

Alma Mater Studiorum · Università di Bologna

Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea Magistrale in Astrofisica e Cosmologia

**Dinamica di radiogalassie compatte e sviluppo
di un software per l'analisi dei dati**

Tesi di Laurea

Relatore:

Chiar.mo Prof. Daniele Dallacasa

Presentata da:

Marco Calzolari

Correlatore:

Dott. Carlo Stanghellini

Anno Accademico 2024/2025

*A Giuseppina
e Alessandro*

Ringraziamenti

Alla fine ce l'ho fatta: sono arrivato al termine di un percorso che si è rivelato molto più lungo e impegnativo di quanto immaginassi all'inizio.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore, il Professore Daniele Dallacasa, che si è sempre mostrato più che disponibile e con il quale vorrei comunque provare ad aprire il cantiere del Planetario a Bologna (sempre che sia disponibile!).

Ringrazio moltissimo Carlo Stanghellini, che mi ha preso sotto la sua ala e mi ha insegnato con passione e pazienza l'arte della radioastronomia. Senza il suo aiuto non credo proprio che sarei riuscito a fare questo lavoro di tesi. Sinceramente spero di poter continuare la collaborazione con Carlo: mi sono divertito a lavorare sotto la sua guida e mi piacerebbe continuare a giocare coi dati interferometrici. Ovviamente il ringraziamento più grande va alla mia famiglia: a mia moglie Giuseppina e a mio figlio Alessandro. Soprattutto a Giuseppina (non me ne voglia Alessandro) che ha sostenuto questo mio ennesimo percorso universitario con infinita pazienza e questo la dice lunga su quanto mi vuole bene. Dedico ad entrambi, Giuseppina ed Alessandro, questo lavoro.

Infine un ricordo di mia Mamma Adriana, che ci ha lasciato di recente. Anche lei mi ha sempre incoraggiato in questo cammino e per motivarmi, ogni volta che passavo un esame, mi regalava 10 euro! Ciao, Mamma.

Questo lavoro di tesi è stato svolto
nell'ambito dell'attività di ricerca
dell'Istituto di Radioastronomia – Istituto Nazionale di Astrofisica
(IRA–INAF), Bologna.

Indice

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | Radiosorgenti JSS (Jetted Subgalactic-Size) | 13 |
| 1.1 | Radiosorgenti JSS classificazione e scenari evolutivi | 13 |
| 1.1.1 | 1.1.2 Contesto e classificazione storica | 14 |
| 1.1.2 | Definizione JSS (Jetted Subgalactic-Size) | 15 |
| 1.1.3 | Caratteristiche delle radiosorgenti JSS | 15 |
| 1.1.4 | Il quadro evolutivo delle radiosorgenti JSS | 16 |
| 1.2 | Jet redirection: estensione dello scenario della frustrazione | 17 |
| 1.2.1 | Periodo di precessione e confinamento della sorgente | 20 |
| 2 | Elaborazione dati VLBA | 21 |
| 2.1 | Archivio NRAO/VLBA | 21 |
| 2.1.1 | Dati osservativi VLBA dall'archivio NRAO per le sorgenti J1335+5844 e J1511+0518 | 22 |
| 2.2 | Calibrazione dei dati VLBA in AIPS | 23 |
| 2.3 | Hybrid mapping in DIFMAP | 26 |
| 2.3.1 | Procedura di self-calibration (hybrid mapping) in DIFMAP | 28 |
| 2.3.2 | Model fitting nel piano delle visibilità | 29 |
| 3 | Gestione degli errori | 30 |
| 3.1 | Errori di un immagine radio | 30 |
| 3.1.1 | Errori stocastici (rumore termico) | 30 |
| 3.1.2 | Errori sistematici | 31 |
| 3.1.3 | Errori sulla posizione | 31 |
| 3.2 | Stima degli errori di posizione | 31 |
| 3.2.1 | Stima degli errori delle componenti della sorgente | 32 |
| 3.2.2 | Propagazione degli errori | 34 |
| 3.2.3 | Riscalatura degli errori nei grafici con χ_{red}^2 | 34 |
| 3.3 | Calcolo e propagazione degli errori nel modulo <code>errors_fwhm.py</code> | 36 |
| 3.3.1 | Componenti cartesiane del ModelFit | 37 |
| 3.3.2 | Componenti cartesiane del beam interferometrico | 37 |
| 3.3.3 | Rapporto segnale-rumore | 38 |
| 3.3.4 | Calcolo degli errori cartesiani del fit e del beam | 38 |
| 3.3.5 | Combinazione degli errori in quadratura | 39 |
| 3.3.6 | Propagazione degli errori sulla posizione | 39 |
| 3.3.7 | Propagazione degli errori sulla distanza e sull'angolo | 40 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4 | Software per l'analisi dei dati osservativi | 42 |
| 4.1 | Finalità del software | 42 |
| 4.2 | Database dei dati delle sorgenti | 43 |
| 4.3 | Dati contenuti nel database | 43 |
| 4.4 | Struttura generale del software | 45 |
| 4.4.1 | Interfaccia grafica del software (GUI) | 46 |
| 4.5 | Grafici prodotti dal modulo plotting.py | 53 |
| 4.5.1 | Proper motion (Component Separation) | 53 |
| 4.5.2 | Interpolazione e riscalatura errori nei grafici del moto radiale, angolare e del flusso | 54 |
| 4.5.3 | Angle/Epoch | 56 |
| 4.5.4 | Distance/Epoch | 58 |
| 4.5.5 | Flux/Epoch | 59 |
| 4.5.6 | Comp_MFIT/Epoch | 60 |
| 5 | Analisi dinamica delle radiosorgenti JSS | 62 |
| 5.1 | Metodologia usata per l'analisi dinamica delle radiosorgenti | 62 |
| 5.2 | Database delle radiosorgenti JSS | 66 |
| 5.3 | Analisi dinamica J1335+5844 (B1333+589) | 67 |
| 5.3.1 | Analisi Morfologia radio | 69 |
| 5.3.2 | Analisi del moto delle componenti | 74 |
| 5.3.3 | Età cinematica e periodo di precessione | 78 |
| 5.4 | Analisi dinamica J1511+0518 (B1509+054) | 79 |
| 5.4.1 | Analisi Morfologia radio | 80 |
| 5.4.2 | Analisi del flusso delle componenti | 83 |
| 5.4.3 | Analisi del moto delle componenti | 87 |
| 5.4.4 | Età cinematica e periodo di precessione | 91 |
| 6 | Conclusioni | 93 |
| 6.1 | Natura ed evoluzione delle radiosorgenti JSS J1335+5844 e J1511+0518 | 93 |
| 6.2 | Considerazioni finali e prospettive future (future work) | 94 |
| 6.2.1 | Prospettive di sviluppo (future work) | 95 |
| A | DATABASE dati Osservativi | 101 |
| A.1 | Dati osservativi radio sorgente J1335+5844 | 101 |
| A.2 | Dati osservativi radio sorgente J1511+0518 | 102 |

Introduzione

Le radiosorgenti JSS (Jetted Subgalactic-Size) costituiscono una classe di oggetti AGN (active galactic nucleus) compatti con emissione radio caratterizzata da dimensioni lineari intrinseche inferiori alla scala tipica della galassia ospite. La motivazione dell'introduzione del termine JSS è data con precisione nel capitolo 1. In questo lavoro di tesi si sono utilizzati come sinonimi i termini *radiosorgente JSS* e *radiosorgente compatta*, intendendo con l'aggettivo *compatta* una radiosorgente originata da un AGN di dimensioni sub-galattica.

Il lavoro di ricerca presentato in questa tesi si inserisce nel più ampio contesto dello studio delle radiosorgenti compatte e si propone di dare un piccolo contributo alla comprensione del problema della loro apparente sovrabbondanza rispetto alle aspettative evolutive. I conteggi osservativi mostrano infatti una frazione di oggetti compatti significativamente superiore a quella prevista da un semplice scenario evolutivo lineare.

Comprendere la dinamica di queste radiosorgenti può essere importante per comprendere i processi di propagazione dei getti su scala sub-galattica, il ruolo dell'ambiente circumnucleare e le caratteristiche del sistema centrale, nella maggior parte dei casi innescato da un merger galattico.

Il contesto evolutivo delle radiogalassie compatte, come descritto nel capitolo 1 è generalmente interpretato secondo tre scenari principali. Nel cosiddetto *youth scenario*, la compattezza osservata riflette una giovane emissione radio: i getti, recentemente attivati, non hanno ancora raggiunto le scale di centinaia di kiloparsec o megaparsec tipiche delle radiogalassie di tipo Fanaroff–Riley. Lo *frustration scenario* attribuisce invece le dimensioni ridotte a un confinamento dinamico esercitato da un mezzo interstellare, in grado di rallentare o deviare la propagazione del getto; in questo contesto le età delle radiosorgenti compatte sarebbero comparabili con quelle di grandi dimensioni. A questo fine, serve un mezzo ambiente particolarmente denso. Infine, lo *short-lived scenario* ipotizza che una frazione delle radiosorgenti JSS sia caratterizzata da un'attività radio intrinsecamente breve o intermittente, che si estingue prima che la sorgente possa evolvere verso dimensioni estese.

Accanto a questi scenari tradizionali, è stato proposto da Stanghellini et al. 2025 un ulteriore meccanismo interpretativo, noto come *jet redirection scenario*, che si inserisce nell'ambito del *frustration scenario* con l'aggiunta di un elemento dinamico che si crea in seguito a un merger galattico. In questo quadro, la precessione o la ridirezione dell'asse del getto potenzialmente indotta dal moto orbitale di sistemi binari di buchi neri supermassicci o da instabilità del disco di accrescimento, può modificare continuamente la direzione di propagazione del plasma

relativistico. Tale effetto riduce l'efficienza con cui il getto scava un canale preferenziale nell'ISM, contribuendo a mantenere la radiosorgente confinata su scale sub-galattiche anche in assenza di un mezzo eccezionalmente denso.

In questo lavoro di tesi si è sviluppato un metodo per l'analisi dinamica di radiosorgenti JSS per determinarne le caratteristiche dinamiche e collocarle criticamente negli scenari evolutivi precedentemente descritti e illustrati in dettaglio nel capitolo 1. Per supportare l'analisi dinamica si è sviluppato un software, descritto nel capitolo 4. A partire dai dati del Very Long Baseline Array (VLBA) calibrati con le modalità descritte nel capitolo 2 e modellizzati secondo criteri definiti all'inizio del capitolo 5, il software consente una gestione sistematica delle incertezze posizionali i cui criteri di stima sono descritti nel capitolo 3 e la produzione dei grafici cinematici utili per consentire un'analisi dettagliata dei moti propri delle singole componenti strutturali.

L'analisi dinamica è stata applicata a J1335+5844 e J1511+0518, due radiosorgenti JSS caratterizzate da un'ampia copertura temporale di osservazioni VLBA, al fine di determinarne le caratteristiche dinamiche e collocarle criticamente negli scenari evolutivi discussi nel Capitolo 1.

I risultati dell'analisi indicano che il modello di semplice espansione dei getti con orientazione costante nel tempo non è completamente adeguato, e che altri fenomeni possono modificarne la direzione finale. Questi fenomeni possono essere legati alla precessione dell'asse di espulsione del materiale relativistico, con conseguente modifica/alterazione della morfologia osservata.

Sintetizziamo brevemente il contenuto della presente tesi:

- Nel **Capitolo 1** vengono introdotte le radiosorgenti JSS, illustrandone le proprietà osservative e il loro inquadramento nel contesto evolutivo delle radiogalassie. Sono discussi i principali scenari interpretativi (*youth, frustration, short-lived*) e viene approfondito il meccanismo di *jet redirection*, con particolare attenzione al ruolo della precessione del getto.
- Nel **Capitolo 2** vengono descritti i dati osservativi utilizzati e la procedura di riduzione dei dati VLBA. Il capitolo illustra l'archivio del National Radio Astronomy Observatory (NRAO), i progetti VLBA selezionati, le fasi di calibrazione nel software di riduzione dati AIPS e la successiva procedura di hybrid mapping nel software DIFMAP, fino alla produzione dei modelli nel piano delle visibilità.
- Nel **Capitolo 3** è descritta la gestione degli errori. Vengono analizzate le fonti di errore nelle osservazioni VLBI, illustrata la metodologia adottata per la stima degli errori posizionali e la loro propagazione e ri-normalizzazione con il metodo del χ_{red}^2 . Descritto infine il formalismo matematico adottato per il calcolo implementato nel modulo python `err_fwhm.py`.
- Nel **Capitolo 4** viene presentato il software sviluppato in linguaggio Python a supporto dell'analisi dinamica delle radiosorgenti. Sono descritte la struttura del database, l'interfaccia grafica con le opzioni disponibili, il "work-

flow” di lavoro e la descrizione dei grafici moto proprio, distanza/epoca, angolo/epoca, flusso/epoca, component/epoca.

- Nel **Capitolo 5** viene condotta l’analisi morfologica, della densità di flusso delle componenti e della dinamica delle radiosorgenti J1335+5844 e J1511+0518. Sono presentati i grafici di densità di flusso e quelli cinematici, stimati i moti propri delle componenti e calcolata l’età cinematica e l’ordine di grandezza del periodo di precessione.
- Nel **Capitolo 6** vengono sintetizzati i risultati principali dell’analisi dinamica per le due radiosorgenti J1335+5844 e J1511+0518 e proposta una loro interpretazione mettendo in relazione i risultati osservativi con gli scenari evolutivi discussi nel Capitolo 1. Il capitolo si conclude con le considerazioni finali e le prospettive di sviluppo futuro (future work).

Capitolo 1

Radiosorgenti JSS (Jetted Subgalactic-Size)

1.1 Radiosorgenti JSS classificazione e scenari evolutivi

Nel panorama delle radiosorgenti associate alle galassie è possibile distinguere due classi principali.

La prima classe comprende le radiosorgenti la cui emissione di sincrotrone è legata ai processi di formazione stellare e ai fenomeni evolutivi ad essa connessi, quali esplosioni di supernovae, pulsar, micro-quasar. In questi sistemi la luminosità radio è generalmente contenuta ($\lesssim 10^{23}$ W Hz $^{-1}$) ed è tipicamente osservata in galassie con intensa attività di formazione stellare, spesso associate a sistemi in interazione o merging, nei quali il gas freddo viene convertito rapidamente in stelle con tassi dell'ordine di decine o centinaia di M_{\odot} yr $^{-1}$. Emissioni radio più deboli sono invece osservate in galassie a spirale con tassi di formazione stellare più moderati, dell'ordine di $\sim 1 M_{\odot}$ yr $^{-1}$. La seconda classe di radiosorgenti è invece associata all'attività dei nuclei galattici attivi (AGN). In una frazione di queste l'emissione radio è prodotta da due getti di plasma magnetizzato ultra-relativistico espulsi dalle regioni centrali della galassia. In questi oggetti la luminosità radio ($\gtrsim 10^{24}$ W Hz $^{-1}$) è generalmente molto più elevata rispetto a quella delle sorgenti dominate dalla formazione stellare. Lo studio dell'emissione di sincrotrone dei getti e dei lobi radio ha inoltre consentito di stimare l'età radiativa della radio-emissione, che negli oggetti più estesi può raggiungere valori dell'ordine di 10^8 anni. Sebbene tali tempi siano considerevoli su scala astrofisica, essi risultano comunque brevi rispetto all'età dell'Universo o della galassia ospite, generalmente una galassia ellittica massiva. Ciò indica che la fase di attività radio associata alla produzione di plasma ultrarelativistico rappresenta un fenomeno transitorio nell'evoluzione delle galassie.

All'interno di questa seconda classe, le dimensioni lineari delle radiosorgenti sono state spesso utilizzate come indicatore della loro età evolutiva. In particolare, nel quadro del modello di crescita auto-similare proposto da Scheuer 1974 e successivamente sviluppato da Baldwin 1982, le radiosorgenti si espanderebbero progressivamente nel mezzo circostante mantenendo una morfologia simile durante

la loro evoluzione. In questo contesto, gli oggetti più compatti possono essere interpretati come radiosorgenti giovani, nelle quali l'attività dei getti si è innescata relativamente di recente e non ha ancora prodotto strutture radio estese su scale galattiche o extragalattiche.

Poiché una caratteristica di base di queste sorgenti è la presenza di getti relativistici, questa classe di oggetti può essere identificata con il termine *Jetted Subgalactic-Size radio sources* (JSS), che indica radiosorgenti caratterizzate dalla presenza di getti e da dimensioni lineari inferiori alla scala tipica della galassia ospite.

1.1.1 1.1.2 Contesto e classificazione storica

Storicamente, le radiosorgenti extragalattiche compatte sono state identificate e classificate sulla base di sottoclassi definite principalmente da proprietà osservative, in particolare spettrali e morfologiche. Questa distinzione riflette l'evoluzione delle tecniche di osservazione radio e dei criteri di selezione adottati nelle diverse surveys. Dato che la compattezza presume elevate densità e, quindi, autoassorbimento significativo, lo spettro radio è stato, storicamente, uno dei criteri per la selezione di tali oggetti

Dal punto di vista spettrale, si distinguono innanzitutto le sorgenti CSS (Compact Steep Spectrum), caratterizzate da uno spettro radio ripido, da un turnover a frequenze dell'ordine del centinaio di MHz e da dimensioni lineari tipicamente inferiori a ~ 20 kpc.

Le sorgenti GPS (Gigahertz-Peaked Spectrum) mostrano uno spettro convesso con picco attorno a ~ 1 GHz e dimensioni generalmente inferiori a ~ 1 kpc. Le HFP (High-Frequency Peakers) estendono ulteriormente la classe delle GPS verso frequenze di picco più elevate ($\gtrsim 5$ GHz), identificando oggetti ancora più compatti e potenzialmente più giovani.

Parallelamente alla classificazione spettrale, l'avvento delle tecniche di interferometria a lunghissima base (VLBI) ha permesso una classificazione morfologica ad alta risoluzione. I CSO (Compact Symmetric Objects) sono definiti come radiosorgenti con struttura bilaterale simmetrica e dimensioni lineari ≤ 1 kpc. I MSO (Medium-sized Symmetric Objects) rappresentano la controparte su scala maggiore, con dimensioni comprese tra 1 e 20 kpc, mantenendo una morfologia sostanzialmente simmetrica.

Sebbene tali classi siano state fondamentali per la classificazione fenomenologica della popolazione compatta, ciascun criterio di selezione presenta limiti intrinseci. I campioni selezionati esclusivamente in base alle proprietà spettrali possono includere una frazione non trascurabile di blazar, nei quali la compattezza è apparente e dovuta a effetti di beaming relativistico (Stanghellini 2003). Al contrario, i CSO potrebbero escludere oggetti che mancano di strutture chiaramente bilaterali per varie ragioni (ad esempio: ambiente disomogeneo che può confinare, a scapito della espansione adiabatica più o meno efficientemente il plasma relativistico) ma che appartengono comunque alla stessa classe di sorgenti radio con jet completamente contenuti dal mezzo interstellare della galassia ospite.

1.1.2 Definizione JSS (Jetted Subgalactic-Size)

L'introduzione del termine JSS (Jetted Subgalactic-Size) introdotto da Stanghellini et al. 2025 per le radiosorgenti compatte mira a fornire una definizione unificata e fisicamente motivata. La definizione non si basa esclusivamente sull'aspetto osservativo, quale la compattezza apparente o la forma dello spettro radio, bensì sulla reale estensione lineare della struttura radio, che rimane confinata entro poche centinaia di parsec o, al più, entro la scala sub-galattica.

La classe delle radiosorgenti JSS include pertanto tutte le sorgenti classificate come CSO/MSO o CSS/GPS/HFP, con la sola esclusione degli oggetti dominati dal beaming relativistico (blazar), nei quali la compattezza non riflette la reale scala fisica della struttura radio ma è solo apparente, dovuta ad effetti di proiezione.

1.1.3 Caratteristiche delle radiosorgenti JSS

Dal punto di vista morfologico, le radiosorgenti di dimensioni subgalattiche con getti (JSS) presentano strutture che, su scala ridotta, richiamano quelle delle grandi galassie radio di tipo Fanaroff–Riley (prevalentemente di Tipo II, ma anche di Tipo I), con hot_spot compatte, lobi ben definiti e, talvolta, un nucleo radio centrale identificabile. Tuttavia, rispetto alle radiosorgenti estese, le radiosorgenti JSS mostrano frequentemente una morfologia più irregolare ed asimmetrica: i due lati della struttura radio possono differire significativamente in estensione, luminosità superficiale e collimazione del getti.

In diversi oggetti sono osservabili curvature dei getti, strutture a forma di S ed estensioni trasversali rispetto all'asse principale. Tali caratteristiche suggeriscono che la propagazione del getto non avvenga sempre lungo un asse stabile, ma possa essere soggetta a variazioni di direzione nel tempo. Una possibile interpretazione di queste morfologie irregolari è la presenza di fenomeni di precessione del getto o di variazioni dinamiche nella orientazione dell'AGN rispetto al mezzo circostante. Le osservazioni VLBI hanno permesso di misurare moti propri delle hot_spot in diversi oggetti, rivelando velocità di separazione tipicamente comprese tra $\sim 0.1c$ e $\sim 0.3c$, corrispondenti negli oggetti studiati a età cinematiche dell'ordine di 10^2 – 10^4 anni (Christopher P. O'Dea et al. 2021). A λ decimetriche o centimetriche le radiosorgenti JSS sono generalmente debolmente polarizzate e presentano elevate misure di rotazione (RM), talvolta dell'ordine di 10^3 – 10^4 rad m^{-2} nel sistema di riferimento della sorgente. È osservata una tendenza all'aumento della polarizzazione frazionaria e alla diminuzione della RM al crescere della dimensione lineare, indicando la presenza di un mezzo circumnucleare denso e magnetizzato (Christopher P. O'Dea et al. 2021).

La forte depolarizzazione alle basse frequenze e le evidenze di interazione tra getto e mezzo interstellare indicano che la propagazione del plasma relativistico avviene in un ambiente complesso e disomogeneo.

In alcuni casi è stata rilevata emissione radio debole e diffusa su scale maggiori rispetto alla struttura compatta principale, interpretata come residuo di precedenti episodi di attività AGN (Orienti et al. 2008; Stanghellini et al. 2005).

Nel complesso, le proprietà morfologiche, cinematiche e di polarizzazione indicano

che le JSS costituiscono una popolazione eterogenea, in cui la compattezza può derivare non solo dalla giovane età della sorgente, ma anche da processi dinamici quali interazioni con un mezzo circumnucleare denso, attività episodica e possibili variazioni della direzione del getto nel tempo (Stanghellini et al. 2025) .

1.1.4 Il quadro evolutivo delle radiosorgenti JSS

Nel contesto evolutivo delle radiogalassie, le radiosorgenti JSS sono comunemente interpretate secondo tre principali scenari fisici: lo scenario di giovinezza (*youth scenario*), lo scenario di frustrazione (*frustration scenario*) e lo scenario di attività di breve durata (*short-lived scenario*).

Secondo lo *youth scenario* C. Fanti, R. Fanti et al. 1995; Readhead et al. 1994, la compattezza osservata rifletterebbe una giovane età dinamica della sorgente radio. I getti, appena innescati dall'attività dell'AGN, si troverebbero nelle prime fasi di espansione e non avrebbero ancora raggiunto le scale kiloparsec o megaparsec tipiche delle radiogalassie di tipo Fanaroff–Riley. Le misure di moti propri delle hot spot in diverse sorgenti compatte, che indicano velocità di espansione significative e tempi cinematici dell'ordine di 10^{2-4} anni, costituiscono un importante supporto osservativo a questa interpretazione. Il destino di queste sorgenti sarebbe quello di diventare comunque grandi, come le radiogalassie estese. Se le radiosorgenti compatte rappresentano semplicemente una fase iniziale dell'evoluzione delle radiogalassie estese, il numero di oggetti osservati dovrebbe essere proporzionale al tempo trascorso in quella fase evolutiva. Le osservazioni mostrano invece una frazione molto alta di radiosorgenti compatte nei campioni radio, (tipicamente compresa tra circa il 15% e il 30% della popolazione osservata), (C. P. O'Dea 1998; Snellen et al. 2000). Per spiegare il numero elevato di radiosorgenti compatte in questo scenario è necessario quindi introdurre una forte diminuzione di luminosità durante l'evoluzione in radiosorgente estesa (C. Fanti, R. Fanti et al. 1995; Snellen et al. 2000).

Lo *frustration scenario* proposto da (Breugel et al. 1984) attribuisce invece le dimensioni ridotte a un confinamento dinamico esercitato dal mezzo interstellare della galassia ospite. In presenza di un ambiente particolarmente denso o turbolento, il getto potrebbe essere rallentato o ostacolato nella sua propagazione, impedendo alla sorgente di svilupparsi su larga scala. In questo contesto, le sorgenti piccole avrebbero età comparabili con quelle grandi, e rimarrebbero confinate a dimensioni minime a causa della incapacità di vincere il confinamento di un mezzo particolarmente denso. Varie osservazioni alla ricerca di un ISM particolarmente denso (C. Fanti, Pozzi et al. 2000; Siemiginowska et al. 2005; Vink et al. 2006) non hanno rivelato differenze significative tra le host galaxies di sorgenti compatte e di sorgenti estese.

Infine, lo *short-lived scenario* attualmente considerato il più convincente (Orienti et al. 2020) ipotizza che una frazione delle radiosorgenti compatte sia caratterizzata da un'attività radio intrinsecamente breve o intermittente. In questo quadro, il getto si spegnerebbe prima di riuscire a propagarsi su scale superiori a qualche kiloparsec , impedendo l'evoluzione verso una radiogalassia estesa.

1.2 Jet redirection: estensione dello scenario della frustrazione

Osservazioni VLBI ad alta risoluzione hanno evidenziato in diverse radiosorgenti JSS la presenza di componenti compatibili con moti trasversali delle hot_spot e strutture parsec-scale complesse, difficilmente spiegabili con un modello di espansione puramente radiale. In particolare, la presenza di curvature dei getti, morfologie a forma di S, estensioni trasversali rispetto all'asse principale e apparenti spostamenti laterali delle regioni terminali suggerisce che la direzione del getto possa variare nel tempo.

Accanto agli inquadramenti evolutivi tradizionali, Stanghellini et al. 2025 hanno proposto un'interpretazione, per almeno una frazione delle radiosorgenti JSS, che si inserisce nell'ambito dello *frustration scenario*, introducendo tuttavia un elemento dinamico, la *jet redirection*, in grado di spiegare il confinamento delle sorgenti compatte anche in assenza di un mezzo interstellare eccezionalmente denso.

In questo scenario evolutivo, il getto non si propaga lungo una direzione stabile e persistente, ma subisce variazioni di orientazione nel tempo, causato da un moto di precessione dell'asse del getto, con un periodo di precessione dell'ordine di 10^3 - 10^4 anni, causato da processi dinamici legati all'evoluzione del sistema centrale, o in alternativa dal moto orbitale dell'AGN radio, in presenza di un buco nero doppio o binario.

Un elemento cruciale per questa ipotesi è il contesto ambientale. Numerose radiosorgenti JSS risultano ospitate in galassie morfologicamente disturbate o in fase di merging (Christopher P. O'Dea et al. 2021), dove è appunto possibile che si formino coppie centrali di buchi neri supermassicci (SMBH) immerse in una distribuzione di gas altamente disomogenea e dinamicamente attiva.

In tali sistemi, la presenza di buchi neri supermassicci doppi o binari, con separazione rispettivamente maggiore o minore di 1 pc (De Rosa et al. 2019), può indurre precessione dell'asse del getto dell'AGN radioemittente a causa della perturbazione del buco nero secondario, causando una continua variazione nella direzione di impatto del getto e quindi nella posizione dell'hot_spot. Il confinamento dei getti su scale del parsec può essere quindi dovuto al loro continuo reindirizzamento. A differenza dei getti più stazionari, che riescono a perforare efficacemente il mezzo interstellare (ISM) e a propagarsi oltre le regioni centrali della galassia ospite, un getto in veloce precessione ed ampi angoli distribuisce quantità di moto ed energia su un volume significativamente più esteso. Questo meccanismo può impedire l'apertura di un canale stabile nel mezzo circostante, anche in presenza di densità moderate, e la radiosorgente rimane confinata all'interno della galassia ospite.

Lo schema qualitativo dello scenario della *jet redirection* è illustrato in Fig. 1.1, (presentata nell'articolo di Stanghellini et al. 2025) dove sono mostrati i casi ideali

di reindirizzamento del getto causato da precessione o dal moto orbitale dell'AGN. La figura evidenzia graficamente come tali processi possano produrre morfologie irregolari, strutture a S ed estensioni trasversali dei getti.

E' importante osservare che in presenza di un getto in precessione, effetti di proiezione possono generare moti apparenti verso l'esterno in una frazione delle sorgenti. Inoltre, lo scenario di ridirezione del getto prevede che alcune radio-sorgenti possano mostrare una contrazione apparente, anch'essa riconducibile a effetti geometrici. L'identificazione e la caratterizzazione sistematica di tali casi rappresentano quindi un passaggio importante per discriminare tra i diversi scenari evolutivi e per comprendere l'origine delle morfologie radio compatte.

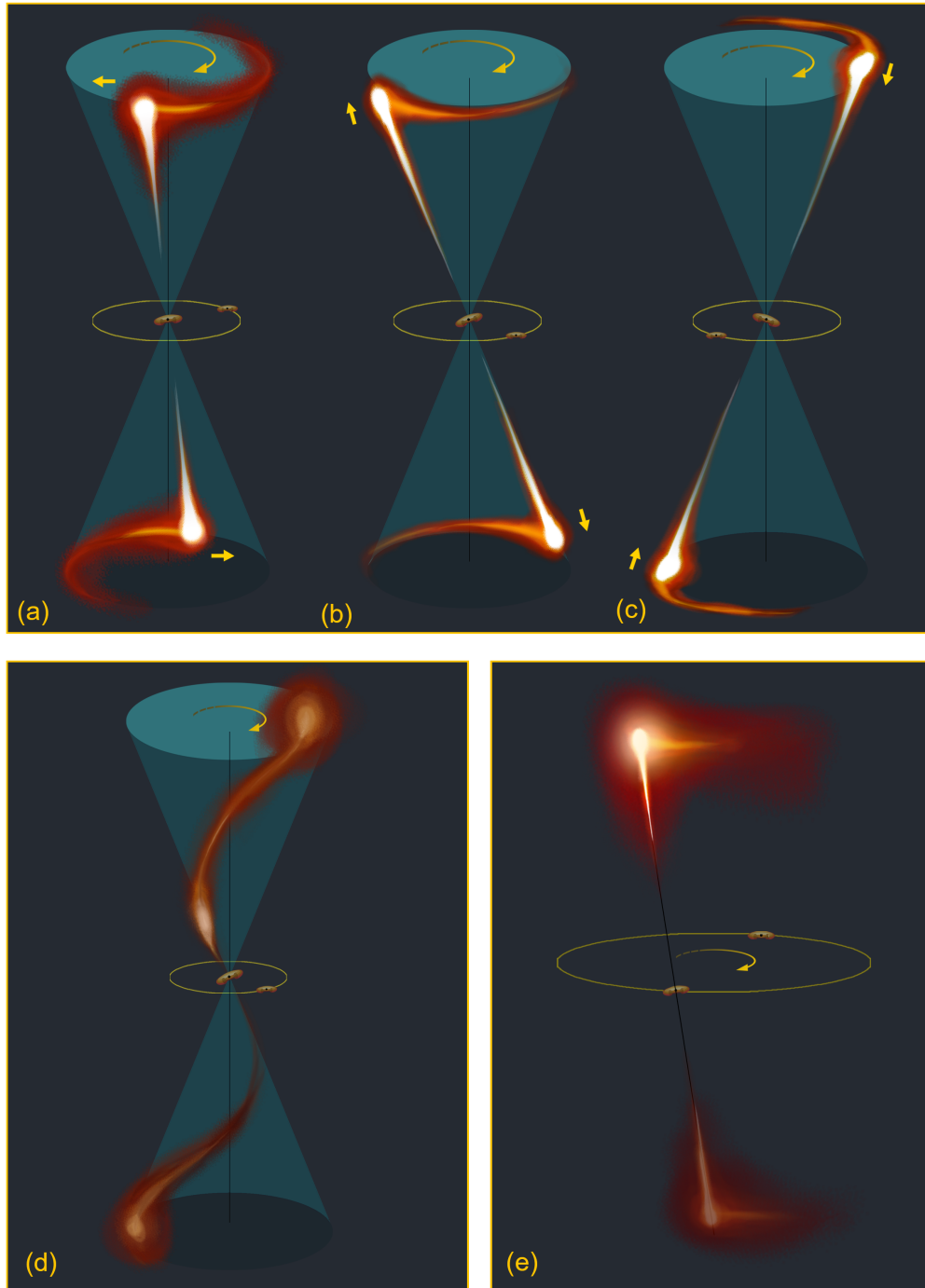


Figura 1.1: Immagine acquisita dall'articolo di Stanghellini et al. 2025 [Illustrazione di Luca Jerrert Rossi] Scenario di reindirizzamento del getto. Pannello superiore: la precessione del getto da sola determina la morfologia osservata, con moti trasversali (a), di espansione (b) o di contrazione (c) sul piano del cielo, risultanti da effetti geometrici e di proiezione. Il pannello (d) rappresenta il caso di un getto in precessione con un periodo più breve (o comparabile) rispetto al tempo di percorrenza del getto dal nucleo all'hot_spot. Nel pannello (e) il moto orbitale dell'AGN radio-loud da solo determina la morfologia osservata. L'immagine non è in scala ed è solo a scopo illustrativo.

1.2.1 Periodo di precessione e confinamento della sorgente

La relazione tra il periodo di precessione del getto e i tempi dinamici di propagazione del plasma relativistico rappresenta un elemento centrale per comprendere il confinamento delle radiosorgenti JSS.

Nelle grandi radiogalassie estese, fenomeni di precessione del getto sono ben documentati e possono produrre strutture a forma di S o lobi leggermente curvati. Lo studio di (—)Krause2019} ha trovato forti evidenze di precessione del getto in circa tre quarti del campione di radiogalassie FR II analizzato, con periodi stimati dell'ordine di 10^6 - 10^7 anni.

La presenza di precessione in radiogalassie di grandi dimensioni potrebbe apparire in contraddizione con quanto discusso nei paragrafi precedenti. In realtà, in tali sistemi il periodo di precessione risulta tre ordini di grandezza più lungo dei periodi di precessione menzionati precedentemente per le radiosorgenti JSS. Di conseguenza, il getto riesce comunque a scavare un canale preferenziale nel mezzo interstellare e a sviluppare lobi estesi, mentre la variazione dell'asse produce soltanto un cambiamento morfologico su larga scala. Le simulazioni idrodinamiche tridimensionali di (Horton et al. 2020) dimostrano infatti che un periodo di precessione più breve comporta una crescita più lenta della sorgente radio.

Inoltre, i getti in precessione nelle radiogalassie estese sono stati recentemente modellati da (Nolting et al. 2023), i quali hanno mostrato come una precessione con ampio angolo può rallentare in modo sostanziale la crescita complessiva della sorgente. L'angolo di precessione risulta pertanto un altro parametro cruciale nel determinare l'espansione della radiosorgente, con angoli ampi che tendono a mantenerla più compatta.

Studi osservativi di (An et al. 2012; Stanghellini et al. 2009a, 2025) hanno riportato, seppur con una discreta incertezza e su campioni ancora limitati, periodi di precessione dell'ordine di 10^3 anni nelle radiosorgenti JSS. Pur tenendo conto dell'elevata incertezza associata a tali stime e della bassa statistica disponibile, i risultati suggeriscono quindi che il periodo di precessione dell'asse del getto nelle radiosorgenti JSS possa essere da 10^2 a 10^3 volte più breve rispetto a quello tipicamente stimato per le radiosorgenti FR II.

Simulazioni numeriche di Yu 2002 indicano che, dopo un merger, i periodi orbitali di sistemi binari di SMBH, individuati come i sistemi fisici che producono la precessione, possono collocarsi nell'intervallo 10^4 - 10^5 anni. Valori compatibili con le scale temporali di precessione stimate per alcune radiosorgenti JSS (Stanghellini et al. 2025).

Simulazioni più recenti mostrano inoltre che i tempi di coalescenza di sistemi binari di buchi neri supermassicci possono variare tra 10^8 e 10^{12} anni (Chen et al. 2020). Ciò implica che, qualora la presenza di un sistema duale o binario contribuisca a modificare la propagazione del getto, il sistema centrale e quindi anche la radiosorgente compatta eventualmente associata potrebbe persistere per tempi comparabili a quelli delle radiogalassie estese.

Capitolo 2

Elaborazione dati VLBA

2.1 Archivio NRAO/VLBA

Il VLBA è un interferometro costituito da dieci antenne distribuite sul territorio degli Stati Uniti e operante in modalità VLBI (Very Long Baseline Interferometry). Grazie alle sue lunghissime basi interferometriche, esso consente di raggiungere risoluzioni angolari dell'ordine del milliarcosecondo, risultando particolarmente adatto allo studio morfologico e cinematica di radiosorgenti compatte come le JSS.

I dati osservativi utilizzati in questo lavoro sono stati reperiti dall'archivio pubblico del **National Radio Astronomy Observatory (NRAO)** (<https://science.nrao.edu/>), che raccoglie e rende disponibili le osservazioni effettuate con gli strumenti radio dell'osservatorio, tra cui il **Very Long Baseline Array (VLBA)**.

L'**archivio NRAO** consente l'accesso ai dati osservativi una volta trascorso il periodo proprietario previsto per ciascun progetto (generalmente di un anno). L'interfaccia web permette di effettuare ricerche selezionando diversi parametri, tra cui:

- nome della sorgente o coordinate celesti;
- codice progetto osservativo;
- epoca dell'osservazione;
- banda o frequenza di osservazione;
- configurazione strumentale.

Per ciascun progetto sono disponibili i dati osservativi, tipicamente in formato **FITS-IDI** (Flexible Image Transport System – Interferometry Data Interchange) o **UVFITS**, compatibili con i principali software di elaborazione dati interferometrici (AIPS, CASA, DIFMAP).

Il formato FITS-IDI è specificamente progettato per contenere dati di visibilità interferometriche, metadati osservativi e informazioni tecniche. Esso include:

- le **visibilità complesse** campionate nel piano UV ;

- le informazioni temporali delle osservazioni;
- la struttura in frequenza (bande, IF, canali);
- la tabella delle antenne, contenente le posizioni delle stazioni;
- le tabelle di calibrazione, quali **TY** (System Temperature) e **GC** (Gain Curve), quando disponibili.

2.1.1 Dati osservativi VLBA dall'archivio NRAO per le sorgenti J1335+5844 e J1511+0518

La disponibilità di dataset multi-epoca nell'archivio NRAO rappresenta un elemento fondamentale per studi dinamici sulle radiogalassie, permettendo di ricostruire l'evoluzione temporale delle componenti radio su archi temporali pluridecennali.

Per la realizzazione della presente ricerca sono state acquisite dall'archivio delle osservazioni VLBA a 8 GHz per le radiosorgenti J1335+5844 e J1511+0518.

Osservazioni VLBA selezionate per J1335+5844

Per lo studio della dinamica della radiosorgente JSS J1335+5844 sono stati utilizzati dati VLBA a 8 GHz appartenenti a diverse epoche, che coprono un intervallo temporale compreso tra il 1994 e il 2025.

Una parte dei dati VLBA è stata precedentemente elaborata e presentata nell'articolo di An et al. 2012; tali dati sono stati acquisiti dall'archivio e rianalizzati nel presente lavoro al fine di avere un set di immagini prodotto in maniera omogenea. Per estendere il più possibile la copertura temporale, sono stati individuati nell'archivio NRAO ulteriori dataset VLBA relativi a epoche non incluse nello studio di An et al. 2012. In Tabella 2.1 sono elencati i progetti individuati nei quali la radiosorgente J1335+5844 è stata osservata.

Tabella 2.1: Osservazioni VLBA 8 GHz acquisite per la radiosorgente J1335+5844.

| Epoca | Codice progetto VLBA |
|------------|----------------------|
| 1994-12-21 | BR026 |
| 2010-08-05 | BO035B |
| 2014-12-20 | BG219 |
| 2017-02-25 | UF001 |
| 2023-10-23 | UC003LV |
| 2025-09-09 | UC003XD |

Osservazioni VLBA selezionate per J1511+0518

Per lo studio della dinamica della radiosorgente JSS J1511+0518 sono state considerate le osservazioni disponibili nel database del progetto MOJAVE (Lister

et al. 2018), che fornisce dati VLBA già calibrati a 15 GHz per diverse epoche comprese tra il 2005 e il 2025.

Al fine di analizzare il comportamento della sorgente a frequenze differenti, sono stati inoltre ricercati nell'archivio NRAO dati VLBA a 8 GHz e a 22 GHz. In Tabella 2.2 sono riportati i progetti individuati a 8 GHz, mentre in Tabella 2.3 quelli a 22 GHz.

I dati acquisiti sono stati elaborati secondo le modalità descritte nei paragrafi successivi. Le osservazioni a 22 GHz non sono state tuttavia incluse nell'analisi dinamica finale a causa della loro scarsa affidabilità.

L'elenco completo delle epoche e delle componenti analizzate a 15 GHz (MOJAVE) e a 8 GHz è riportato nelle Tabelle 5.4 e 5.5 nel Capitolo 5.4.

Tabella 2.2: Osservazioni VLBA 8 GHz acquisite per la radiosorgente J1511+0518.

| Epoca | Codice progetto VLBA |
|------------|----------------------|
| 2005-05-03 | BY020 |
| 2006-04-05 | BL137C |
| 2006-07-21 | BO025E |
| 2022-07-15 | BS298 |
| 2022-08-19 | BS298 |

Tabella 2.3: Osservazioni VLBA 22 GHz acquisite per la radiosorgente J1511+0518.

| Epoca | Codice progetto VLBA |
|------------|----------------------|
| 2002-01-02 | BD77k |
| 2006-07-22 | BO25k |
| 2023-09-08 | UC003KZ |

2.2 Calibrazione dei dati VLBA in AIPS

L'obiettivo della fase di analisi dei dati è la rimozione sistematica degli effetti strumentali, geometrici e atmosferici che alterano le visibilità osservate, apportando correzioni in modo che esse riproducano nel modo più fedele possibile le visibilità intrinseche della sorgente. Nel formalismo interferometrico, la visibilità complessa osservata su una baseline tra le antenne i e j può essere scritta come:

$$V_{ij}^{\text{obs}}(t) = G_i(t) G_j^*(t) V_{ij}^{\text{true}}(t) + n_{ij}(t), \quad (2.1)$$

dove G_i e G_j rappresentano i guadagni complessi (ampiezza e fase) antenna-dipendenti, detti anche gain, e n_{ij} il contributo di rumore. La calibrazione consiste quindi nella determinazione più accurata possibile dei termini $G_i(t)$. I gain sono grandezze complesse costituite da un termine di ampiezza e uno di fase che si possono gestire anche separatamente.

La calibrazione dei dati interferometrici VLBA è stata eseguita in ambiente AIPS (Astronomical Image Processing System), seguendo la procedura “step-by-step” descritta nell’appendice dedicata alla calibrazione VLBA nell’AIPS Cookbook (National Radio Astronomy Observatory 2019), basata sulle utility VLBAUTIL.

La filosofia di calibrazione di AIPS è di tipo incrementale. In tale approccio, i singoli passi di calibrazione producono soluzioni incrementali che vengono salvate in tabelle dedicate, garantendo tracciabilità e possibilità di ripetere o correggere i singoli passaggi senza alterare irreversibilmente i dati.

Ogni task di calibrazione produce una tabella di soluzioni (SN) con numerazione progressiva, contenente esclusivamente le correzioni stimate in quello specifico passaggio. Tali soluzioni vengono successivamente combinate con la tabella di calibrazione del passaggio precedente generando una nuova tabella CL (numerata progressivamente) che include tutte le correzioni applicate fino a quel punto e costituisce la base per la produzione dei dati calibrati finali tramite il task SPLIT che separa i dati delle diverse sorgenti inizialmente nello stesso file, per facilitare il trasferimento delle correzioni dalle sorgenti di calibrazione a quelle target.

Caricamento e preparazione dei dati

I dataset, scaricati dall’archivio NRAO in formato FITS-IDI/UVFITS, sono stati importati in AIPS tramite VLBALOAD e successivamente preparati per la calibrazione mediante VLBAFIX, verificando la corretta indicizzazione temporale, la consistenza delle antenne partecipanti e la struttura delle frequenze. VLBAFIX implementa le azioni per la preparazione del dataset (sorting, indicizzazione, gestione di subarray e correzioni di struttura), in modo da rendere i dati pronti per la calibrazione successiva.

Correzioni geometriche e ionosferiche

Sono stati applicati gli aggiornamenti dei parametri di Earth Orientation tramite VLBAEOPS, riducendo possibili errori sistematici nella modellizzazione del ritardo geometrico poichè i parametri di orientazione terrestre (EOP) vengono raffinati a posteriori. Alle frequenze inferiori a qualche GHz gli effetti dispersivi della ionosfera possono introdurre ritardi addizionali, dipendenti dal quadrato della lunghezza d’onda per cui è stata applicata la correzione ionosferica tramite VLBATECR, che scarica in modo automatico i parametri di correzione basati su modelli del contenuto elettronico totale (TEC).

Calibrazione dell’offset dei campionatori dei correlatori

La calibrazione è stata effettuata mediante VLBACCOR, per correggere eventuali offset dei campionatori del correlatore. La procedura VLBACCOR esegue ACCOR, SNSMO. ACCOR utilizza l’autocorrelazione per correggere gli offset di tensione dei campionatori. Dopo che ACCOR ha creato una tabella SN, SNSMO ne verifica i dati per rimuovere eventuali punti anomali (outlier).

Ispezione dati e eventuale rimozione di quelli di scarsa qualità

Dopo le calibrazioni precedentemente descritte è stata effettuata un'ispezione con il task POSSM che mostra, baseline per baseline e sorgente per sorgente, ampiezze e fasi su tutto l'intervallo di frequenze al fine di verificare la qualità dei dati. In alcuni casi si sono osservati andamenti anomali all'inizio o alla fine delle finestre spettrali (canali): tali dati sono stati rimossi mediante UVFLG, limitando il flagging alle regioni affette da scarsa qualità dei dati.

Fringe fitting

La rimozione degli errori residui di fase, dipendenti da tempo e frequenza, è stata effettuata tramite fringe fitting globale utilizzando la procedura VLBAFRNG, basata sul task FRING. Nel formalismo interferometrico, la fase osservata su una baseline può essere scritta come

$$\Phi_{ij}^{\text{obs}}(t) = \Phi_{ij}^{\text{true}}(t) + \theta_i(t) - \theta_j(t), \quad (2.2)$$

dove $\theta_i(t)$ e $\theta_j(t)$ rappresentano gli errori di fase antenna-based. Il fringe fitting consente di stimare tali contributi e di rimuoverli dalle visibilità. La robustezza del metodo è legata al vincolo sulle quantità di chiusura: la closure phase su una terna di antenne (i, j, k) ,

$$C_{ijk} = \Phi_{ij} + \Phi_{jk} + \Phi_{ki}, \quad (2.3)$$

è indipendente dagli errori antenna-based, garantendo la convergenza del processo di calibrazione.

La rimozione delle pendenze di fase è stata sempre controllata con il task POSSM.

Calibrazione banda passante

Dopo il fringe fitting, è stata eseguita la calibrazione del bandpass tramite VLBABPSS, necessaria per correggere variazioni di ampiezza lungo la banda osservativa dovuta alla risposta non lineare del filtro in frequenza. La bontà delle soluzioni è stata verificata mediante ispezione dei dati con il task POSSM.

Calibrazione a-priori

Infine è stata eseguita la calibrazione a-priori delle ampiezze con VLBAAMP, basata sulle temperature di sistema (T_{sys}) e sulle curve di guadagno delle antenne. La procedura VLBAAMP include anche una correzione della normalizzazione delle autocorrelazioni (ACSCL) e produce nuove tabelle SN/CL. In questa fase le ampiezze osservate vengono scalate utilizzando le informazioni di T_{sys} e delle gain curve delle antenne i e j , secondo

$$Amp_{\text{corr}} = Amp_{\text{oss}} \sqrt{\frac{T_{\text{sys},i} T_{\text{sys},j}}{GC_i GC_j}},$$

dove Amp_{oss} è l'ampiezza osservata, $T_{\text{sys},i}$ e $T_{\text{sys},j}$ sono le temperature di sistema delle due antenne del baseline e GC_i e GC_j rappresentano i valori delle rispettive gain curve.

Applicazione finale ed esportazione

Completate tutte le fasi di calibrazione, le soluzioni cumulative sono state applicate alle visibilità tramite `SPLIT`, generando dataset calibrati per la singola sorgente.

I dati così ottenuti sono stati esportati da `AIPS` in formato `UVFITS` e analizzati con il software `DIFMAP` (Shepherd 1997). La scelta di `DIFMAP` è stata motivata dal suo ambiente interattivo per l'hybrid mapping, che consente cicli iterativi di `CLEAN` e self-calibration e fornisce strumenti flessibili per il model fitting nel piano UV.

Pipeline di calibrazione adottata in AIPS

1. `VLBALOAD` – caricamento dei dati FITS;
2. `VLBAFIX` – preparazione e indicizzazione;
3. `VLBAEOPS` – correzione EOP;
4. `VLBATECR` – correzione ionosferica;
5. `VLBACCOR` – correzione sampler offsets;
6. `POSSM` – controllo spettrale;
7. `UVFLG` – eventuale flagging selettivo;
8. `VLBAFRNG` – fringe fitting globale;
9. `VLBABPSS` – calibrazione di banda;
10. `VLBAAMP` – calibrazione in ampiezza;
11. `SPLIT` – applicazione finale delle soluzioni;
12. Export in `UVFITS` → analisi in `DIFMAP`.

2.3 Hybrid mapping in DIFMAP

I dataset calibrati in `AIPS` e successivamente esportati in formato `UVFITS` sono stati analizzati in ambiente `DIFMAP` (Shepherd1997), dove sono state eseguite:

- la procedura di hybrid mapping;
- il model fitting nel piano UV descritto nel capitolo5 sezione5.1.

L'hybrid mapping è un procedimento iterativo che combina la ricostruzione dell'immagine della sorgente (`CLEAN`) con la self-calibration, la quale consente di ricalibrare le fasi e, se il caso, anche le ampiezze delle visibilità stimando i guadagni antenna-dipendenti. Attraverso l'alternanza tra aggiornamento del modello di sorgente e correzione delle visibilità, il processo converge progressivamente verso una soluzione coerente tra dati osservati e distribuzione di brillantezza.

Equazione delle visibilità e significato del modello

Partendo dalla teoria della diffrazione di Fraunhofer e' noto che la radioastronomia misura la trasformata di Fourier della distribuzione di brillanza del cielo che prende il nome di visibilita' di frangia V . Essa e' una funzione continua, hermitiana e appartenente al piano complesso, e che, nel caso dell'interferometro, viene campionata dalla singole baselines secondo le coordinate spaziali che le definiscono, chiamate coordinate (u,v) di un piano cartesiano, Sono rappresentate in unita' di lunghezze d'onda.

Nel piano delle frequenze spaziali UV, la visibilita' osservata su una baseline tra le antenne i e j puo' essere scritta come

$$V_{ij}^{\text{obs}} = G_i G_j^* V_{ij}^{\text{true}} + n_{ij}, \quad (2.4)$$

dove V_{ij}^{true} rappresenta la visibilita' della reale distribuzione di brillanza della sorgente, G_i e G_j sono i guadagni complessi (corruzioni dovute al sistema d'antenna) e n_{ij} il contributo di rumore.

Poiche' V_{ij}^{true} non e' direttamente nota, si introduce una visibilita' di modello V_{ij}^{mod} , ottenuta come trasformata di Fourier di una distribuzione di brillanza modello $I^{\text{mod}}(l, m)$:

$$V^{\text{mod}}(u, v) = \int \int I^{\text{mod}}(l, m) e^{-2\pi i(ul+vm)} dl dm. \quad (2.5)$$

Nel contesto dell'hybrid mapping, $I^{\text{mod}}(l, m)$ non rappresenta la clean map finale (che include residui e convoluzione con il beam), bensì il modello discreto costituito dalla somma delle clean components cioè dalle sorgenti puntiformi ideali (funzioni δ) determinate dall'algoritmo CLEAN che, sommate tra loro, approssimano la reale distribuzione di brillanza della sorgente. È tale modello matematico che viene trasformato nel piano UV per ottenere V^{mod} . Durante il processo iterativo di imaging e autocalibrazione si assume quindi che:

$$V_{ij}^{\text{obs}} \approx G_i G_j^* V_{ij}^{\text{mod}}, \quad (2.6)$$

$V_{ij}^{\text{mod}} \neq V_{ij}^{\text{true}}$, ma il modello tende progressivamente ad approssimare la distribuzione reale al convergere dell'algoritmo.

Operativamente, il processo di hybrid mapping procede nel modo seguente. A partire dalle visibilita' calibrate si costruisce una prima immagine della sorgente mediante l'algoritmo CLEAN. Il modello iniziale della distribuzione di brillanza, costituito dalle clean components ottenute durante il processo di CLEAN, viene quindi trasformato nel piano UV per ottenere le visibilita' di modello V^{mod} , utilizzate nella procedura di self-calibration.

Poi con l'autocalibrazione (self-calibration) vengono determinati i guadagni complessi G_i che minimizzano la differenza tra le visibilita' osservate V_{ij}^{obs} e quelle di modello V_{ij}^{mod} . I guadagni stimati vengono quindi applicati alle visibilita' osservate, producendo un nuovo dataset di visibilita' corrette. A partire da questo insieme di visibilita' corrette si esegue nuovamente il processo di imaging, ottenendo una nuova immagine della sorgente tramite CLEAN e un modello aggiornato di clean components. Il modello aggiornato viene quindi trasformato nel piano

UV per calcolare nuove visibilità di modello, che vengono utilizzate in un ulteriore ciclo di autocalibrazione che ridetermina i guadagni minimizzando nuovamente la differenza tra visibilità osservate e del modello. Il processo iterativo di imaging e autocalibrazione viene ripetuto fino al raggiungimento della convergenza tra il modello della sorgente e le visibilità osservate.

Funzione da minimizzare

La self-calibration determina i guadagni G_i minimizzando la quantità

$$\chi^2 = \sum_k \frac{|V_k^{\text{obs}} - G_i G_j^* V_k^{\text{mod}}|^2}{\sigma_k^2}, \quad (2.7)$$

dove l'indice k scorre tutte le visibilità osservate e σ_k rappresenta l'incertezza associata a ciascun dato.

Il parametro diagnostico utilizzato dal software per valutare la bontà della soluzione è il chi-quadro ridotto:

$$\chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{N - p}, \quad (2.8)$$

dove N è il numero di visibilità e p il numero di parametri liberi. Con il procedere delle varie iterazioni il χ_{red}^2 tende a diminuire, portando a una convergenza del processo di self-calibration.

2.3.1 Procedura di self-calibration (hybrid mapping) in DIFMAP

La procedura di self-calibration in DIFMAP è stata applicata a tutti i dataset VLBA acquisiti per le due sorgenti analizzate. Essa consiste in un processo iterativo che alterna i passaggi di CLEAN e self-calibration, ripetuti fino al soddisfacimento di specifici criteri di arresto.

Di seguito sono descritti in dettaglio i passaggi eseguiti.

1) CLEAN: costruzione del modello iniziale

La procedura ha avuto inizio con la generazione della *dirty image* e la successiva deconvoluzione tramite l'algoritmo CLEAN.

In questa fase viene costruito un modello discreto della sorgente, costituito da una somma di componenti puntiformi (clean components). Tale modello fornisce una prima approssimazione della distribuzione di brillantezza $I^{\text{mod}}(l, m)$ e costituisce la base per la successiva fase di self-calibration.

2) Self-calibration solo sulle fasi

Nel primo stadio sono state corrette esclusivamente le fasi dei gain di corruzione (*comando: selfcal*). In questa modalità si assume che la calibrazione in ampiezza, già eseguita in AIPS, sia sufficientemente accurata.

AL centro del processo di autocalibrazione ci sono le fasi poichè sono la componente de guadagni meno stabile in quanto l'atmosfera puo' introdurre delle variazioni significative, date le condizioni differenti tra i telescopi che sono distribuiti su una ampia fascia della superficie terrestre. Successivamente si calibrano le ampiezze soprattutto nel caso ci siano dei malfunzionamenti di qualche antenna.

La minimizzazione del χ^2 viene effettuata rispetto alle sole componenti di fase dei guadagni G_i , migliorando rapidamente la coerenza del dataset senza alterare la scala assoluta del flusso.

3) Self-calibration in ampiezza e fase

Una volta stabilizzata la soluzione in fase attraverso l'iterazione dei passaggi 1) e 2), è stata eseguita una self-calibration completa in ampiezza e fase, in cui vengono stimati sia il modulo sia l'argomento dei guadagni complessi G_i . Generalmente le correzioni dei guadagni sono dell'ordine di qualche percento

Questo passaggio consente di ridurre eventuali errori residui di ampiezza, migliorando il dynamic range dell'immagine. Poiché introduce un numero maggiore di parametri liberi, è stato applicato con cautela e solo dopo aver ottenuto un modello sufficientemente robusto.

Criteri di arresto iterativo

La procedura CLEAN + self-calibration è stata ripetuta fino al soddisfacimento dei seguenti criteri:

- stabilizzazione del valore del chi-quadro ridotto χ_{red}^2 ;
- noise dell'immagine compatibile con il rumore termico;
- stabilità dei parametri principali del modello tra iterazioni successive.

2.3.2 Model fitting nel piano delle visibilità

L'immagine finale ottenuta tramite hybrid mapping è stata utilizzata come punto di partenza per il model fitting nel piano UV.

In questa fase la struttura della sorgente è stata parametrizzata mediante componenti gaussiane, i cui parametri (flusso, dimensioni angolari, posizione) sono stati determinati minimizzando direttamente il χ^2 nel piano delle visibilità.

Le modalità con cui è stato realizzato il model fitting delle osservazioni delle sorgenti J1335+5844 e J1511+0518 sono descritte nella Sezione 5.1.

Capitolo 3

Gestione degli errori

3.1 Errori di un immagine radio

Una corretta stima degli errori nella misura dei parametri di una immagine radio astronomica è essenziale per determinare l'affidabilità degli stessi da usare per l'analisi scientifica. Nel nostro caso, l'attenzione era particolarmente rivolta a determinare la posizione delle componenti delle sorgenti. Possiamo suddividere gli errori in tre grandi classi:

1. **errori stocastici (rumore)** dovuti ai limiti fondamentali del radiotelescopio e della strumentazione, che producono errori stocastici con proprietà abbastanza ben conosciute;
2. **errori sistematici** causati da una varietà di difetti strumentali di imaging, che possono essere compresi o meno, o anche solo sospettati. Questi errori dovrebbero essere eliminati tramite il processo di calibrazione;
3. **errori sulla posizione** dati dal modello applicato per l'individuazione delle principali componenti della nostra sorgente.

3.1.1 Errori stocastici (rumore termico)

Il comportamento complessivo degli errori stocastici dipende dal tipo di ricevitori e dagli altri dispositivi elettronici utilizzati nell'array. Questi errori sono spesso riassunti da un unico numero: il rumore RMS dell'immagine. Per i rilevatori di tipo correlativo, utilizzati dalla maggior parte degli array di sintesi, il rumore è distribuito con una probabilità normale intorno all'intensità zero (è possibile un piccolo scostamento) avendo valor medio nullo e con un $\sigma_{noise} = RMS$ dipendente da molti parametri di osservazione e ricezione. Si osserva anche che in un'immagine radio, ad esempio ottenuta da dati del VLBA, gli errori stocastici tra due posizioni separate da più di un'ampiezza di beam sono quasi indipendenti. L'RMS delle immagini di questa ricerca è stato ottenuto in DIFMAP dall'immagine dei residui dopo la sottrazione del modello ottenuto con il task MODELFIT.

3.1.2 Errori sistematici

Gli errori sistematici, causati da una serie di problemi strumentali e di imaging. Un esempio di errore sistematico è costituito dall'origine di alcune increspature parallele nelle immagini (frange), presumibilmente dovute a qualche errore residuo di ampiezza causato da una non corrispondenza tra la misura della temperatura di sistema, che determina la calibrazione delle ampiezze, e l'effettiva performance dell'antenna. I dati acquisiti dagli archivi VLBA per questa tesi e poi calibrati sono stati eliminati gli errori sistematici dovuti alla strumentazione, alla orientazione della terra, alle ionosfera. Con queste correzioni si assume di aver eliminato tutti gli errori sistematici.

3.1.3 Errori sulla posizione

La difficoltà di stimare gli errori nella misura della posizione di una componente radio in una immagine è un problema ben noto nell'analisi di osservazioni VLBI. Per individuare le posizioni delle componenti delle sorgenti analizzate in questo lavoro di tesi si è adottato il task MODELFIT di DIFMAP. In generale con le tecniche di model-fitting, dopo aver selezionato il modello di distribuzione dell'intensità (segnale) appropriato per la componente, ad esempio una distribuzione gaussiana si determinano i parametri liberi p_j del modello. I parametri del modello sono calcolati utilizzando un griglia di l_i punti attorno alla componente. Per cui posto $M_{\text{odel}}(p_j, l_i)$ per determinare i parametri p_j e i relativi errori si utilizza il metodo della massima verosimiglianza. Se si ipotizza che gli errori siano distribuiti normalmente, il metodo è equivalente alla minimizzazione della varianza, σ^2 :

$$\sigma^2 = \sum_i (M(p_i, i) - I(i))^2 \quad (3.1)$$

Sono disponibili molte tecniche di fitting, che dipendono dalla trattabilità analitica delle funzioni del modello. La maggior parte dei metodi converge rapidamente e verso una soluzione ragionevole tramite un processo iterativo.

Individuati i parametri del fit si può fare una stima degli errori che si ottiene con un calcolo statistico. Purtroppo errori statistici determinati coi parametri di un fit, sono da considerarsi puramente come errori formali e risultano troppo piccoli ed inadeguati a descrivere l'incertezza nella posizione.(Fomalont 1999).

Inoltre gli errori sui parametri di una gaussiana che descrivono una distribuzione di brillantezza dipendono da una serie di fattori. Componenti estese e con basso flusso hanno “naturalmente” una incertezza più marcata, semplicemente perché la distribuzione di brillantezza non è particolarmente piccata, come invece potrebbe essere una componente più piccola e di flusso maggiore.

3.2 Stima degli errori di posizione

Per gli obiettivi di questo lavoro di tesi è necessario misurare la posizione delle componenti di due radiosorgenti nel corso di un lungo periodo di tempo acquisendo dati osservativi di epoche diverse. L'ideale sarebbe che le osservazioni

fossero state effettuate con la stessa configurazione dell'array e un programma di osservazione simile. Purtroppo la configurazione dell'array e il programma di osservazione, in particolare per i tempi di osservazione, differiscono a volte in maniera significativa. Però, l'uniformità delle antenne e dell'elettronica del VLBA, nonché consolidate procedure di calibrazione, garantiscono una buona consistenza dei dati. Questo è il motivo per cui si sono selezionate per le sorgenti le osservazioni fatte con il VLBA. Le sorgenti oggetto della ricerca contengono comunque componenti ben identificabili tracciabili su più epoche e le cui caratteristiche essenziali possono essere rappresentate da pochi parametri. L'analisi è stata condotta nel piano della visibilità di Frangia, modellando le strutture più brillanti di ciascuna sorgente mediante componenti gaussiane bidimensionali utilizzando il task MODELFIT di DIFMAP (Shepherd 1997) come descritto all'inizio del capitolo 5. I parametri che modellizzano le componenti sono :FLUSSO, MAJORFWHM, AXIALRATIO, PHI). Il fit delle componenti direttamente nel dominio delle visibilità permette di distinguere meglio eventuali componenti vicine. Questo specialmente nel caso, come accade per i nostri oggetti, in cui la struttura della radiosorgente può essere ben descritta da un numero limitato di componenti compatte e brillanti. La stima degli errori di posizione ha grande importanza in questo lavoro poiché l'obiettivo è un'analisi cinematica del movimento di alcune componenti delle radiosorgenti nel corso degli anni. Movimenti che essendo dell'ordine dei [mas] o più spesso decimi di [mas] possono essere dello stesso ordine di grandezza degli errori.

3.2.1 Stima degli errori delle componenti della sorgente

Le stime degli errori ottenute direttamente dai modelli di fit devono essere considerate con prudenza (Fomalont 1999). Generalmente si presume che gli errori dell'immagine siano stocastici e indipendenti dalle altre componenti, ma tale presupposto potrebbe non essere sempre valido. Una stima dell'incertezza posizionale è fornita da Fomalont 1999, la cui espressione può essere scritta come:

$$\sigma = \frac{FWHM}{2 \cdot SNR} \quad (3.2)$$

dove σ è l'incertezza posizionale monodimensionale rispetto a un punto di riferimento, FWHM è la larghezza a metà altezza della dimensione apparente (predeconvoluta) della componente e SNR è il rapporto segnale-rumore. Per i nostri casi dove il task MODELFIT fornisce le dimensioni deconvolute delle componenti, calcoleremo separatamente il contributo all'incertezza dato dalla dimensione deconvoluta e dal beam e li sommeremo quadraticamente. Tuttavia, questa espressione può comunque portare a una sottostima degli errori per componenti con SNR molto elevato.

Secondo Lister et al. 2009 la determinazione degli errori sui parametri del modello delle singole componenti gaussiane nelle immagini VLBA è un problema complesso, a causa delle dipendenze non lineari dalla copertura interferometrica dell'array, dal rumore termico e dalla presenza di altre strutture nelle vicinanze delle componenti che, a volte, possono risultare parzialmente sovrapposte. Spesso esiste una forte correlazione tra il valore integrale del flusso e i diametri delle

componenti. Quando si fa il "fitting" con diverse componenti, c'è il rischio che i parametri non siano ben separati e gli errori associati diventano più grandi di quanto calcolato con l'espressione 3.2. Per componenti isolate, Lister et al. (2009) dichiara che gli studi fatti nell'ambito del progetto MOJAVE, suggeriscono di adottare errori tipici del 5% sui flussi totali delle componenti e le incertezze posizionali sono almeno il 5% della dimensione del beam di ricostruzione dell'immagine. Per questo motivo, in questa ricerca è stato posto un limite inferiore conservativo 1/20 del Beam nella stima dell'incertezza posizionale in modo da evitare di sottostimare gli errori nei casi di SNR elevato, rafforzando l'affidabilità della stima degli errori.

Tenendo in considerazione che l'incertezza della posizione di una componente nell'immagine dipende dalla risoluzione angolare delle osservazioni e dalla dimensione stessa della componente, l'incertezza sarà dominata dalla risoluzione angolare o dalla dimensione della componente a seconda che questa sia molto più piccola o molto più grande della risoluzione angolare. Gli errori basati sulle dimensioni del fit e sul beam di ricostruzione dell'immagine adottando l'approccio di Fomalont (1999) saranno quindi:

$$\sigma_{\text{fit}}^{\text{Fomal}} = \frac{MFIT_FWHM}{2 \cdot SNR}, \quad \sigma_{\text{beam}}^{\text{Fomal}} = \frac{BEAM_FWHM}{2 \cdot SNR} \quad (3.3)$$

Questa espressione descrive correttamente la dipendenza dell'errore dalla risoluzione (beam) e dalla dimensione della componente (fit) rispetto al rapporto segnale-rumore (SNR), ma tende a sottostimare le incertezze nel caso di componenti con SNR molto elevato. Per ovviare a questa criticità si applica una soglia minima al calcolo degli errori sul fit e sul beam tenendo quindi in considerazione quanto scritto da Lister et al. (2009). Se gli errori calcolati con 3.3 risultano inferiori a $\frac{1}{20}$ del beam si assume che l'errore sia uguale a $\frac{1}{20}$ di Beam (sia per il fit che per il beam). Infine l'incertezza finale sulla posizione è data dalla somma in quadratura degli errori dovuti alla dimensione e di quelli dovuti al beam.

$$\sigma = \sqrt{(\sigma_{\text{fit}}^{\text{Fomal}})^2 + (\sigma_{\text{beam}}^{\text{Fomal}})^2} \quad (3.4)$$

Come vedremo nel prossimo capitolo gli errori saranno calcolati nelle componenti cartesiane sugli assi X=ascensione retta e Y=declinazione.

Successivamente al ricalcolo delle coordinate dovute alla selezione di una componente di riferimento si procederà con il calcolo degli errori di posizione, distanza e angolo tramite le formule di propagazione degli errori.

Infine forzando ad 1 il valore del χ_{red}^2 risultante dalla interpolazione lineare dei dati per il moto *distance/epoch*, *angle/epoch* e *flux/epoch* (descritti nella sezione 4.5), otteniamo una calibrazione statistica degli errori sulla dispersione reale dei dati rispetto al modello di interpolazione assumendo che questo sia quello corretto. Questo confronto risulta essere particolarmente utile per analizzare gli errori in set osservativi multi epoca.

Per quanto riguarda gli errori sul flusso, nei nostri casi sono dominati dall'incertezza nella calibrazione delle ampiezze e sono stimati del 10%.

3.2.2 Propagazione degli errori

Nelle osservazioni VLBI non pianificate specificamente per l'astrometria, manca la posizione assoluta delle componenti nel cielo, e generalmente si misurano le posizioni rispetto ad un punto di riferimento nell'immagine. La posizione iniziale di riferimento dei dati è il puntamento del radiotelescopio che di solito non corrisponde ad alcune componente ottenuta con il processo di model fitting gaussiano, la cui posizione è modificata in modo arbitrario dal processo di hybrid mapping. Nelle nostra analisi è però importante riferire le componenti per tutte le epoche di cui si hanno i dati ad una componente che diventa di riferimento e che si ritiene opportuna per l'analisi dinamica della sorgente. Si dovranno quindi ricalcolare le coordinate delle componenti e poi gli errori rispetto alla componente scelta come riferimento. Si tratta di utilizzare le formule di propagazione degli errori per ottenere per tutte le componenti:

- l'errore di posizione avendo spostato il centro di riferimento sul piano del cielo;
- l'errore sulla distanza delle componenti dalla componente di riferimento;
- l'errore sull'angolo rispetto alla nuova origine data dalla componente di riferimento.

3.2.3 Riscalatura degli errori nei grafici con χ_{red}^2

Nel già citato articolo di Lister et al. 2009 è proposta la stima delle incertezze posizionali a partire dalla dispersione delle posizioni misurate attorno alla retta di regressione del moto proprio, assumendo valido un modello di interpolazione lineare. I dati di ciascuna componente vengono inizialmente pesati in modo uniforme e successivamente rinormalizzati imponendo che il valore di χ^2 sia pari al numero di gradi di libertà del fit o il χ^2 ridotto uguale a 1 . Questo metodo, pur non consentendo una verifica statistica dell'adeguatezza del modello, fornisce stime robuste delle incertezze, poiché riflette direttamente la dispersione osservata nei dati multi-epoca. E' interessante notare che Lister et al. (2009) per le loro osservazioni VLBA a 15 GHz trovano che l'incertezza posizionale più probabile per i componenti del getto è compresa tra 0.04 e 0.06 mas, con il 68% dei casi al di sotto di 0.12 mas. Nel nostro lavoro abbiamo impostato il ricalcolo degli errori utilizzando il χ_{red}^2 che si può applicare in fase di creazione dei grafici. A differenza dell'approccio di Lister et al. (2009) si è scelto di utilizzare un modello di interpolazione lineare pesata weighted Least Squares (WLS) poiché le singole misure sono caratterizzate da incertezze eterogenee. In questo formalismo ciascun punto contribuisce al fit in proporzione alla propria affidabilità statistica. A ciascuna osservazione y_i effettuata all'epoca x_i è associato un peso

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (3.5)$$

dove σ_i rappresenta l'incertezza stimata sul singolo punto osservativo per la componente che si sta esaminando. Questa scelta dei pesi deriva direttamente dal

principio di massima verosimiglianza nel caso di errori gaussiani e indipendenti. Il modello di interpolazione è una legge lineare del tipo

$$f(x) = a + bx, \quad (3.6)$$

dove a rappresenta l'intercetta e b la pendenza, fisicamente interpretabile come tasso di variazione temporale (velocità) del parametro osservato. I valori di a e b sono ottenuti rendendo minima la funzione chi-quadro:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N w_i [y_i - (a + bx_i)]^2, \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (3.7)$$

che conduce alle ben note equazioni dei minimi quadrati pesati. Questo approccio consente di ottenere stime robuste dei parametri del modello, riducendo l'influenza delle misure caratterizzate da grandi incertezze. La bontà dell'interpolazione è valutata tramite il chi-quadro ridotto

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{N - p}, \quad (3.8)$$

dove N è il numero di osservazioni e p il numero di parametri liberi del modello. Nel caso del fit lineare adottato in questo lavoro, i parametri liberi sono due (a e b), per cui si assume $p = 2$. Il valore di χ_{red}^2 fornisce un'indicazione sintetica del grado di coerenza tra la dispersione osservata dei dati e le incertezze assegnate alle singole misure. In particolare:

- $\chi_{\text{red}}^2 \simeq 1$ indica che la dispersione dei dati attorno al modello è compatibile con gli errori stimati;
- $\chi_{\text{red}}^2 > 1$ suggerisce una sottostima delle incertezze o la presenza di una dispersione intrinseca non descritta dal modello lineare;
- $\chi_{\text{red}}^2 < 1$ può indicare una sovrastima degli errori o la presenza di correlazioni tra i dati che riducono il numero effettivo di gradi di libertà.

Calcolato il χ_{red}^2 le incertezze vengono rinormalizzate imponendo $\chi_{\text{red}}^2 \simeq 1$, mediante una riscalatura globale degli errori:

$$\sigma'_i = \sigma_i \sqrt{\chi_{\text{red}}^2}. \quad (3.9)$$

Questa procedura non modifica i valori stimati di a e b , dell'interpolazione lineare ma consente di ottenere una stima più realistica delle loro incertezze, in accordo con la dispersione effettivamente osservata nei dati multi-epoca.

Questo metodo consente di combinare una stima fisicamente motivata delle incertezze relative con una calibrazione statistica basata sulla dispersione reale dei dati, risultando particolarmente adatto all'analisi di set osservativi eterogenei.

3.3 Calcolo e propagazione degli errori nel modulo `errors_fwhm.py`

Il modulo `errors_fwhm.py` è parte del software di analisi dati realizzato nel corso di questo lavoro di tesi ed illustrato nel capitolo 4. Si anticipa in questo capitolo la descrizione di questo modulo software è implementata una procedura completa per la stima e la propagazione delle incertezze associate alle componenti della sorgente coerentemente con quanto scritto in precedenza.

Il calcolo degli errori combina informazioni geometriche del modello di fit e del beam interferometrico con il rapporto segnale-rumore delle osservazioni, producendo incertezze finali coerenti e fisicamente significative. In particolare, il modulo:

- calcola le componenti cartesiane di errore del modello di fitting gaussiano (`modelFit`);
- calcola le componenti cartesiane di errore del beam interferometrico;
- stima gli errori in funzione del SNR del beam e del fit (metodo di Fomalont);
- applica vincoli minimi per evitare una sottostima degli errori ;
- combina gli errori cartesiani del fit e del beam in quadratura per ottenere un stima finale di σ_x e σ_y ;
- propaga gli errori dopo il ricalcolo delle coordinate per ottenere le incertezze cartesiane di posizione e nelle coordinate polari per avere gli errori sulla distanza relativa e sull'angolo σ_R e σ_θ .

Per ciascuna riga del database (componente osservata a una data epoca) si adottano le seguenti grandezze:

- R : distanza radiale della componente dal riferimento del `modelFit` (mas);
- θ : angolo di posizione dal riferimento del `modelFit` (deg);
- F : flusso della componente (Jy);
- RMS : rumore termico dalla mappa dei residui del `modelFit` (mJy/beam);
- σ_x, σ_y : incertezze cartesiane finali sulla posizione (mas).

In conclusione il modulo `errors_fwhm.py` fornisce una stima robusta e coerente degli errori, combinando contributi di fit e beam scalati dal rapporto segnale-rumore, imponendo vincoli fisici minimi determinati dal beam e propagando le incertezze utilizzando le opportune trasformazioni geometriche e le formule di propagazione degli errori.

3.3.1 Componenti cartesiane del ModelFit

Il task MODELFIT in DIFMAP produce delle componenti ellittiche, circolari o puntiformi caratterizzate dai valori di FWHM e dall'angolo di orientazione. Ovviamente le componenti puntiformi sono delle δ di Dirac. I parametri che descrivono le componenti sono :

- MAJORFWHM: asse maggiore;
- AXIALRATIO: rapporto tra asse minore e maggiore;
- PHI: angolo di orientazione espresso in gradi. Positivo a sinistra dell'asse verticale e negativo a destra

Dalla MAJORFWHM si trova l'asse minore

$$\text{MINORFWHM} = \text{MAJORFWHM} \cdot \text{AXIALRATIO} \quad (3.10)$$

Poi si trasforma l'angolo PHI in radianti:

$$\Phi_{rad} = \text{PHI} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (3.11)$$

Quindi si calcolano le componenti cartesiane con la somma in quadratura delle proiezioni degli assi maggiore e minore: La somma in quadratura di due grandezze (o errori) è definita come la radice quadrata della somma dei loro quadrati. Viene utilizzata principalmente nella teoria degli errori per combinare incertezze casuali indipendenti, in quanto fornisce una stima più realistica e meno conservativa rispetto alla somma dei valori assoluti. Otteniamo quindi:

$$\text{MFIT_FWHM}_x = \sqrt{(\text{MAJORFWHM} \sin \Phi_{rad})^2 + (\text{MINFWHM} \cos \Phi_{rad})^2} \quad (3.12)$$

$$\text{MFIT_FWHM}_y = \sqrt{(\text{MAJORFWHM} \cos \Phi_{rad})^2 + (\text{MINFWHM} \sin \Phi_{rad})^2} \quad (3.13)$$

Nel caso di componenti puntiformi ovviamente il modello è degenere per cui le componenti cartesiane in x e y sono uguali a zero.

3.3.2 Componenti cartesiane del beam interferometrico

Si ricorda che il Beam dipende dagli strumenti utilizzati nell'osservazione. Dopo aver calibrato i dati ed ottenuto le visibilità si possono ottenere, ad esempio usando DIFMAP, le caratteristiche del beam che è descritto da:

- BEAM_FWHM1, BEAM_FWHM2 : sono l'asse maggiore e minore del beam
- BEAM_ANGOLO: angolo in gradi di inclinazione del beam nel cielo

Nel caso di beam circolare si avrà:

$$\text{BEAM_FWHM1} = \text{BEAM_FWHM2} \quad (3.14)$$

Per trovare le componenti cartesiane del beam innanzitutto si trasforma l'angolo PHI in radianti:

$$B_ANG_{\text{rad}} = \text{BEAM_ANGOLO} \cdot \frac{\pi}{180} \quad (3.15)$$

Quindi analogamente alle componenti del modelfit si calcolano le componenti x e y del beam con la somma in quadratura delle componenti degli assi maggiore e minore:

$$B_FWHM_x = \sqrt{(\text{BEAM_FWHM1} \cdot \sin B_ANG_{\text{rad}})^2 + (\text{BEAM_FWHM2} \cdot \cos B_ANG_{\text{rad}})^2} \quad (3.16)$$

$$B_FWHM_y = \sqrt{(\text{BEAM_FWHM1} \cdot \cos B_ANG_{\text{rad}})^2 + (\text{BEAM_FWHM2} \cdot \sin B_ANG_{\text{rad}})^2} \quad (3.17)$$

3.3.3 Rapporto segnale–rumore

Il rapporto segnale–rumore è definito come:

$$\text{SNR} = \frac{F_{\text{mJy}}}{\text{Noise}} \quad (3.18)$$

dove il flusso integrale della componente è convertito da Jy a mJy, ($F_{\text{mJy}} = 1000 \cdot F_{\text{Jy}}$). Il Noise (Jy) è calcolato dall' RMS moltiplicato per il numero di beam occupati dalla componente ottenuto dal rapporto tra l'area apparente della componente e l'area del beam

In assenza di un valore valido di RMS nel database (colonna MFIT_RMS), viene utilizzato un valore di default che si può impostare nel pannello Option della GUI del programma.

3.3.4 Calcolo degli errori cartesiani del fit e del beam

Seguendo il metodo di Fomalont (1999) gli errori associati al fit si ottengono dalla conversione in coordinate cartesiane del cartesiane del modello del fit ed applicando le seguenti formule:

$$\sigma_{x,\text{fit}}^{\text{Fomal}} = \frac{\text{MFIT_FWHM_x}}{2 \cdot \text{SNR}}, \quad \sigma_{y,\text{fit}}^{\text{Fomal}} = \frac{\text{MFIT_FWHM_y}}{2 \cdot \text{SNR}} \quad (3.19)$$

(N.B.: si assume che il sigma gaussiano sia uguale a FWHM/2)

Gli errori associati al beam sono:

$$\sigma_{x,\text{beam}}^{\text{Fomal}} = \frac{B_FWHM_x}{2 \cdot \text{SNR}}, \quad \sigma_{y,\text{beam}}^{\text{Fomal}} = \frac{B_FWHM_y}{2 \cdot \text{SNR}} \quad (3.20)$$

(N.B.: si assume che il sigma gaussiano sia uguale a FWHM/2)

Per evitare una sottostima degli errori, viene imposto un limite minimo sugli errori : Gli errori calcolati NON possono essere minori di 1/20 delle dimensioni in x e y del beam. Dall'apposizione di questo limite si ottiene:

$$\sigma_x^{\text{fit}} = \max \left(\sigma_{x,\text{fit}}^{\text{Fomal}}, \frac{\text{MFIT_FWHM_x}}{20} \right), \quad \sigma_y^{\text{fit}} = \max \left(\sigma_{y,\text{fit}}^{\text{Fomal}}, \frac{\text{MFIT_FWHM_y}}{20} \right) \quad (3.21)$$

$$\sigma_x^{\text{beam}} = \max\left(\sigma_{x,\text{beam}}^{\text{Fomal}}, \frac{\text{B_FWHM_x}}{20}\right), \quad \sigma_y^{\text{beam}} = \max\left(\sigma_{y,\text{beam}}^{\text{Fomal}}, \frac{\text{B_FWHM_y}}{20}\right) \quad (3.22)$$

3.3.5 Combinazione degli errori in quadratura

Ottenuti i valori cartesiani delle sigma del modelfit e del beam si ottiene il valore finale σ_x e di σ_y per la componente che si sta esaminando combinando in quadratura i contributi del modelfit e del beam:

$$\sigma_x = \sqrt{(\sigma_x^{\text{fit}})^2 + (\sigma_x^{\text{beam}})^2} \quad \sigma_y = \sqrt{(\sigma_y^{\text{fit}})^2 + (\sigma_y^{\text{beam}})^2} \quad (3.23)$$

La somma in quadratura si giustifica poichè la componente ottenuta dal modelfit e il beam di ricostruzione sono approssimati con profili gaussiani. In questo caso la convoluzione si traduce in una combinazione in quadratura delle rispettive larghezze e delle relative incertezze. I valori trovati saranno poi scritti nel dataframe di lavoro che sarà utilizzato per fare i grafici ponendo $\sigma_x = \text{SIGMAX}$ e $\sigma_y = \text{SIGMAY}$. I dati della sorgente potrebbero non essere completi in tutte le epoche e in questi casi si pone $\sigma_x = \sigma_y = \text{SIGMA_DEF}$, cioè le incertezze di posizione sono poste uguale al valore di default scritto nel database al momento della sua costruzione definito dall'utente del programma. Si assume inizialmente un'incertezza di default uguale a 0.05mas: valore tipico trovato per le nostre osservazioni VLBA che si trova anche confermato in studi come quello di Lister et al. 2009. Si possono avere i seguenti casi in cui i dati non sono completi:

- le componenti di una sorgente per una data epoca hanno i dati del modelfit o del beam ma non entrambi (data set della sorgente per una data epoca incompleto);
- le componenti di una sorgente per una data epoca sono state estratti da articoli, ad esempio An et al. (2012). In questo caso il valore di default inserito nella colonna SIGMAXY_DEF per ciascuna componente contiene l'errore calcolato dagli autori dell'articolo.

3.3.6 Propagazione degli errori sulla posizione

Riferire un insieme di componenti con le loro coordinate cartesiane misurate e le relative incertezze ad una componente di riferimento significa traslare tutto il piano in modo che il riferimento (0,0) vada nella componente prescelta. Le formule di traslazione della *i-esima* componente rispetto a quella di riferimento *r* sono:

$$x'_i = x_i - x_r \quad y'_i = y_i - y_r \quad (3.24)$$

con x'_i, y'_i le coordinate traslate della *i-esima* componente. Dati gli errori delle due componenti $\sigma_{x_i}, \sigma_{y_i}, \sigma_{x_r}, \sigma_{y_r}$ si ottiene che gli errori in x e y della *i-esima* componente traslata sono (propagazione degli errori):

$$\sigma_{x'_i} = \sqrt{\sigma_{x_i}^2 + \sigma_{x_r}^2} \quad \sigma_{y'_i} = \sqrt{\sigma_{y_i}^2 + \sigma_{y_r}^2} \quad (3.25)$$

Si osserva pertanto che l'incertezza sulle coordinate traslate di ciascuna componente è data dalla combinazione in quadratura dell'errore proprio della componente e dell'errore associato alla componente di riferimento. Ovviamente assumeremo che la componente di riferimento nel s.d.r. traslato in cui ha coordinate (0,0) abbia per definizione $\sigma_{x'_r} = 0$ e $\sigma_{y'_r} = 0$. Affinchè la propagazione degli errori sia data da 3.25 si assumono le seguenti ipotesi:

- le incertezze sulle coordinate x e y sono statisticamente indipendenti;
- le misure delle posizioni delle componenti sono indipendenti dalla misura della componente di riferimento r ;
- non sono presenti termini di covarianza tra le variabili considerate.

Tali ipotesi risultano valide nel caso in cui le coordinate siano ottenute da misure indipendenti e non vi siano sorgenti di errore comuni rilevanti. Assumiamo sempre vere queste ipotesi.

3.3.7 Propagazione degli errori sulla distanza e sull'angolo

Dopo aver individuata la componente di riferimento ed effettuato il ricalcolo delle coordinate di tutte le componenti di una sorgente si deve applicare la propagazione degli errori per avere gli errori sulla distanza (σ_R) e sull'angolo (σ_θ) dalla componente di riferimento. Si ricorda che operiamo nel piano del cielo per cui l'asse Y è la DEC relativa perchè si prende lo 0 della declinazione sulla componente di riferimento. L'asse X è l'ascensione retta, che essendo crescente verso est, è tale per cui i valori positivi sono alla sinistra dell'origine e i valori negativi sono alla destra. Tramite la propagazione degli errori calcoliamo gli errori sulla distanza e sull'angolo relativi a ciascuna componente della sorgente rispetto alla componente di riferimento. E' quindi fondamentale, per procedere alla propagazione degli errori, individuare una componente di riferimento della sorgente. Rispetto a questa componente saranno calcolate la distanza e l'angolo di tutte le altre componenti in tutte le epoche di osservazione e poi i relativi errori.

Si ricorda che i dati osservativi nel database sono in coordinate polari rispetto a un'origine inizialmente individuata dal puntamento dei telescopi. Selezionata la componente di riferimento si applica la trasformazione di coordinate per ottenere la distanza R e l'angolo θ tra la componente di riferimento e la componente selezionata. Queste nuove coordinate sono memorizzate nei campi del dataframe RAGGIO_NEW e ANGOLO_NEW come si vede in figura 3.1. La conversione in coordinate cartesiane è data da:

$$\Delta_x = R \sin(\theta), \quad \Delta_y = R \cos(\theta), \quad (3.26)$$

Dove Δ_x rappresenta la RA relativa nel cielo della componente, positiva a sinistra del riferimento e negativa a destra e Δ_y rappresenta la DEC relativa. Posto che la componente di riferimento ha coordinate (0,0) si ottiene che l'errore sulla distanza (in mas) è:

$$\sigma_R = \frac{1}{R} \sqrt{\Delta_x^2 (\sigma_{x,\text{ref}} + \sigma_{x,\text{comp}})^2 + \Delta_y^2 (\sigma_{y,\text{ref}} + \sigma_{y,\text{comp}})^2} \quad (3.27)$$

L'errore sull'angolo in radianti è dato da:

$$\sigma_{\theta,rad} = \frac{1}{R^2} \sqrt{\Delta_y^2(\sigma_{x,ref} + \sigma_{x,comp})^2 + \Delta_x^2(\sigma_{y,ref} + \sigma_{y,comp})^2} \quad (3.28)$$

con conversione finale in gradi:

$$\sigma_{\theta,deg} = \sigma_{\theta,rad} \frac{180}{\pi}. \quad (3.29)$$

Questi valori sono memorizzati nel dataframe utilizzato per i grafici nei campi ERR.RAGGIO_NEW e ERR.ANGOLO_NEW.

| SORGENTE | EPOCA | COMP. | RAGGIO_NEW | ERR.RAGGIO_NEW | ANGOLO_NEW | ERR.ANGOLO_NEW |
|------------|-----------|-------|------------|----------------|------------|----------------|
| J1511+0518 | 2002.0288 | A1 | 5.068 | 0.038 | 90.825 | 1.061 |
| J1511+0518 | 2002.0288 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2005.3384 | A1 | 5.218 | 0.035 | 89.989 | 0.854 |
| J1511+0518 | 2005.3384 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2006.2589 | A1 | 5.088 | 0.035 | 90.494 | 0.868 |
| J1511+0518 | 2006.2589 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2006.5521 | A1 | 5.184 | 0.095 | 90.578 | 0.569 |
| J1511+0518 | 2006.5521 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2006.9164 | A1 | 5.133 | 0.033 | 90.724 | 0.844 |
| J1511+0518 | 2006.9164 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2007.2397 | A1 | 5.089 | 0.035 | 91.372 | 0.851 |
| J1511+0518 | 2007.2397 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2007.6452 | A1 | 5.099 | 0.034 | 90.796 | 0.834 |
| J1511+0518 | 2007.6452 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2009.4068 | A1 | 5.067 | 0.034 | 91.403 | 0.847 |
| J1511+0518 | 2009.4068 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2013.5548 | A1 | 5.287 | 0.034 | 95.262 | 0.793 |
| J1511+0518 | 2013.5548 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2018.9575 | A1 | 5.420 | 0.031 | 96.654 | 0.743 |
| J1511+0518 | 2018.9575 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2019.9603 | A1 | 5.556 | 0.034 | 97.369 | 0.724 |
| J1511+0518 | 2019.9603 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |
| J1511+0518 | 2025.0699 | A1 | 5.730 | 0.033 | 96.889 | 0.716 |
| J1511+0518 | 2025.0699 | C1 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 |

Figura 3.1: Dataframe parziale della sorgente J1511+0518 nel quale si possono vedere per le diverse epoche la distanza (RAGGIO_NEW) e l'angolo (ANGOLO_NEW) ed i relativi errori della hot_spot A1 rispetto all' hot_spot C1 scelta come componente di riferimento. I valori delle incertezze sono stati ricalcolati con le modalità descritte in questo capitolo.

Capitolo 4

Software per l'analisi dei dati osservativi

4.1 Finalità del software

Il programma di analisi dei dati osservativi costituisce il nucleo principale del "workflow" di analisi e visualizzazione dei dati interferometrici calibrati e relativi a diverse epoche delle radiosorgenti. Il suo scopo è quello di permettere l'analisi della cinematica delle diverse componenti delle radiosorgenti tramite la creazione di grafici e l'analisi dei dati del dataframe ottenuto rielaborando il database in excel dei dati osservativi. L'insieme dei cinque grafici prodotti dal software fornisce una descrizione completa e coerente dell'evoluzione cinematica, del flusso radio e della modellizzazione delle componenti radio. La stretta integrazione tra selezione dei dati, ricalcolo delle coordinate e gestione degli errori garantisce la riproducibilità e l'affidabilità dell'analisi scientifica. Il software è stato concepito come strumento di supporto all'analisi scientifica, con particolare attenzione alla gestione degli errori e alla produzione di grafici pronti per l'uso. Grafici che hanno l'obiettivo di fornire una rappresentazione coerente, riproducibile e scientificamente rigorosa dell'evoluzione temporale delle sorgenti radio osservate tramite l'immediata visualizzazione dei movimenti delle componenti (core, getti, hot_spot). Le componenti sono state individuate nelle radio sorgenti tramite la precedente attività di data reduction e data analysis che hanno popolato il database in excel contenente i dati in input per il programma. Esso è stato progettato come applicazione modulare in Python composto da moduli che implementano:

- Un'interfaccia utente grafica (GUI);
- la lettura dei dati dal database;
- il calcolo degli errori;
- la produzione dei grafici scientifici;
- il salvataggio dei grafici e dei risultati.

Il programma fornisce una pipeline completa per l'analisi di dati delle radio sorgenti inseriti nel data base in formato excel di input, integrando il ricalcolo delle

coordinate e degli errori delle componenti e la visualizzazione grafica in un unico ambiente coerente. L'architettura modulare consente di mantenere separati l'interfaccia utente, il calcolo degli errori e la produzione grafici migliorando la manutenibilità e la tracciabilità delle versioni.

4.2 Database dei dati delle sorgenti

Rappresenta l'archivio principale dei dati osservativi e dei parametri derivati delle sorgenti radio analizzate. Il database delle sorgenti radio utilizzato in questo lavoro è contenuto in un file in formato Excel (.xlsx) o ODS (.ods) (es: DATABASE_SORGENTI_20260122_COMPLETO.xlsx) ed è organizzato in due fogli principali: CSO e DATISORGENTI.

Il foglio CSO contiene i dati osservativi e i parametri di analisi delle singole componenti radio, organizzati per sorgente, epoca osservativa, frequenza e fonte del dataset. Rappresenta il nucleo operativo del database ed è direttamente utilizzato dal software per il ricalcolo delle coordinate, la propagazione degli errori e la generazione dei grafici scientifici.

Il foglio DATISORGENTI raccoglie invece i metadati fisici e cosmologici delle sorgenti, utilizzati a scopo descrittivo. Questa separazione consente di distinguere chiaramente tra: dati direttamente misurati o derivati dalle osservazioni interferometriche; informazioni descrittive e cosmologiche delle sorgenti.

4.3 Dati contenuti nel database

Foglio CSO – Dati osservativi e parametri di analisi

Tabella 4.1: Foglio CSO: campi e descrizione (database sorgenti)

| Campo | Descrizione |
|---|---|
| Colonne di controllo e identificazione | |
| NOTE_SCARTO | Campo di commento e controllo qualità. Se il valore inizia con caratteri speciali (ad es. * o /), la riga viene esclusa dall'analisi. |
| PRODUTTORE | Indica il produttore o l'autore dell'analisi/del dataset. |
| NOME_FILE.MOD | Nome del file Modelfit originale associato ai dati. |
| IMMAGINE | Identificativo o riferimento all'immagine interferometrica utilizzata. |
| Identificazione della sorgente e del dataset | |
| SORGENTE | Nome standard della sorgente radio (chiave primaria logica del database). |
| SORGENTE_NOME_2 | Nome alternativo o alias della sorgente. |
| FONTE | Identifica la fonte del dataset (campagne osservative o analisi differenti). |
| FREQUENZA_DETT | Descrizione testuale dettagliata della frequenza osservativa. |

| Campo | Descrizione |
|--|--|
| FREQUENZA | Frequenza osservativa numerica (GHz), usata per selezione e classificazione. |
| Informazioni temporali | |
| DATAJULIANA | Data dell'osservazione espressa in forma giuliana. |
| EPOCA | Epoca osservativa in anni (variabile indipendente principale nei grafici temporali). |
| Parametri fotometrici | |
| FLUSSO | Flusso della componente radio (Jy). |
| ERR.FLUSSO | Incertezza associata al flusso (Jy). |
| Identificazione delle componenti | |
| COMP. | Nome della componente radio (core, knot, jet component, ecc.). |
| ID | Identificatore numerico per distinguere componenti omonime in epoche diverse. |
| Parametri geometrici osservativi | |
| RAGGIO | Distanza radiale della componente rispetto al riferimento (mas). |
| ERR.RAGGIO | Errore associato al raggio (mas). |
| ANGOLO | Angolo di posizione della componente (gradi). |
| ERR.ANGOLO | Errore associato all'angolo (gradi). |
| Parametri di errore e sigma | |
| SIGMAXY_DEF | Valore di errore cartesiano di default, utilizzato come fallback. |
| SIGMAX | Componente cartesiana dell'errore lungo l'asse X (mas). |
| SIGMAY | Componente cartesiana dell'errore lungo l'asse Y (mas). |
| DATA_CALC.SIGMA | Data del calcolo delle sigma (tracciabilità). |
| Parametri del beam interferometrico | |
| BEAM_FWHM1 | Asse maggiore del beam interferometrico (mas). |
| BEAM_FWHM2 | Asse minore del beam interferometrico (mas). |
| BEAM_ANGOLO | Angolo di orientazione del beam (gradi). |
| B_FWHMX | Componente cartesiana del beam FWHM lungo X (mas). |
| B_FWHMY | Componente cartesiana del beam FWHM lungo Y (mas). |
| STIMA_BEAM | Indicatore della modalità di stima del beam. |
| Parametri di ModelFit | |
| MFIT_RMS | RMS (rumore) dall'immagine dei residui (mJy /beam). |
| MFIT_FWHMX | Componente cartesiana del FWHM della componente lungo X (mas). |
| MFIT_FWHMY | Componente cartesiana del FWHM della componente lungo Y (mas). |
| MAJORFWHM | Asse maggiore del modello ellittico della componente (mas). |
| AXIALRATIO | Rapporto tra asse minore e asse maggiore del modello (adimensionale). |
| PHI | Angolo di orientazione del modello ellittico (gradi). |
| T | Tipo componente del modelfit; 0 delta, 1 gaussiana ellittica o circolare. |
| FREQ | Frequenza usata nel fit spettrale (se presente). |

| Campo | Descrizione |
|-----------|--|
| SPECINDEX | Indice spettrale della componente (se presente). |

Foglio DATISORGENTI – Metadati fisici e cosmologici

Tabella 4.2: Foglio DATISORGENTI: campi e descrizione (database sorgenti)

| Campo | Descrizione |
|-------------------------------------|---|
| Identificazione e coordinate | |
| SOURCE | Nome standard della sorgente (chiave di collegamento con CSO.SORGENTE). |
| ALT.NAME | Nome alternativo o identificativo di catalogo. |
| RA | Ascensione retta della sorgente. |
| DEC | Declinazione della sorgente. |
| Parametri cosmologici | |
| ZETA | Redshift della sorgente. |
| SCALE (pc/mas) | Fattore di scala angolare (pc/mas). |
| AGE_AT_Z (Gyr) | Età dell'Universo all'epoca del redshift osservato (Gyr). |
| LIGHT_TRAVEL (Gyr) | Tempo di viaggio della luce (Gyr). |
| LIGHT_DISTANCE (Mpc) | Distanza di luminosità (Mpc). |
| COMOV_RAD_DIST (Mpc) | Distanza radiale comovente (Mpc). |
| Proprietà fisiche aggiuntive | |
| SIZE (pc) | Dimensione lineare stimata della sorgente (pc). |
| MAG (ottico) | Magnitudine ottica. |
| L5GHz (10 ⁻²⁶ W/Hz) | Luminosità radio a 5 GHz. |

4.4 Struttura generale del software

Il software è organizzato in modo modulare e si compone dei seguenti elementi principali:

- `graficov495.py`: programma principale con interfaccia grafica (GUI) versione 495;
- `plotting.py`: modulo dedicato alla generazione dei grafici scientifici;
- `errors_fwhm.py`: modulo per il calcolo e la propagazione degli errori osservativi già descritto nel capitolo 3, sezione 3.3;
- `aggiornamenti_db.py`: modulo per l'importazione di file coi dati del modelfit e l'aggiornamento del database.

Questa suddivisione consente di separare logicamente la gestione dei dati, il calcolo degli errori e la visualizzazione grafica, migliorando la leggibilità del codice e la manutenibilità del software.

4.4.1 Interfaccia grafica del software (GUI)

Il programma `graficov495` è dotato di un'interfaccia grafica, (GUI: Graphic User Interface) rappresentata in figura 4.2 sviluppata in linguaggio Python mediante la libreria Tkinter, progettata per consentire un controllo completo e trasparente di tutte le fasi dell'analisi dei dati interferometrici.

L'interfaccia è organizzata secondo una struttura a colonne verticali, che riflette il flusso logico rappresentato in figura 4.1 per arrivare alla creazione dei grafici:

- Selezione del database sorgenti
- Selezione della sorgente
- Selezione delle componenti
- Selezione delle epoche (con frequenza e fonte dati)
- Selezione della fonte dati
- Ricalcolo delle coordinate e degli errori (opzionale)
- Creazione dei grafici
- Controllo delle opzioni avanzate e valori di default
- Visualizzazione delle immagini sorgenti

Questa disposizione consente all'utente di procedere da sinistra verso destra seguendo l'ordine concettuale: database → selezione sorgente/componenti epoche/-fonti → elaborazione → visualizzazione. . Tale impostazione riduce la possibilità di errori operativi e rende esplicito ogni passaggio del processo di analisi. Nella Gui esistono poi due pannelli aggiuntivi per:

- Controllo delle opzioni avanzate e valori di default
- Visualizzazione delle immagini delle sorgenti

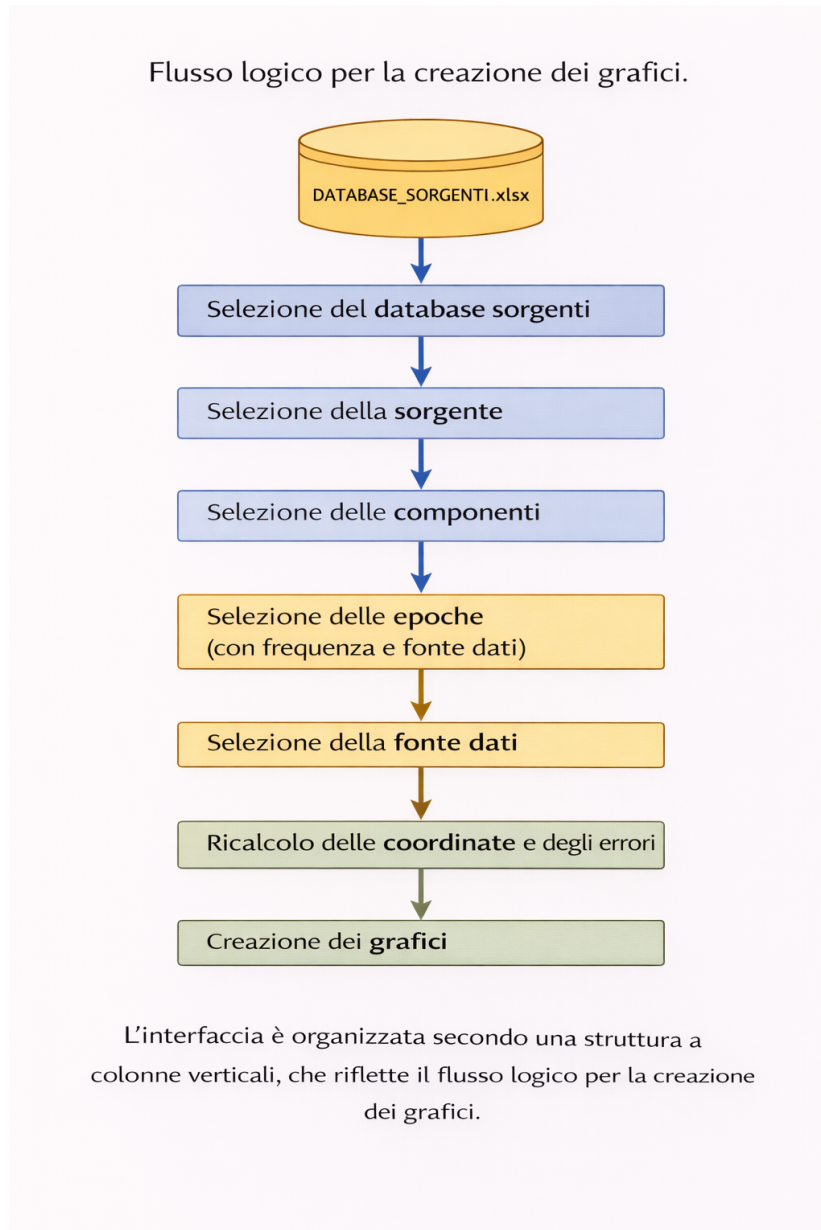


Figura 4.1: workflow

Nel complesso, la GUI di `graficov495` (figura 4.2) non costituisce un semplice strumento di visualizzazione, ma rappresenta una vera e propria formalizzazione del metodo di analisi adottato in questo lavoro, garantendo riproducibilità, controllo e coerenza tra dati, errori e rappresentazioni grafiche. L'interfaccia grafica è progettata per:

- rendere esplicito ogni passaggio dell'analisi,
- ridurre errori operativi,
- mantenere separazione tra selezione dati, calcolo e visualizzazione,
- supportare analisi scientifiche riproducibili.

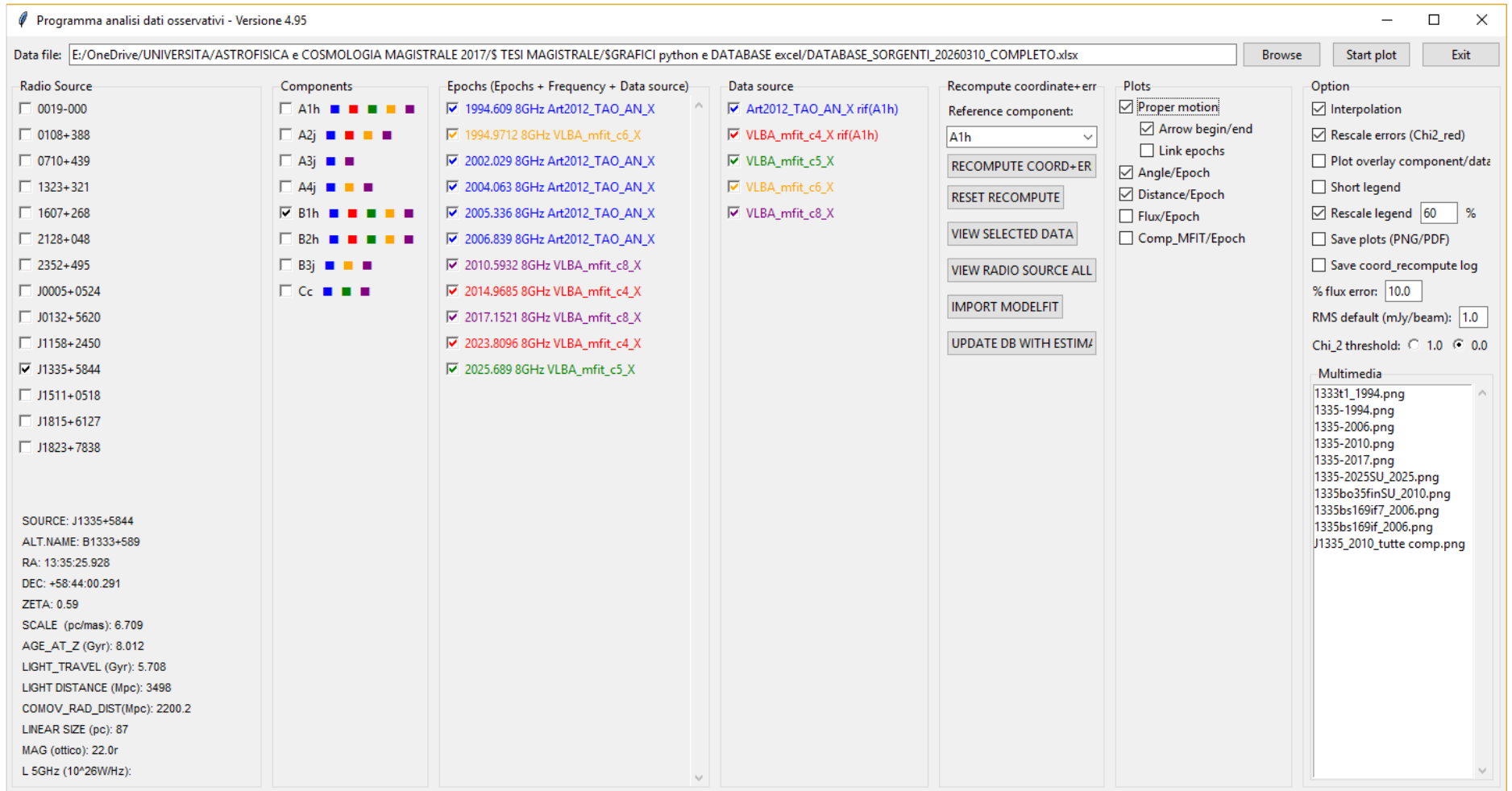


Figura 4.2: GUI programma. L'interfaccia consente la selezione della sorgente radio, delle componenti e delle osservazioni multi-epoca e multi-frequenza, il ricalcolo delle coordinate e degli errori rispetto a una componente di riferimento, e la generazione dei grafici scientifici utilizzati nell'analisi. La disposizione a pannelli riflette il flusso logico dell'elaborazione dei dati, dalla selezione iniziale alla visualizzazione dei risultati.

Pannelli dell'interfaccia grafica

Barra superiore (controllo file e avvio) Nella parte superiore della finestra sono presenti i principali controlli globali:

- Data file: campo di testo che visualizza il percorso completo del database attualmente caricato.
- Browse: pulsante per la selezione di un file di input in formato .xlsx o .ods.
- Start plot: avvia la generazione dei grafici selezionati utilizzando i parametri correnti.
- Exit: chiude l'applicazione. Le selezioni effettuate sono salvate in file testo grafico.par

Questa barra costituisce il punto di ingresso dell'intero flusso di lavoro.

Pannello "Radio Source" Nella parte sinistra della finestra è presente il pannello di selezione della sorgente radio, che consente di scegliere la sorgente da analizzare e, se disponibili, di visualizzarne i principali parametri fisici e cosmologici. La selezione della sorgente aggiorna dinamicamente i pannelli successivi. Caratteristiche:

- Elenco di sorgenti presentato sotto forma di checkbox.
- Sebbene tecnicamente sia possibile selezionare più sorgenti, il flusso operativo del programma è progettato per lavorare su una sorgente alla volta.
- La selezione della sorgente aggiorna dinamicamente:
 - componenti disponibili,
 - epoche,
 - fonti dati,
 - metadati informativi.

Riquadro informativo sorgente Nella parte inferiore del pannello sono mostrati i parametri astrofisici della sorgente, se presenti nel foglio DATISORGEN-TI, tra cui:

- nome sorgente e alias,
- coordinate equatoriali (RA, Dec),
- redshift,
- fattore di scala pc/mas,
- età dell'universo al redshift dell'oggetto,
- distanze cosmologiche (di luminosità, comovente).

Queste informazioni hanno funzione descrittiva e non entrano direttamente nei calcoli.

Pannello “Components” Il pannello Components permette la selezione delle singole componenti radio associate alla sorgente, Caratteristiche:

- Ogni componente è associata a una checkbox.
- Accanto a ciascuna componente sono visualizzati piccoli indicatori cromatici, utilizzati come riferimento visivo coerente con le epoche e le fonti (data source). Tramite gli indicatori cromatici è possibile verificare visivamente in quali epoche/fonti la componente è presente. È possibile selezionare:
 - una singola componente,
 - più componenti contemporaneamente.

Le componenti selezionate saranno rappresentate nei grafici.

Pannello “Epochs + Frequency + Data source” Questo pannello consente di selezionare le osservazioni in funzione dell’epoca, della frequenza e della fonte del dataset, supportando analisi multi-epoca e multi-frequenza. Ogni riga rappresenta una combinazione unica di: Epoca osservativa, Frequenza, Fonte dei dati (ad esempio analisi diverse o dataset differenti). Caratteristiche:

- Lista che è possibile scorrere, necessaria per sorgenti con molte osservazioni.
- Checkbox multiple che consentono di selezionare insiemi arbitrari di epoche.
- Codifica cromatica del testo (vari colori) per distinguere visivamente fonti differenti.

Questa struttura permette:

- confronti temporali,
- analisi multi-frequenza,
- overlay di dati provenienti da fonti diverse. (solo se è selezionata un’unica componente)

Pannello “Data source” Consente la selezione diretta della fonte dei dati (ad esempio diverse campagne osservative o diversi autori). Caratteristiche:

- Selezione per checkbox.
- Sincronizzazione automatica con il pannello delle epoche: abilitando/disabilitando una fonte, vengono automaticamente inserite/escluse le epoche associate alla fonte.

Pannello “Recompute coordinate+error” Questo pannello è dedicato al ricalcolo delle coordinate relative e degli errori, permettendo di definire una componente di riferimento e di aggiornare in modo coerente le posizioni e le incertezze di tutte le componenti selezionate. Questo pannello è fondamentale per garantire che:

- tutte le posizioni siano espresse in modo relativo e coerente,
- la propagazione degli errori sia fisicamente consistente.

L’utente seleziona una componente di riferimento dal menu a tendina e avvia il ricalcolo. Il programma:

1. converte le coordinate polari in cartesiane;
2. riferisce la posizione della componente di riferimento;
3. calcola la distanza relativa e l’angolo dalla componente di riferimento;
4. scrive i risultati nelle colonne RAGGIO_NEW e ANGOLO_NEW.

Il ricalcolo degli errori utilizza i parametri di Modelfit e del beam per stimare le sigma cartesiane e propagarle in errori su raggio e angolo. Viene applicato un limite fisico minimo pari a 1/20 del beam e, se necessario, un valore di fallback. Nel Capitolo 3 è descritto analiticamente e in dettaglio il calcolo degli errori e le formule di propagazione degli stessi. Eventuali casi problematici (assenza della componente di riferimento o errori non calcolabili) vengono segnalati all’utente tramite finestre di avviso.

Oltre al menu a tendina per la selezione della componente di riferimento nel pannello ci sono dei pulsanti per attivare le funzionalità di ricalcolo e visualizzazione:

PULSANTE Recompute Coord+Errors: ricalcola le coordinate di tutte le componenti rispetto alla componente scelta e aggiorna coerentemente gli errori (Vedere Capitolo 3 sulla gestione degli errori).

PULSANTE Reset Recompute: annulla il ricalcolo e ripristina i dati originali.

PULSANTE View Selected Data: permette di visualizzare in forma tabellare i dati selezionati e aggiornati della sorgente. I dati visualizzati possono essere esportati in formato Excel nella cartella dei grafici.

PULSANTE View Radio Source All Data: permette di visualizzare in forma tabellare l’intero dataset della sorgente. I dati visualizzati possono essere esportati in formato Excel nella cartella dei grafici.

PULSANTE Import Modelfit: permette di visualizzare in forma tabellare i dati di un modelfit realizzato in difmap. I dati visualizzati possono essere esportati in formato Excel nella cartella GRAFICI.

PULSANTE Update DB With Estimated Error: in futuro sarà sviluppata un funzione di aggiornamento degli errori stimati secondo i criteri descritti nel Capitolo 3.

Pannello “Plots” La sezione Plots consente di scegliere le diverse tipologie di grafici prodotti dal software. Le opzioni avanzate permettono inoltre di attivare regressioni, riscalatura automatica degli errori e modalità di confronto tra dataset differenti. I grafici sono generati dal modulo plotting.py. Tipologie di grafici:

- Proper motion (separazione delle componenti in RA–Dec), con opzioni Arrow begin/end e Link epochs.
- Angle/Epoch
- Distance/Epoch
- Flux/Epoch
- Comp_MFIT/Epoch

Opzioni di analisi: per ciascun grafico sono disponibili opzioni avanzate quali:

- interpolazione lineare (regressione pesata sugli errori);
- riscalatura automatica degli errori con metodo del χ^2 ridotto;
- modalità di confronto tra diverse fonti di dati.

I grafici vengono visualizzati a schermo e salvati automaticamente in formato PNG e PDF se selezionata l’opzione “ Save Plots”. Nella sezione sezione 4.5 sono descritti in dettaglio i grafici prodotti.

Pannello “Option” Contiene le opzioni avanzate di analisi. Le opzioni disponibili sono:

- Interpolation: abilita interpolazione lineare;
- Rescale errors (χ_{red}^2): riscalatura automatica degli errori se il χ_{red}^2 supera una soglia. Vedere sezione 4.5 per informazioni dettagliate;
- Plot overlay component/data: confronto tra fonti diverse (data source). Solo una componente può essere selezionata con questa opzione.
- Save plots (PNG/PDF): salvataggio automatico dei grafici;
- Save coord.recompute.log: salvataggio del log del ricalcolo errori;
- flux error: errore percentuale sul flusso;
- RMS di default (mJy/beam): valore RMS di default . Si applica se l’RMS rumore non è valorizzato nel database;
- χ_{red}^2 threshold: soglia per la riscalatura degli errori. Può essere 1.0 oppure 0.0.

Questo pannello consente un controllo fine del comportamento statistico dell’analisi.

Pannello “Multimedia” : infine, il pannello Multimedia che fornisce un accesso diretto ai file grafici generati nella fase di data analysis ed inseriti nella cartella MULTIMEDIA, consentendo una rapida verifica della struttura e della forma della radiosorgente.

4.5 Grafici prodotti dal modulo plotting.py

Il modulo python plotting.py del programma graficov495 implementa la produzione di cinque grafici principali, ciascuno dei quali rappresenta una diversa proiezione dei dati osservativi e dei parametri derivati. I grafici sono costruiti a partire dai dati selezionati dall’utente e utilizzano procedure di conversione delle coordinate, propagazione degli errori e regressione statistica coerenti con le convenzioni della radioastronomia interferometrica.

4.5.1 Proper motion (Component Separation)

Il grafico proper motion figura?? e la figura 4.4 visualizza il moto proprio della o delle componenti nel cielo. Ci sono due opzioni associate a questo grafico:

- arrow begin/end: disegna una freccia rossa tra la prima e l’ultima epoca della componente per illustrare graficamente lo spostamento dall’inizio alle fine del periodo;
- link epochs: disegna dei segmenti di raccordo tra un epoca e la successiva per rendere visibile l’intero percorso della componente.

Le posizioni delle componenti radio ed i relativi errori sono originariamente fornite nel database in coordinate polari, definite dalla distanza R (in mas) e dall’angolo di posizione θ (in gradi). Il programma converte tali coordinate in coordinate cartesiane relative secondo le relazioni:

$$\begin{aligned}x &= R \sin(\theta) \\ y &= R \cos(\theta)\end{aligned}\tag{4.1}$$

dove x rappresenta la coordinata lungo l’asse di ascensione retta relativa e y quella lungo l’asse di declinazione relativa. L’asse delle ascisse viene invertito per rispettare la convenzione astronomica standard sulla Right Ascension.

Significato fisico

Il grafico fornisce una rappresentazione diretta del moto proprio apparente delle componenti nel piano del cielo e consente di analizzare traiettorie, curvature e cambiamenti di direzione del getto radio. La coordinata verticale è la relative DEC e quella orizzontale la relative AR. Le coordinate sono relative alla componente di riferimento (0.0).

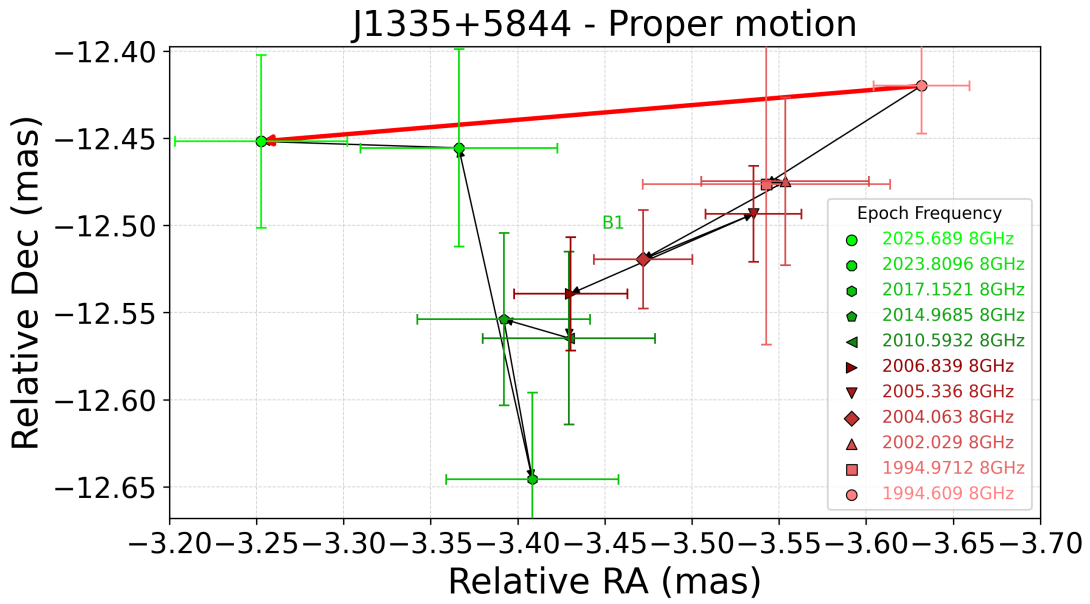


Figura 4.3: Grafico Proper motion con una componente

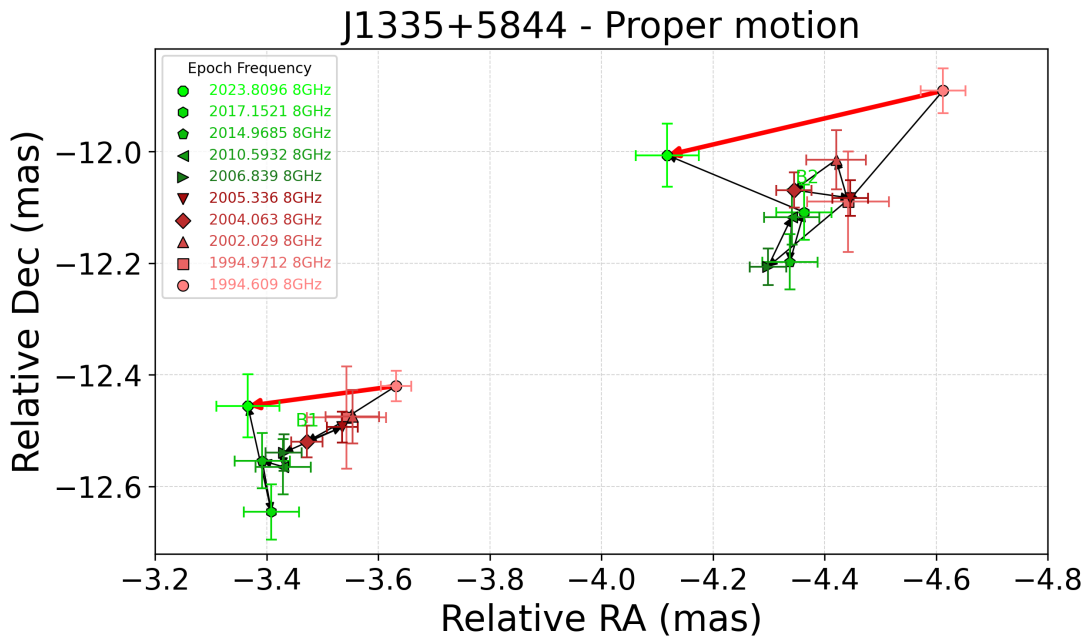


Figura 4.4: Grafico Proper motion con due componenti

4.5.2 Interpolazione e riscalatura errori nei grafici del moto radiale, angolare e del flusso

L'interpolazione è effettuata mediante minimi quadrati pesati (*Weighted Least Squares*, WLS), in cui ciascun punto contribuisce al fit in proporzione alla propria affidabilità statistica. A ciascuna osservazione y_i effettuata all'epoca x_i è associato

un peso

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (4.2)$$

dove σ_i rappresenta l'incertezza stimata sul singolo punto osservativo per la componente che si sta esaminando. Questa scelta dei pesi deriva direttamente dal principio di massima verosimiglianza nel caso di errori gaussiani e indipendenti. Il modello adottato è una legge lineare del tipo

$$f(x) = a + b x, \quad (4.3)$$

dove a rappresenta l'intercetta e b la pendenza, fisicamente interpretabile come tasso di variazione temporale (velocità) del parametro osservato. I valori di a e b sono ottenuti rendendo minima la funzione chi-quadro:

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N w_i [y_i - (a + b x_i)]^2, \quad w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad (4.4)$$

che conduce alle ben note equazioni dei minimi quadrati pesati. In forma esplicita, indicando con

$$\begin{aligned} S &= \sum_i w_i, & S_x &= \sum_i w_i x_i, & S_y &= \sum_i w_i y_i, \\ S_{xx} &= \sum_i w_i x_i^2, & S_{xy} &= \sum_i w_i x_i y_i, \end{aligned}$$

i parametri del fit risultano

$$b = \frac{S S_{xy} - S_x S_y}{S S_{xx} - S_x^2}, \quad a = \frac{S_y - b S_x}{S}. \quad (4.5)$$

Questo approccio consente di ottenere stime robuste dei parametri del modello, riducendo l'influenza delle misure caratterizzate da grandi incertezze. La bontà dell'interpolazione è valutata tramite il chi-quadro ridotto

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{N - p}, \quad (4.6)$$

dove N è il numero di osservazioni e p il numero di parametri liberi del modello. Nel caso del fit lineare adottato in questo lavoro, i parametri liberi sono due (a e b), per cui si assume $p = 2$. Il valore di χ_{red}^2 fornisce un'indicazione sintetica del grado di coerenza tra la dispersione osservata dei dati e le incertezze assegnate alle singole misure. In particolare:

- $\chi_{\text{red}}^2 \simeq 1$ indica che la dispersione dei dati attorno al modello è compatibile con gli errori stimati;
- $\chi_{\text{red}}^2 > 1$ suggerisce una sottostima delle incertezze o la presenza di una dispersione intrinseca non descritta dal modello lineare;
- $\chi_{\text{red}}^2 < 1$ può indicare una sovrastima degli errori o la presenza di correlazioni tra i dati che riducono il numero effettivo di gradi di libertà.

Quando χ_{red}^2 risulta significativamente maggiore dell'unità, le incertezze osservazionali vengono rinormalizzate imponendo $\chi_{\text{red}}^2 \simeq 1$, mediante una riscalatura globale degli errori:

$$\sigma'_i = \sigma_i \sqrt{\chi_{\text{red}}^2}. \quad (4.7)$$

Questa procedura non modifica i valori stimati di a e b , dell'interpolazione lineare ma consente di ottenere una stima più realistica delle loro incertezze, in accordo con la dispersione effettivamente osservata nei dati multi-epoca. La riscalatura degli errori è applicabile in fase di costruzione dei grafici *distance/epoch*, *angle/epoch* e *flux/epoch*, garantendo una descrizione auto-consistente dell'evoluzione temporale dei parametri osservativi e delle incertezze associate.

Coefficiente di correlazione lineare (coefficiente di Pearson)

Nei grafici prodotti dal modulo `plotting.py` viene riportato in legenda il valore del coefficiente di correlazione lineare r , che rappresenta il coefficiente di correlazione di Pearson tra le variabili considerate (ad esempio distanza-epoca o angolo-epoca).

Il coefficiente di Pearson misura il grado di correlazione lineare tra due variabili x e y ed è definito come:

$$r = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2}}, \quad (4.8)$$

dove \bar{x} e \bar{y} sono i valori medi delle due variabili e N è il numero di osservazioni. Il coefficiente assume valori nell'intervallo $-1 \leq r \leq 1$:

- $r \approx 1$ indica una forte correlazione lineare positiva;
- $r \approx -1$ indica una forte correlazione lineare negativa;
- $r \approx 0$ indica assenza di correlazione lineare significativa.

Nel contesto dell'analisi dinamica multi-epoca, un valore di r prossimo all'unità indica che l'andamento temporale del parametro osservato è ben descritto da una legge lineare, rafforzando l'ipotesi, ad esempio, di un moto a velocità costante. Valori inferiori possono invece suggerire dispersione intrinseca, presenza di accelerazioni oppure una modellizzazione lineare non completamente adeguata.

4.5.3 Angle/Epoch

Il grafico `Angle/Epoch` (figura 4.5) mostra l'evoluzione temporale dell'angolo di posizione θ delle componenti radio in funzione dell'epoca osservativa t :

$$\theta = \theta(t) \quad (4.9)$$

Regressione lineare

Il programma esegue un fit lineare del tipo:

$$\theta(t) = \theta_0 + \omega t \quad (4.10)$$

dove ω rappresenta la velocità angolare apparente espressa in gradi per anno [deg yr⁻¹].

Se sono disponibili errori sull'angolo, il fit è eseguito tramite Weighted Least Squares (WLS):

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(\theta_i - \theta(t_i))^2}{\sigma_{\theta,i}^2} \quad (4.11)$$

In assenza di errori affidabili viene utilizzato un Ordinary Least Squares (OLS).

Riscalatura degli errori

Il chi-quadro ridotto è definito come:

$$\chi_{\text{red}}^2 = \frac{\chi^2}{N - 2} \quad (4.12)$$

Se χ_{red}^2 supera una soglia impostata dall'utente, gli errori vengono riscalati secondo:

$$\sigma_{\theta,i}^{\text{resc}} = \sigma_{\theta,i} \sqrt{\chi_{\text{red}}^2} \quad (4.13)$$

e il grafico viene visualizzato con i nuovi errori. SI osserva, anche se ovvio, che l'interpolazione lineare non cambia.

Significato fisico

Il grafico consente di studiare variazioni nella direzione di propagazione delle componenti, fornendo indicazioni sul moto angolare della componente rispetto a quella di riferimento per fare valutazioni sulla precessione o interazioni con il mezzo circostante. Possiamo considerare attendibile la stima della velocità se $\omega > 3\sigma_\omega$ (σ_ω è visualizzato nella legenda).

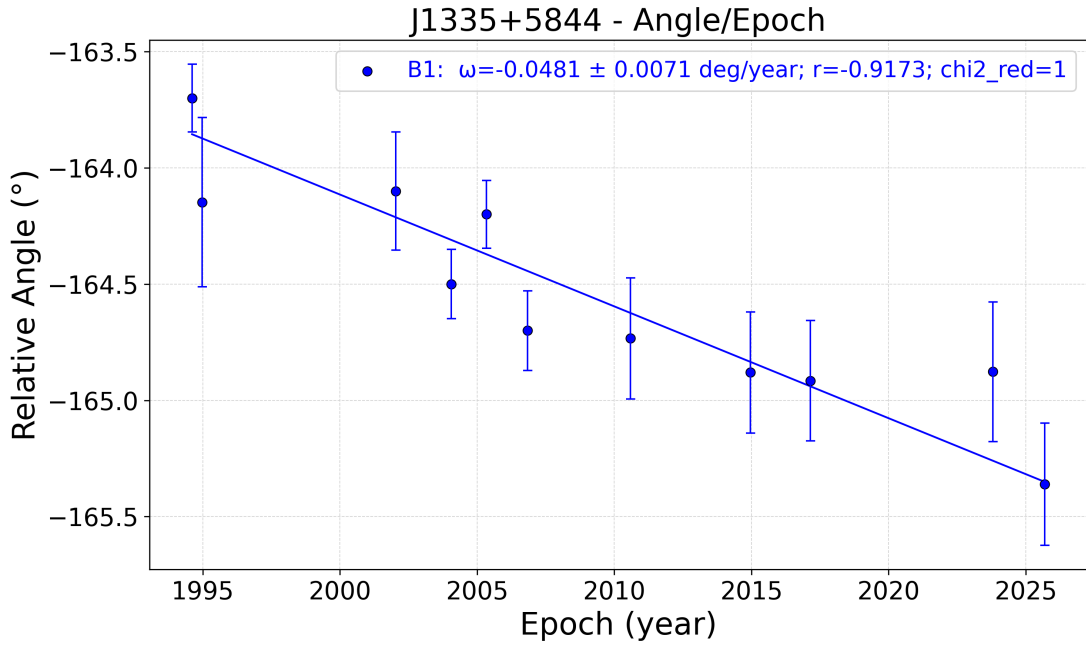


Figura 4.5: Grafico Angolo/epoca

4.5.4 Distance/Epoch

Il grafico *Distance/Epoch* (figura 4.6) rappresenta l'evoluzione temporale della distanza radiale R delle componenti radio rispetto alla componente di riferimento:

$$R = R(t) \quad (4.14)$$

Regressione lineare

Il fit adottato è del tipo:

$$R(t) = R_0 + \mu t \quad (4.15)$$

dove μ rappresenta il moto proprio apparente espresso in mas per anno. La procedura di regressione e la riscalatura degli errori seguono le stesse modalità descritte per il grafico *Angle/Epoch*.

Significato fisico

Questo grafico è fondamentale per lo studio della cinematica del getto dando indicazioni in [mas] sullo spostamento e sulla velocità radiale (proietta) delle componenti rispetto a quella presa come riferimento. Introducendo la scala cosmologica S (pc/mas), la velocità apparente è ricavata come:

$$v_{\text{app}} = \mu S \text{ [pc yr}^{-1}\text{]} \quad (4.16)$$

Possiamo considerare attendibile la stima della velocità se $\mu > 3\sigma_\mu$ (σ_μ è visualizzato nella legenda).

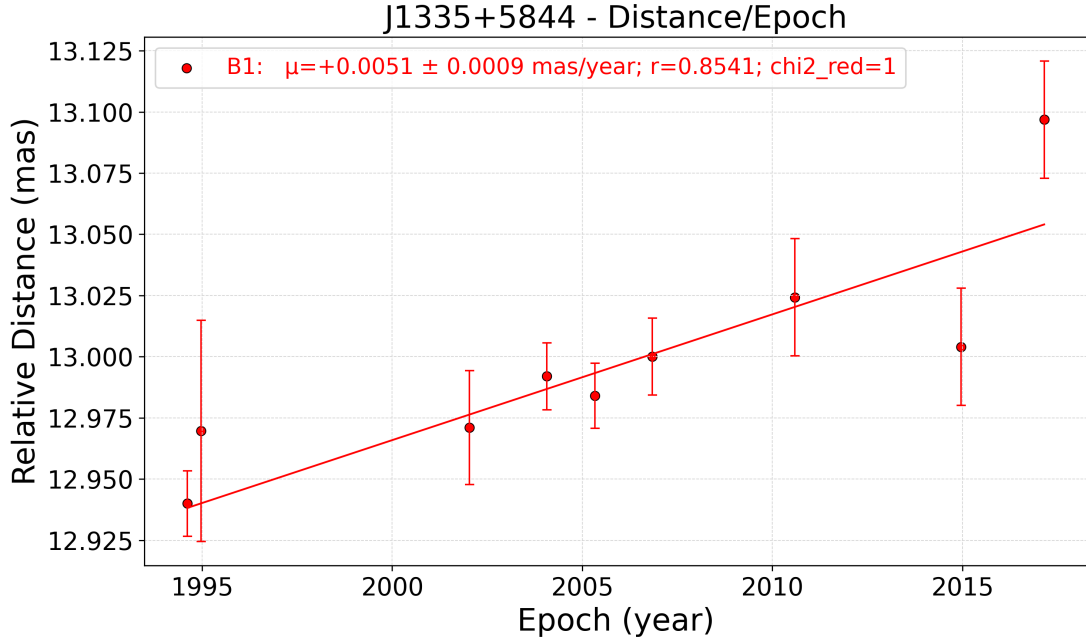


Figura 4.6: Grafico Distanza/epoca

4.5.5 Flux/Epoch

Il grafico Flux/Epoch (figura 4.7) mostra l'evoluzione temporale del flusso radio delle componenti selezionate. Il flusso osservato viene convertito da Jy a mJy secondo:

$$F_{\text{mJy}} = 1000 F_{\text{Jy}} \quad (4.17)$$

In assenza di un errore esplicito sul flusso, l'incertezza viene stimata come:

$$\sigma_F = p F \quad (4.18)$$

dove p rappresenta la percentuale di errore impostata dall'utente.

Significato fisico

Questo grafico permette di analizzare la variabilità del flusso delle componenti radio, evidenziando fenomeni di outburst, decadimento o trasferimento di energia lungo il getto.

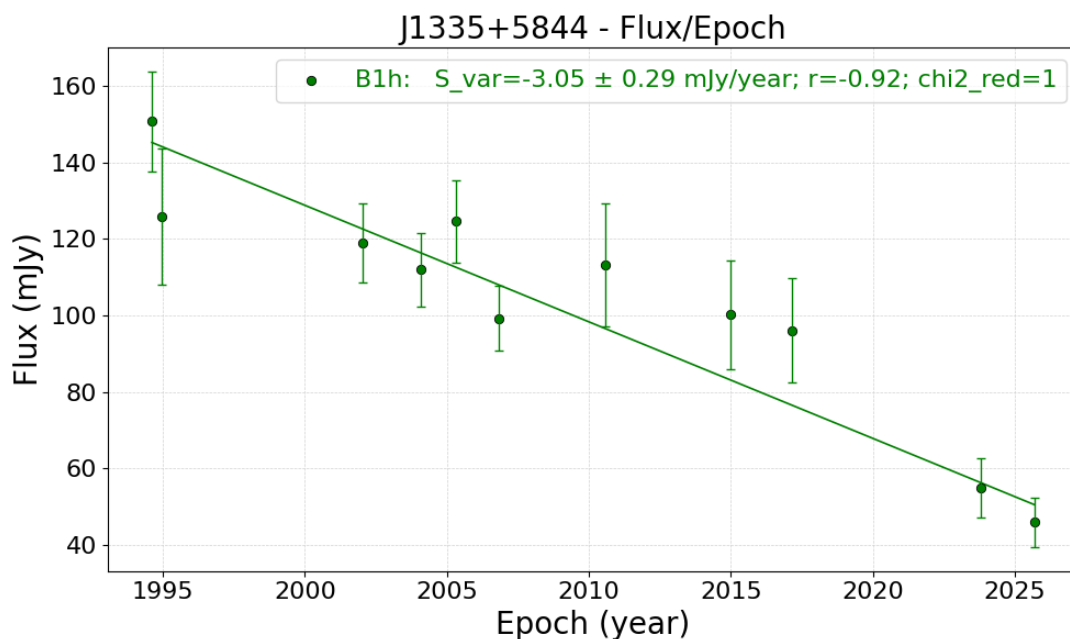


Figura 4.7: Grafico flusso/epoca

4.5.6 Comp_MFIT/Epoch

Il grafico Comp_MFIT/Epoch (figura 4.8) analizza l'evoluzione temporale dei parametri morfologici delle componenti radio derivati dal Modelfit.

Per ciascuna componente vengono utilizzati i parametri:

- MAJORFWHM
- AXIALRATIO
- PHI

L'asse minore dell'ellisse è calcolato come:

$$\text{MINORFWHM} = \text{MAJORFWHM} \times \text{AXIALRATIO} \quad (4.19)$$

Significato fisico

Questo grafico consente di studiare l'evoluzione delle dimensioni di una o più componenti radio in funzione del tempo, evidenziando fenomeni di espansione/compressione, spesso associati a interazioni con il mezzo circostante al nucleo centrale.

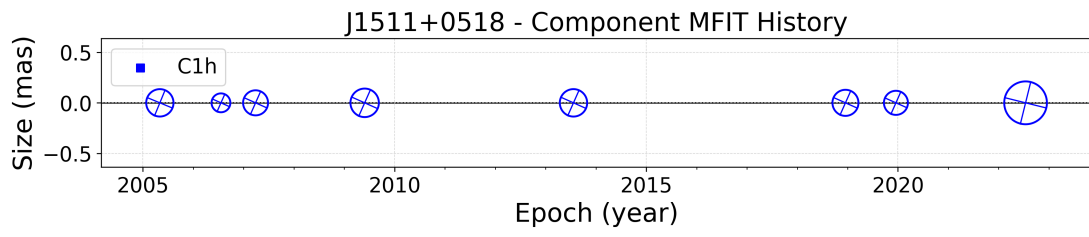


Figura 4.8: Grafico Componenti Modelfit/epoca

Capitolo 5

Analisi dinamica delle radiosorgenti JSS

5.1 Metodologia usata per l'analisi dinamica delle radiosorgenti

L'analisi dinamica delle radiosorgenti è incentrata sullo studio di dati acquisiti con il VLBA a diverse epoche e a diverse frequenze. Per raggiungere questo obiettivo è necessario seguire un metodo di lavoro finalizzato a :

1. **Individuare le componenti della radiosorgente** che ne definiscono gli elementi principali della struttura;
2. **elaborare i dati seguendo un "workflow"** per ottenere le grandezze di interesse: morfologiche, di flusso, cinematiche, di periodo e infinescrivere una relazione sui risultati ottenuti.

Si fanno le seguenti importanti premesse:

- i dati osservativi VLBA provengono dall'archivio dell'NRAO. Si tratta di dati acquisiti negli ultimi trenta anni nel corso di progetti di osservazione con le più diverse finalità, definite da coloro i quali hanno fatto la proposta osservativa. Questo comporta un'ovvia mancanza di omogeneità ad esempio sulla durata delle osservazioni nelle varie epoche e/o sulla frequenza di osservazione;
- le grandezze cinematiche quali distanza, velocità radiale e angolare sono individuate rispetto a una componente di riferimento della sorgente: per cui sono valori relativi. La posizione iniziale di riferimento dei dati è spesso poco significativa, in quanto può dipendere dalla riduzione dati e di solito non corrisponde ad alcuna componente ottenuta con il processo di model fitting gaussiano. Per i nostri scopi è necessario individuare una componente di riferimento, dato che misuriamo posizioni relative, rispetto a cui riferire le posizioni nelle diverse epoche per poi derivare i dati cinematici. L'ideale sarebbe avere come riferimento il nucleo della radiogalassia. Purtroppo il core radio raramente è visibile in quanto ci occupiamo di radiogalassie i cui

getti hanno orientazione prossima al piano del cielo. Si deve quindi utilizzare un'altra componente di riferimento e per i nostri scopi è utile scegliere una `hot_spot` (cioè la componente terminale del getto). Le `hot_spot` hanno il vantaggio di essere particolarmente brillanti e di solito ben identificabili alle diverse epoche di osservazione e sono generalmente di dimensioni contenute;

- Lo scopo di questo studio finalizzato capire se esiste un moto di precessione dei getti in due radiosorgenti JSS. Le componenti su cui analizzare il moto dei getti sono le componenti terminali, cioè le `hot_spot`. Individuarne una come riferimento ci permette di ricavare i dati cinematici del moto di un'`hot_spot` rispetto all'altra (anche se l'ideale sarebbe rispetto al core). Tramite questi dati si può valutare in termini qualitativi e quantitativi l'esistenza di un moto trasversale e quindi di riorientazione dei getti;
- Infine è bene ricordare che la classificazione delle componenti, core, `hot_spot`, getti, componenti secondarie è, a volte, frutto di ipotesi ragionevoli ma non certe.

Approccio usato per l'individuazione delle componenti

L'individuazione della struttura delle radiosorgenti compatte avviene attraverso il riconoscimento delle principali componenti morfologiche: `hot_spot`, getti, core e componenti secondarie tramite l'utilizzo del task MODELFIT in DIFMAP. Ovviamente non tutte queste tipologie di componenti sono identificabili in ogni sorgente. Ad esempio, come già scritto, solo in alcuni CSO il nucleo è chiaramente visibile, mentre nella maggior parte delle radiogalassie compatte i nuclei centrali risultano troppo deboli per essere rilevati.

Un vincolo fondamentale della nostra analisi cinematica è la possibilità di identificare in modo affidabile le singole componenti della radiosorgente da un'epoca all'altra, così da poterne tracciare il moto. Una difficoltà rilevante deriva dal fatto che il modelfit può creare componenti differenti a causa della qualità e quantità dei dati osservativi acquisiti in epoche diverse ed anche per le scelte operative che si fanno applicando il task: ad esempio è possibile scegliere il numero totale di componenti da utilizzare e/o il loro tipo (funzioni delta, gaussiane circolari o ellittiche).

Linee guida utilizzate per il Model fitting

Per individuare le componenti, come già scritto, si è utilizzato il task MODELFIT di DIFMAP, basato su modelli di distribuzione di brillantezza gaussiane.

Il model fitting nel piano UV sfrutta pienamente la risoluzione angolare delle osservazioni ed è particolarmente vantaggioso quando la struttura della sorgente è dominata da poche componenti compatte.

Ai fini dell'analisi dinamica, l'obiettivo principale è la determinazione accurata della posizione delle componenti. Per ogni sorgente analizzata si è partiti costruendo un modello di fit di riferimento il più possibile affidabile utilizzando le osservazioni con i dati di migliore qualità, ovvero quelle di maggiore durata e con tutte o quasi le antenne del VLBA attive.

Successivamente, il modello di riferimento è stato propagato alle altre osservazioni, mediante l'uso del task MODELFIT di DIFMAP che aggiorna opportunamente i parametri che caratterizzano le componenti .

Purtroppo non sempre si è riusciti a propagare lo stesso identico modello in tutte le epoche. Con il passare degli anni può succedere che la sorgente cambi: ad esempio ci può essere una variazione significativa nel flusso di una o più componenti oppure che emerga un componente in precedenza non presente. Anche la scarsa qualità dei dati di alcune osservazioni hanno effetto sulla propagazione del modello di riferimento.

In questi casi a partire dal modello di fit iniziale si è ottenuta una modellizzazione parzialmente diversa per numero e posizione delle componenti, ma il più possibile correlata a quella di riferimento.

In figura 5.1 e 5.2 è rappresentato un esempio di modelfit con 5 componenti della sorgente J1511.

Nel fitting delle componenti nel piano UV si è seguito in larga parte l'approccio descritto da Lister et al. (2009) e da An et al. (2012). Ogni set di dati, ossia i dati relativi a un'osservazione a una determinata frequenza ed epoca, è stato modellato:

- utilizzando il numero minimo di componenti semplici necessarie a riprodurre adeguatamente la morfologia complessiva, tipicamente corrispondenti alle componenti più brillanti;
- privilegiando componenti gaussiane circolari rispetto a quelle ellittiche al fine di ridurre il numero di parametri liberi e ottenere una determinazione più robusta dei centroidi delle componenti;
- sostituendo le componenti gaussiane ellittiche che degeneravano in segmenti con rapporto assiale nullo con gaussiane circolari;
- utilizzando una componente con funzione delta nei casi in cui la dimensione adattata di una gaussiana circolare risultava molto inferiore al beam;
- aggiungendo componenti al modello fino a quando i picchi dei residui non scendevano al di sotto di 5 mJy/beam.

Identificazione delle componenti ed inserimento nel database dei dati osservativi

Ottenuti con la metodologia sopra illustrata i modelfit per tutte le osservazioni disponibili per la sorgente si è poi provveduto a inserire i dati nel foglio excel che costituisce il database dei dati osservativi.

Un passaggio fondamentale è la corretta identificazione di ciascuna componente della sorgente nelle varie epoche di osservazione. Le componenti con circa la stessa posizione tra epoche adiacenti sono state identificate come lo stesso componente e catalogate con la stessa lettera/codice.

In alcune epoche con osservazioni di scarsa qualità si è trovato uno scostamento significativo della posizione di alcune componenti. Per ovviare a questa criticità

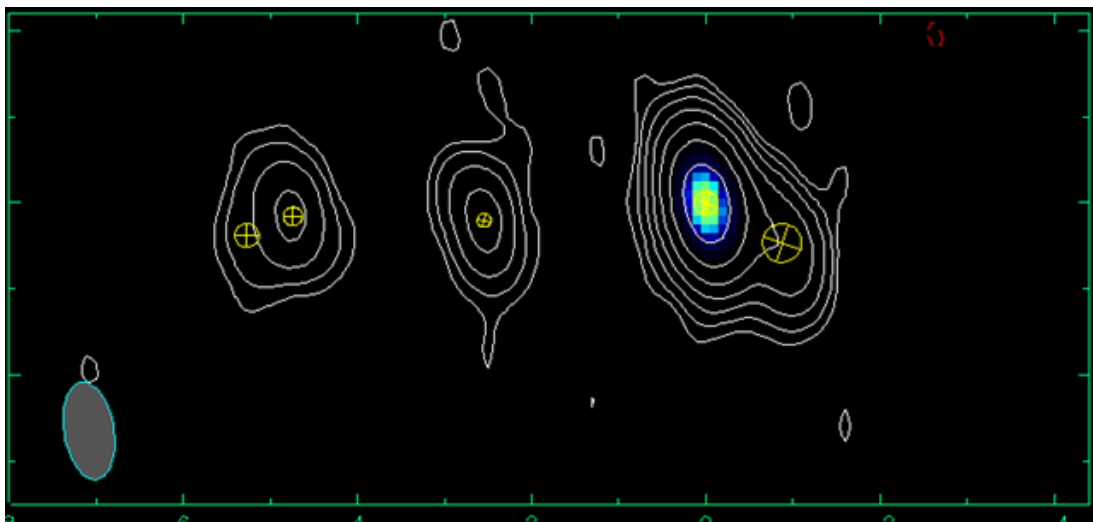


Figura 5.1: Immagine di J1511+0518 con sovrapposto il modelfit a 5 componenti della sorgente.

```
! Center RA: 15 11 41.26637, Dec: +05 18 09.25876 (2000.0)
! MODEL FITTING DIFMAP
! Flux (Jy) Radius (mas) Theta (deg) Major FWHM (mas) Axial ratio Phi (deg) T Freq (Hz) SpecIndex
0.600397 0.00465970 -57.3813 0.342188 1.00000 -113.962 1 1.53680e+10 0
0.0437715 0.941249 -125.838 0.704457 1.00000 -108.435 1 1.53680e+10 0
0.0346918 2.57548 95.7320 0.137055 1.00000 -100.784 1 1.53680e+10 0
0.0076457 4.72687 94.7262 0.174871 1.00000 -125.538 1 1.53680e+10 0
0.0255485 5.72545 96.8692 0.311156 1.00000 -99.4623 1 1.53680e+10 0
```

Figura 5.2: Modelfit a 5 componenti della radiosorgente J1511+0518.

nel programma di analisi dei dati è possibile escludere nella produzione dei grafici del moto le epoche in cui l'identificazione della posizione della componente sia troppo incerta.

”Workflow” per l’analisi dinamica delle radiosorgenti

Nell’analisi delle dinamica delle radiogalassie esaminate in questa tesi si è usato il programma di analisi dei dati osservativi sviluppato per la creazione dei grafici a supporto dell’analisi delle sorgenti.

Come esposto nel capitolo 4 (Software per l’analisi dei dati osservativi) l’interfaccia permette di seguire un flusso logico per l’analisi della radiosorgente che avviene tramite la lettura e lo studio dei grafici prodotti tramite il software.

Dopo aver effettuato l’inserimento delle componenti nel database si avvia un ”workflow” di lavoro che prevede per ciascuna sorgente oggetto di studio:

1. La scelta della componente per la quale si vogliono ottenere i dati cinematici;
2. la scelta delle epoche di osservazione;
3. la scelta delle fonti, cioè delle frequenze di osservazioni abbinate al tipo di modelfit individuato con il numero di componenti . Come già spiegato la propagazione del modello di fit di riferimento per alcune osservazioni può creare un modello correlato a quello iniziale ma che differisce per numero e posizione delle componenti. In ogni caso i risultati ottenuti per epoche

diverse sono tra loro indipendenti per cui è opportuno valutare operativamente, analizzando la dispersione dei dati (componenti), se utilizzando assieme modelli con numero diverso di componenti si ottengono grafici del moto consistenti. In questa analisi aiutano gli indicatori di correlazione lineare e χ^2 visualizzati nei grafici;

4. la scelta della componente di riferimento che assumerà coordinate (0,0) nel piano del cielo rispetto a cui calcolare la posizione delle altre componenti per tutte le epoche;
5. il ricalcolo delle coordinate delle altre componenti e i relativi errori calcolati con le formule della propagazione degli errori come descritto nel capitolo 3 (Gestione degli errori);
6. l'analisi dei grafici di moto proprio, distanza, angolo e flusso per ciascuna componente di interesse per ottenere le grandezze cinematiche (posizione e velocità) e la valutazione degli indicatori sulla qualità del fit;
7. il calcolo di alcuni indicatori quali la dimensione della sorgente, l'età cinematica e il periodo di precessione ;
8. la stesura di una relazione che a partire dall'analisi della morfologia radio, della variabilità del flusso delle principali componenti esplicita le valutazioni dinamiche sulla radiosorgente e l'eventuale esistenza di precessione dei getti.

La possibilità di avere a disposizione un programma che permette di selezionare le componenti di riferimento rispetto a cui effettuare il ricalcolo delle coordinate e degli errori rispetto a quella oggetto di indagine e poter poi produrre immediatamente i grafici e i relativi fit lineari ha permesso di aumentare la flessibilità dell'indagine e di verificare velocemente differenti scenari sulla dinamica delle sorgenti.

5.2 Database delle radiosorgenti JSS

Nel corso di questo lavoro di tesi, i dati osservativi relativi a 14 radiosorgenti JSS sono stati inseriti nel database utilizzato dal software di analisi. Tali dati provengono da diverse fonti: dalla letteratura scientifica, dal progetto MOJAVE, da precedenti attività di ricerca svolte presso l'IRA di Bologna e da osservazioni recuperate dall'archivio NRAO. Queste ultime sono state successivamente calibrate mediante il software AIPS e modellizzate con il task MODELFIT del software DIFMAP nel corso della presente ricerca.

Tra le radiosorgenti incluse nel database, si è scelto di approfondire in particolare l'analisi dinamica delle sorgenti J1335+5844 e J1511+0518. Queste due radiosorgenti, già oggetto di studi in letteratura, sono state selezionate in quanto caratterizzate da un buon campionamento sia temporale sia in frequenza, condizione che consente di ricostruire con maggiore affidabilità l'evoluzione morfologica e cinematica delle componenti radio.

5.3 Analisi dinamica J1335+5844 (B1333+589)

La radiosorgente JSS, J1335+5844 (nota anche come B1333+589 o 4C + 58.26) ha un redshift fotometrico di 0.59 (Tremblay et al. 2016). ed è stata classificata come High Frequency Peaker (HFP) con frequenza di turnover attorno ai 5 GHz (Dallacasa et al. 2000) e Compact Symmetric Object (CSO).

Le osservazioni VLBA a 8 GHz evidenziano una struttura tripla in direzione nord-sud, costituita da due regioni terminali compatte separate da circa 13 mas cioè ~ 87 pc e da un core centrale debole (si veda figura 5.3). Tale morfologia è tipica delle CSO, caratterizzate da getti confinati nelle regioni centrali della galassia ospite ed è confermata anche in letteratura (si veda figura 2 in Stanghellini et al. 2009b) . Le sorgente radio J1335+5844 è stata tra le le prime in cui è stata rilevata in via preliminare e proposta come possibile caratteristica un moto trasversale delle hot_spots (Stanghellini et al. 2009b), sebbene con notevole incertezza osservativa. In questa ricerca si sono ampliati i risultati di Stanghellini et al. 2009b e An et al. 2012 integrandoli con dati d'archivio VLBA più recenti. In Tabella 5.1 un sommario di alcuni dati della sorgente.

Tabella 5.1: Sommario della sorgente J1335+5844

| Sorgente | RA (J2000) | Dec (J2000) | z | Scala (pc mas ⁻¹) | Mag (r) |
|-------------|--------------|---------------|------|-------------------------------|---------|
| J1335+05844 | 13:35:25.928 | +58:44:00.291 | 0.59 | 6.709 | 22.0 |

Dati osservativi utilizzati nell'analisi di J1335+5844

Per monitorare il cambiamento della posizione relativa delle componenti nel tempo, sono state riprocessate le osservazioni VLBA reperite nell'archivio NRAO, alle frequenze di 8 GHz integrate con i dati VLBA calibrati e modellizzati dell'articolo An et al. 2012 . L'elenco completo delle osservazioni utilizzate e delle relative epoche è riportato in Tabella 5.2 da cui si può vedere che abbiamo raccolto 11 osservazioni a 8.4 GHz tra agosto 1994 e novembre 2025.

Tabella 5.2: Dati 8 GHz: epoche e fonte dati VLBA

| Epoca | Fonte dati VLBA |
|------------|-----------------|
| 1994-08-11 | An et al. 2012 |
| 1994-12-21 | BR026 |
| 2002-01-11 | An et al. 2012 |
| 2004-01-24 | An et al. 2012 |
| 2005-05-03 | An et al. 2012 |
| 2006-11-03 | An et al. 2012 |
| 2010-08-05 | BO035B |
| 2014-12-20 | BG219 |
| 2017-02-25 | UF001 |
| 2023-10-23 | UC003LV |
| 2025-09-09 | UC003XD |

I dati recuperati dall'archivio NRAO sono stati calibrati seguendo le procedure standard in AIPS, includendo la calibrazione in ampiezza e fase. Successivamente, i dataset sono stati esportati in DIFMAP, dove è stato eseguito il procedimento di hybrid mapping — comprendente cicli iterativi di self-calibration e imaging — e l'individuazione delle componenti con il task MODELFIT. In appendice A sezione A.1 sono visualizzati i dati utilizzati per l'analisi di questa sorgente.

5.3.1 Analisi Morfologia radio

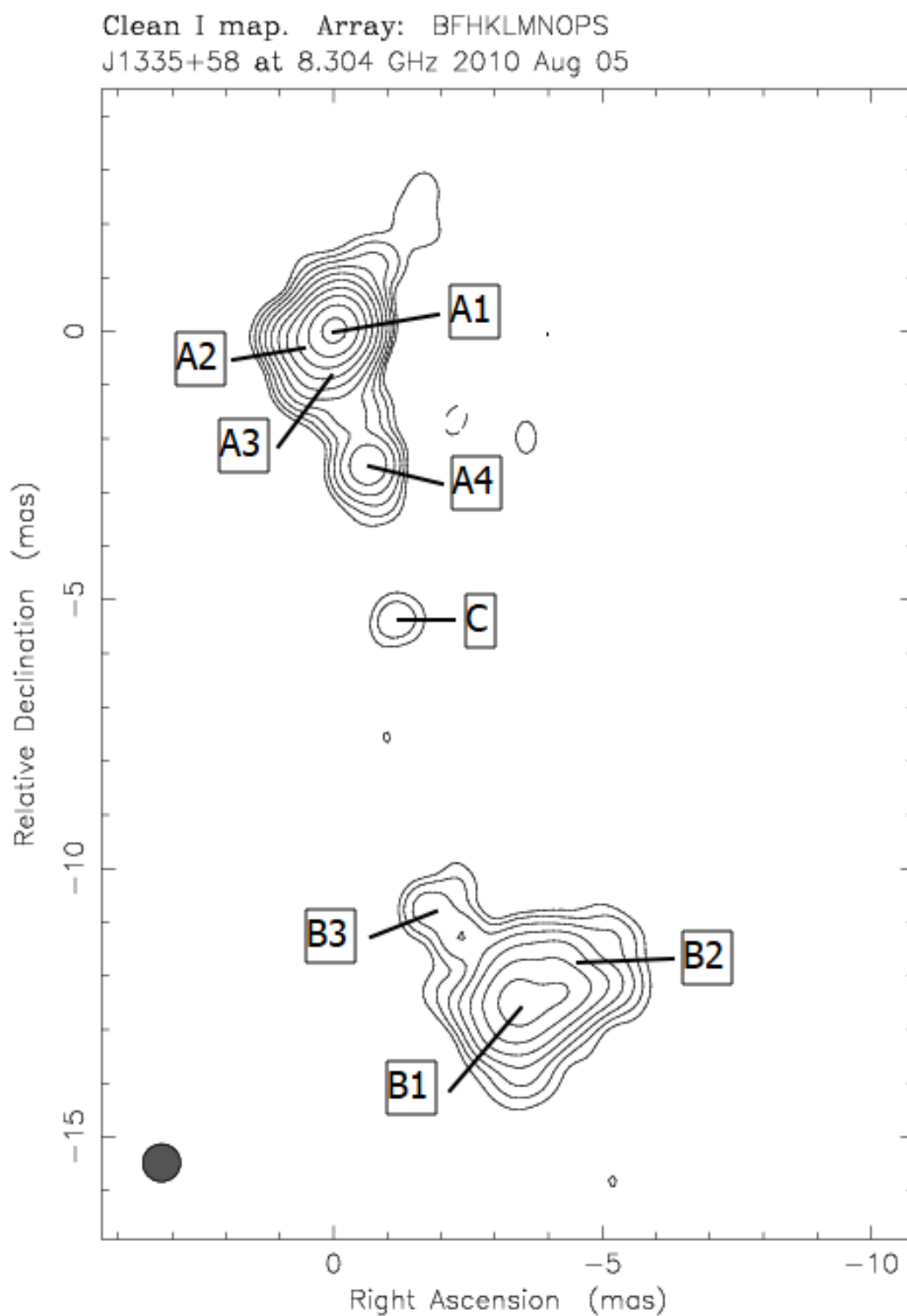


Figura 5.3: J1335+5844, immagine VLBA a 8GHz del 2010 con le componenti individuate con il modelfit

Dal punto di vista morfologico, la sorgente presenta due regioni principali, una settentrionale e una meridionale, oltre a una debole emissione centrale associabile al core (componente C in figura 5.3). La regione nord mostra una struttura terminale compatta e brillante accompagnata da un'estensione allungata che si dirige verso la componente centrale. La regione sud appare più sviluppata in direzione est-ovest, con una morfologia meno collimata e una distribuzione di emissione più estesa. Si sono considerati come hot_spot le due componenti più intense e compatte nelle regioni settentrionale e meridionale.

Nel modello adottato per il modelfit, la radiosorgente J1335+5844 è stata descritta direttamente mediante otto componenti gaussiane. Nei casi in cui la qualità dei dati o la risoluzione angolare non abbiano consentito una deconvoluzione affidabile, le componenti sono state modellate come puntiformi. Il modello include il core centrale e due subcomponenti per ciascuna delle regioni estreme e tre componenti nei getti.

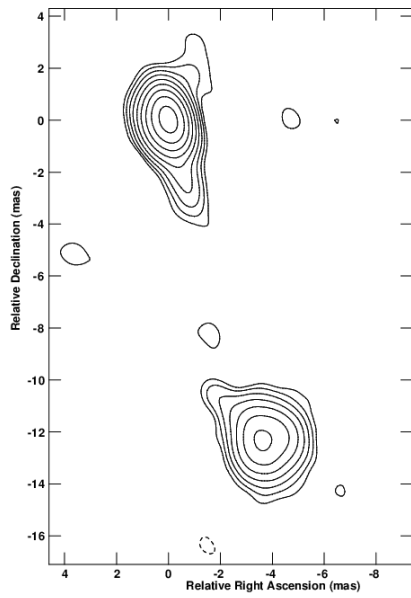
Come illustrato in figura 5.3 sono state identificate le seguenti componenti;

- **Il core C:** il nucleo centrale è caratterizzato da un flusso dell'ordine di pochi mJy alle diverse epoche di osservazione. La sua debolezza e la conseguente incertezza posizionale (a causa del basso rapporto segnale/rumore) non consentono di utilizzarlo come componente di riferimento, poiché ciò comporterebbe un'eccessiva propagazione degli errori sulle posizioni relative delle hot_spot.
- **Regione nord (settentrionale):** sono state individuate quattro componenti. A1 è la componente più brillante e compatta della sorgente che assumiamo essere l'hot_spot nord e per tale motivo viene adottata come riferimento per l'analisi dinamica. A2, prossima ad A1, costituisce una componente secondaria di minore intensità. Le componenti A3 e A4 sono interpretate come knot del getto settentrionale.
- **Regione sud (meridionale):** sono state identificate tre componenti. B1 è assunta essere l'hot_spot sud, compatto e ben definito. B2 è una seconda componente brillante nella regione meridionale. B3 è verosimilmente un knot associato al getto meridionale.

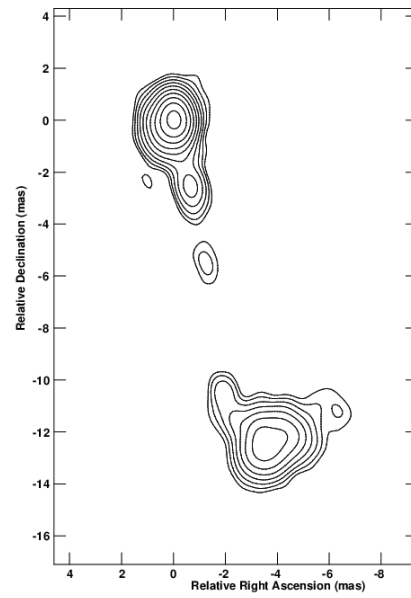
La presenza di due componenti brillanti in ciascuna regione (hot_spot e componente secondaria) è una conseguenza della modellizzazione adottata: la struttura osservata non è puntiforme, ma presenta una distribuzione di emissione estesa che richiede almeno due gaussiane per essere descritta in modo fisicamente e morfologicamente coerente. L'introduzione di una componente secondaria consente una rappresentazione più accurata dell'area di emissione.

Dal punto di vista fisico l'emissione estesa è dovuta alla diffusione degli elettroni della parte terminale del getto (hot_spot) eventualmente tracciando la posizione precedente dell'hot_spot.

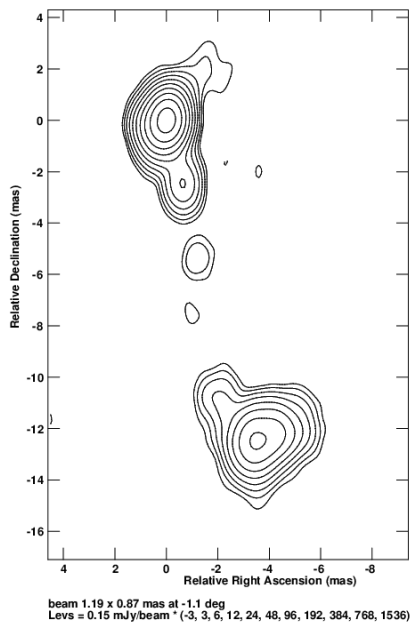
Immagini alle epoche di osservazione : la sequenza di immagini mostrata in figura 5.4 mostra quattro epoche della sorgente J1335+5844 acquisita alla frequenza di 8 GHz all'interno del periodo considerato.



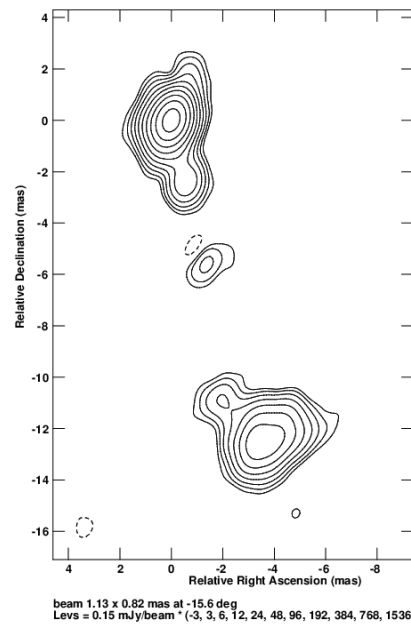
1994/12/21



2006/11/03



2010/08/05



2017/02/25

Figura 5.4: Immagini J1335+5844 a 8 GHz nei periodi 1994, 2006, 2010, 2017.

Evoluzione del flusso delle componenti

La Figura 5.5 riporta l'andamento temporale del flusso delle componenti modellizzate a 8 GHz: nel pannello superiore sono mostrate tutte le componenti, mentre nel pannello inferiore è evidenziato l'hot_spot meridionale B1.

L'hot_spot settentrionale A1 risulta sistematicamente la componente più brillante lungo l'intero intervallo osservativo (1994–2025) e non mostra variazioni significative oltre le incertezze di misura.

Al contrario, l'hot_spot B1 evidenzia una progressiva diminuzione di flusso. Tale comportamento può essere coerente con uno scenario di espansione adiabatica del plasma emittente, che comporta una riduzione della densità di energia delle particelle e del campo magnetico, con conseguente decremento della luminosità radio. È importante osservare che la diminuzione del flusso della componente B1 risulta molto meno marcata se escludiamo le epoche 2023 e 2025 caratterizzate da una scarsa qualità dei dati e quindi poco affidabili.

Le componenti secondarie delle regioni nord e sud presentano flussi dell'ordine di alcune decine di mJy, mentre il core e le componenti di getto risultano deboli (≤ 15 mJy), con una conseguente maggiore incertezza nella determinazione delle loro posizioni.

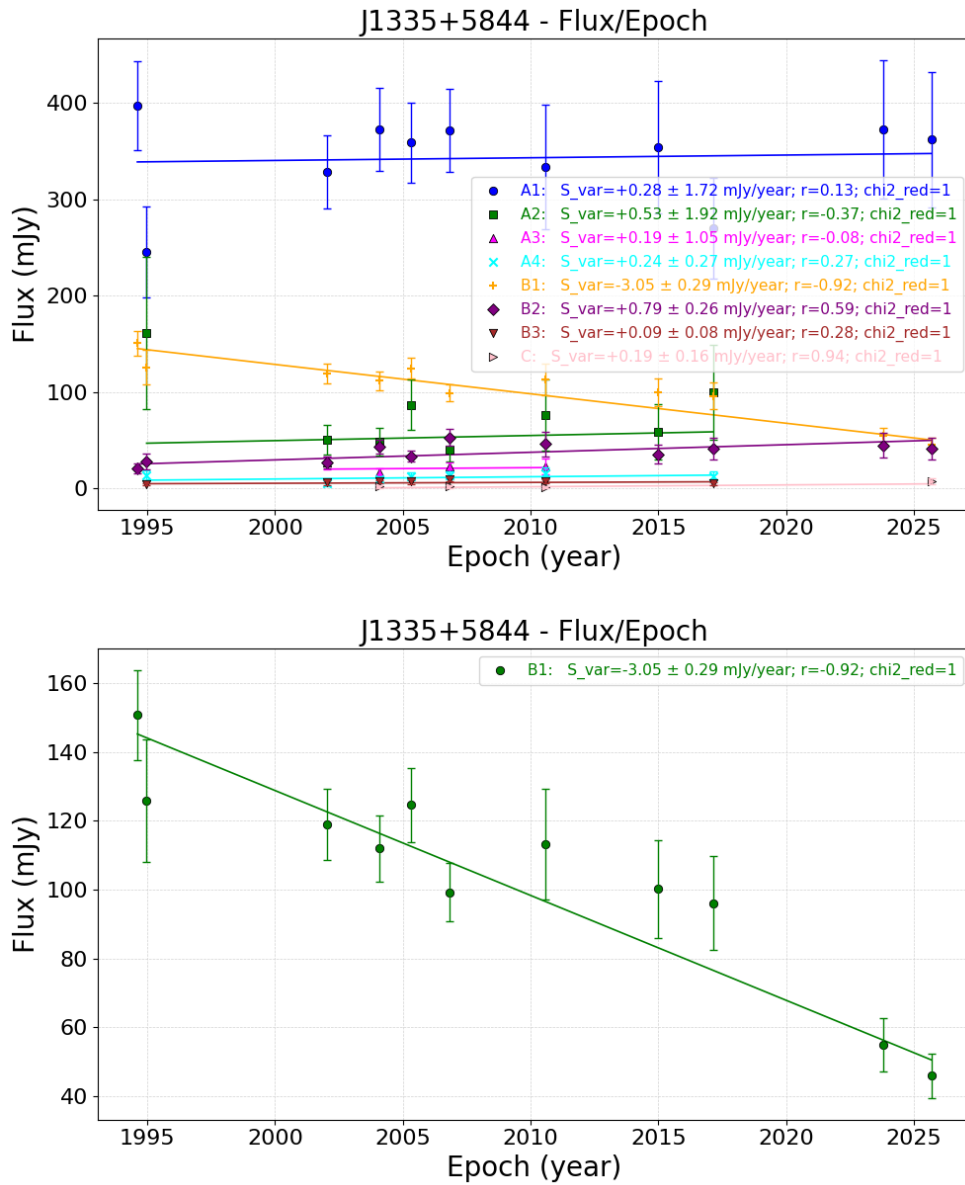


Figura 5.5: Flusso delle componenti della sorgente J1335+5844, in alto tutte le componenti con A1 colore blu e B1 colore giallo. Sotto la componente B1 da osservazioni VLBA a 8 GHz tutte le epoche fino al 2025.

5.3.2 Analisi del moto delle componenti

Si fanno alcune assunzioni iniziali:

- In assenza di una posizione centrale di riferimento luminosa e stabile (poiché la componente centrale è troppo debole o variabile), non possiamo distinguere un eventuale diverso moto delle due hot_spot e dobbiamo assumere un comportamento simmetrico per entrambi i lati;
- la determinazione dei moti propri è relativa al movimento dell'hot_spot meridionale B1 rispetto a quello settentrionale A1 preso come componente

di riferimento in virtù della sua elevata e stabile luminosità nel periodo 1994–2025;

- l’analisi cinematica si differenzia parzialmente inserendo o escludendo le ultime due date di osservazione, 2023 e 2025, a causa della loro scarsa affidabilità dovuta al breve tempo di osservazione (120sec) che rende poco affidabili immagini di sorgenti complesse descritte da pochi dati;
- la produzione dei grafici è eseguita con il software di analisi dei dati osservativi. Tutte le posizioni relative, le distanze e gli angoli sono stati ricalcolati rispetto ad A1, con propagazione delle incertezze calcolate come descritto nel Capitolo 3.

I grafici moto-proprio, angolo/epoca e distanza/epoca di figura 5.6 che sono stati ottenuti inserendo le osservazioni recenti di breve durata (120sec) del 2023 e 2025 evidenziano come la componente B1 presenti un moto trasversale dominante nella direzione perpendicolare all’asse principale del getto in direzione est, mentre il moto radiale risulta nullo suggerendo che la sorgente non si stia espandendo.

Con l’esclusione delle epoche 2023 e 2025, caratterizzate da una copertura del piano UV limitata a causa dei brevi tempi di osservazione, si ottengono i grafici di moto proprio, angolo/epoca e distanza/epoca sono riportati in figura 5.7.

Il moto trasversale dell’hot spot B1 e la sua velocità angolare risultano confermati, entro i limiti delle incertezze, anche escludendo queste due epoche. Tale comportamento appare quindi sistematico lungo l’intero intervallo temporale (~ 30 anni) e conferma l’ipotesi di uno spostamento laterale degli hot spot già riportata da An et al. 2012 e Stanghellini et al. 2025. Si conferma pertanto che la dinamica osservata non corrisponde a una semplice espansione rettilinea.

L’esclusione delle osservazione delle ultime due date , 2023 e 2025, modifica invece i valori di velocità radiale dell’hot_spot B1: la sorgente sembra ora, oltre al moto trasversale, anche espandersi con velocità di circa $5\mu as$. Dal fit distanza/epoca (Fig. 5.7) si ottiene per la componente B1 una velocità radiale proiettata (di espansione tra le due hot_spot) di:

$$\mu = 5.1 \pm 0.9 \mu as yr^{-1}, \quad (5.1)$$

corrispondente, nel sistema di riferimento della sorgente (rest-frame), a:

$$v = 0.11c \pm 0.02c. \quad (5.2)$$

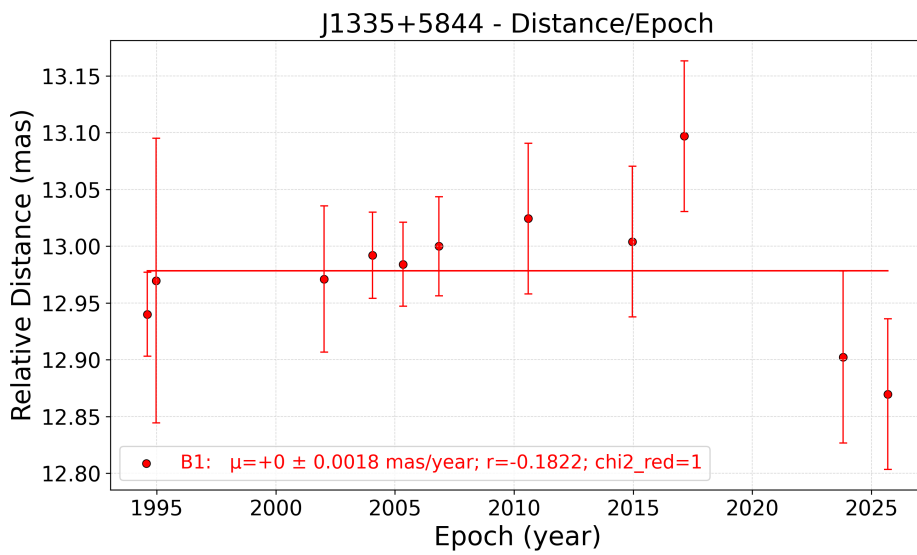
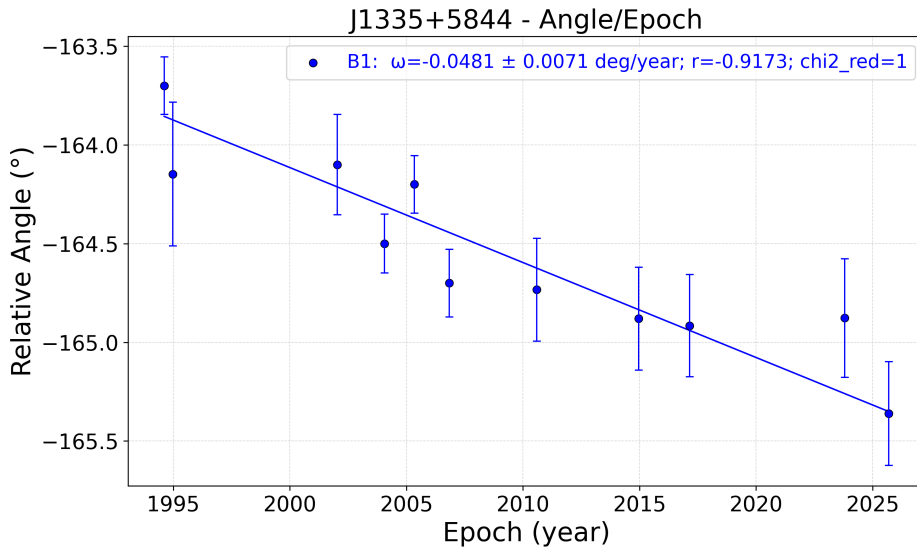
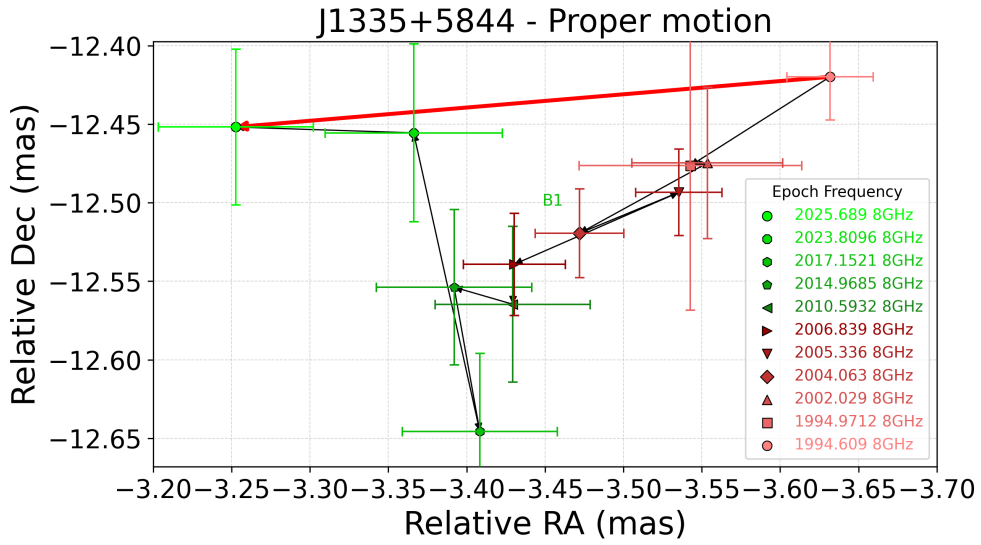


Figura 5.6: Moto proprio nel cielo della componente B1 della sorgente J1335+5844, componente di riferimento A1, da osservazioni VLBA a 8 GHz epoche dal 1994 al 2025. Grafici: in alto moto proprio nel cielo, in mezzo angolo/epoca, in basso distanza/epoca.

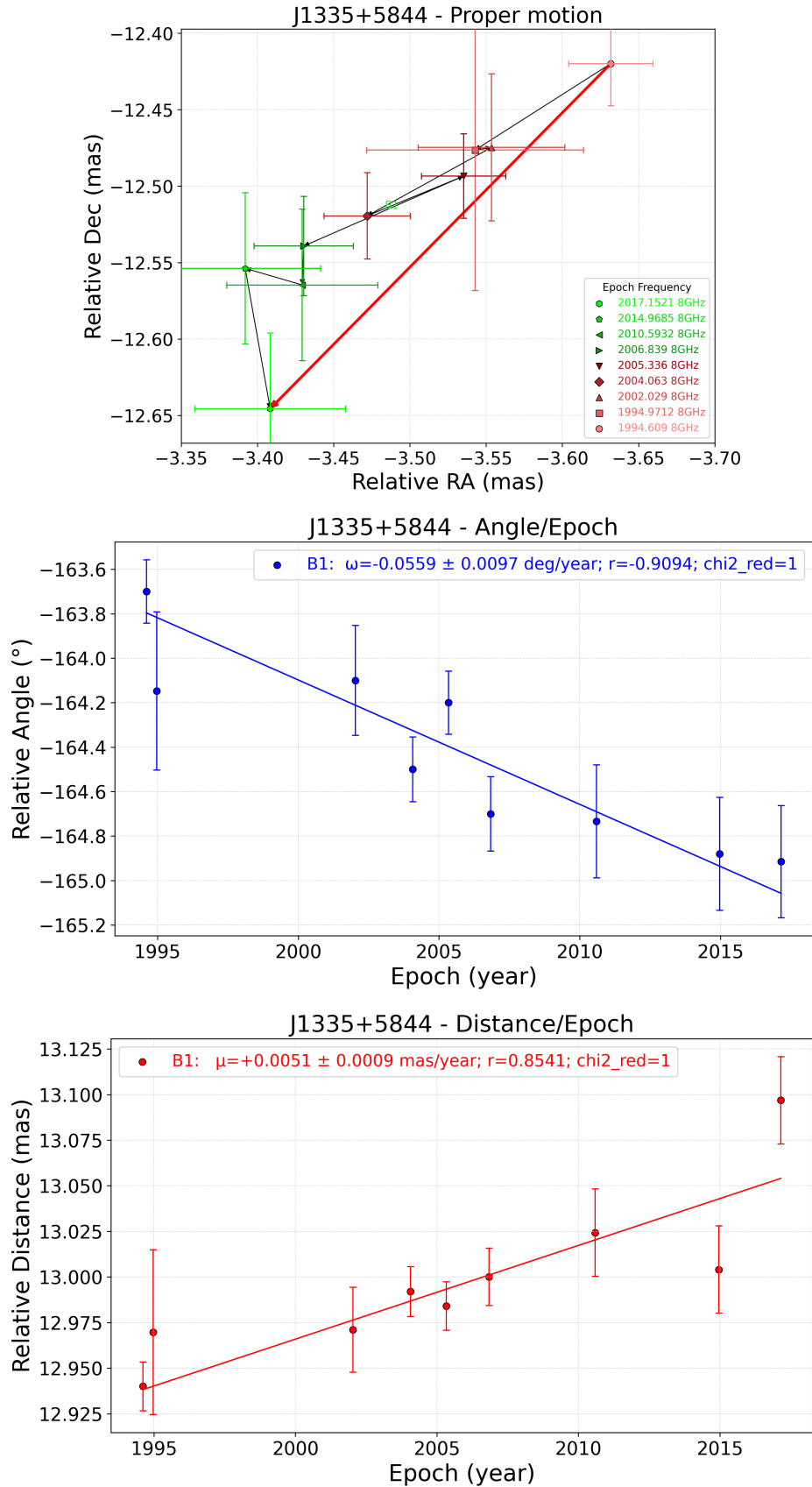


Figura 5.7: Moto proprio della componente B1 della sorgente J1335+5844, componente di riferimento A1, da osservazioni VLBA a 8 GHz epoche dal 1994 al 2017. Grafici: in alto moto proprio nel cielo, in mezzo angolo/epoca, in basso distanza/epoca.

5.3.3 Età cinematica e periodo di precessione

Assumendo che l'espansione misurata sia una proprietà intrinseca ad una velocità costante è stata stimata l'età cinematica tra le due hot_spot A1 e B1 . Si utilizza l'interpolazione lineare sul grafico distanza/epoca escludendo le osservazioni del 2023 e 2025 (figura 5.7) per ottenere la velocità radiale di $\mu = 5.1 \mu\text{as yr}^{-1}$ e la distanza di 13.05 mas che corrisponde a circa 87.6pc al 2017. Applicando la correzione cosmologica, sapendo che la sorgente si trova a $z=0.59$, si ottiene:

$$\text{Età cinematica} = \frac{1}{1+z} \cdot \frac{\text{Distanza (A1,B1)}}{\mu}$$

$$\text{Età cinematica} \sim 1600 \text{ yr}$$

Quindi la sorgente avrebbe un'età cinematica dell'ordine di 10^3 anni. Questo calcolo dà un'età indicativa che inserirebbe la radiosorgente JSS J1331+5844 nello scenario di sorgente giovane (youth scenario) .

Se assumiamo che il moto trasversale osservato sia prodotto dalla precessione dell'asse del getto possiamo stimare il periodo di precessione. Per farlo è necessario definire la configurazione geometrica del sistema. Poiché l'obiettivo è stimare l'ordine di grandezza del periodo, adottiamo alcune assunzioni semplificate: consideriamo l'apertura del cono di precessione pari al doppio dell'angolo sotteso dalla massima estensione trasversale della radiosorgente rispetto al centro della struttura (circa 25 gradi per J1335+5844). Assumiamo inoltre che il moto campionato avvenga in prossimità della massima velocità trasversale e trascuriamo gli effetti di proiezione.

Il grafico angolo/epoca dà una velocità angolare per la componente B1 di circa $0.056 \text{ deg yr}^{-1}$ e con l'apertura del cono di precessione di 50 gradi si ottiene:

$$\text{Periodo di Precessione} = \frac{1}{1+z} \cdot \frac{360}{\text{vel.angolare}} \cdot \sin\left(\frac{\text{angolo al centro cono[rad]}}{2}\right)$$

$$\text{Periodo di Precessione} \sim 2000 \text{ yr}$$

Quindi nello scenario di jet redirection, l'ordine di grandezza del periodo di precessione dei getti è dell'ordine di 10^3 anni.

L'incertezza sulla geometria influisce sulla stima come segue: se limitassimo l'apertura del cono alla sola emissione visibile, il periodo risulterebbe inferiore di un fattore ~ 2 ; al contrario, ipotizzando un'apertura estrema di 90 gradi, il periodo aumenterebbe di un fattore ~ 3 . Infine, qualora la velocità apparente fosse ridotta da effetti di proiezione rispetto a quella intrinseca, il periodo di precessione reale risulterebbe sistematicamente inferiore a quello stimato.

5.4 Analisi dinamica J1511+0518 (B1509+054)

La radiosorgente JSS J1511+0518 (nota anche come B1509+054) è identificata con una galassia di tipo Seyfert 1 a redshift $z = 0.084$ ed è una delle radiosorgenti JSS brillanti più vicine. In tabella 5.3 alcuni dati della sorgente

La struttura principale mostra una morfologia tripla, tipica dei CSO, con un'estensione angolare complessiva di circa 5.6 mas, corrispondenti a 9 pc. È costituita da un core compatto e brillante e da due regioni estreme, disposte in direzione est-ovest, ciascuna ulteriormente risolta in subcomponenti (An et al. 2012).

A bassa frequenza (1.7 GHz) è stata rilevata una debole emissione estesa a una distanza di ~ 30 mas cioè ~ 50 pc dalla struttura principale e ad essa non allineata, interpretata come emissione fossile associata a una precedente fase di attività della radiosorgente (Orienti et al. 2008). Tale componente non è rilevata alle frequenze analizzate in questo lavoro ed è stata pertanto esclusa dall'analisi.

Tabella 5.3: Sommario della sorgente J1511+0518

| Sorgente | RA (J2000) | Dec (J2000) | z | Scala (pc mas ⁻¹) | Mag (r) |
|------------|-------------|---------------|-------|-------------------------------|---------|
| J1511+0518 | 15:11:41.27 | +05:18:09.259 | 0.084 | 1.580 | 17.2 |

Per la sorgente J1511+0518, nell'articolo di Orienti et al. 2008 lo spettro delle singole componenti è stato analizzato per verificare se il turnover sia compatibile con synchrotron self-absorption (SSA) oppure richieda un contributo di free-free absorption (FFA).

Nel caso di J1511+0518, l'analisi spettrale evidenzia che la componente occidentale presenta un turnover compatibile con synchrotron self-absorption (SSA) in condizioni prossime all'equipartizione, mentre per la componente orientale il campo magnetico stimato assumendo SSA risulta fisicamente non plausibile. L'indice spettrale nel regime otticamente spesso, più ripido del limite teorico previsto per la SSA, insieme al miglior adattamento ottenuto con un modello di free-free absorption (FFA), indica che il picco spettrale della componente East è afflitto sia da synchrotron self absorption che da free-free absorption da parte di plasma termico ionizzato. Tale evidenza suggerisce la presenza di un mezzo circumnucleare denso costituito da plasma ionizzato non distribuito in modo isotropo e continuo attorno alla sorgente, ma con presenza di variazioni locali di opacità lungo diverse linee di vista.

Dati osservativi utilizzati nell'analisi di J1511+0518

Per monitorare il cambiamento della posizione relativa delle componenti nel tempo, sono state considerate le osservazioni disponibili nel database del progetto Mojave, gestito dal MOJAVE team (Lister et al. 2018), che fornisce dati VLBA già calibrati a 15 GHz per diverse epoche osservative.

Tali dati sono stati integrati con ulteriori osservazioni VLBA reperite nell'archivio NRAO e riprocessate, alle frequenze di 8 GHz. L'elenco completo delle osservazioni utilizzate e delle relative epoche è riportato nelle Tabelle 5.4, 5.5.

Tabella 5.4: Dati 15 GHz dal progetto Mojave: epoche e progetti VLBA

| Epoca | VLBA Project |
|--------------|---------------------|
| 2005-05-03 | BY020 |
| 2006-04-05 | BL137C |
| 2006-07-21 | BO025E |
| 2006-12-01 | BL137L |
| 2007-03-28 | BL137P |
| 2007-08-24 | BL149AM |
| 2009-05-28 | BL149BL |
| 2012-12-23 | BL178AX |
| 2013-07-22 | BL178BF |
| 2018-12-16 | BL229AT |
| 2019-12-17 | BL273C |
| 2021-01-11 | BL273I |
| 2022-01-22 | BL286AF |
| 2022-02-07 | BL286AG |
| 2023-05-27 | BL286AU |
| 2024-06-02 | BL286BG |
| 2025-01-26 | BK255AE |

Tabella 5.5: Dati 8 GHz: epoche e progetti VLBA

| Epoca | VLBA Project |
|--------------|---------------------|
| 2005-05-03 | BY020 |
| 2006-04-05 | BL137C |
| 2006-07-21 | BO025E |
| 2022-07-15 | BS298 |
| 2022-08-19 | BS298 |

I dati recuperati dall’archivio NRAO sono stati calibrati seguendo le procedure standard in AIPS, includendo la calibrazione in ampiezza e fase. Successivamente, i dataset sono stati esportati in DIFMAP, dove è stato eseguito il procedimento di hybrid mapping — comprendente cicli iterativi di self-calibration e imaging — e l’individuazione delle componenti con il task MODELFIT. In appendice A sezione A.2 sono visualizzati i dati utilizzati per l’analisi di questa sorgente.

5.4.1 Analisi Morfologia radio

L’intervallo temporale delle osservazioni VLBA utilizzate in questa tesi inizia nel 2002 ed arriva al 2025 con un arco temporale di 23 anni. In questo lavoro considereremo solo le osservazioni con il VLBA alle frequenze di 8 e 15 GHz . Nella figura 5.8 è rappresentata la sorgente con le sue componenti.

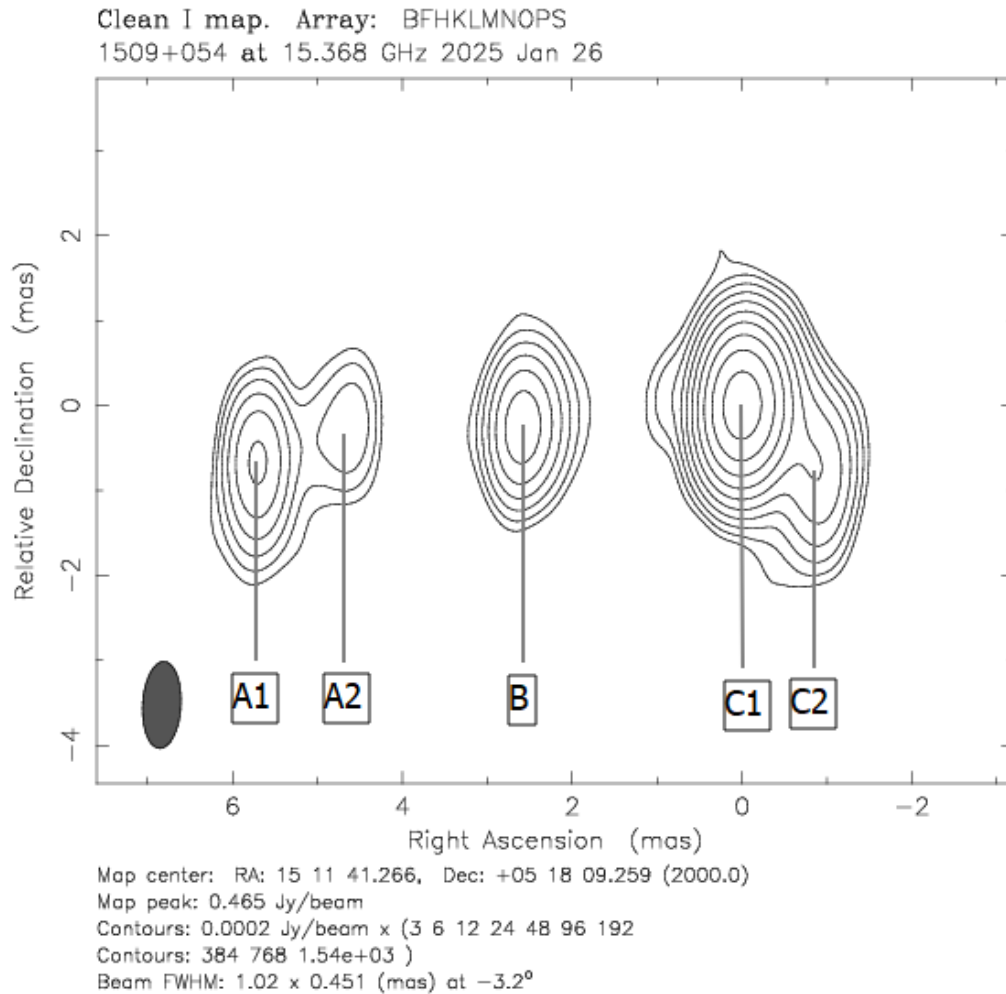


Figura 5.8: Immagine VLBA a 15 GHz del 2025 con le componenti

La radiosorgente J1511+0518 è stata descritta utilizzando il task MODELFIT con cinque componenti gaussiane (ellittiche o circolari). Il modello include il core centrale e due subcomponenti per ciascuna delle regioni estreme. Le interpretazioni presumibili del modello sono ;

- **componente centrale B:** è stata inizialmente presa come riferimento supponendo fosse il core. I dati che seguono dimostreranno che in realtà è un componente che si muove rispetto alle hot_spot e quindi non rappresenta un punto di riferimento affidabile. E' probabilmente una fusione tra l'emissione del core piu' un knot del jet nella sua parte iniziale;
- **regione EST:** due componenti; la componente A2 che è inizialmente dominante in questa regione e poi cala rapidamente in flusso; dal 2010 le due componenti A1 e A2 hanno circa la stessa luminosità. Come spiegato successivamente si assume A1 essere l'hot_spot;
- **regione OVEST:** due componenti; i dati ci fanno chiaramente vedere come la componente C1 sia molto più luminosa e compatta di C2 per cui si

assume che C1 sia l'hot_spot e C2 una componente secondaria.

Le due hot_spot A1 e C1, nel 2005 sono separate da circa 5mas per cui la dimensione complessiva delle sorgente al 2005 è di circa 8pc .

Di seguito vengono presentate le immagini della sorgente alle frequenze di osservazione: la sequenza di immagini è costituita di coppie di immagini che mostrano alle due frequenze di osservazione (8, 15 GHz) come la sorgente si è evoluta dalle epoche iniziali a quelle finali.

E' particolarmente evidente nelle immagini a 8 GHz (figura 5.9 ma ancora di più in quelle a 15 GHz figura 5.10) un cambiamento significativo di morfologia della regione EST. Si può osservare visivamente come le componenti della regione EST, A1 e A2, si siano differenziate.

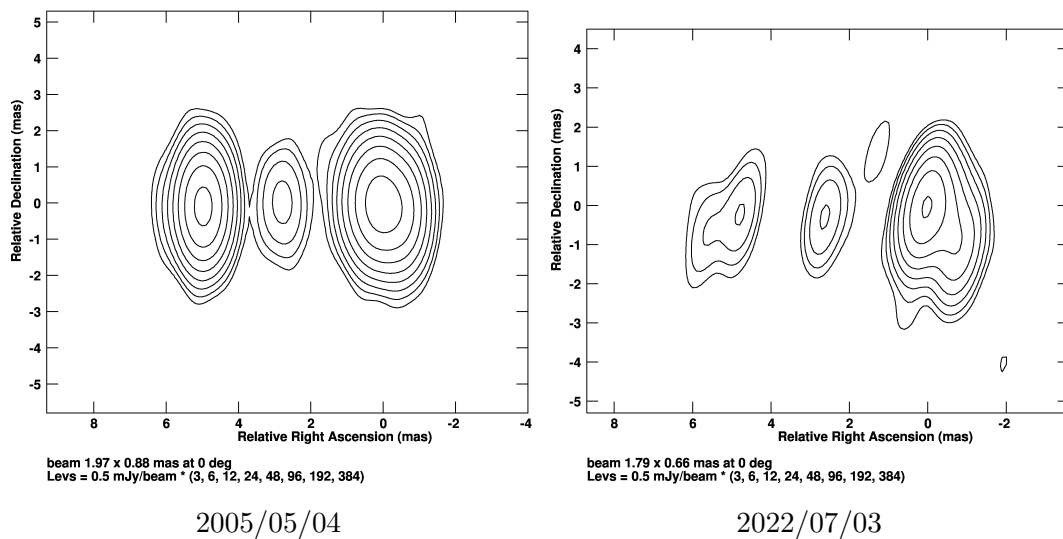


Figura 5.9: Immagini J1511+058 a 8 GHz.

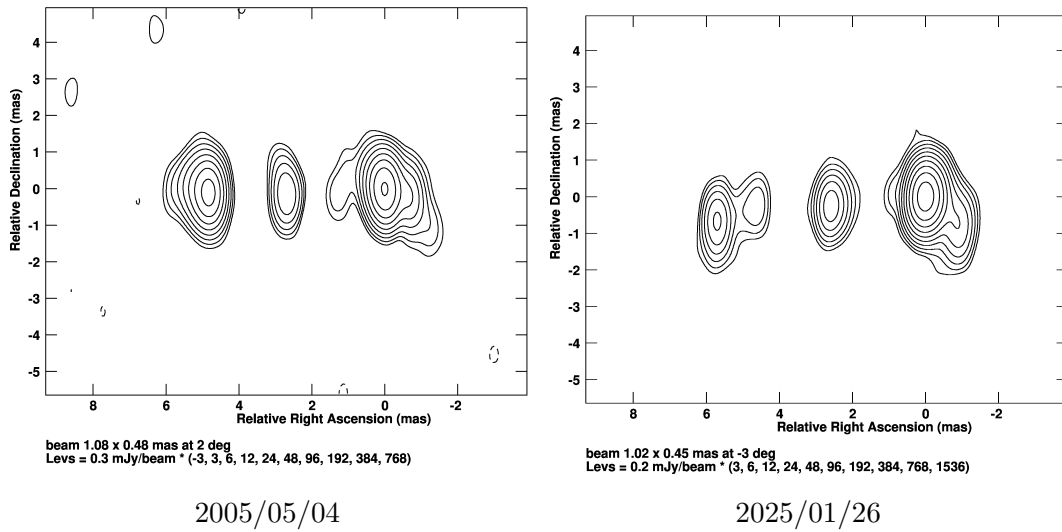


Figura 5.10: Immagini J1511+058 a 15 GHz.

5.4.2 Analisi del flusso delle componenti

La radio sorgente J1511+0518, come scritto all'inizio di questa analisi, si trova in presenza di un mezzo circumnucleare denso costituito da plasma ionizzato non distribuito in modo isotropo e continuo attorno alla sorgente, ma con presenza di variazioni locali di opacità lungo diverse linee di vista.

COMPONENTI A1 e A2 (regione EST): l'analisi dell'andamento del flusso delle componenti A1 e A2 nel periodo 2005-2025 a 8, 15 GHz ci indica che la luminosità di entrambe le componenti cala. In figura 5.11 si può vedere il flusso delle due componenti a 15 GHz. Inizialmente, nel 2005, il flusso della componente A2 era molto maggiore rispetto alla componente A1 (circa 1/3 della componente A2). Le osservazioni degli anni successivi attestano che il flusso della componente A2 tende a diminuire molto di più della componente A1. Si possono dare alcune spiegazioni di questa diminuzione:

- la diminuzione di flusso di entrambe le componenti potrebbe essere dovuta a un'espansione adiabatica del volume emittente che riduce la luminosità radio;
- Il leggero aumento di flusso delle componente A1 nell'epoca 2025 potrebbe essere un segnale di injection di un flusso maggiore di particelle da parte del core.

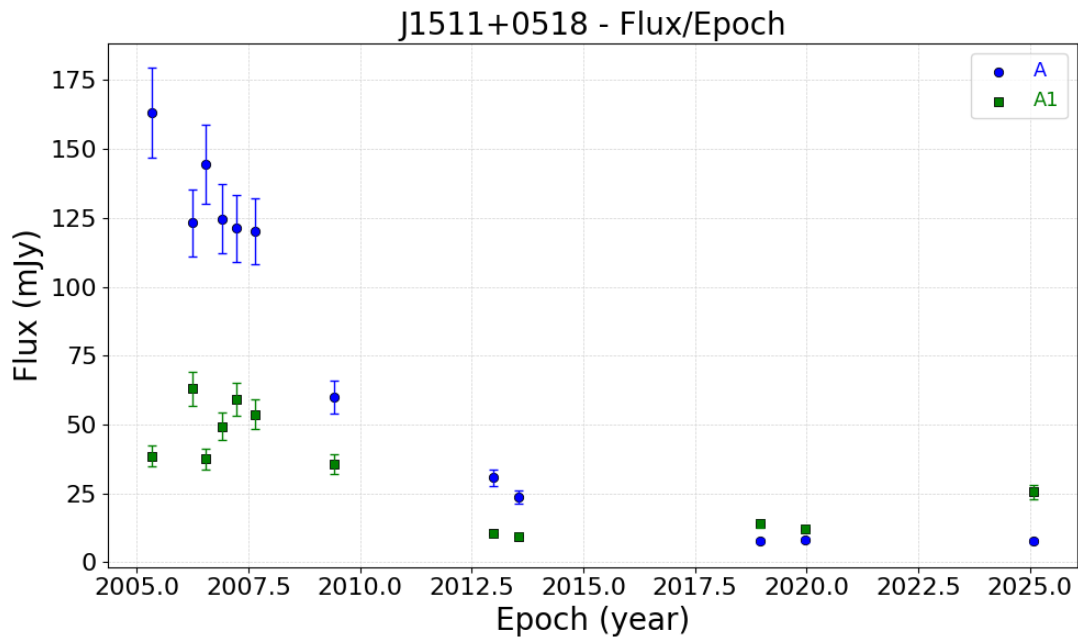


Figura 5.11: Flusso delle componenti A2(colore Blu) e A1(colore verde) a 15 GHz nel periodo 2005-2025. Si osserva che a partire dal 2019 il flusso delle componente A1 è superiore a quello della componente A2 anche se entrambe le componenti hanno un flusso relativamente basso.

COMPONENTE centrale B: è un componente dell'ordine delle decine di mJy. Nel periodo 2002-2025 aumenta di luminosità nella banda 15 GHz e rimane circa costante nella banda 8 GHz. La figura 5.12 visualizza l'andamento della luminosità della componente B a 15 GHz. Essendo una sorgente a flusso variabile, se B è il core potrebbe non avere il proprio flusso descritto coerentemente con un andamento lineare. Nonostante questa premessa, abbiamo trattato la componente B nello stesso modo delle altre componenti.

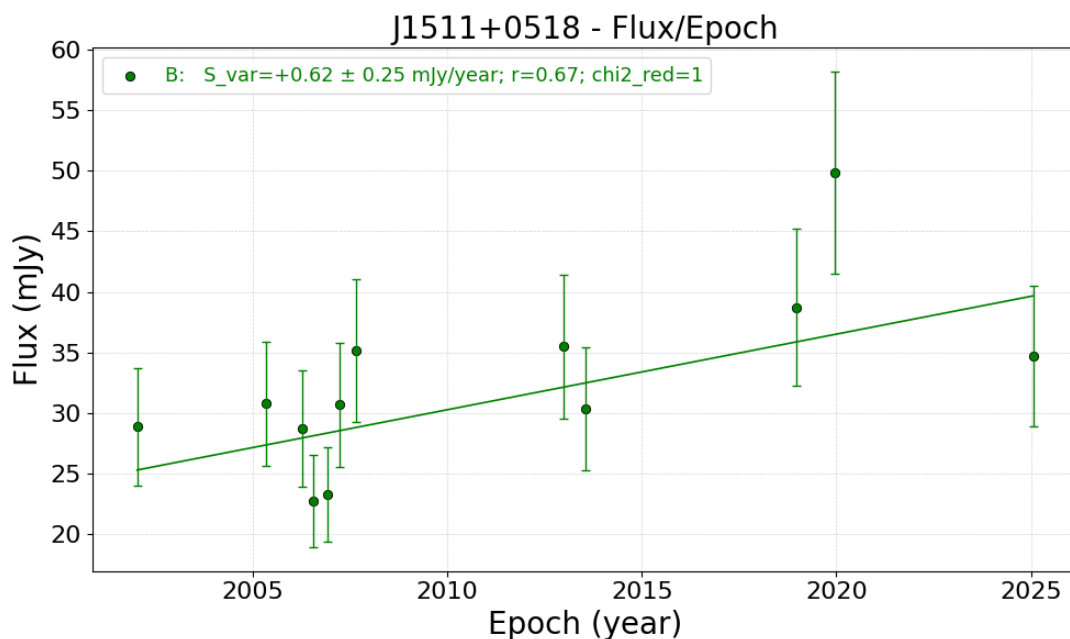


Figura 5.12: Flusso delle componente B della sorgente a 15 GHz nel periodo 2002-2025.

COMPONENTI C1 e C2 (regione ovest): la componente C1 (l'hot_spot Ovest) a 8 GHz ha una luminosità circa costante nel periodo 2022-2025. Siamo in prossimità della frequenza di turnover della componente come calcolato da Orienti et al. (2008) e questo può spiegare la stabilità dell'emissione a questa frequenza. Alla frequenza di 15 GHz la componente C1 ha una luminosità iniziale elevata che si incrementa di n fattore 2 nel periodo 2002-2025. Nella figura 5.13 è rappresentato l'andamento del flusso a 15 GHz della componente C1.

Il deciso aumento della luminosità delle componente C1 potrebbe essere spiegato con una fluttuazione in aumento dell'injection di elettroni da parte del core.

La componente C2 invece ha una luminosità relativamente bassa con un andamento che cambia alle diverse frequenze di osservazione. Nel periodo 2002-2025 a 15 GHz, come si può vedere nella figura 5.14 il flusso tende a calare leggermente anche se i dati sono molto dispersi probabilmente a causa della bassa luminosità. Alla frequenza di 8 GHz si ha una diminuzione del flusso molto maggiore. Nella figura 5.15 è rappresentato l'andamento a 8 GHz della componente C2.

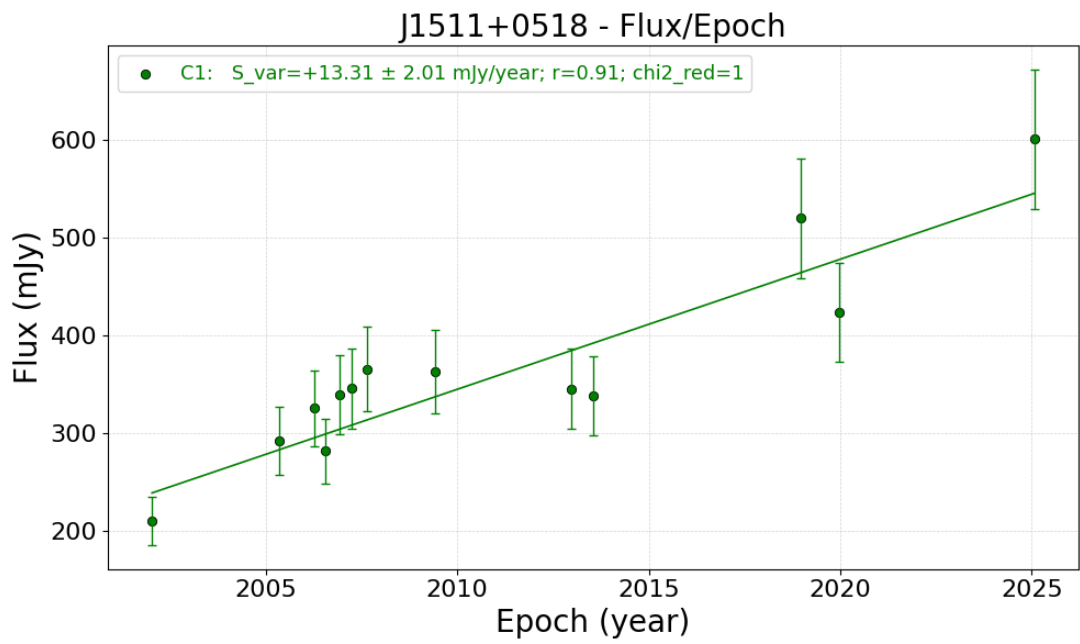


Figura 5.13: Flusso delle componente C1 della sorgente a 15 GHz nel periodo 2002-2025.

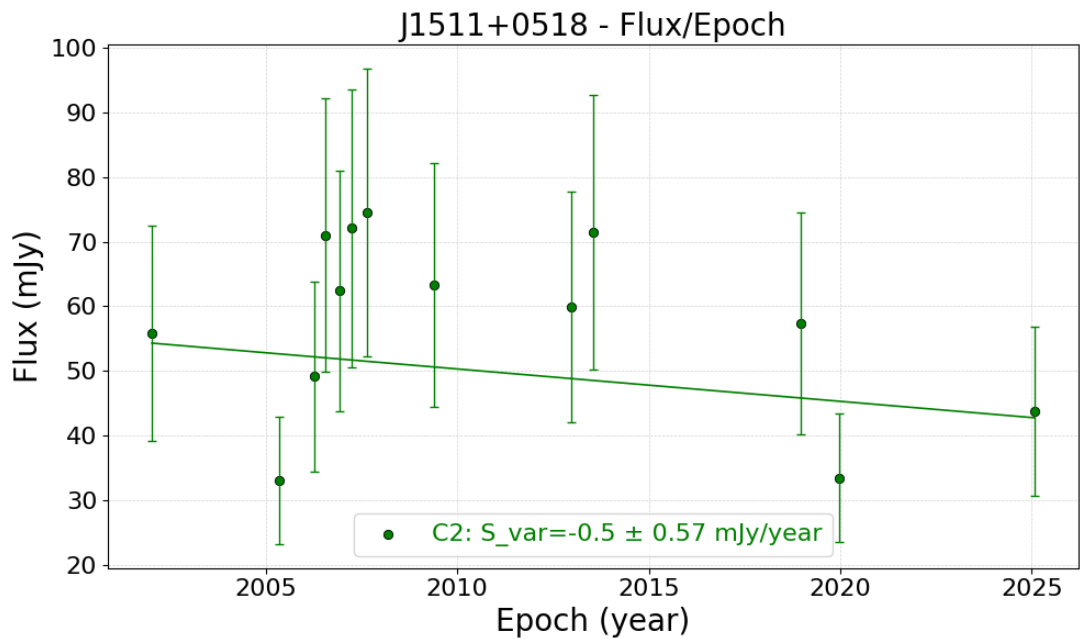


Figura 5.14: Flusso delle componente C2 della sorgente a 15 GHz nel periodo 2002-2025.

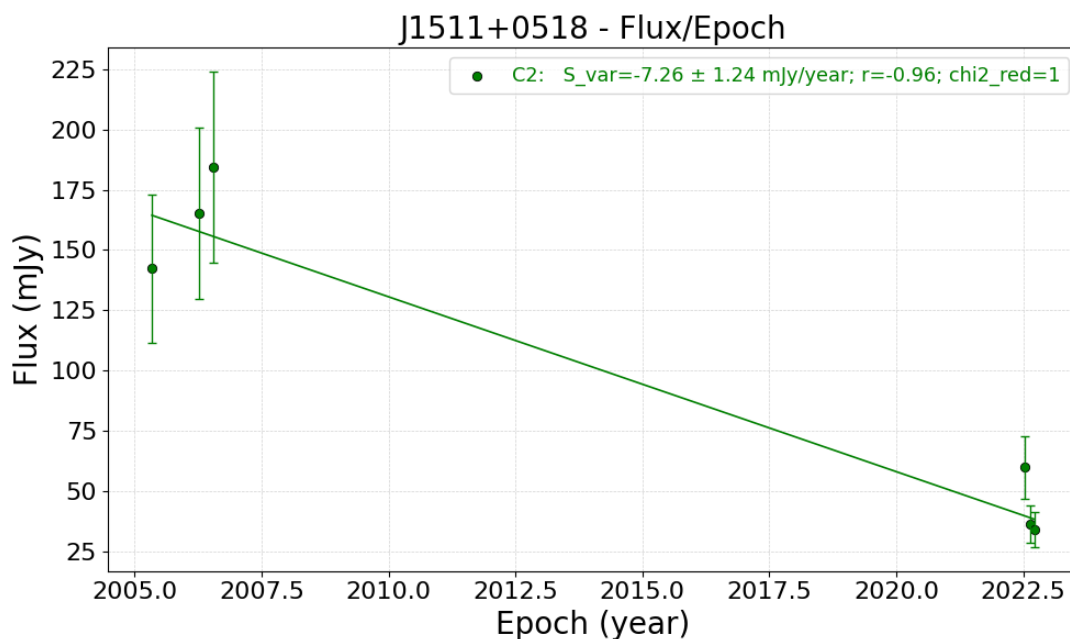


Figura 5.15: Flusso delle componente C2 della sorgente a 8 GHz nel periodo 2002-2025.

5.4.3 Analisi del moto delle componenti

Si fanno alcune assunzioni iniziali:

- si analizzano i moti delle componenti con particolare attenzione alle componenti individuate come hot_spot e cioè C1 e A1;
- si mantengono distinte le osservazioni per banda radio (X, U) poichè la posizione alle diverse frequenze delle componenti può risentire dell'opacità sia all'interno della sorgente che dell'ISM;
- i dati a 15 GHz raccolti per questa sorgente sono i più numerosi e sono distribuiti in maniera omogenea nell'intervallo 2002-2025 per cui producono i fit più affidabili;
- la produzione dei grafici è eseguita con il software di analisi dei dati osservativi che implementa la gestione degli errori descritta nel capitolo 3.

Analisi del moto con componente con riferimento B

La possibilità di individuare il core delle sorgente nella componente B e utilizzarla come componente di riferimento per l'analisi dei moti propri consentirebbe, in linea di principio, di ottenere una stima indipendente del moto delle due hot_spot. In una fase iniziale dell'analisi è stato pertanto adottato questo approccio utilizzando la componente B come riferimento. Tuttavia, come mostrato nel grafico di figura 5.16, l'assunzione che la componente B rappresenti il core, cioè un componente stazionaria del sistema, risulta problematica poichè la distanza dalla

componente C1 si riduce nel tempo ed è circa costante quella della componente C2. È plausibile ipotizzare che la posizione delle componenti B abbia uno spostamento sia a causa di effetti di opacità (core shift) sia per l'eventuale eiezione di una nuova componente del getto (knot), ancora non risolta, diretta verso l'hot_spot ad ovest, , con il risultato di uno spostamento apparente del core in quella direzione . Alla luce di queste considerazioni, si è scelto di modificare l'approccio adottando come riferimento la componente C1, identificata con l'hot_spot ovest. Questo tipo di analisi e' stato spessissimo usata per studiare i moti di espansione nei CSO (per esempio Owsianik et al. 1998).

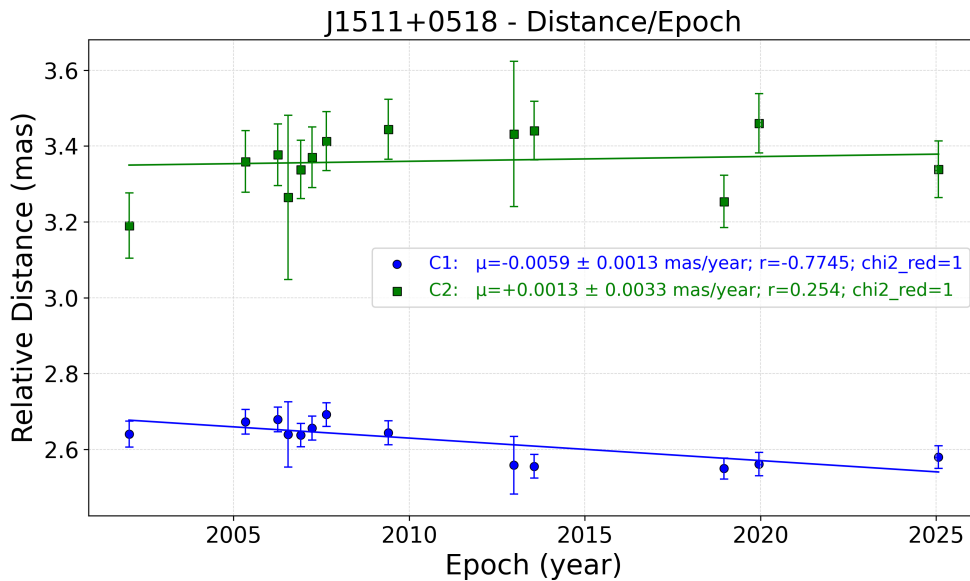


Figura 5.16: Distanza delle componenti C1 e C2 dalla componente di riferimento centrale B della sorgente J1511+0518 a 15GHz.

Analisi del moto con componente di riferimento C1

Adottando come riferimento la componente C1, identificata con l'hot_spot ovest, è stato possibile misurare il moto relativo tra le due hot_spot, assumendo un comportamento cinematico simmetrico rispetto a un punto di origine posto nel centro geometrico della loro separazione.

Componenti A1 e A2 (regione EST)

Moto proprio nel cielo : dai grafici di figura 5.17 si evince abbastanza chiaramente come la componente A1 (hot_spot EST) si muova allontanandosi dalla componente C1 (hot_spot ovest) in maniera abbastanza coerente in tutte e due le frequenze di osservazione. Invece la componente A2 (in alto a destra nei grafici) ha un modesto moto angolare e radiale rispetto alla componente di riferimento C1 per cui non sarà presa in considerazione nell'analisi del moto (sia radiale che angolare).

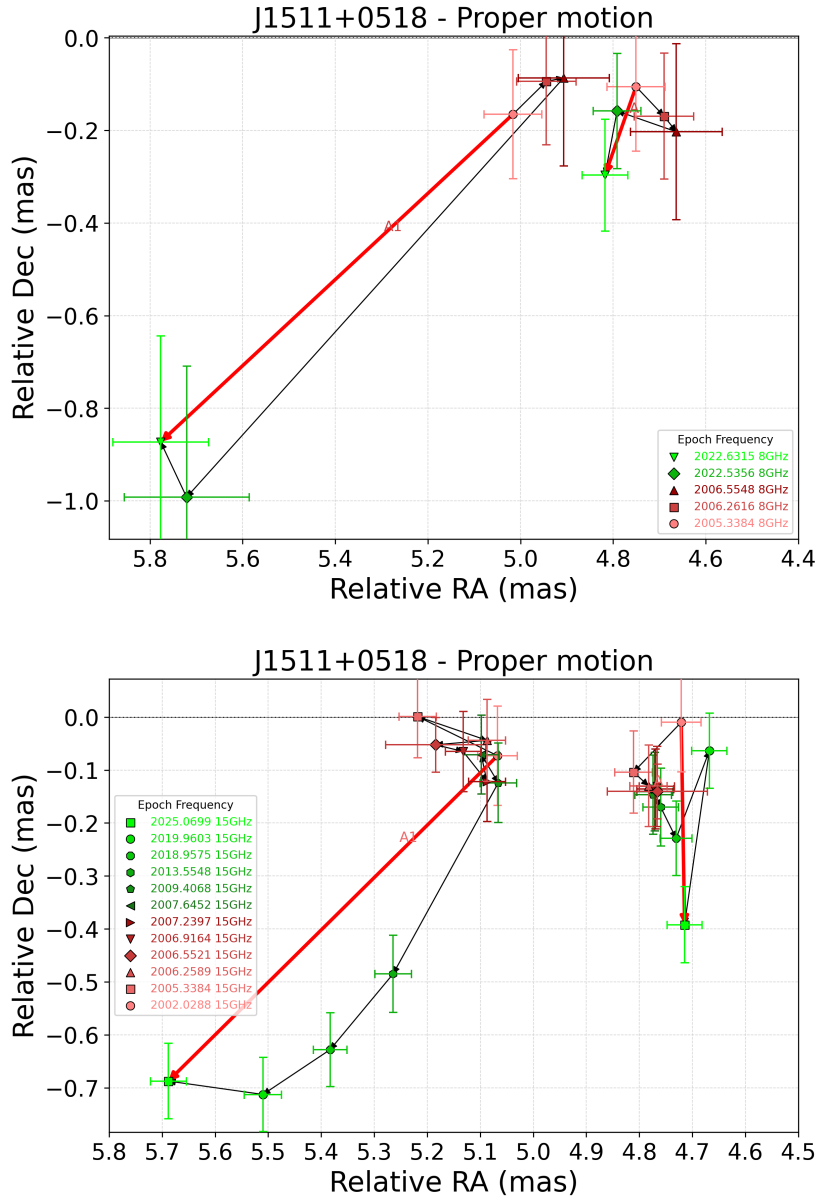


Figura 5.17: Moto proprio nel cielo delle componenti A1 e A2 della sorgente J1511+0518, componente di riferimento C1, da osservazioni VLBA, pannello in alto 8 GHz, pannello in basso 15 GHz.

Distanza e angolo della componente A1 dall'hot_spot ovest C1 :

Per la componente A1 (che si ipotizza essere l'hot_spot EST) è rappresentato nel grafico di figura 5.18 con il colore blu l'andamento di distanza/epoca dato dalle osservazioni a 15 GHz e con il colore rosso l'andamento di distanza/epoca ottenuto con i dati a 8 GHz.

Coi dati a 15 GHz, che rappresentano il data set più completo ed affidabile, la componente A1 ha un moto di allontanamento dalla componente C1 con velocità $\mu=29.4 \pm 3.3 \mu\text{as yr}^{-1}$ che corrisponde nel rest-frame a una $v=0.15c \pm 0.016c$ e la distanza dell'hot_spot A1 dall'altra hot_spot C1 aumenta di oltre il 10% nel range di tempo considerato..

Coi dati a 8 GHz, per i quali si hanno solo 5 epoche di osservazione la velocità di allontanamento è superiore. Dall'interpolazione si ottiene $\mu=50.9 \pm 5.3 \mu\text{as yr}^{-1}$ che corrisponde nel rest-frame a una $v= 0.26c \pm 0.027c$.

Si specifica che si considerano più attendibili i dati a 15 GHz poichè le osservazioni 2022 a 8 GHz hanno ridotta copertura del piano UV a causa dei modesti tempi di osservazione.

Infine i grafici di figura 5.19 di angolo/epoca a ci danno la la velocità angolare di A1 rispetto al riferimento C1. Prendendo i dati a 15 GHz di figura 5.19, si ottiene dal fit lineare $\omega=0.398 \pm 0.04 \text{ deg yr}^{-1}$. I dati a 8 GHz danno un risultato coerente rispetto a quelli a 15 GHz. Nel grafico di figura 5.19 sono rappresentati gli andamenti dello spostamento angolare di A1 con i dati a 8 (colore rosso) e 15 GHz (colore blu).

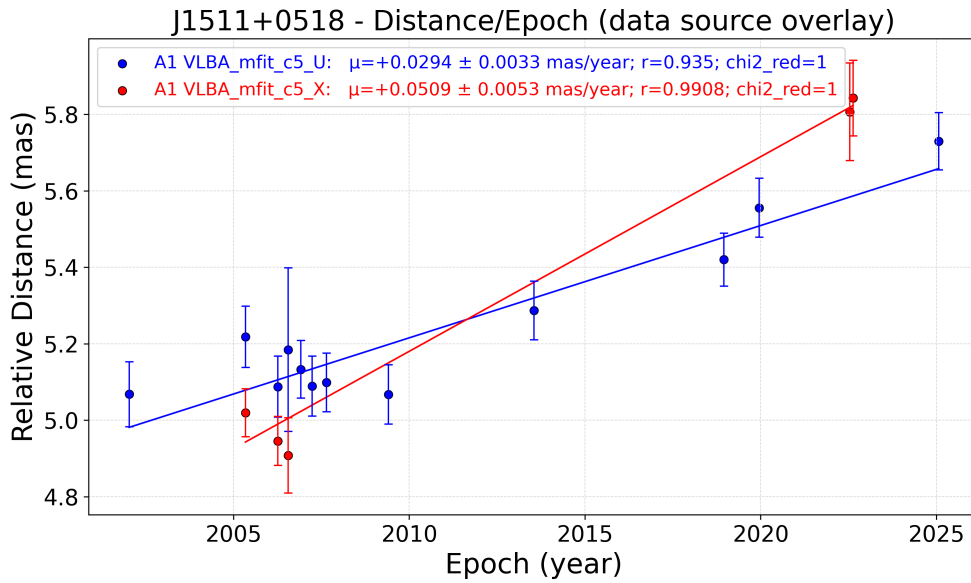


Figura 5.18: Distanza/epoca della componente A1 dalla componente di riferimento C1 della sorgente J1511+0518. In figura i dati di distanza/epoca di A1 a 8 GHz (colore rosso) e 15GHz (colore Blu).

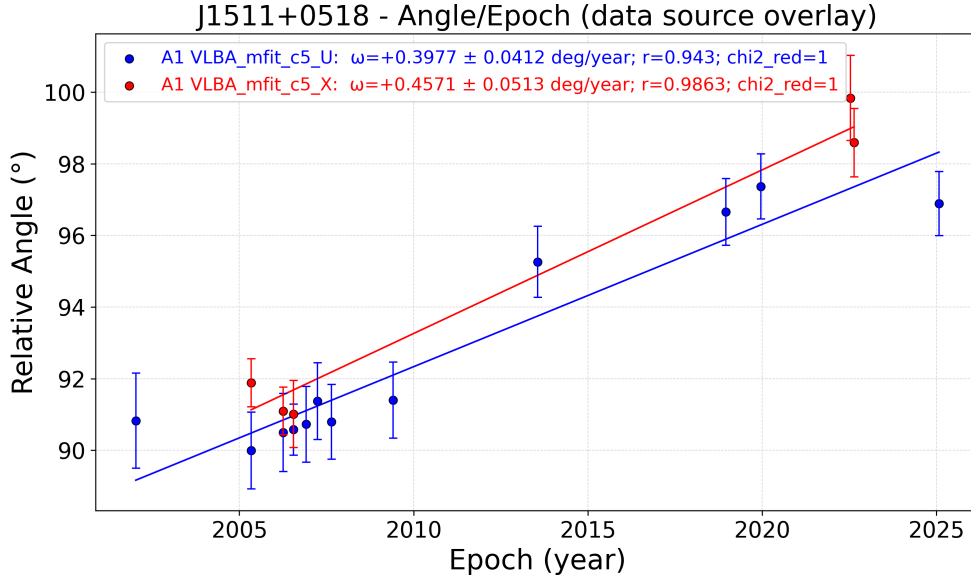


Figura 5.19: angolo/epoca della componente A1 dalla componente di riferimento C1 della sorgente J1511+0518. In figura i dati di angolo/epoca di A1 a 8 GHz (colore rosso) e 15 GHz (colore Blu).

5.4.4 Età cinematica e periodo di precessione

Assumendo che il moto di separazione delle hot_spot sia un moto intrinseco possiamo calcolare l'età cinematica considerando un'espansione lineare a velocità costante. E' stata utilizzata l'interpolazione lineare sul grafico distanza/epoca (grafico 5.18) per ottenere la velocità radiale $\mu = 29.4 \mu\text{s yr}^{-1}$ e la distanza di 5.66 mas al 2025 che corrisponde a circa 9pc. Da cui, sapendo che la sorgente si trova $z=0.084$ otteniamo:

$$\text{Età cinematica} = \frac{1}{1+z} \cdot \frac{\text{Distanza (A1,C1)}}{\mu}$$

$$\text{Età cinematica} \sim 180 \text{ yr}$$

Quindi la sorgente avrebbe un'età cinematica dell'ordine dei due secoli, rendendo la radiosorgente JSS J1511+0518 una sorgente giovane (youth scenario).

Se assumiamo che il moto trasversale osservato di A1 sia prodotto dalla precessione dell'asse del getto possiamo stimare il periodo di precessione con lo stesso metodo seguito per J1335+5844 nella sezione 5.3.3. Definita la configurazione geometrica del sistema si ottiene un'apertura del cono di precessione di 40 gradi. Il grafico angolo/epoca dà una velocità angolare per la componente A1 di circa 0.4 deg yr^{-1} da cui si ottiene:

$$\text{Periodo di Precessione} = \frac{1}{1+z} \cdot \frac{360}{\text{vel.angolare}} \cdot \sin\left(\frac{\text{angolo al centro cono}[\text{rad}]}{2}\right)$$

$$\text{Periodo di Precessione} \sim 285 \text{ yr}$$

Si può quindi affermare che, nello scenario di jet redirection, l'ordine di grandezza del periodo di precessione dei getti è dell'ordine di 10^2 - 10^3 anni.

E' opportuno ricordare nuovamente che l'incertezza sulla geometria influisce sulla stima come segue: se limitassimo l'apertura del cono alla sola emissione visibile, il periodo risulterebbe inferiore di un fattore ~ 2 ; al contrario, ipotizzando un'apertura estrema di 90 gradi, il periodo aumenterebbe di un fattore ~ 3 . Infine, qualora la velocità apparente fosse ridotta da effetti di proiezione rispetto a quella intrinseca, il periodo di precessione reale risulterebbe sistematicamente inferiore a quello stimato.

Capitolo 6

Conclusioni

6.1 Natura ed evoluzione delle radiosorgenti JSS J1335+5844 e J1511+0518

L'analisi morfologica multi-epoca della **radiosorgente J1335+5844**, condotta su dati VLBA a 8 GHz distribuiti su un arco temporale di circa trent'anni (1994–2025), conferma la presenza di una struttura tripla orientata lungo l'asse nord–sud, estesa per 13 mas, corrispondenti a ~ 87 pc. La sorgente è composta da due hot_spot ben definite e da una componente centrale debole.

Il moto trasversale già suggerito da precedenti lavori viene confermato con un'alta significatività statistica ($\sim 6 \sigma$). Tale risultato è compatibile con uno scenario di precessione del getto. Dalla velocità angolare misurata $\omega = 0.056 \pm 0.01 \text{ deg yr}^{-1}$ è possibile stimare un periodo di precessione dell'ordine di 10^3 anni.

L'espansione lungo l'asse principale diventa apprezzabile soltanto escludendo le due epoche più recenti (2023 e 2025), caratterizzate da una copertura del piano UV meno omogenea e da una qualità dei dati inferiore. In questo caso la velocità radiale risulterebbe pari a $\mu = 5.1 \pm 0.9 \text{ } \mu\text{as yr}^{-1}$. Limitando l'analisi alle epoche con migliore copertura interferometrica, e assumendo un moto rettilineo a velocità costante lungo l'asse dei getti, si ottiene un'età cinematica di 1.6×10^3 anni. E' opportuno sottolineare che una espansione apparente della radiosorgente è prevista anche nello scenario di *jet redirection* come effetto di proiezione (vedi capitolo 1). Si può quindi concludere che l'ipotesi che J1335+5844 sia una radiosorgente giovane non può essere esclusa; tuttavia, la presenza di un moto trasversale significativo rende favorito lo scenario di *jet redirection*. Nuove osservazioni già pianificate permetteranno di verificare in modo definitivo la presenza o meno di un'espansione sistematica della sorgente.

La **radiosorgente J1511+0518**, conferma attraverso l'analisi morfologica una struttura tripla est–ovest risolta in subcomponenti con un'estensione complessiva di circa 5.6 mas, corrispondenti a ~ 9 pc.

La variabilità morfologica e di flusso osservata nella regione orientale può essere interpretata in due modi non mutuamente esclusivi: da un lato come conseguenza dell'interazione con un mezzo interstellare con una densità variabile, che potrebbe contribuire alla deviazione locale del flusso e alla formazione di

una subcomponente secondaria (A2) nella posizione precedentemente occupata dall'*hot_spot*; dall'altro come possibile indizio di precessione del getto, il cui spostamento angolare avrebbe prodotto un'emissione residua più consistente in una regione caratterizzata da maggiore densità del mezzo.

L'analisi della variazione angolare nel tempo evidenzia una significativa evoluzione dell'angolo della componente A1 rispetto alla componente di riferimento C1. La presenza di una componente angolare non trascurabile suggerisce che l'espansione dei getti non avvenga lungo una direzione puramente rettilinea.

L'evoluzione morfologica di questa radiosorgente è più complessa rispetto al caso precedente. L'allontanamento delle *hot_spot* appare infatti significativo, pur in presenza di un evidente moto trasversale. Come discusso in precedenza, un'apparente espansione può verificarsi anche in presenza di un moto di precessione; pertanto, anche per questo oggetto non si può escludere lo scenario di *jet redirection*. Occorre tuttavia ricordare che questa radiosorgente presenta una debole emissione diffusa a 30 mas di distanza dalla struttura tripla principale, compatibile con emissione residua di una precedente fase di attività. La presenza di questa componente diffusa, insieme alla relativamente rapida velocità di separazione delle *hot_spot*, rende per questo oggetto più plausibile lo scenario *short lived*, suggerendo inoltre che la sorgente possa appartenere alla classe delle radiosorgenti *restarted*.

In conclusione, pur essendo basata su una statistica molto limitata di soli due oggetti, l'analisi presentata risulta coerente con il quadro secondo cui la classe delle radiosorgenti JSS non costituisce una popolazione fisicamente omogenea. I risultati ottenuti suggeriscono infatti che differenti meccanismi evolutivi possano contribuire alla compattezza osservata in questi oggetti. Nel caso di J1335+5844, la presenza di un moto trasversale significativo favorisce un'interpretazione in termini di *jet redirection*, mentre per J1511+0518 le proprietà morfologiche e la presenza di emissione diffusa associata a una precedente fase di attività rendono più plausibile uno scenario *short-lived e restarted*.

Nel loro insieme, questi risultati forniscono quindi un ulteriore elemento osservativo a supporto dell'idea che le radiosorgenti JSS possano includere oggetti in diverse fasi evolutive o governate da differenti processi fisici e con attività ricorrente su tempi scala modesti. L'estensione di questo approccio osservativo a campioni più ampi permetterà di valutare in modo più sistematico il ruolo dei diversi meccanismi fisici proposti per spiegare la natura delle radiosorgenti JSS.

6.2 Considerazioni finali e prospettive future (future work)

Giunti al termine di questo lavoro, emerge con chiarezza come lo studio dinamico delle radiosorgenti JSS contribuisca ad aumentare la comprensione della complessità fisica che governa l'evoluzione delle radiogalassie su scala sub-galattica, nonché del feedback tra l'emissione radio prodotta dal nucleo attivo e il mezzo interstellare della galassia ospite.

Un elemento che emerge con forza è il valore della precisione quantitativa. In un

contesto in cui le variazioni misurate sono dell'ordine di pochi milli-micro arcosecondi per anno, la gestione rigorosa delle incertezze non costituisce un dettaglio tecnico, bensì il fondamento della corretta interpretazione dei dati. La costruzione di uno strumento software dedicato all'analisi cinematica, l'attenzione alla propagazione degli errori, la verifica sistematica dei fit tramite il χ_{red}^2 e la scelta critica delle epoche da includere o escludere hanno rappresentato passaggi metodologici essenziali per garantire solidità dell'analisi. Questo lavoro ha inoltre evidenziato un aspetto più ampio di questo tipo di ricerca astrofisica: la necessità di integrare dati d'archivio raccolti in epoche differenti e con qualità non sempre omogenea, ricostruendo da essi un quadro dinamico coerente. La reinterpretazione di osservazioni distribuite su oltre trent'anni in una visione evolutiva unitaria costituisce di per sé uno dei risultati più significativi di questa tesi.

6.2.1 Prospettive di sviluppo (future work)

Il quesito scientifico che ora emerge con forza riguarda la diffusione del fenomeno di precessione tra le radiosorgenti JSS per capire se tale meccanismo sia sufficientemente frequente da contribuire a spiegare l'apparente sovrabbondanza di sorgenti compatte.

Un primo passo consisterà nella costruzione di un campione significativo dal punto di vista statistico di radiosorgenti JSS su cui effettuare l'analisi dinamica. Il campione dovrà essere costruito con radiosorgenti per le quali sono disponibili dati multi-epoca e multi-frequenza in letteratura o negli archivi VLBA. Parte di questo lavoro è già stata avviata, con l'inserimento nel database del software di analisi di sorgenti quali 1607+268, J1158+2450, J1815+6127, J0005+0524, 0710+439, 1323+321, J0132+5620, 2128+048, 0019-000, 0108+388, 2352+495 e J1823+7838. Parallelamente sarà necessario predisporre proposte osservative per integrare i dati d'archivio delle sorgenti del campione con nuove osservazioni multi-frequenza e multi-epoca. L'impiego di calibratori di posizione (*phase referencing*), finora non applicati, sarà importante per separare il moto relativo delle componenti, riducendo la degenerazione tra i moti delle hot.spot consentendo una determinazione più affidabile del moto proprio e delle velocità angolari. Nuove osservazioni VLBA con una copertura temporale più estesa permetterebbero inoltre una maggiore precisione nella determinazione della posizione delle componenti e quindi nelle grandezze cinematiche.

Un altro passaggio importante sarà un'ulteriore implementazione del software di analisi dati creato per questo lavoro di tesi. Un elenco non esaustivo di possibili evoluzioni potrebbe includere: l'acquisizione automatica dei parametri dai file .mod prodotti da DIFMAP; il calcolo automatico dell'età cinematica e del periodo di precessione a partire dal dataset selezionato; la generazione automatica degli spettri e la loro evoluzione temporale per sorgenti con dati multi-frequenza; l'introduzione di modelli di interpolazione alternativi a quello lineare (polinomiali o esponenziali); una gestione più flessibile e parametrica delle incertezze; l'integrazione di riferimenti bibliografici direttamente nell'interfaccia del database; il time lapse delle immagini prodotte.

In prospettiva, l'approccio adottato in questa tesi potrà forse contribuire a chiarire

il ruolo delle radiosorgenti JSS nel percorso evolutivo delle radiogalassie, offrendo un collegamento tra l'analisi osservativa di precisione e l'interpretazione fisica dei processi che governano le prime fasi dell'attività radio.

Per supportare ulteriormente questi studi, il software sviluppato per l'analisi dei dati osservativi sarà reso disponibile tramite GitHub, una volta completata la traduzione in inglese delle diverse componenti e predisposta un'adeguata documentazione, anch'essa in lingua inglese.

Strumenti di **intelligenza artificiale (IA)** sono stati utilizzati a supporto della generazione del codice per il software di elaborazione dati sviluppato con specifiche definite dall'autore di questa tesi che ne ha criticamente valutato e verificato il funzionamento. Gli strumenti dell'IA sono stati usati anche per revisionare il testo per quanto riguarda la correzione di eventuali errori di lingua e in alcuni casi per migliorarne la chiarezza. L'autore mantiene la piena responsabilità per l'accuratezza, l'integrità e il contenuto scientifico di questa tesi.

Bibliografia

- [1] Tao An et al. “VLBI Observations of 10 Compact Symmetric Object Candidates: Expansion Velocities of Hot Spots”. In: *ApJS* 198.1 (2012), p. 5. DOI: 10.1088/0067-0049/198/1/5. URL: <https://doi.org/10.1088/0067-0049/198/1/5>.
- [2] J. E. Baldwin. “Evolutionary tracks of extended radio sources”. In: IAU Symposium 97 (gen. 1982). A cura di D. S. Heeschen et al., pp. 21–24.
- [3] W. van Breugel et al. “Radio galaxies in a dense interstellar medium”. In: *AJ* 89 (1984), pp. 5–22.
- [4] Yunfeng Chen et al. “Dynamical Evolution of Cosmic Supermassive Binary Black Holes and Their Gravitational Wave Radiation”. In: *ApJ* 897 (2020), p. 86. DOI: 10.3847/1538-4357/ab9594. URL: <https://doi.org/10.3847/1538-4357/ab9594>.
- [5] Dallacasa et al. “High Frequency Peakers”. In: *AA* 363 (2000), p. 887.
- [6] A. De Rosa et al. “The quest for dual and binary supermassive black holes”. In: *New Astron. Rev.* 86 (2019), p. 101525. DOI: 10.1016/j.newar.2020.101525.
- [7] C. Fanti, R. Fanti et al. “Are compact steep spectrum sources young?” In: *A&A* 302 (1995), pp. 317–326.
- [8] C. Fanti, F. Pozzi et al. “The environment of compact steep spectrum radio sources”. In: *A&A* 358 (2000), pp. 499–514.
- [9] Ed B. Fomalont. “Synthesis Imaging in Radio Astronomy”. In: *From Darkness to Light: The Origin and Evolution of Young Stellar Clusters*. A cura di Charles J. Lada et al. Vol. 180. ASP Conference Series. San Francisco: Astronomical Society of the Pacific, 1999, p. 301. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1999ASPC..180..301F/abstract>.
- [10] M. A. Horton et al. “Hydrodynamical simulations of precessing jets”. In: *MNRAS* 495 (2020), pp. 2714–2731. DOI: 10.1093/mnras/staa1320. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/staa1320>.
- [11] M. L. Lister et al. “MOJAVE: Monitoring of Jets in Active Galactic Nuclei with VLBA Experiments. VI. Kinematics Analysis of a Complete Sample of Blazar Jets”. In: *AJ* 138 (2009), pp. 1874–1892. DOI: 10.1088/0004-6256/138/6/1874. URL: <https://doi.org/10.1088/0004-6256/138/6/1874>.

- [12] National Radio Astronomy Observatory. *AIPS Cookbook: VLBA Data Calibration in AIPS*. 31DEC19 release, revised 21 October 2019. NRAO. 2019. URL: <https://www.aips.nrao.edu/cook.html>.
- [13] C. Nolting et al. “Modelling precessing jets in radio galaxies”. In: *MNRAS* 521 (2023), pp. 1642–1658. DOI: 10.1093/mnras/stad577. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stad577>.
- [14] C. P. O’Dea. “The Compact Steep-Spectrum and Gigahertz Peaked-Spectrum Radio Sources”. In: *PASP* 110 (1998), pp. 493–532. DOI: 10.1086/316162. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1998PASP..110..493O/abstract>.
- [15] Christopher P. O’Dea et al. “Compact steep-spectrum and peaked-spectrum radio sources”. In: *A&A Rev.* 29 (2021), p. 3. DOI: 10.1007/s00159-021-00131-w. URL: <https://doi.org/10.1007/s00159-021-00131-w>.
- [16] M. Orienti et al. “Are young radio sources in equipartition?” In: *A&A* 487 (2008), pp. 885–894. DOI: 10.1051/0004-6361:200809948. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2008A%26A...487..885O>.
- [17] M. Orienti et al. “Short-lived radio sources”. In: *MNRAS* 494 (2020), pp. 4541–4552.
- [18] I. Owsianik et al. “First detection of hotspot advance in a Compact Symmetric Object: Evidence for a class of very young extragalactic radio sources”. In: *Astronomy and Astrophysics* 337 (1998), pp. 69–79.
- [19] A. C. S. Readhead et al. “Compact symmetric objects and the youth scenario”. In: *ApJ* 434 (1994), pp. 51–66.
- [20] P. A. G. Scheuer. “Models of extragalactic radio sources with a continuous energy supply from a central object”. In: 166 (mar. 1974), pp. 513–528. DOI: 10.1093/mnras/166.3.513.
- [21] Mark C. Shepherd. “Difmap: An Interactive Program for Synthesis Imaging”. In: *Astronomical Data Analysis Software and Systems VI*. A cura di Gareth Hunt et al. Vol. 125. ASP Conf. Ser. San Francisco: ASP, 1997, p. 77. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1997ASPC..125...77S/abstract>.
- [22] A. Siemiginowska et al. “X-ray observations of compact steep spectrum radio sources”. In: *ApJ* 632 (2005), pp. 110–126.
- [23] I. A. G. Snellen et al. “The evolution of young radio-loud AGN”. In: *MNRAS* 319 (2000), pp. 445–462.
- [24] Stanghellini. “Young radio sources and blazar contamination”. In: *PASP* 115 (2003), pp. 1098–1120.
- [25] Stanghellini et al. “Extended emission around GPS radio sources”. In: 443.3 (dic. 2005), pp. 891–902. DOI: 10.1051/0004-6361:20042226. arXiv: astro-ph/0507499 [astro-ph].

- [26] Stanghellini et al. “Parsec-scale properties of compact radio sources”. In: *A&A* 495 (2009), pp. 37–49. DOI: 10.1051/0004-6361:200810632. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361:200810632>.
- [27] Stanghellini et al. “Title not available in your pasted reference (add from ADS if needed)”. In: *Astronomische Nachrichten* 330 (2009), p. 153. DOI: 10.1002/asna.200811146. URL: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2009AN....330..153S>.
- [28] Stanghellini et al. “Jetted subgalactic-size radio sources in merging galaxies: A jet redirection scenario”. In: *Astronomy & Astrophysics* 695 (2025), A179. DOI: 10.1051/0004-6361/202451334.
- [29] S. E. Tremblay et al. “Compact symmetric objects and supermassive binary black holes in the VLBA Imaging and Polarimetry Survey”. In: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 459.1 (2016), pp. 820–840. DOI: 10.1093/mnras/stw592. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/stw592>.
- [30] J. Vink et al. “Gas around compact radio sources”. In: *MNRAS* 367 (2006), pp. 928–944.
- [31] Qingjuan Yu. “Evolution of massive binary black holes”. In: *MNRAS* 331 (2002), pp. 935–958. DOI: 10.1046/j.1365-8711.2002.05254.x.

Appendice A

DATABASE dati Osservativi

A.1 Dati osservativi radio sorgente J1335+5844

Tabella A.1: Dati VLBA J1335+5844.

| Epoch | ν (GHz) | Comp. | R (mas) | θ (deg) | S_{int} (mJy) | SNR | σ_x (mas) | σ_y (mas) |
|-----------|----------------|-------|---------------|-------------------|---------------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 1994.6090 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 397.6(23.9) | 397.6 | 0.030 | 0.030 |
| 1994.6090 | 8 | B1h | 12.940(0.028) | -163.7(0.1) | 150.8(9.2) | 150.8 | 0.028 | 0.028 |
| 1994.6090 | 8 | B2h | 12.754(0.040) | -158.8(0.2) | 21.0(1.7) | 21.0 | 0.040 | 0.040 |
| 1994.9712 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 245.5(24.6) | 245.5 | 0.066 | 0.095 |
| 1994.9712 | 8 | A2j | 0.430(0.087) | 145.9(10.2) | 161.7(16.2) | 161.7 | 0.066 | 0.095 |
| 1994.9712 | 8 | A4j | 2.381(0.094) | -167.5(1.6) | 14.0(1.4) | 14.0 | 0.066 | 0.095 |
| 1994.9712 | 8 | B1h | 12.970(0.094) | -164.1(0.3) | 125.9(12.6) | 125.9 | 0.066 | 0.095 |
| 1994.9712 | 8 | B2h | 12.880(0.092) | -159.8(0.5) | 28.2(2.8) | 28.2 | 0.066 | 0.095 |
| 2002.0290 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 328.6(19.7) | 328.6 | 0.050 | 0.050 |
| 2002.0290 | 8 | A2j | 0.572(0.048) | 121.8(1.4) | 50.7(3.2) | 50.7 | 0.048 | 0.048 |
| 2002.0290 | 8 | A3j | 0.945(0.047) | 174.5(2.7) | 26.9(1.9) | 26.9 | 0.047 | 0.047 |
| 2002.0290 | 8 | A4j | 2.298(0.050) | -168.3(1.2) | 5.7(0.9) | 5.7 | 0.050 | 0.050 |
| 2002.0290 | 8 | B1h | 12.971(0.048) | -164.1(0.3) | 119.1(7.3) | 119.1 | 0.048 | 0.048 |
| 2002.0290 | 8 | B2h | 12.802(0.053) | -159.8(0.3) | 27.3(2.1) | 27.3 | 0.053 | 0.053 |
| 2004.0630 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 372.5(22.4) | 372.5 | 0.040 | 0.040 |
| 2004.0630 | 8 | A2j | 0.675(0.028) | 122.4(0.6) | 48.8(3.0) | 48.8 | 0.028 | 0.028 |
| 2004.0630 | 8 | A3j | 1.182(0.030) | 177.9(1.0) | 17.2(1.1) | 17.2 | 0.030 | 0.030 |
| 2004.0630 | 8 | A4j | 2.725(0.034) | -166.0(0.7) | 10.0(0.7) | 10.0 | 0.034 | 0.034 |
| 2004.0630 | 8 | B1h | 12.992(0.028) | -164.5(0.1) | 112.0(6.8) | 112.0 | 0.028 | 0.028 |
| 2004.0630 | 8 | B2h | 12.827(0.032) | -160.2(0.2) | 43.6(2.7) | 43.6 | 0.032 | 0.032 |
| 2005.3360 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 358.9(21.5) | 358.9 | 0.050 | 0.050 |
| 2005.3360 | 8 | A2j | 0.522(0.028) | 144.4(0.8) | 87.1(5.4) | 87.1 | 0.028 | 0.028 |
| 2005.3360 | 8 | A4j | 2.595(0.055) | -168.1(0.9) | 12.7(1.2) | 12.7 | 0.055 | 0.055 |
| 2005.3360 | 8 | B1h | 12.984(0.028) | -164.2(0.1) | 124.6(7.6) | 124.6 | 0.028 | 0.028 |
| 2005.3360 | 8 | B2h | 12.875(0.032) | -159.8(0.2) | 33.8(2.2) | 33.8 | 0.032 | 0.032 |
| 2006.8390 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 371.8(22.3) | 371.8 | 0.033 | 0.033 |
| 2006.8390 | 8 | A2j | 0.664(0.033) | 117.2(1.1) | 40.6(2.5) | 40.6 | 0.033 | 0.033 |
| 2006.8390 | 8 | A3j | 0.940(0.033) | 168.0(1.6) | 22.6(1.4) | 22.6 | 0.033 | 0.033 |

| Epoch | ν (GHz) | Comp. | R (mas) | θ (deg) | S_{int} (mJy) | SNR | σ_x (mas) | σ_y (mas) |
|-----------|----------------|-------|---------------|-------------------|---------------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 2006.8390 | 8 | A4j | 2.547(0.034) | -166.6(0.7) | 14.3(0.9) | 14.3 | 0.034 | 0.034 |
| 2006.8390 | 8 | B1h | 13.000(0.033) | -164.7(0.2) | 99.2(6.0) | 99.2 | 0.033 | 0.033 |
| 2006.8390 | 8 | B2h | 12.941(0.033) | -160.6(0.2) | 53.0(3.2) | 53.0 | 0.033 | 0.033 |
| 2010.5932 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 333.7(33.4) | 333.7 | 0.050 | 0.050 |
| 2010.5932 | 8 | A2j | 0.519(0.050) | 123.8(1.0) | 76.1(7.6) | 76.1 | 0.050 | 0.050 |
| 2010.5932 | 8 | A3j | 0.992(0.050) | 179.5(1.2) | 23.3(2.3) | 23.3 | 0.050 | 0.050 |
| 2010.5932 | 8 | A4j | 2.630(0.050) | -167.4(0.8) | 16.3(1.6) | 16.3 | 0.050 | 0.050 |
| 2010.5932 | 8 | B1h | 13.024(0.050) | -164.7(0.3) | 113.3(11.3) | 113.3 | 0.050 | 0.050 |
| 2010.5932 | 8 | B2h | 12.871(0.050) | -160.3(0.3) | 46.4(4.6) | 46.4 | 0.050 | 0.050 |
| 2014.9685 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 354.1(35.4) | 354.1 | 0.050 | 0.050 |
| 2014.9685 | 8 | A2j | 0.700(0.050) | 145.9(0.8) | 59.2(5.9) | 59.2 | 0.050 | 0.050 |
| 2014.9685 | 8 | B1h | 13.004(0.050) | -164.9(0.3) | 100.2(10.0) | 100.2 | 0.050 | 0.050 |
| 2014.9685 | 8 | B2h | 12.946(0.050) | -160.4(0.3) | 35.7(3.6) | 35.7 | 0.050 | 0.050 |
| 2017.1521 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 270.4(27.0) | 270.4 | 0.050 | 0.050 |
| 2017.1521 | 8 | A2j | 0.474(0.050) | 137.2(1.1) | 99.9(10.0) | 99.9 | 0.050 | 0.050 |
| 2017.1521 | 8 | A4j | 2.445(0.050) | -166.8(0.8) | 13.0(1.3) | 13.0 | 0.050 | 0.050 |
| 2017.1521 | 8 | B1h | 13.097(0.050) | -164.9(0.2) | 96.1(9.6) | 96.1 | 0.050 | 0.050 |
| 2017.1521 | 8 | B2h | 12.871(0.050) | -160.2(0.3) | 41.2(4.1) | 41.2 | 0.050 | 0.050 |
| 2023.8096 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 372.4(37.2) | 372.4 | 0.057 | 0.057 |
| 2023.8096 | 8 | B1h | 12.902(0.057) | -164.9(0.3) | 54.9(5.5) | 54.9 | 0.057 | 0.057 |
| 2023.8096 | 8 | B2h | 12.693(0.057) | -161.1(0.3) | 45.0(4.5) | 45.0 | 0.057 | 0.057 |
| 2025.6890 | 8 | A1h | 0.000 | 0.0 | 362.0(36.2) | 362.0 | 0.050 | 0.050 |
| 2025.6890 | 8 | B1h | 12.870(0.050) | -165.4(0.3) | 45.9(4.6) | 45.9 | 0.050 | 0.050 |
| 2025.6890 | 8 | B2h | 13.166(0.050) | -162.5(0.3) | 41.4(4.1) | 41.4 | 0.050 | 0.050 |

A.2 Dati osservativi radio sorgente J1511+0518

Tabella A.2: Dati VLBA J1511+0518.

| Epoch | ν (GHz) | Comp. | R (mas) | θ (deg) | S_{int} (mJy) | SNR | σ_x (mas) | σ_y (mas) |
|-----------|----------------|-------|--------------|-------------------|---------------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 2005.3384 | 8 | A1h | 5.019(0.062) | 91.9(1.6) | 50.0(5.0) | 33.3 | 0.062 | 0.139 |
| 2005.3384 | 8 | A2l | 4.752(0.062) | 91.3(1.7) | 191.6(19.2) | 127.8 | 0.062 | 0.139 |
| 2005.3384 | 8 | Bc | 2.625(0.063) | 93.0(3.0) | 16.8(1.7) | 11.2 | 0.062 | 0.139 |
| 2005.3384 | 8 | C1h | 0.000 | 0.0 | 281.6(28.2) | 187.7 | 0.062 | 0.139 |
| 2005.3384 | 8 | C2j | 0.678(0.080) | -113.4(11.0) | 142.3(14.2) | 94.9 | 0.062 | 0.139 |
| 2006.2616 | 8 | A1h | 4.945(0.064) | 91.1(1.6) | 120.0(12.0) | 80.0 | 0.064 | 0.136 |
| 2006.2616 | 8 | A2l | 4.693(0.064) | 92.1(1.7) | 111.7(11.2) | 74.5 | 0.064 | 0.136 |
| 2006.2616 | 8 | Bc | 2.593(0.064) | 94.1(3.0) | 15.2(1.5) | 10.1 | 0.064 | 0.136 |
| 2006.2616 | 8 | C1h | 0.000 | 0.0 | 320.2(32.0) | 213.5 | 0.064 | 0.136 |
| 2006.2616 | 8 | C2j | 0.699(0.083) | -116.2(10.3) | 165.1(16.5) | 110.1 | 0.064 | 0.136 |
| 2006.5548 | 8 | A1h | 4.907(0.098) | 91.0(2.2) | 104.5(10.4) | 104.5 | 0.098 | 0.190 |
| 2006.5548 | 8 | A2l | 4.668(0.099) | 92.5(2.3) | 127.4(12.7) | 127.4 | 0.098 | 0.190 |
| 2006.5548 | 8 | Bc | 2.568(0.099) | 92.4(4.2) | 20.5(2.0) | 20.5 | 0.098 | 0.190 |
| 2006.5548 | 8 | C1h | 0.000 | 0.0 | 286.8(28.7) | 286.8 | 0.098 | 0.190 |
| 2006.5548 | 8 | C2j | 0.755(0.121) | -115.9(13.4) | 184.3(18.4) | 184.3 | 0.098 | 0.190 |

| Epoch | ν (GHz) | Comp. | R (mas) | θ (deg) | S_{int} (mJy) | SNR | σ_x (mas) | σ_y (mas) |
|-----------|----------------|-------|--------------|-------------------|---------------------------|-------|---------------------|---------------------|
| 2022.5356 | 8 | A1h | 5.806(0.128) | 99.8(2.8) | 4.8(0.5) | 3.2 | 0.119 | 0.290 |
| 2022.5356 | 8 | A2l | 4.794(0.052) | 91.9(1.5) | 15.6(1.6) | 10.4 | 0.051 | 0.125 |
| 2022.5356 | 8 | Bc | 2.653(0.057) | 95.3(2.9) | 12.7(1.3) | 8.5 | 0.056 | 0.136 |
| 2022.5356 | 8 | C1h | 0.000 | 0.0 | 250.1(25.0) | 166.7 | 0.051 | 0.125 |
| 2022.5356 | 8 | C2j | 1.165(0.100) | -138.6(4.5) | 59.8(6.0) | 39.9 | 0.051 | 0.125 |
| 2022.6315 | 8 | A1h | 5.843(0.099) | 98.6(2.3) | 4.7(0.5) | 3.9 | 0.093 | 0.233 |
| 2022.6315 | 8 | A2l | 4.827(0.049) | 93.5(1.4) | 11.8(1.2) | 9.9 | 0.048 | 0.121 |
| 2022.6315 | 8 | Bc | 2.627(0.051) | 95.7(2.7) | 11.4(1.1) | 9.5 | 0.049 | 0.123 |
| 2022.6315 | 8 | C1h | 0.000 | 0.0 | 249.1(24.9) | 207.6 | 0.048 | 0.120 |
| 2022.6315 | 8 | C2j | 1.092(0.086) | -130.4(5.1) | 36.3(3.6) | 30.3 | 0.048 | 0.120 |
| 2002.0288 | 15 | A1h | 5.068(0.038) | 90.8(1.1) | 85.9(8.6) | 71.6 | 0.038 | 0.094 |
| 2002.0288 | 15 | A2l | 4.721(0.038) | 90.1(1.1) | 352.9(35.3) | 294.1 | 0.038 | 0.094 |
| 2002.0288 | 15 | Bc | 2.640(0.038) | 91.3(2.0) | 28.8(2.9) | 24.0 | 0.038 | 0.094 |
| 2002.0288 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 209.7(21.0) | 174.7 | 0.038 | 0.094 |
| 2002.0288 | 15 | C2j | 0.564(0.042) | -102.7(9.3) | 55.9(5.6) | 46.6 | 0.038 | 0.094 |
| 2005.3384 | 15 | A1h | 5.218(0.035) | 90.0(0.9) | 38.6(3.9) | 64.3 | 0.035 | 0.078 |
| 2005.3384 | 15 | A2l | 4.812(0.035) | 91.2(0.9) | 163.3(16.3) | 272.1 | 0.035 | 0.078 |
| 2005.3384 | 15 | Bc | 2.673(0.036) | 94.0(1.7) | 30.8(3.1) | 51.3 | 0.035 | 0.078 |
| 2005.3384 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 292.0(29.2) | 486.7 | 0.035 | 0.078 |
| 2005.3384 | 15 | C2j | 0.731(0.042) | -108.7(5.8) | 33.0(3.3) | 55.0 | 0.035 | 0.078 |
| 2006.2589 | 15 | A1h | 5.088(0.035) | 90.5(0.9) | 63.0(6.3) | 105.0 | 0.035 | 0.077 |
| 2006.2589 | 15 | A2l | 4.784(0.035) | 91.6(0.9) | 123.2(12.3) | 205.3 | 0.035 | 0.077 |
| 2006.2589 | 15 | Bc | 2.679(0.035) | 93.2(1.6) | 28.7(2.9) | 47.8 | 0.035 | 0.077 |
| 2006.2589 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 325.2(32.5) | 542.1 | 0.035 | 0.077 |
| 2006.2589 | 15 | C2j | 0.743(0.042) | -109.3(5.7) | 49.1(4.9) | 81.9 | 0.035 | 0.077 |
| 2006.5521 | 15 | A1h | 5.184(0.095) | 90.6(0.6) | 37.5(3.7) | 83.3 | 0.095 | 0.051 |
| 2006.5521 | 15 | A2l | 4.768(0.095) | 91.7(0.6) | 144.5(14.5) | 321.2 | 0.095 | 0.051 |
| 2006.5521 | 15 | Bc | 2.639(0.094) | 93.6(1.1) | 22.7(2.3) | 50.4 | 0.095 | 0.051 |
| 2006.5521 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 281.1(28.1) | 624.6 | 0.095 | 0.051 |
| 2006.5521 | 15 | C2j | 0.670(0.091) | -110.0(5.0) | 71.0(7.1) | 157.8 | 0.095 | 0.051 |
| 2006.9164 | 15 | A1h | 5.133(0.033) | 90.7(0.8) | 49.3(4.9) | 98.6 | 0.033 | 0.076 |
| 2006.9164 | 15 | A2l | 4.769(0.033) | 91.6(0.9) | 124.7(12.5) | 249.5 | 0.033 | 0.076 |
| 2006.9164 | 15 | Bc | 2.638(0.034) | 92.5(1.6) | 23.3(2.3) | 46.6 | 0.033 | 0.076 |
| 2006.9164 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 338.9(33.9) | 677.8 | 0.033 | 0.076 |
| 2006.9164 | 15 | C2j | 0.745(0.041) | -110.0(5.5) | 62.4(6.2) | 124.8 | 0.033 | 0.076 |
| 2007.2397 | 15 | A1h | 5.089(0.035) | 91.4(0.9) | 59.2(5.9) | 159.9 | 0.035 | 0.076 |
| 2007.2397 | 15 | A2l | 4.772(0.035) | 91.6(0.9) | 121.2(12.1) | 327.6 | 0.035 | 0.076 |
| 2007.2397 | 15 | Bc | 2.656(0.035) | 93.6(1.6) | 30.7(3.1) | 82.9 | 0.035 | 0.076 |
| 2007.2397 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 345.2(34.5) | 933.0 | 0.035 | 0.076 |
| 2007.2397 | 15 | C2j | 0.770(0.043) | -111.4(5.3) | 72.1(7.2) | 194.8 | 0.035 | 0.076 |
| 2007.6452 | 15 | A1h | 5.099(0.034) | 90.8(0.8) | 53.7(5.4) | 145.1 | 0.034 | 0.074 |
| 2007.6452 | 15 | A2l | 4.773(0.034) | 91.7(0.9) | 120.3(12.0) | 325.0 | 0.034 | 0.074 |
| 2007.6452 | 15 | Bc | 2.692(0.034) | 93.5(1.6) | 35.1(3.5) | 95.0 | 0.034 | 0.074 |
| 2007.6452 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 365.2(36.5) | 987.2 | 0.034 | 0.074 |
| 2007.6452 | 15 | C2j | 0.779(0.042) | -111.6(5.2) | 74.6(7.5) | 201.5 | 0.034 | 0.074 |
| 2009.4068 | 15 | A1h | 5.067(0.034) | 91.4(0.8) | 35.7(3.6) | 87.1 | 0.034 | 0.075 |
| 2009.4068 | 15 | A2l | 4.776(0.034) | 91.8(0.9) | 59.9(6.0) | 146.1 | 0.034 | 0.075 |

| Epoch | ν (GHz) | Comp. | R (mas) | θ (deg) | S_{int} (mJy) | SNR | σ_x (mas) | σ_y (mas) |
|-----------|----------------|-------|--------------|-------------------|---------------------------|--------|---------------------|---------------------|
| 2009.4068 | 15 | Bc | 2.644(0.035) | 93.8(1.6) | 52.7(5.3) | 128.6 | 0.034 | 0.075 |
| 2009.4068 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 362.3(36.2) | 883.8 | 0.034 | 0.075 |
| 2009.4068 | 15 | C2j | 0.885(0.044) | -115.1(4.5) | 63.3(6.3) | 154.3 | 0.034 | 0.075 |
| 2013.5548 | 15 | A1h | 5.287(0.034) | 95.3(0.8) | 9.4(0.9) | 25.3 | 0.033 | 0.073 |
| 2013.5548 | 15 | A2l | 4.763(0.034) | 92.0(0.9) | 23.8(2.4) | 64.4 | 0.033 | 0.073 |
| 2013.5548 | 15 | Bc | 2.555(0.034) | 95.0(1.6) | 30.4(3.0) | 82.1 | 0.033 | 0.073 |
| 2013.5548 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 337.8(33.8) | 912.9 | 0.033 | 0.073 |
| 2013.5548 | 15 | C2j | 1.006(0.046) | -118.3(3.8) | 71.4(7.1) | 193.1 | 0.033 | 0.073 |
| 2018.9575 | 15 | A1h | 5.420(0.031) | 96.7(0.7) | 13.9(1.4) | 30.9 | 0.030 | 0.071 |
| 2018.9575 | 15 | A2l | 4.736(0.030) | 92.8(0.9) | 7.7(0.8) | 17.2 | 0.030 | 0.071 |
| 2018.9575 | 15 | Bc | 2.550(0.030) | 95.3(1.6) | 38.7(3.9) | 86.0 | 0.030 | 0.071 |
| 2018.9575 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 519.4(51.9) | 1154.3 | 0.030 | 0.071 |
| 2018.9575 | 15 | C2j | 0.824(0.044) | -120.4(4.4) | 57.4(5.7) | 127.5 | 0.030 | 0.071 |
| 2019.9603 | 15 | A1h | 5.556(0.034) | 97.4(0.7) | 12.0(1.2) | 32.5 | 0.033 | 0.071 |
| 2019.9603 | 15 | A2l | 4.668(0.033) | 90.8(0.9) | 8.0(0.8) | 21.5 | 0.033 | 0.071 |
| 2019.9603 | 15 | Bc | 2.561(0.034) | 95.4(1.6) | 49.8(5.0) | 134.7 | 0.033 | 0.071 |
| 2019.9603 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 423.3(42.3) | 1144.2 | 0.033 | 0.071 |
| 2019.9603 | 15 | C2j | 1.098(0.050) | -126.2(3.1) | 33.5(3.3) | 90.4 | 0.033 | 0.071 |
| 2025.0699 | 15 | A1h | 5.730(0.033) | 96.9(0.7) | 25.5(2.6) | 85.2 | 0.032 | 0.072 |
| 2025.0699 | 15 | A2l | 4.731(0.033) | 94.8(0.9) | 7.6(0.8) | 25.5 | 0.032 | 0.072 |
| 2025.0699 | 15 | Bc | 2.580(0.033) | 95.8(1.6) | 34.7(3.5) | 115.6 | 0.032 | 0.072 |
| 2025.0699 | 15 | C1h | 0.000 | 0.0 | 600.4(60.0) | 2001.3 | 0.032 | 0.072 |
| 2025.0699 | 15 | C2j | 0.940(0.050) | -126.1(3.7) | 43.8(4.4) | 145.9 | 0.032 | 0.072 |
| 2002.0288 | 22 | A1h | 5.001(0.030) | 90.5(0.8) | 84.6(8.5) | 84.6 | 0.030 | 0.070 |
| 2002.0288 | 22 | A2l | 4.664(0.061) | 90.0(1.7) | 253.0(25.3) | 253.0 | 0.030 | 0.070 |
| 2002.0288 | 22 | Bc | 2.690(0.030) | 90.9(1.5) | 20.8(2.1) | 20.8 | 0.030 | 0.070 |
| 2002.0288 | 22 | C1h | 0.000 | 0.0 | 111.0(11.1) | 111.0 | 0.030 | 0.070 |
| 2002.0288 | 22 | C2j | 0.509(0.032) | -97.5(7.8) | 29.4(2.9) | 29.4 | 0.030 | 0.070 |
| 2006.5521 | 22 | A1h | 5.190(0.036) | 90.8(0.7) | 28.5(2.8) | 11.9 | 0.036 | 0.067 |
| 2006.5521 | 22 | A2l | 4.789(0.036) | 91.6(0.8) | 45.5(4.5) | 19.0 | 0.036 | 0.067 |
| 2006.5521 | 22 | Bc | 2.727(0.051) | 93.6(2.0) | 14.0(1.4) | 5.8 | 0.050 | 0.094 |
| 2006.5521 | 22 | C1h | 0.000 | 0.0 | 159.4(15.9) | 66.4 | 0.036 | 0.067 |
| 2006.5521 | 22 | C2j | 0.732(0.053) | -112.6(6.0) | 17.6(1.8) | 7.3 | 0.047 | 0.080 |
| 2023.6863 | 22 | A1h | 5.635(0.036) | 96.0(0.7) | 13.5(1.4) | 22.5 | 0.036 | 0.067 |
| 2023.6863 | 22 | Bc | 2.550(0.036) | 96.1(1.5) | 26.9(2.7) | 44.8 | 0.036 | 0.067 |
| 2023.6863 | 22 | C1h | 0.000 | 0.0 | 301.5(30.1) | 502.5 | 0.036 | 0.067 |
| 2023.6863 | 22 | C2j | 0.412(0.044) | -116.2(8.7) | 75.2(7.5) | 125.3 | 0.036 | 0.067 |