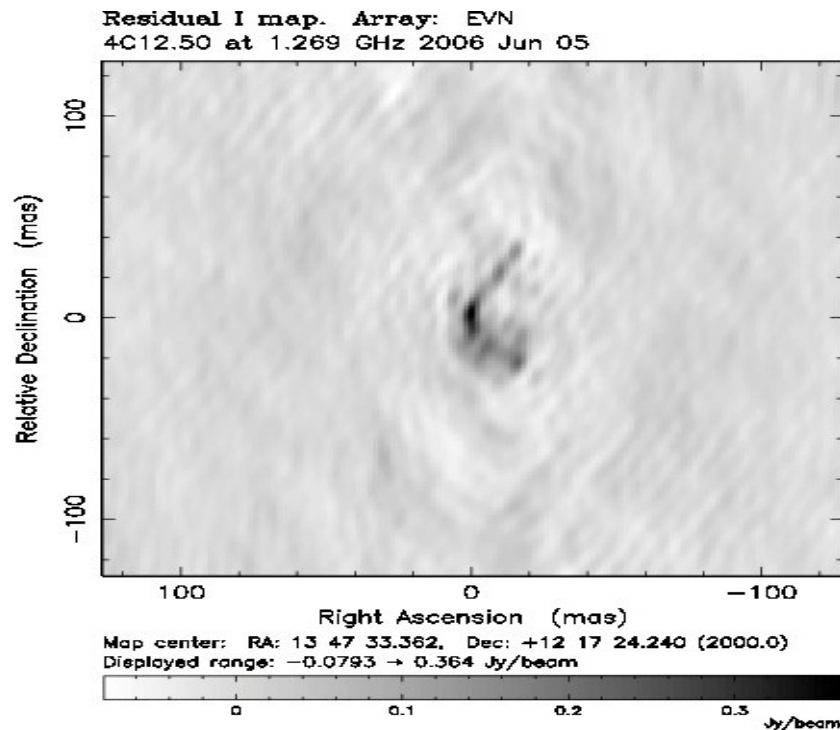


8. ábra. A vizibilitás-amplitúdók (felső) és a fázisok (alsó) az u-v sugár függvényében a 4C12.50 jelű forrás esetén. Az amplitúdó görbe lecsengő alakja arra utal, hogy a forrás felbontott.

A végső kalibráció után kapott adatsort megtisztítottam a spektrumvonalaktól, így egy vonalmentes kontinuumot tartalmazó UV fájlt kaptam eredményül (8. ábra), amiből a DIFMAP [15] elnevezésű szoftverrel készítettem térképet.

A térképezés célja, hogy a rendelkezésünkre álló piszkos térkép (9. ábra) alapján meghatározzuk a forrás valódi intenzitás-eloszlását. Ehhez két fontos műveletet kell elvégezni, ez a **clean** és az önkalibrálás (**selfcal**). A **clean** egy olyan iterációs eljárás, melynek alapfeltevése, hogy a rádióforrás fényességeloszlása véges számú pontforrás összegzéseképp előállítható [16]. Az algoritmus fő lépései [12]:

- kiválasztja a piszkos térkép legfényesebb pontját, majd pontforrást helyez rá
- levonja az ún. piszkos nyalábot
- eltárolja a komponensek koordinátáit és intenzitását
- új iterációt kezd egészen addig, míg a maradványtérképen csúcsérték a zajszint fellett van
- az algoritmus végén a modellkomponensek alapján, ideális hálózat leképezést feltételezve létrehozza a végleges térképet, hozzáadva a megmaradó zajt is



9. ábra. A 4C12.50 piszkos térképe.

A sugárzás által, a forrástól a rádióteleszkópig megtett út hossza nem állandó, az atmoszférából, órahibából fázishibák merülhetnek fel. N antennából álló hálózat esetén $N(N-1)/2$ bázisvonalon van mérésünk. Az önkalibrálás azon alapszik, hogy a fázishibák az antennák rendelleneségeiből tevődnek össze, ez az N hiba pedig a redundáns mérések alapján kiküszöbölhető, ha a vizibilitások kombinációját és egy elfogadott forrás modellt használunk.

A clean algoritmus és az önkalibráció többszöri alkalmazásával a kezdeti piszkos térképből előállítható a végleges térkép [12].

5.2.8. A vonalprofilok és abszorpció helyének meghatározása

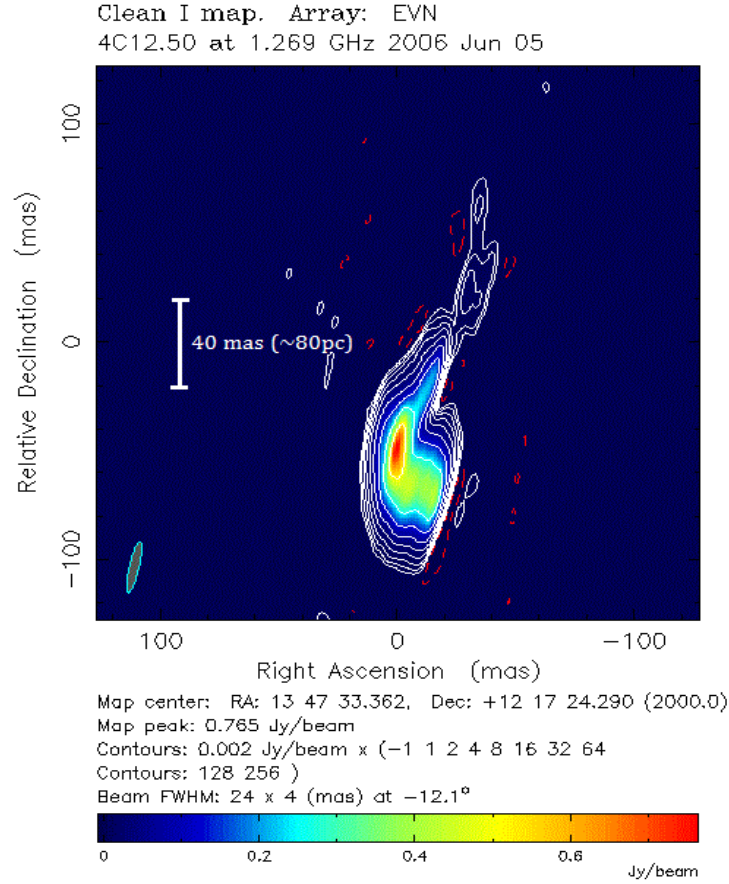
Ahhoz, hogy meghatározzuk az abszorpció helyét a forráson belül, az adattömböt és a kontinuum térképet is beolvastuk a Karma szoftvercsomag [17] KVIS nevű alkalmazásába. Segítségével az adattömbre ráhelyezhető a kontinuum térkép, interaktív taskjai által pedig megkereshetők az adattömbön belül, az egyes csatornákon végighaladva, az abszorpciós régiók. Ezáltal a kontinuum térképen beazonosítható, hogy honnan származnak az abszorpciós vonalak, emellett azok vonalprofiljait is meg lehet kapni.

Sajnos csak az adatfeldolgozás ezen fázisában derült ki, hogy az AIPS által létrehozott adattömböt nem megfelelően kezeli a Kvis és nem tudja összegezni a fluxussűrűségeket a teljes abszorpciós területre⁶. Emiatt nem tudtuk megállapítani a vonalak teljes fluxussűrűségét, ezért azt a csatornát választottuk ki, melyben az abszorpció maximális értékű és ezt az adattömb részletet használtuk a továbbiakban.

6. Eredmények

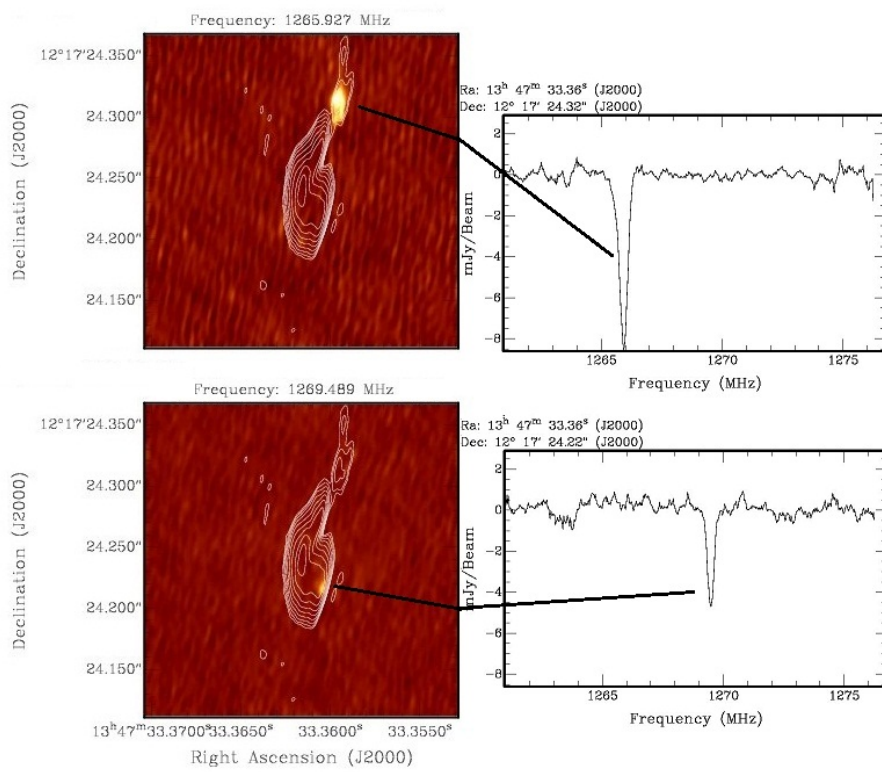
Az adatfeldolgozás eredményeként egy vonalmentes kontinuum térképet és egy kontinuummentes adattömböt kaptunk.

⁶Általában a spektrális vonalakkal foglalkozó rádiócsillagászok a MIRIAD nevű, rádióinterferometriás adatfeldolgozó csomagot használják, ami teljes mértékben kompatibilis a Karma csomag alkalmazásaival.



10. ábra. A 4C12.50 clean térképe. Az ábra alatti paraméterek: a térkép (0,0) koordinátájához tartozó égi koordináták; a térképen szereplő legnagyobb intenzitás érték; a kontúrok által szimbolizált intenzitási szintek. A térkép bal alsó sarkában látható ellipszis a hálózat u–v lefedettségéből adódó É-D, K-Ny irányú felbontást mutatja, számszerűen az alsó paramétersor adja meg. A zaj 0.5 mJy/beam.

A 10. ábrán látható clean térkép, összehasonlítva az eddig kontinuum térképekkel jól visszadja a forrás alakját. Egyértelműen kirajzolódik a déli jet, az aktív mag komponens (A1) és a 2. ábrán látható D1-gyel jelölt déli jetkomponens is. Bár az eredeti térbeli felbontásunk jobb (4x9 mas), a térkép készítésekor ugyanazt a térbeli felbontást használtuk, mint amivel a 3. ábrán látható térkép készült, egyrésről az összehasonlítás végett, másrésről így a kontinuum forrás halványabb, északi irányban kiterjedt része is láthatóvá vált. A forrás kiterjedése kb. 180 mas (~ 400 pc).



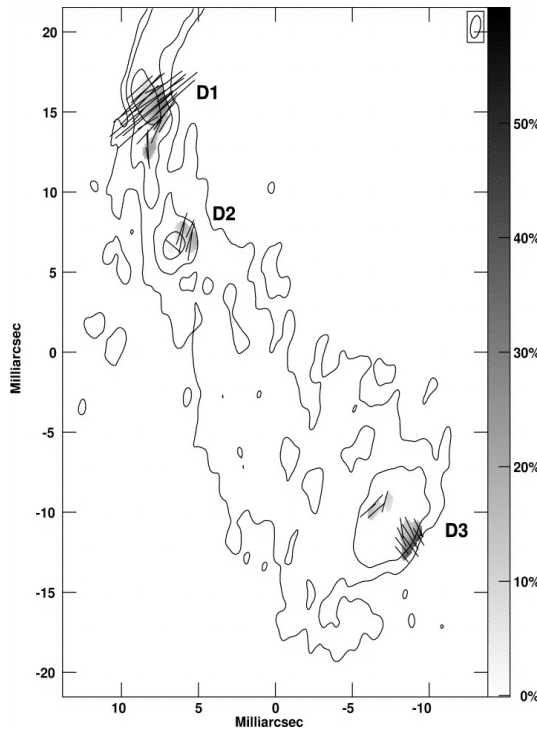
11. ábra. A forrásról készült kontúrtérkép ráhelyezve a kontinuummentes adat-
tömbre, az abszorpció maximumát adó csatornánál (bal). A zaj 0.4 mJy/beam csa-
tornánként. A keskeny (fent) és a széles (lent) abszorpciós komponens vonalprofilja
(jobb).

Az adatfeldolgozás sikeresnek tekinthető, hiszen mind a rendszersebességnél lévő
keskeny, mind az ehhez képest kékeltołodott széles abszorpciós komponens detektá-
lása lehetővé vált. A 11. ábra jobb oldalán láthatóak az abszorpciós komponensekhez
tartozó vonalprofilok.

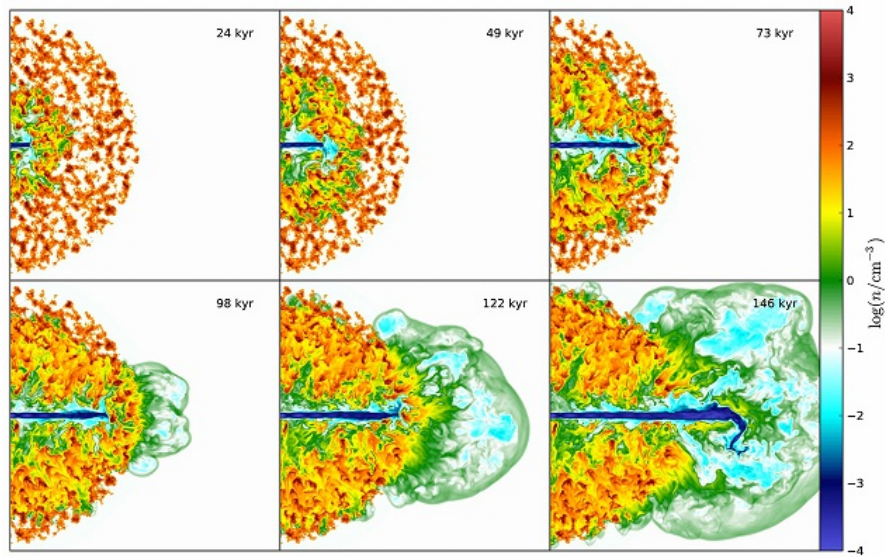
Bár az abszorpciós vonalak teljes fluxussűrűségét nem tudtuk meghatározni, az enél-
kül is megállapítható, hogy a széles komponens nem kifejezetten széles. Lehetséges,
hogy csupán az abszorpció egy részét detektáltuk és ez a kiáramlás csak egy kis
része egy sokkal kiterjedtebb kiáramlásnak, bár az is előfordulhat, hogy nem volt
elegendő az antennák érzékenysége.

A 11. ábra bal oldalán tehát az adattömbnek azon részlete látható, ahova az abszorpció maximális értéke esik, erre pedig a kontinuum térkép van ráhelyezve. Az ábra alapján sikerült egyrésztől megerősítenünk a keskeny komponens Morganti [9] által meghatározott helyzetét, másrésztől a széles komponens helyzetét is meghatároztuk. A kéeltolódott komponens a déli, felénk tartó jet végén helyezkedik el. A kéeltolódott gáz tehát a rádió jet és az ISM kölcsönhatásának eredménye lehet.

Ez az abszorpciós komponens igen közel található a 12. ábrán látható D3 jetkomponenshez, mely igen nagy mértékben (60%) polarizált, emellett rendezett mágneses térrel rendelkezik. Mindez arra utal, hogy a déli jet végén egy erős lökéshullám található, ami rendezi a mágneses teret. Ez azt jelenti, hogy a rádió jet itt nekiütközik a csillagközi anyag egy sűrűbb felhőjének.



12. ábra. A déli jet kontúrtérképe. A kontúrok a teljes intenzitást jelölik. A kontúrszintek: -0.4, 0.4, 1.6, 6.4 mJy/beam. Az elektromos vektorok arányosak a lineárisan polarizált fluxussal, 1 mas=303 mJy/beam-nek felel meg. A szürke skála a részleges lineáris polarizációnak felel meg százalékban. [8]



13. ábra. Rádió jet kölcsönhatása csomós, gázban gazdag közeggel [18]

A 13. ábra egy szimuláció eredménye, mely során a rádió jet terjedését vizsgálták gázban gazdag, csomós szerkezetű csillagközi anyag esetén, a magtól kiindulva 1 kpc-en belül [18].

Ahogy a jet tágul és megtisztítja az útját, egy pseudo-szférikus buborék indul meg az ISM-ben, a buborék tágulása pedig a sűrű gázfelhőket kifelé hajtja. Úgy gondoljuk, hogy egy ehhez hasonló folyamat megy végbe a forrásunk esetén is. Ezek alapján elmondható, hogy a rádió jet szerepe a mag körüli régió gáztól való megtisztításában rendkívül fontos.

Összefoglalva, a széles abszorpciós komponens detektálásával és a rádióforráson belüli helyzetének meghatározásával újabb aktív galaxismag esetén találtunk közvetlen bizonyítékot a rádió jet-ISM kölcsönhatásra.

7. Összefoglalás

Munkám során ismertettem a fiatal, erőteljes rádióforrások esetén gyakran detektált gázkiáramlások lehetséges mechanizmusát, kitérve az általam is vizsgált, 4C12.50 jelű rádióforrásban lévő semleges hidrogén kiáramlásokkal kapcsolatos eddigi eredményekre.

Dolgozatom második felében bemutattam a választott forrás feldolgozásakor megtett főbb lépéseket és annak elméleti alapjait.

Az általam elvégzett adatfeldolgozás eredményeképp újabb közvetlen bizonyítékot sikerült találni a rádió jet-ISM kölcsönhatásra vonatkozóan.

A jövőben a széles abszorpciós komponens kinematikáját, dinamikáját, a tömegkiáramlási rátát és egyéb tulajdonságait szeretném meghatározni, ezáltal bővítve ismereteinket a forrásban lezajló kölcsönhatásokról.

Hivatkozások

- [1] B. H. C. Emonts et al. Large-scale HI in nearby radio galaxies (II): The nature of classical low-power radio sources. *MNRAS*, 406(2):987–1006, 2010.
- [2] R. Morganti. Neutral hydrogen in radio galaxies: results from nearby, importance for far away. *Astronomische Nachrichten*, 327:127–134, 206.
- [3] C. N. Tadhunter R. Morganti and T. A. Oosterloo. Fast neutral outflows in powerful radio galaxies: a major source of feedback in massive galaxies. *A&A*, 444(1):L9–L13, 2005.
- [4] R. Morganti et al. The location of the broad HI absorption in 3C305: clear evidence for a jet-accelerated neutral outflow. *A&A*, 439(2):521–526, 2005.
- [5] G. Mellema et al. Evolution of clouds in radio galaxy cocoons. *A&A*, 395(2):L13–L16, 2002.
- [6] I. Owsianik et al. Renewed radio activity of age 370 years in the extragalactic source 0108+388. *A&A*, 336(2):L37–L40, 1998.
- [7] C. Stanghellini et al. Extended emission around GPS radio sources. *A&A*, 443(3):891–902, 2005.
- [8] M. L. Lister et al. A superluminal precessing jet in the recent merger system IRAS 13451+1232. *ApJ*, 584:135–146, 2003.
- [9] R. Morganti et al. The unfriendly ISM in the radio galaxy 4C12.50 (PKS 1345+12). *A&A*, 424:119–124, 2004.
- [10] I. F. Mirabel. Atomic hydrogen in the powerful radio-infrared galaxies 4C12.50 and 3C433. *ApJ*, 340(2):L13–L16, 1989.
- [11] B. G. Clark. Interferometers and coherence theory. *ASP Conference Series*, 82:3–16, 1995.

- [12] J.O. Fogasy and M. Nagy. Mi történt 4 év alatt egy távoli rádiókvazárban?
Csillagász TDK, 2011.
- [13] P. J. Diamond. VLBI data reduction in practice. *ASP Conference Series*, 82:227–246, 1995.
- [14] M. J. Reid. Spectral-line VLBI. *ASP Conference Series*, 82:209–226, 1995.
- [15] M. C. Shepherd. Difmap: an interactive program for synthesis imaging. *ASP Conference Series*, 125, 1997.
- [16] R. C. Walker. Practical VLBI imaging. *ASP Conference Series*, 82, 1995.
- [17] G. H. Jacoby and J. Barnes. Karma: a visualization test-bed. *ASP Conference Series*, 101, 1996.
- [18] A. Y. Wagner and G.V. Bicknell. Relativistic jet feedback in evolving galaxies.
ApJ, 728(1), 2011.