

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

SCUOLA DI SCIENZE
Dipartimento di Fisica e Astronomia
Corso di Laurea in Fisica

**Analisi del moto proprio
degli AGN
3C84, 0336-019 e 3C111**

Relatore:
Prof. GABRIELE GIOVANNINI

Presentata da:
SIMONE BUSCAROLI

**Sessione III
Anno Accademico 2018/2019**

Indice

Introduzione	1
1 Introduzione agli AGN	3
1.1 Galassie	3
1.2 Radiosorgenti	5
1.3 Galassie attive	6
2 Classificazione degli AGN	8
2.1 Galassie di Seyfert	8
2.2 Quasar	9
2.3 BL Lac	10
2.4 Radiogalassie	11
3 Fisica di un AGN	13
3.1 Disco di accrescimento	13
3.2 Moto superluminale	14
3.3 Doppler factor	15
4 Modello unificato	18
4.1 Fattori β e θ	18
4.2 Alta e bassa potenza	19
4.3 Unificazioni	21
5 Gli AGN 3C84 0336-019 3C111	23
5.1 AGN in esame	23

5.2	VLBI	26
5.3	Boston university blazar group	27
5.4	Software AIPS	28
5.5	Procedimento	29
6	Analisi dati	30
6.1	AGN 3C84	30
6.2	AGN 0336-019	34
6.3	AGN 3C111	38
	Conclusioni	44
	Bibliografia	47

Introduzione

La tesi è sostanzialmente divisa in due parti. La prima definisce e descrive i nuclei galattici attivi (AGN), le loro proprietà e morfologia e i fenomeni fisici relativi alla propagazione dei getti come moti superluminali, doppler factor e doppler boosting. Viene anche definita la teoria del modello unificato che mette in relazione le diverse categorie di AGN in rapporto all'angolo di osservazione. La seconda parte si occupa dell'analisi di moto proprio nei getti di tre diversi AGN: 3C84, 0336-019 e 3C111. Dopo un'introduzione alla tecnica VLBI utilizzata dalla Boston University per ottenere i dati, vengono descritte le tecniche usate per l'analisi dati. Per ciascuna sorgente è stata misurata la distanza delle principali componenti dal nucleo e le velocità di ciascuna di esse in un specifico arco di tempo. Utilizzando l'angolo θ di inclinazione rispetto alla linea di vista, nota da lavori di letteratura, è stata stimata anche la velocità effettiva del getto e comunque il θ_{max} di ogni sorgente usando come limite di velocità del getto la velocità della luce.

Capitolo 1

Introduzione agli AGN

1.1 Galassie

Una galassia è costituita da un'insieme di stelle, nubi di polveri e gas interstellare legati gravitazionalmente. Si distingue da un ammasso globulare per la differente massa, in quanto quest'ultimo possiede una massa $M < 10^5 M_\odot$ mentre una galassia ha $M > 10^5 M_\odot$ dove M_\odot rappresenta una massa pari a quella del Sole. Le galassie sono state categorizzate secondo la loro morfologia e le suddivisioni principali sono: galassie ellittiche, galassie a spirale, galassie lenticolari e galassie irregolari. La loro distinzione fu schematizzata attraverso il diagramma di Hubble (figura 1.1) che le classifica in base a massa, gas costituenti, velocità di rotazione e colore. Va specificato che tale diagramma non è di tipo evolutivo ma solo descrittivo.

In particolare abbiamo:

galassie ellittiche E la cui forma ellittica non dipende dalla velocità di rotazione ma dalla modalità di formazione. Hanno curva di brillantezza regolare, sono povere di gas e caratterizzate da un colore rosso;

galassie a spirale S caratterizzate da un nucleo centrale dal quale si dipartono i bracci a spirale. Il modello fisico alla base di tale galassia è il disco non rigido che è caratterizzato da onde d'urto lungo le quali

si hanno fenomeni di nascita stellare. Sono in equilibrio perchè ruotano attorno al loro nucleo. Non si può parlare di curva di brillantezza in quanto sono molto schiacciate. Sono ricche di gas e caratterizzate da un colore blu.

galassie lenticolari S0 presentano la forma a disco ma sono prive di bracci e hanno quindi proprietà intermedie tra le due precedenti.

galassie irregolari I la cui morfologia non è ben definita, riconducibili a volte al risultato della collisione tra due galassie o della loro formazione.

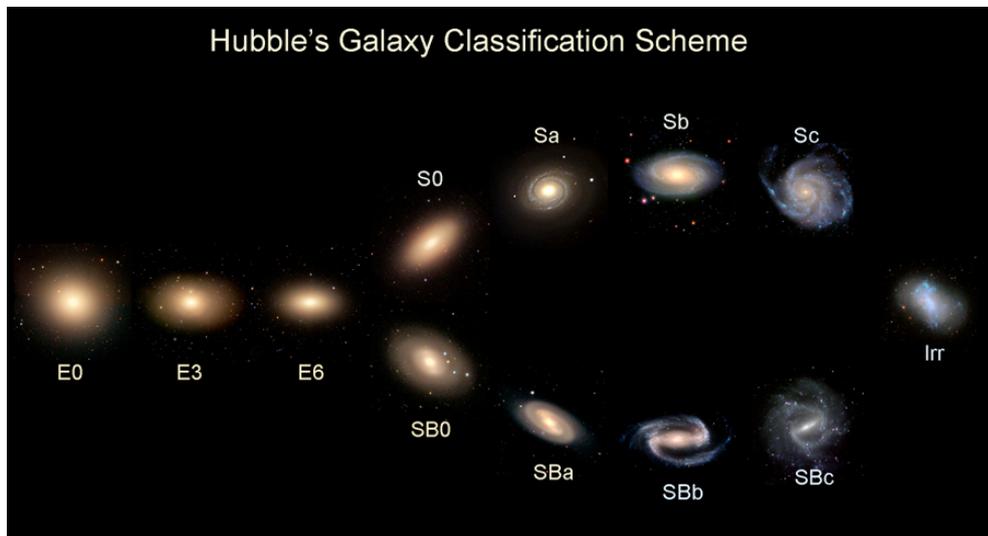


Figura 1.1: Classificazione delle galassie proposta dall'astronomo Edwin Hubble, detta anche "Forchetta di Hubble", che suddivide le galassie a seconda della loro morfologia, ovvero della loro forma ed aspetto.

1.2 Radiosorgenti

Negli anni '30 Karl Jansky, ingegnere dei Bell Telephone Laboratories, stava studiando la causa dei disturbi atmosferici che interferivano con le prime radiocomunicazioni a lunga distanza, rintracciandone l'origine nell'attività solare e nella emissione dal centro della nostra galassia. Questi studi furono di fondamentale importanza poichè ampliarono l'oggetto di studio dell'astronomia: nei decenni successivi, con la realizzazione dei primi prototipi moderni di radiotelescopi, si scoprirono nuovi oggetti in radio e si iniziarono a studiare fenomeni che erano invisibili in banda ottica.

In particolare si rintracciarono una serie di oggetti extra galattici che, nonostante presentassero forme e dimensioni diverse, erano accumulati da un'emissione in banda radio prodotta da un meccanismo non termico. Tali oggetti sono definiti come radiosorgenti e presentano una struttura interna simile, i cui costituenti principali sono:

nucleo (core) è costituito da un buco nero supermassiccio e risulta la parte centrale della sorgente. Può possedere dimensioni fino a 100 pc. Generalmente non supera in potenza l'emissione dei lobi;

getti sono di forma cilindrica o conica, sono generalmente simmetrici rispetto al nucleo. Costituiscono il mezzo di trasporto di energia e di particelle relativistiche dal nucleo verso l'esterno;

lobi sono strutture ellissoidali simmetriche con dimensioni che vanno da qualche kpc al Mpc. La loro luminosità cresce dal centro verso l'esterno e costituiscono la principale fonte di emissione della sorgente;

hot-spots sono regioni di dimensioni di qualche kpc che contengono fino all'1% della luminosità totale della sorgente. In tali zone avviene l'interazione tra i getti espulsi dal nucleo ed il mezzo intergalattico attorno ad esso.

Le radiosorgenti possono dividersi in due gruppi in base alla complessità della loro struttura.

Le prime sono chiamate **estese** (lobe dominated) in quanto le principali emissioni sono da ricondursi all'attività dei lobi nei quali la perdita di energia di elettroni relativistici genera uno spettro ripido ($\alpha = 0.7$). Le seconde vengono denominate **compatte** (core dominated) in quanto prive di emissione radio estesa e caratterizzate da uno spettro di emissione piatto ($\alpha \approx 0.0$) causato dal fenomeno di autoassorbimento di sincrotrone.

1.3 Galassie attive

Alcune galassie presentano energie di emissione anche mille volte maggiori rispetto a quelle di galassie normali, perciò vengono chiamate attive. Tali quantità di energia non sono riconducibili a fenomeni di origine stellare perchè, anche sommando tutti i contributi di ogni singola stella, non si raggiungerebbero tali livelli energetici. Si riscontrano inoltre forti emissioni nella banda radio e nella banda X, a conferma che i processi all'interno di questi oggetti non possano essere di origine stellare. Quasi ogni galassia attiva ospita al suo centro un buco nero super massiccio (SMBH): di questi il 99% non è attivo, l'1% è attivo e lo 0.1% presenta emissioni radio.

Viene definito AGN (active galactic nuclei) un oggetto la cui emissione energetica sia per lo più riconducibile all'attività di un SMBH posto al suo centro (figura 1.2). Gli AGN vengono suddivisi in due classi principali rapportando l'intensità dell'emissione in banda radio a 5 GHz e l'intensità dell'emissione in banda ottica a 4400 Å. Si definiscono AGN Radio-Quiet (RQ) gli oggetti con un rapporto di flussi radio e ottico $R_{r-o} < 10$, mentre gli AGN con $R_{r-o} > 10$ vengono detti Radio-Loud (RL). La maggior parte degli AGN attualmente noti appartiene ai RQ, mentre solo il 10% rientra nella classe degli AGN RL. Vengono classificati come oggetti AGN RQ i seguenti oggetti:

- Galassie di tipo Seyfert
- Radio quiet quasar

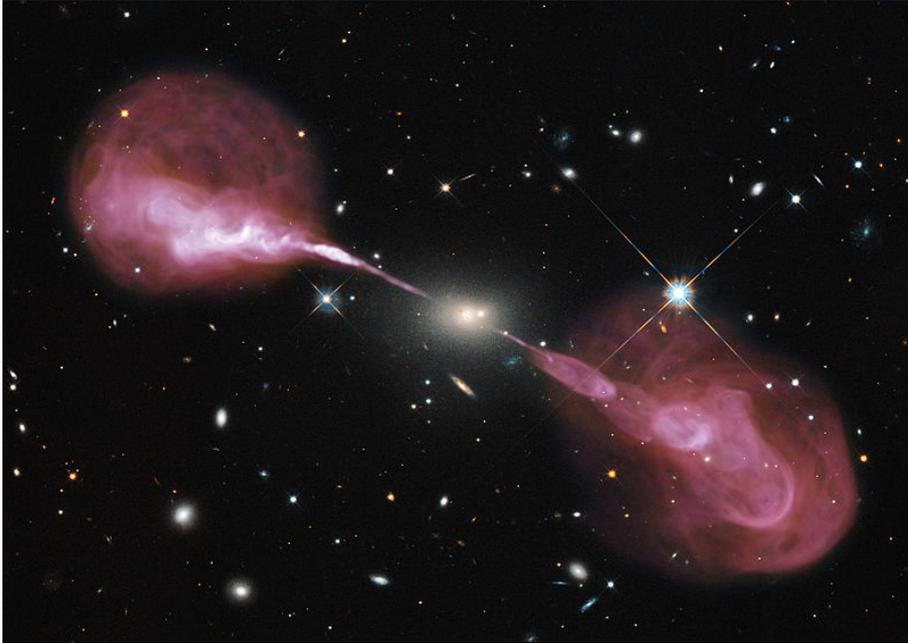


Figura 1.2: Una vista a lunghezza d'onda multipla della radiogalassia di Hercules che mostra l'elevata luminosità proveniente dal nucleo.

Fanno parte degli AGN RL oggetti come:

- Radio galassie
- Quasar
- BL Lac

Capitolo 2

Classificazione degli AGN

2.1 Galassie di Seyfert

Nel 1943 Carl Seyfert studiò alcune galassie, prevalentemente a spirale, che presentavano uno spettro con larghe righe in emissione e luminosità molto più elevata in corrispondenza dei nuclei. Ciò dimostrava che all'origine di tale luminosità non potevano esserci fenomeni di origine stellare bensì la presenza di un buco nero supermassiccio posto al suo centro. Questi oggetti si chiamano galassie di Seyfert, in onore dello studioso, e si possono distinguere in due gruppi in base al tipo di spettro in emissione e alla luminosità (figura 2.1).

Le Seyfert 1 sono caratterizzate da larghe righe in emissione mentre le righe proibite sono generalmente strette. Ciò implica che la regione di formazione di tali spettri deve essere molto densa e che il gas contenuto al suo interno si muove con velocità molto elevata ($v \approx 1000$ km/s). Questa regione più interna prende il nome di Broad Line Region (BLR) ed è visibile quasi esclusivamente in questo tipo di galassie. Mentre la Narrow Line Region (NLR), regione esterna al nucleo da cui provengono le righe proibite, è meno brillante.

Le Seyfert 2 presentano spettri di emissione con righe molto strette, sia permesse che proibite. In esse il nucleo stellare non termico è debole e le nu-



Figura 2.1: Messier 77, galassia Seyfert 2, fotografata dal telescopio spaziale Hubble.

vole di gas denso e veloce non sono visibili in quanto probabilmente oscurate da un toro di polveri. Queste Seyfert presentano emissioni in banda X molto più deboli di quella ottica e alcune di esse emettono in radio.

2.2 Quasar

Negli anni '60 vennero scoperti una serie di oggetti puntiformi riconducibili a stelle blu con numerose righe per le quali si verificava red-shift. Le caratteristiche dello spettro e l'elevata intensità luminosa erano inizialmente in disaccordo perchè mostravano oggetti molto lontani con emissioni energetiche talmente elevate da apparire come stelle blu nonostante fossero distanti anche miliardi di anni luce. Per distanze così elevate si calcolarono lumino-

sità intrinseche di circa $L = 10^{13}L_{\odot}$ non riconducibili ad alcun fenomeno di fusione nucleare. Inizialmente si ipotizzò che questi oggetti fossero costituiti da antimateria oppure fossero buchi bianchi. Solo in seguito, grazie all'utilizzo del telescopio spaziale Hubble, si ebbe conferma del fatto che alla loro origine ci sono dei nuclei galattici estremamente luminosi molto distanti, la cui attività è dovuta alla presenza di un buco nero. Questi oggetti sono chiamati quasar (quasi-stellar radio source) a causa della peculiare emissione che li identifica come potenti sorgenti radio le cui controparti ottiche li rendono riconducibili a oggetti stellari.

La luminosità dei quasar è fortemente variabile e presenta periodi molto brevi che vanno dal giorno al mese. Poichè un oggetto non può cambiare luminosità più velocemente del tempo che la luce impiega per attraversarlo, dall'analisi dei periodi è stato possibile stimare un raggio $R \approx 10^{16}$ m. I quasar sono quindi nuclei galattici molto piccoli con spettri che comprendono raggi gamma, X, infrarosso, radio e in alcuni casi ultravioletto. Sono classificati come sorgenti compatte e in base all'intensità dell'emissione radio si dividono in RLQ (radio loud quasar) e RQQ (radio quiet quasar).

2.3 BL Lac

Devono il loro nome alla sorgente prototipo BL Lacertae, studiata da Hofmeister nel 1929, a partire dalla quale venne così denominata una classe di oggetti accomunati dall'appartenenza a galassie giganti tipicamente ellittiche e individuate come sorgenti puntiformi.

I BL Lac si distinguono per uno spettro ottico privo di ampie righe di emissione tipiche delle quasar, mostrando invece analogie con le quasar a spettro piatto. Si pensa che la mancanza di tali righe nello spettro sia dovuta a una quasi totale mancanza di gas ionizzato, oppure che vi sia un continuo talmente intenso da nascondere le righe. Tra le radiosorgenti compatte attualmente note i BL Lac sono quelle che mostrano variazioni più rapide di flusso, con scale temporali spesso solo di alcune ore per quanto riguarda sia

la banda ottica che quella X. L'emissione radio di queste sorgenti è dovuta al meccanismo di radiazione di sincrotrone, mentre per quanto riguarda l'emissione in X è causata dall'effetto Compton inverso.

2.4 Radiogalassie

Come suggerisce il nome, le radiogalassie sono sorgenti caratterizzate da luminosità in banda radio molto superiori a quella in banda ottica. Presentano radiazioni con intensità radio più di cento volte superiore a quella di galassie normali ($10^{37} - 10^{39}$ W contro 10^{33} W). Possono avere estensioni fino a 6 Mpc, quindi avere dimensioni oltre 10 volte maggiori delle normali galassie. La prima radiogalassia, Cygnus A, fu scoperta nel 1939 nella costellazione del Cigno: essa irraggia in questa banda spettrale un milione di volte più intensamente della nostra galassia.

Nel 1974 Fanaroff e Riley classificarono le radiogalassie, in base alla luminosità, in due categorie distinte ciascuna delle quali caratterizzata dalla propria morfologia:

Fanaroff-Riley di tipo I (FRI) sono più deboli nella regione esterna e sono caratterizzate da una potenza radio $P_{1.4\text{ GHz}} < 10^{24.5}$ W/Hz. In queste radiosorgenti le hot-spots sono raramente visibili, i lobi sono estesi e non sempre ben allineati con il corpo centrale. I getti sono molto luminosi e presentano grandi angoli di apertura ($10 - 15^\circ$), mostrando dunque un trasporto di materia poco efficiente. Le FRI sono in genere associate a galassie vicine e/o ad ammassi galattici.

Fanaroff-Riley di tipo II (FR II) sono più luminose nella regione esterna e sono caratterizzate da una potenza radio $P_{1.4\text{ GHz}} > 10^{24.5}$ W/Hz. I lobi sono più brillanti che nelle FRI, mentre i getti sono deboli, simmetrici e soprattutto collimati, ad indicare in questo caso un trasporto efficiente. Nella maggior parte dei casi comunque si osserva un solo getto. Inoltre questi oggetti si dividono in ulteriori due sottoclassi:

BLRG (Broad Line Radio Galaxy) e NLRG (Narrow Line Radio Galaxy). Le prime presentano righe di emissione sia strette che larghe; le seconde hanno solamente righe d'emissione strette. La ragione di tale distinzione è legata alle nubi gassose che circondano il nucleo della galassia; esse sono caratterizzate dalla loro velocità, che, per effetto Doppler, modifica lo spostamento delle frequenze. Esiste una relazione di proporzionalità tra la dispersione di velocità delle nubi e la larghezza delle righe spettrali d'emissione: se aumenta la velocità aumenta anche la larghezza, in caso contrario le righe diventano più sottili. Le nubi dotate di una maggior velocità (responsabili delle righe larghe) sono situate nelle vicinanze del nucleo, nella BLR. Questa regione presenta una distanza dal nucleo di circa 1 pc e il gas ruota ad una velocità $v \approx 5000$ km/s). Le nubi dotate di una minore velocità si trovano nella NLR, ad una distanza dal nucleo dell'ordine di 1 kpc.

Capitolo 3

Fisica di un AGN

3.1 Disco di accrescimento

Un AGN è caratterizzato da un'emissione non termica che proviene dal proprio nucleo. In ciascuno dei nuclei è presente un SMBH di massa compresa tra 1 milione e 10 miliardi di volte quella del Sole. L'enorme potenziale gravitazionale ad esso associato attrae il gas interstellare circostante che inizia a collassare verso il centro. A causa della conservazione del momento angolare il gas tende a disporsi in spirali, formando il caratteristico disco di accrescimento attorno al buco nero. L'attrito generato dalla frizione delle particelle, dovuto alla viscosità e turbolenza di tali moti, riscalda la materia fino a $T=10^6-10^9$ K e la ionizza. Questo processo porta alla formazione del plasma che, in quanto gas ionizzato in movimento, genera un forte campo magnetico che si estende per regioni dell'ordine del kpc. La presenza di campi magnetici e la rotazione differenziale del disco di accrescimento danno origine a campi elettrici indotti che accelerano le particelle cariche in direzione perpendicolare al piano del disco, lungo l'asse di rotazione del sistema. In questo modo le particelle cariche raggiungono velocità prossime a quelle della luce, generando dei getti relativistici di plasma che emergono dal centro delle galassie attive.

Questo processo alimentato dalla gravità del SMBH è molto efficiente

nel trasformare materia in energia: circa il 50% della materia è interamente convertito ed emesso nei getti attraverso processi di radiazione di sincrotrone e compton inverso. Quando è stato inglobato tutto il gas l'emissione cessa e il BH diventa quieto: potrà essere riattivato in caso altro gas venisse attratto al suo interno. È questo il motivo per cui le quasar erano più comuni nelle prime ere dell'universo e sono rintracciabili solo in regioni molto lontane da noi.

3.2 Moto superluminale

I getti prodotti all'interno degli AGN sono intrinsecamente relativistici per quanto detto nel paragrafo precedente. Inoltre dall'analisi di alcune quasar appare che le emissioni dei getti si allontanano dal nucleo con velocità superiori a quelle della luce. Questi moti vengono chiamati superluminali in quanto presentano $v > c$ violando i postulati della relatività ristretta. La prima teoria elaborata per spiegare questo fenomeno è quella denominata ad albero di Natale secondo cui l'oggetto si illuminerebbe a intermittenza in regioni diverse. La teoria attualmente riconosciuta dimostra come il moto superluminale sia riconducibile a un fenomeno di natura puramente geometrica, in cui il getto emesso dalla sorgente forma un piccolo angolo con la linea di vista dell'osservatore.

Consideriamo una sorgente che occupi inizialmente la posizione A e che emetta un getto verso l'osservatore come appare mostrato in figura 3.1.

Supponiamo che questo getto abbia velocità v prossima a c e che si propaghi lungo una direzione che forma un angolo θ molto piccolo rispetto alla linea di vista. Mentre la luce viene emessa nel punto D, posizione occupata dalla sorgente al tempo t_2 , la luce emessa al tempo t_1 ha percorso la distanza AC. La differenza di tempo di arrivo registrata dall'osservatore è calcolata come:

$$\Delta t_{oss} = \frac{AC - AB}{c} = \frac{c\Delta t - v\Delta t \cos \theta}{c} \quad (3.1)$$

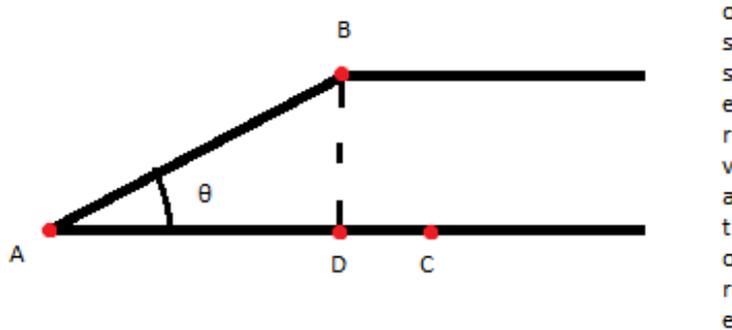


Figura 3.1: Modello geometrico della spiegazione del moto superluminale.

La componente ortogonale del getto rispetto alla linea di vista dell'osservatore non è altro che lo spostamento apparente misurato BD:

$$BD = v\Delta t \sin \theta \quad (3.2)$$

La velocità apparente registrata dall'osservatore risulta quindi:

$$\Delta v_{oss} = \frac{BD}{\Delta t_{oss}} = \frac{v\Delta t \sin \theta}{\Delta t_{oss}} = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (3.3)$$

Posto $\beta = v/c$ e dividendo entrambi i membri dell'equazione 3.3 per c si ottiene:

$$\beta_{app} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (3.4)$$

Poichè per ipotesi θ è un angolo piccolo allora è così dimostrata la natura dei moti superluminali che apparentemente supera di molte volte la velocità della luce c , come riportato nel seguente esempio:

$$\theta = 10^\circ \quad v = 0.999c \quad \Rightarrow \quad v_{oss} = 10.7c$$

3.3 Doppler factor

Poichè le sorgenti sono in movimento rispetto all'osservatore con velocità prossime a quelle della luce sono soggette all'effetto Doppler relativistico.

Considerandone una che si muove con $v = \beta/c$ formando un angolo θ rispetto alla linea di vista, abbiamo una correzione della velocità registrata dall'osservatore rispetto a quella emessa pari a:

$$v_o = \frac{v_e}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} = v_e D \quad (3.5)$$

$$\text{dove } \gamma = (1 - \beta^2)^{-1/2}$$

$$D = \frac{1}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (3.6)$$

Il fattore D viene chiamato Doppler factor e consiste in un fattore di correzione relativistica dovuto al moto della sorgente rispetto all'osservatore. In tale termine ritroviamo il fattore Doppler classico al tendere di γ a 1. Il Doppler factor si presenta in due casi a seconda del verso del moto rispetto alla direzione sorgente-osservatore: nel caso in cui la sorgente si avvicini ($\beta > 0$) avremo $D > 1$ con conseguenti fenomeni di blueshift, nel caso in cui la sorgente si allontani ($\beta < 0$) avremo invece $D < 1$ che comporta fenomeni di redshift.

Boosting relativistico

Consideriamo una sorgente con luminosità totale L_e e luminosità monocromatica $L(\nu_e)$ la cui potenza irradiata in banda $\Delta\nu_e$ sarà ricevuta in banda:

$$\Delta\nu_o = \Delta\nu_e D \quad (3.7)$$

Anche il tempo di emissione subisce trasformazioni relativistiche che modificano l'intervallo di tempo di emissione rispetto a quello registrato dall'osservatore secondo:

$$\Delta t_o = \Delta t_e \gamma(1 - \beta \cos \theta) = \Delta t_e / D \quad (3.8)$$

Un altro fattore che influisce sulla luminosità è la trasformazione degli angoli solidi nei quali si propaga la radiazione emessa. Infatti la superficie unitaria compresa in un cono $d\Omega_o$ risulterà diversa da quella emessa $d\Omega_e$ a causa

dell'aberrazione relativistica dovuta al moto della sorgente. In particolare avremo:

$$d\Omega_o = d\Omega_e/D^2 \quad (3.9)$$

Tornando ora a considerare la luminosità emessa dalla sorgente e le correzioni relativistiche espresse nelle precedenti formule, la luminosità osservata sarà pari a:

$$L_o = L_e D^4 \quad (3.10)$$

Questo effetto viene chiamato boosting relativistico e in particolare avremo che se $\beta > 1$ la luminosità osservata sarà fortemente amplificata, mentre se $\beta < 1$ si avrà un fenomeno di deboosting in cui la luminosità appare notevolmente ridotta. Un'ulteriore conseguenza del boosting relativistico è l'apparente asimmetria dei getti. Il getto emesso in direzione dell'osservatore, detto getto in avvicinamento o semplicemente getto, subisce l'effetto del "favoritismo Doppler"; al contrario, il getto in allontanamento rispetto all'osservatore (contro-getto), risulta praticamente non osservabile.

Se consideriamo invece luminosità monocromatiche avremo che:

$$L_o(\nu_o)d\nu_o = L_e(\nu_e)d\nu_e D^4 \quad (3.11)$$

da cui si ricava osservando a banda larga:

$$L_o(\nu_o) = L_e(\nu_e) D^3 \quad (3.12)$$

Infine se lo spettro considerato è di sincrotrone ovvero $L_o \propto \nu^{-\alpha}$ possiamo scrivere:

$$L_o(\nu_o) = L_e(\nu_o) D^{3+\alpha} = L_e(\nu_o) D^4 D^{-(1-\alpha)} \quad (3.13)$$

in cui il termine $D^{-(1-\alpha)}$ è noto come correzione K .

Capitolo 4

Modello unificato

4.1 Fattori β e θ

Come descritto nel precedente capitolo, l'angolo θ di inclinazione dell'emissione della sorgente rispetto alla linea di vista e la velocità β hanno un ruolo fondamentale nella descrizione di un AGN. È grazie alla conoscenza di questi due parametri che si può passare dai valori apparenti misurati dall'osservatore ai valori intrinseci emessi dalla sorgente. Data la differenza di tali valori è possibile che oggetti apparentemente diversi siano invece intrinsecamente uguali e che alla base dei diversi tipi di AGN ci sia un unico oggetto con caratteristiche simili misurato però da angolazioni diverse (figura 4.1).

Ciò ha portato la comunità scientifica all'elaborazione di diverse teorie per spiegare le diverse proprietà degli AGN come conseguenze di un unico oggetto che viene misurato in condizioni differenti. Nel 1995 è stata riconosciuta valida la teoria del modello unificato che è tutt'ora quella che meglio descrive le proprietà comuni di queste radiosorgenti. Benchè inizialmente si tentasse di ricondurre tutte queste tipologie di oggetti a un'unica entità, ad oggi l'unificazione si limita a spiegare in modo esaustivo le proprietà comuni ad alcune coppie di oggetti.

Secondo questa teoria ciò che determina la differenza tra i vari modelli di radiosorgenti è l'inclinazione rispetto alla linea di vista del toro di polveri

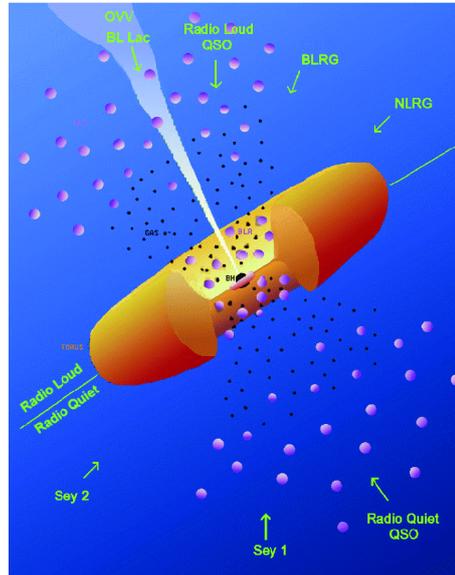


Figura 4.1: Classificazione degli AGN del modello unificato in base all'angolo di osservazione.

che circonda il nucleo dell'AGN. L'assorbimento dell'emissione da parte del toro stesso e dei gas caldi sopra di esso può arrivare a oscurare intere regioni del nucleo e così alcune aree, responsabili della produzione di righe spettrali, non risultano visibili.

4.2 Alta e bassa potenza

Nella descrizione del modello unificato dobbiamo innanzitutto distinguere gli oggetti ad alta potenza da quelli a bassa potenza ed indicare quali sono state le principali cause dell'unificazione tra i vari oggetti della prima o della seconda categoria.

Oggetti ad alta potenza

Per oggetti ad alta potenza si ricorre al modello di Orr e Browne che cerca di unificare sorgenti estese e compatte in condizione di orientazione casuale

dei corpi e di velocità di emissione relativistiche. La velocità di emissione dei getti è prossima a quella della luce mentre quella dei lobi è minore a causa dell'urto con le particelle che circondano il nucleo, tale da considerarsi non relativistica. Classificando i fenomeni rispetto alla diversa angolazione che le sorgenti assumono rispetto alla linea di vista registriamo rispettivamente:

radiosorgenti ortogonali - se la sorgente è orientata ortogonalmente alla linea di vista appare come una radiogalassia di tipo FR II, caratterizzata da lobi molto luminosi, mentre nucleo e getti risultano meno visibili;

radiosorgenti angoli piccoli - se le sorgenti sono orientate con un angolo piccolo rispetto alla linea di vista risultano amplificate a causa del Doppler factor, presentando quindi getti amplificati e luminosità molto intensa, al contrario dei lobi che risultano oscurati.

Quando il Doppler factor assume valori molto elevati è possibile che incrementi la luminosità del nucleo al punto di oscurare i lobi, apparendo così come una sorgente compatta.

Nonostante questo modello riesca a spiegare il rapporto tra sorgenti compatte ed estese, non riesce a giustificare i troppi moti superluminali registrati sperimentalmente.

Oggetti a bassa potenza

Se la direzione in cui punta la sorgente coincide con quella di osservazione l'AGN è caratterizzato da una emissione molto luminosa nella quale è possibile distinguere anche la BLR. Nel caso in cui il toro di particelle si frapponga alla linea di vista l'emissione del nucleo risulterà oscurata rendendo impossibile rintracciare la BLR e mostrando così quasi esclusivamente la NLR.

4.3 Unificazioni

Le diverse tipologie di AGN descritte secondo il modello unificato sono riconducibili principalmente agli effetti del moto relativistico dei getti emessi dal nucleo e all'oscuramento dovuto al toro di polveri. In base alle diverse angolazioni con cui questi oggetti si dispongono rispetto alla linea di vista è possibile identificarne alcune coppie come diverse evidenze di uno stesso oggetto.

Unificazione quasar-radiogalassie FR II

Sia i quasar che le radiogalassie presentano morfologie simili caratterizzate dalla presenza di doppi lobi e uno spettro molto ripido nella regione estesa, ma quasi piatto nella regione interna. Le due sorgenti presentano dimensioni lineari fortemente diverse: se le quasar sono definite come sorgenti puntiformi e compatte, le radiogalassie sono identificate come sorgenti estese. La loro unificazione è discussa nel modello di Barthel che può essere considerato come un'estensione del modello di Orr e Browne. Considerando l'asse della struttura toroidale come principale fonte di emissione e osservando la sorgente con un angolo grande rispetto alla linea di vista, il nucleo appare otticamente oscurato dal toro di particelle che lo circonda. Se l'angolo di inclinazione è minore il nucleo risulta puntiforme e brillante. La differenza tra i due casi viene definita dall'angolo critico, a parità di potenza radio emessa, per valori di circa 45° . In particolare, l'angolo mediano rispetto alla linea di vista per le quasar è approssimativamente 30° , mentre per le radiogalassie risulta 70° .

Unificazione BL Lac-radiogalassie FRI

Entrambi questi oggetti sono associati a galassie giganti di tipo ellittico situate in ammassi a basso redshift e sono caratterizzati da emissioni radio con stesse proprietà isotrope e stesse funzioni di luminosità radio e X. Le diverse proprietà sono riconducibili a diverse orientazioni dei singoli oggetti rispetto alla linea di osservazione. Lo studio condotto da Padovani e Urry

nel 1992 ha stimato l'angolo critico tra i due oggetti pari a circa 30° : se l'angolo di vista è minore l'oggetto appare come una BL Lac, altrimenti viene individuato come una radiogalassia FRI.

Unificazione Seyfert1-Seyfert2

Una principale differenza tra questi due oggetti consiste nella possibilità di distinguere sia la BLR che la NLR. Questo modello di unificazione viene spiegato ipotizzando che il nucleo sia circondato da un disco di materia assorbente capace di nascondere sia lo stesso nucleo che la BLR. Se l'oggetto viene osservato lungo l'asse di tale toro allora viene identificato come Sy1 in cui nessuna regione viene oscurata ed è possibile distinguere sia il nucleo che le regioni circostanti. Se l'oggetto è visto perpendicolarmente all'asse si ha una Sy2 in cui il toro si interpone tra il nucleo e l'osservatore oscurandone il nucleo stesso e la BLR, lasciando in evidenza solo la NLR.

Capitolo 5

Gli AGN 3C84 0336-019 3C111

5.1 AGN in esame

Oggetto specifico di questa tesi sono tre nuclei galattici attivi e l'analisi del moto proprio dei rispettivi nuclei.

3C84

Il primo nucleo galattico attivo in esame è denominato 3C84 ed è una radiogalassia FRI appartenente all'Ammasso di Perseo. È identificata anche con i nomi 0316+431 o J0319+4130 e in banda ottica corrisponde alla galassia ellittica NGC 1275: una delle radiogalassie più vicine a noi, distante solo 75.1 Mpc, con red shift molto basso pari a $z=0.017559$. Spesso, a causa dell'estrema luminosità, è stata anche classificata come galassia di Seyfert. Le sue coordinate sono:

$$DEC : 41^{\circ} 30' 42'' \quad RA : 3h 19m 48s$$

3C84 è conosciuta come una sorgente radio luminosa di cui si possono trovare riferimenti in letteratura da poco prima degli anni '60. L'emissione principale è in radio le cui attuali frequenze risultano essere comprese tra 10^{14} - 10^{15} Hz. Tali emissioni si propagano attraverso una struttura a lobi multipli che copre regioni dal sub-pc al Mpc. Al centro è presente il nucleo delle

dimensioni di circa 1 pc all'interno del quale sono presenti tre sottostrutture, denominate C1, C2, C3. La prima sottostruttura C1 è considerata il nucleo vero e proprio mentre C2 è caratterizzata da un getto mediamente stabile, situato alla distanza di 1 mas da esso. La componente C3 è la più recente, originatasi attorno al 2003 a 43 GHz, in corrispondenza di un incremento dell'emissione radio, e si è separata dalla componente C1 con un β_{app} medio di 0.23.

La massa del SMBH è stimata attorno a $3.4 \cdot 10^8 M_{\odot}$. Nella regione centrale, nella scala di 10 pc, è presente una coppia di lobi simmetrici originati dall'attività dei getti provenienti dal nucleo. Ad alta risoluzione angolare è possibile distinguere nella luminosa parte centrale il nucleo attivo e un singolo getto. La singola emissione è riconducibile all'effetto di Doppler boosting per velocità relativistiche dei getti, e ai piccoli angoli rispetto alla nostra linea di vista. Il flusso radio è stato monitorato dagli anni '60 registrando repentine variazioni di flusso e variazioni nei moti delle sottostrutture del nucleo. Oltre a emissioni radio sono state registrate emissioni in X e γ in prossimità del nucleo.

Per la trattazione e i calcoli relativi a 3C84 si sono assunti come parametri cosmologici $H_0 = 71$, $\Omega_{materia} = 0.3$, $\Omega_{vuoto} = 0.7$ e l'equivalenza 1 mas=0.352 pc per la correzione dovuta alla curvatura dell'universo.

I calcoli sono stati effettuati tramite il software Ned Wright's Cosmology Calculator, messo a disposizione online dall'astronomo Wright della facoltà di astronomia dell'università della California.

0336-019

Il secondo nucleo galattico è denominato 0336-019 ed è un quasar con redshift $z = 0.85200$. Classificato anche con il nome CTA 26, è stato individuato come sorgente radio con uno spettro piatto e con una densità di flusso di circa 3 Jy a 5 GHz. È stato identificato visualmente nel 1966 ed è caratterizzato da un ottico fortemente variabile. Successivamente nel 1994 è stato studiato anche come sorgente di raggi X sia dall'Einstein Observatory sia da

ROSAT All-Sky Survey. Nel 1995 sono state registrate significative emissioni di raggi γ dal Compton Gamma Ray Observatory tramite strumento EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope).

Tra i tre AGN in esame risulta il piÙ lontano, infatti si è stimato che sia distante circa 5345.5 Mpc. Le sue coordinate sono:

$$DEC : -1^\circ 46' 35'' \quad RA : 3h 39m 31s$$

Data l'enorme distanza dell'oggetto è difficile ottenerne informazioni, però grazie all'utilizzo di VLBI siamo in grado di ottenere dati precisi riuscendo sia a studiarne l'emissione che il moto proprio.

Per la trattazione e i calcoli relativi a 0336-019 si sono assunti come parametri cosmologici $H_0 = 71$, $\Omega_{materia} = 0.3$, $\Omega_{vuoto} = 0.7$ e l'equivalenza 1 mas=7.556 pc per la correzione dovuta alla curvatura dell'universo.

Come nel caso precedente i calcoli sono stati effettuati tramite il software Ned Wright's Cosmology Calculator, messo a disposizione online dall'astro-nomo Wright della facoltà di astronomia dell'università della California.

3C111

Il terzo nucleo galattico è denominato 3C111 ed è una radiogalassia FR II con redshift $z = 0.04850$ e distante 212.4 Mpc. Recenti studi hanno rivelato che ad alte energie l'emissione ricorda invece piÙ quella di una galassia Seyfert, il che rende 3C111 una sorgente unica per lo studio della connessione tra disco e getti. La massa del buco nero centrale è pari a circa $2 \cdot 10^8 M_\odot$. Le sue coordinate sono:

$$DEC : 38^\circ 1' 36'' \quad RA : 4h 18m 21s$$

I getti della scala del parsec mostrano luminosità particolarmente elevate ed altamente polarizzate. La coppia di getti si muove con moti superluminali e a causa del relativo doppler factor risulta evidente solo uno dei due getti. Lunghi periodi di osservazione tramite VLBI a 15 GHz da parte di MOJAVE

rivelano una forte variabilità strutturale sulla scala del parsec. Recenti studi sulle emissioni di raggi γ hanno identificato nella regione in prossimità di 3C111 una possibile sorgente. Tali studi ipotizzano che l'AGN in esame sia una delle tre sorgenti variabili di raggi γ della radiogalassia 3EG J0416+3650. Ciò implicherebbe una correlazione tra i due oggetti e 3C111 risulterebbe una controparte della radiogalassia 3EG J0416+3650.

Per la trattazione e i calcoli relativi a 3C111 si sono assunti come parametri cosmologici $H_0 = 71$, $\Omega_{materia} = 0.3$, $\Omega_{vuoto} = 0.7$ e l'equivalenza $1 \text{ mas} = 0.936 \text{ pc}$ per la correzione dovuta alla curvatura dell'universo.

Come nei casi precedenti i calcoli sono stati effettuati tramite il software Ned Wright's Cosmology Calculator, messo a disposizione online dall'astroonomo Wright della facoltà di astronomia dell'università della California.

5.2 VLBI

La Very Long Baseline Interferometry (VLBI) è una tecnica di interferometria utilizzata in ambito radioastronomico. Si basa sulla raccolta di dati provenienti da stesse sorgenti, attraverso radiotelescopi distribuiti su tutta la Terra. I segnali vengono ricevuti contemporaneamente da ciascuna stazione e sono amplificati, digitalizzati e registrati in modo indipendente, per poi essere inviati al correlatore dove i dati vengono combinati per individuare le frange di interferenza. L'analisi e il confronto dei dati, che tiene conto della distanza tra tutti i radiotelescopi e il tempo necessario per il passaggio delle informazioni, consente di simulare l'utilizzo di un unico telescopio di dimensioni pari alla massima distanza tra i telescopi. La VLBI consente di ottenere misurazioni astrofisiche su scale del millisecondo d'arco (mas) che sono utilizzate da diversi programmi di analisi dati. Questi ultimi trovano applicazioni pratiche nella classica osservazione di getti in AGN, in misurazioni di posizioni di gamma-ray burst (GRBs) e video di supernove. Le eccellenti risoluzioni angolari permettono di sondare strutture poste al centro di galassie lontane con scala del parsec: questo permette di osservare e monitorare la dinamica

nelle regioni centrali degli AGN. Al giorno d'oggi esistono molte diverse reti VLBI in tutto il mondo tra cui ricordiamo la EVN e la VLBA.

EVN

La European VLBI Network (EVN) è una rete di radiotelescopi localizzati principalmente in Europa e in Asia, con alcune antenne addizionali in Sud Africa e a Porto Rico, le quali garantiscono una elevatissima risoluzione angolare delle osservazioni delle sorgenti radio. Istituita nel 1980, è cresciuta fino ad includere oltre 20 telescopi tra i quali alcuni sono tra i più grandi al mondo. La EVN è la rete VLBI con sensibilità più alta in tutto il mondo.

VLBA

La Very Long Baseline Array (VLBA) è una rete di interferometri costituita da 10 antenne identiche separate da distanze che vanno da 200 km a 8600 km. Ogni stazione VLBA è costituita da un'antenna di 25 m e da un edificio di controllo adiacente. Osserva a lunghezze d'onda da 90 cm a 3 mm quindi a frequenze nell'intervallo tra 312 MHz e 96 GHz. La VLBA è controllata a distanza dalla Science Operations Center di Socorro in New Mexico. La sensibilità di tale apparato può essere enormemente migliorata se si combinano i dati ottenuti con quelli di altri telescopi: con GBT, VLA, Arecibo e/o Effelsberg per creare High Sensitivity Array (HSA), o con gli esistenti telescopi VLBI in Europa per creare la Global cm VLBI o Global mm VLBI Array (GMVA).

5.3 Boston university blazar group

Il programma VLBA-BU-BLAZAR è utilizzato dall'università di Boston per raccogliere dati mensilmente attraverso VLBA per ottenere immagine di blazar e radiogalassie a una frequenza di 43 GHz. Poichè la VLBA utilizza telescopi localizzati a lati opposti della Terra, i dati vengono ottenuti con una

risoluzione 1000 volte maggiore a quella del telescopio Hubble. Infatti, anche se i getti sono lunghi anche molti anni luce, in alcuni casi sono così distanti dalla Terra che la VLBA è l'unico strumento di misurazione al mondo che può effettivamente vedere gli spot luminosi (tecnicamente chiamati "blob") che si muovono attraverso i getti.

Al giorno d'oggi i ricercatori del Blazar group stanno cercando di capire l'origine delle più potenti emissioni di raggi gamma. Si era ipotizzato che tale fonte fosse vicina al buco nero al centro delle blazar, ma il team BU ha scoperto che la maggior parte dei raggi gamma proviene da un punto lontano anni luce. Questo fronte di ricerca è ancora aperto e si stanno formulando diverse ipotesi che cercano conferma in test attraverso l'utilizzo del Discovery Channel Telescope, ovvero un telescopio ottico di 4,3 metri posto al Lowell Observatory, Arizona.

5.4 Software AIPS

AIPS (Astronomical Image Processing System) è un pacchetto software dedicato alla visualizzazione e stampa delle immagini astronomiche ed alla calibrazione e all'analisi di dati di interferometria radioastronomica attraverso il metodo della sintesi di Fourier. Il progetto e lo sviluppo del programma iniziò nel 1978, a Charlottesville, in Virginia. Ad oggi è costituito da oltre 5400 file contenenti più di 2.04 milioni di linee di testo, che costituiscono 530 diverse applicazioni chiamate 'task'. Nel 1983, quando AIPS fu selezionato come il pacchetto principale per la riduzione dei dati per la VLBA, il campo di applicazione di AIPS fu espanso a tutti gli stadi della calibrazione di interferometria radio, sia al continuo sia alle linee spettrali. Nel 1996, considerevoli sforzi furono spesi per garantire che AIPS potesse gestire i dati provenienti dai satelliti VLBI come VSOP. Dal 2010, lo sviluppo di AIPS è stato rivolto a gestire le ampie larghezze di banda e altri miglioramenti del Expandend VLA (ora chiamato Jansky VLA).

Per il suo funzionamento le mappe utilizzate devono essere processate nel for-

mato FITS (Flexible Image Transport System), ovvero un formato binario che consente una facile elaborazione.

Per i tre AGN in esame sono state utilizzate le mappe in tale formato, fornite gratuitamente dal Boston blazar group e successivamente il software AIPS per la loro analisi.

5.5 Procedimento

Per quanto riguarda l'analisi dati si è proceduto nel modo seguente. Per ciascuna sorgente si sono scaricate le mappe e si sono individuate le epoche in cui analizzare ciascun AGN. In seguito si sono analizzate le mappe in formato FITS tramite il software AIPS, individuando il nucleo di ciascun AGN e la distanza delle principali componenti del getto dal nucleo stesso. In questo modo è stato possibile ricavare l'evoluzione spaziale del getto nel corso delle epoche considerate e il variare della sua velocità. La velocità così ottenuta risulta essere il β_{app} del getto da cui è possibile ricavare informazioni sul β_{eff} e sull'angolo di inclinazione del getto stesso rispetto alla linea di vista dell'osservatore. Una volta stimato l'angolo θ è stato possibile anche avere una stima del doppler factor caratteristico della sorgente.

L'indicazione dell'errore relativo alle misurazioni è stata omessa in quanto la precisione del software AIPS nel calcolo dei dati è così elevata da renderlo trascurabile rispetto alla individuazione delle componenti. Inoltre l'arco temporale considerato tra le misurazioni comporta risultati apprezzabili alla seconda cifra decimale mentre l'errore, anche una volta propagato, cade sulle successive. Per esempio la distanza della componente C1 in data 15/10/18 è $d = 4.375 \pm 0.006$ mas, ma i dati riportati in tabella hanno due cifre significative e nel grafico 6.3 la scala è in 0.02 mas.

Capitolo 6

Analisi dati

6.1 AGN 3C84

Per la sorgente 3C84, studiata anche in tesi precedenti, sono stati scelti 6 periodi molto recenti che vanno dal 07/11/17 al 31/03/19. L'immagine di ciascuno di essi è stata editata tramite il software AIPS in modo da delineare con esattezza il profilo della sorgente e le aree in cui l'intensità del getto è maggiore. In particolare per quanto riguarda 3C84 si è individuato il nucleo centrale C1 molto attivo e la parte terminale del getto C3 di cui riportiamo l'evoluzione nelle figure 6.1 e 6.2.

Tramite software AIPS è stato possibile individuare, attraverso un fit gaussiano, il punto di maggiore intensità di ciascuna delle due componenti in pixel. Tenendo conto dei fattori di conversione pixel-mas utilizzato dal software e mas-pc, ricavato con software di Wright, si sono ottenute le distanze C1-C3 anche in anni luce di cui riportiamo i valori in tabella 6.1.

Il grafico 6.3 mostra con chiarezza che la sorgente è in espansione e che la componente C3 si sta allontanando dal nucleo. In seguito si sono ricavati i valori delle velocità apparenti espresse in funzione di c . Poichè è noto in letteratura l'angolo θ di emissione del getto pari a 18° si è ricavato il β_{vero} tramite la formula 3.4. I valori così ottenuti vengono quindi riportati in tabella 6.2 e nel grafico 6.4.

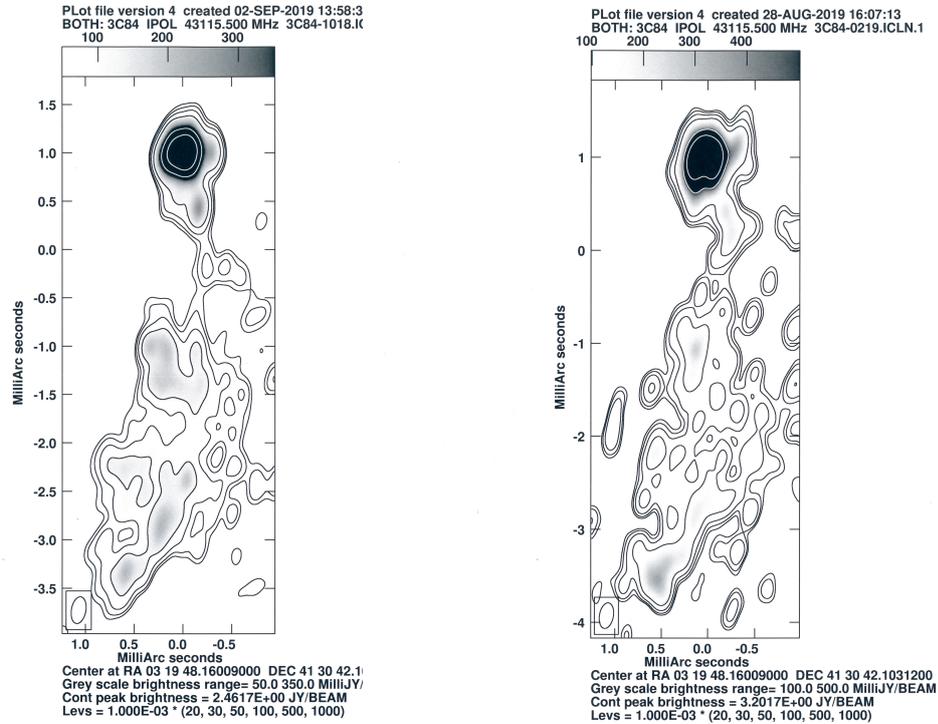


Figura 6.1: Componenti C1 e C3 in **Figura 6.2:** Componenti C1 e C3 in data 10/18. data 02/19.

<i>data</i>	distanza (mas)	distanza (al)
06/11/17	3.79	4.35
10/03/18	4.09	4.69
16/06/18	4.08	4.68
15/10/18	4.38	5.02
03/02/19	4.52	5.19
31/03/19	4.56	5.23

Tabella 6.1: Distanza tra la componente C1 e la componente C3.

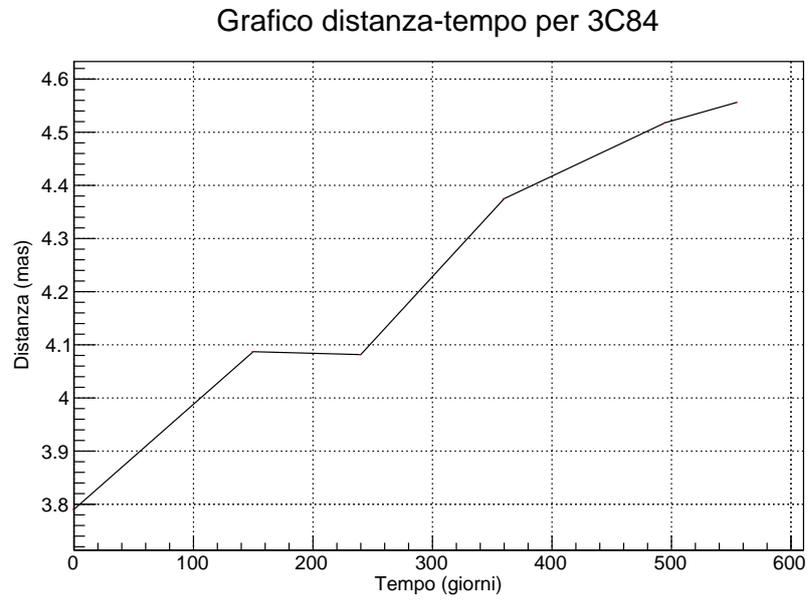


Figura 6.3: Distanza tra la componente C1 e la componente C3 tra le epoche 06/11/17 e 31/03/19.

<i>periodo</i>	β_{app} (c)	β_{vero} (c)
11/17 – 03/18	0.83	0.76
03/18 – 06/18	-0.03	-0.09
06/18 – 10/18	1.02	0.80
10/18 – 02/19	0.44	0.61
02/19 – 03/19	0.28	0.48

Tabella 6.2: Velocità di espansione della componente C3.

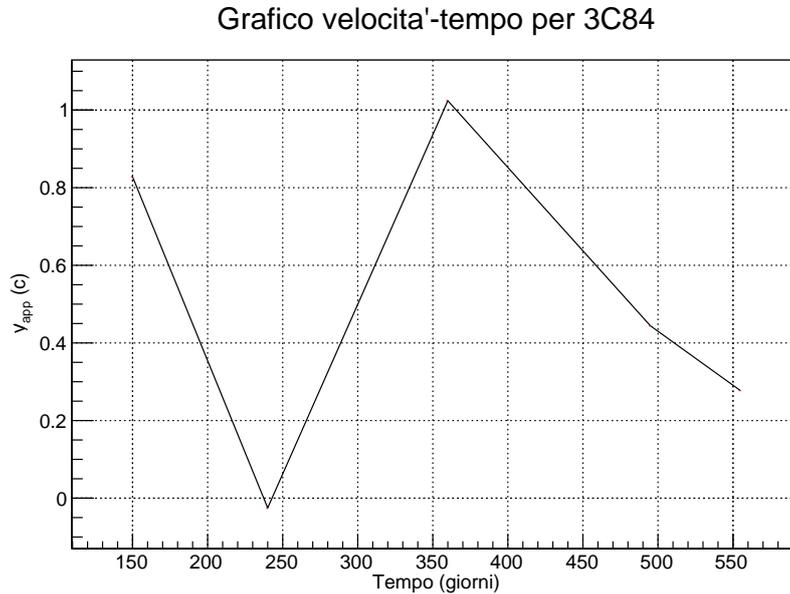


Figura 6.4: Velocità apparente di espansione della componente C3 nel periodo 06/11/17-31/03/19.

Dai risultati ottenuti si può notare come la velocità della componente C3 non sia costante ma subisca improvvise accelerazioni. Tale comportamento è riconducibile al fatto che la sorgente 3C84 è molto giovane e quindi ancora circondata da gas e polveri che ostacolano la propagazione del getto, il quale sta "scavando" una via attraverso il gas. È importante sottolineare quindi che le velocità così ottenute non sono quelle di propagazione del getto, bensì quelle con cui la sorgente si sta espandendo attraverso il materiale che la circonda.

Poiché 3C84 è ancora una sorgente giovane in espansione delle dimensioni del pc si è voluto stimare quanto tempo impiegherà per occupare le dimensioni di un AGN in piena attività ovvero di circa 1 kp o 10 kpc. Si è quindi stimata la velocità media di espansione dalle misure precedenti e si sono ottenuti i seguenti risultati riportati in tabella 6.3, assumendo costante la velocità di espansione.

I tempi stimati per raggiungere una distanza di 10 kpc sono quindi di

$\langle v \rangle (c)$	$t_{1kpc}(anni)$	$t_{10kpc}(anni)$
0.51	$6.4 \cdot 10^3$	$6.4 \cdot 10^4$

Tabella 6.3: Tempi necessari alla sorgente 3C84 per coprire regioni rispettivamente di 1 kp e 10 kp con una velocità media stimata dalle osservazioni precedenti.

$6.4 \cdot 10^4$ anni, in accordo con l'età delle radiosorgenti giovani che è dell'ordine di 10^3 - 10^4 anni.

6.2 AGN 0336-019

Per la sorgente 0336-019 sono stati scelti 8 periodi con cadenza annua, che vanno dal 21/07/11 al 16/07/18. L'immagine di ciascuno di essi è stata editata tramite il software AIPS in modo da delineare con esattezza il profilo della sorgente e le aree in cui l'intensità del getto è maggiore. In particolare per quanto riguarda 0336-019 si è individuato il nucleo centrale C molto attivo e altre quattro componenti principali all'interno del getto: A dal 21/07/11 al 21/07/14, B dal 21/07/14 al 03/07/17, D dal 10/06/16 al 16/07/18 ed E dal 03/07/17 al 16/07/18. Le figure da 6.5 a 6.8 sono state ottenute tramite AIPS e riportano l'evoluzione di ciascuna delle precedenti componenti rispetto al nucleo C.

Tramite software AIPS si è calcolata la distanza tra il nucleo C e le componenti A, B, D, E attraverso un fit gaussiano in due diversi modi. Nel caso in cui una componente fosse ben distinta da C si è eseguito un fit gaussiano in prossimità di C e della componente in esame separatamente, nel caso in cui le due parti in esame fossero molto vicine tra loro si è eseguito un unico fit con due gaussiane che restituisce con maggiore precisione la posizione dei due massimi di intensità. Tenendo conto dei fattori di conversione pixel-mas utilizzato dal software e mas-pc ricavato col software di Wright si sono otte-

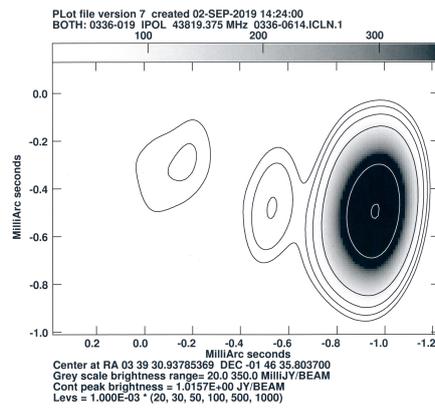
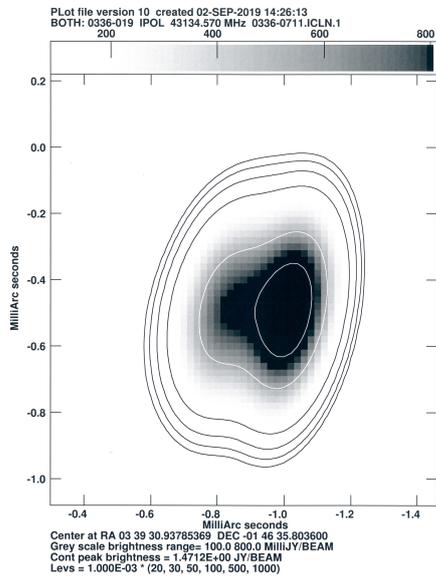


Figura 6.5: Componenti A e C in data 21/07/11 Figura 6.7: Componenti A, B e C in data 21/06/14.

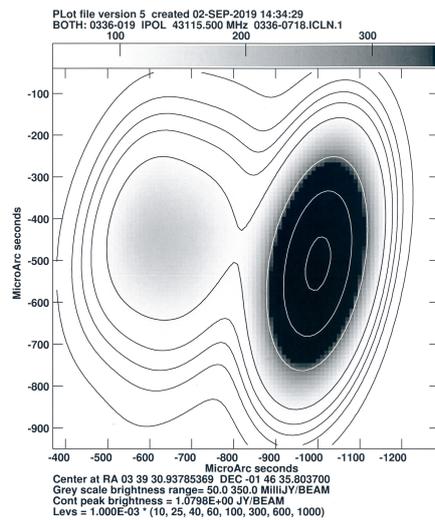
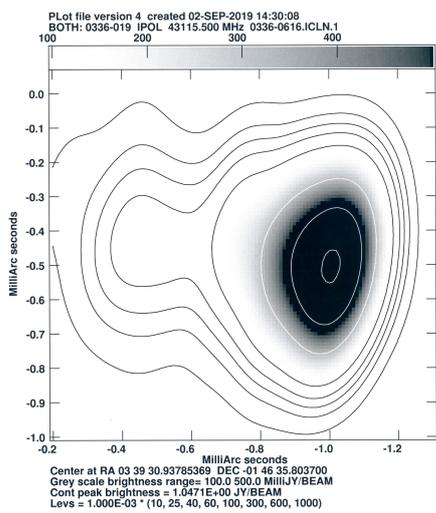


Figura 6.6: Componenti B, D e C in data 10/06/16. Figura 6.8: Componenti D e C in data 16/07/18.

nute le distanze tra il nucleo e ciascuna componente in anni luce e in mas, questi ultimi riportati in tabella 6.4.

<i>data</i>	A-C (mas)	B-C (mas)	D-C (mas)	E-C (mas)
21/07/11	0.09			
26/06/12	0.26			
28/07/13	0.55			
21/07/14	0.84	0.42		
02/07/15		0.38		
10/06/16		0.55	0.13	
03/06/17		1.02	0.50	0.19
16/07/18			0.84	0.36

Tabella 6.4: Distanza tra le componenti del getto A, B, D, E ed il nucleo C.

Il grafico 6.9 mostra che ciascuna componente viene emessa in prossimità del nucleo e si allontana da esso raggiungendo distanze fino a circa 1 mas: a queste distanze le componenti tendono a disgregarsi e non risultano più ben definite.

In seguito si sono ricavati i valori delle velocità apparenti delle singole componenti espresse in funzione di c di cui si riportano i valori in tabella 6.5. Tramite la formula 3.4 è stato possibile stimare il θ_{max} in quanto il valore di β_{vero} deve essere un valore compreso tra 0 e 1. Si è così ricavato un valore pari a 10° . Conoscendo i valori della velocità apparente ed effettiva ed avendo stimato l'angolo massimo è stato possibile anche ricavare il doppler factor di 0336-019 che risulta $D_{max} = 10.90$.

Il grafico 6.10 mostra che il nucleo emette un getto le cui componenti si stanno espandendo con velocità diverse. Le componenti A e B vengono emesse con forte accelerazione e si allontanano con velocità sempre più elevate dal nucleo; la componente D invece appare più debole e diffusa e si allontana

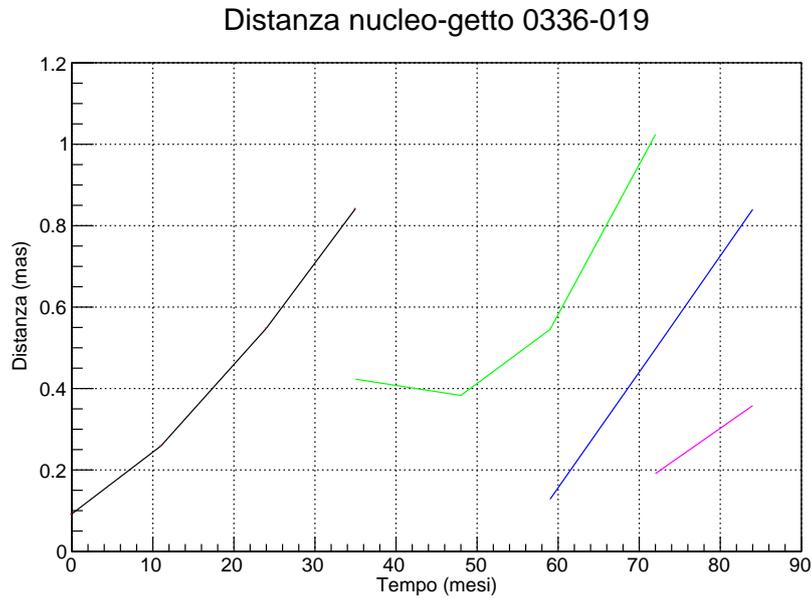


Figura 6.9: Distanza tra il nucleo C e le componenti del getto: A in nero, B in verde, D in blu, E in viola.

<i>periodo</i>	v C-A (c)	v C-B (c)	v C-D (c)	v C-E (c)
07/11 – 06/12	4.48			
06/12 – 07/13	6.57			
07/13 – 21/07	7.91			
07/14 – 02/15		-0.89		
07/15 – 06/16		4.33	8.39	
06/16 – 06/17		10.90	8.45	
06/17 – 07/18				4.12

Tabella 6.5: Velocità apparenti delle componenti A, B, D ed E rispetto alla componente C.

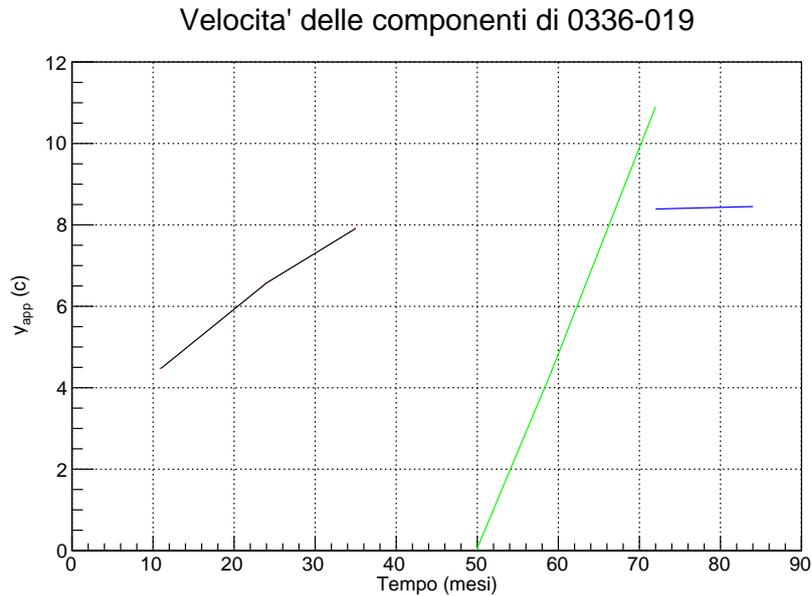


Figura 6.10: Velocità delle componenti A in nero, B in verde, D in blu.

con velocità costante dal nucleo; la componente E è la più recente e non siamo ancora in grado di prevedere come evolverà nei prossimi anni.

La sorgente 0336-019 è quindi molto diversa da 3C84 in quanto in questo caso la sorgente è 'vecchia' e stabile quindi la traiettoria del getto della sorgente non incontra ostacoli e il getto si propaga con velocità propria. Ciò in accordo col fatto che quest'ultima sorgente è già completamente formata poiché il getto copre distanze molto maggiori prima di diffondersi senza subire improvvise decelerazioni.

6.3 AGN 3C111

Per la sorgente 3C111 sono stati scelti 7 periodi che vanno dal 19/01/14 al 19/04/18. L'immagine di ciascuno di essi è stata editata tramite il software AIPS in modo da delineare con esattezza il profilo della sorgente e le aree in cui l'intensità del getto è maggiore. In particolare per quanto riguarda 3C111 si è individuato il nucleo centrale C ed altre cinque componenti

principali all'interno del getto: A il 19/01/14, B dal 19/01/14 al 28/07/14, D dal 28/07/14 al 19/04/18, E dal 06/10/16 al 19/04/18 ed F dal 24/12/17 al 19/04/18. Il getto risulta molto complesso infatti oltre a queste cinque componenti sono presenti altre sottostrutture che non sono state prese in esame perchè troppo variabili nell'arco di tempo analizzato. Le figure da 6.11 a 6.14 ottenute tramite AIPS riportano l'evoluzione di ciascuna delle precedenti componenti rispetto al nucleo C.

Tramite software AIPS si è calcolata la distanza tra il nucleo C e le componenti A, B, D, E ed F attraverso un fit gaussiano in due diversi modi. Nel caso in cui una componente fosse ben distinta da C si è eseguito un fit gaussiano in prossimità di C e della componente in esame in maniera distinta, nel caso in cui le due parti in esame fossero molto vicine tra loro si è eseguito un unico fit con due gaussiane che restituisce con maggiore precisione la posizione dei due massimi di intensità. Tenendo conto dei fattori di conversione pixel-mas utilizzato dal software e mas-pc ricavato col software di Wright si sono ottenute le distanze tra il nucleo e ciascuna componente in anni luce e in mas, questi ultimi riportati in tabella 6.6.

<i>data</i>	A-C (mas)	B-C (mas)	D-C (mas)	E-C (mas)	F-C (mas)
19/01/14	2.60	0.22	0.15		
28/07/14		1.54	0.25		
09/06/15			0.46		
06/10/16			0.54	0.22	
03/07/17			0.65	0.29	
24/12/17			1.56	1.06	0.24
19/04/18			1.93	1.48	0.25

Tabella 6.6: Distanza tra il nucleo C e le componenti del getto: A, B, D, E ed F.

Il grafico 6.15 mostra che tutte le componenti si allontanano progressivamente dal nucleo. È stata esclusa la componente A perchè essa appare

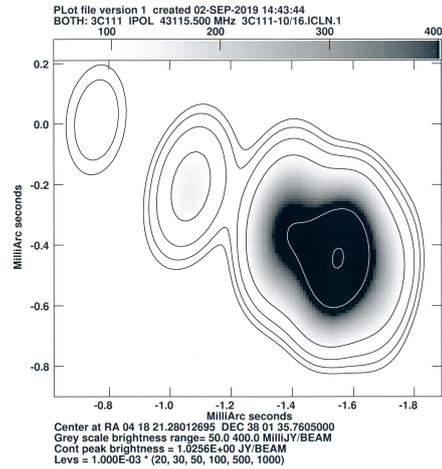
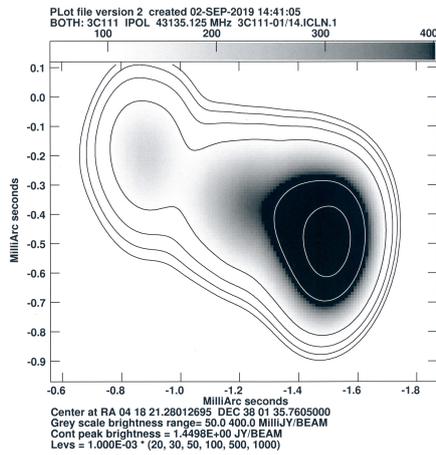


Figura 6.11: Componenti B, C e D in data 19/01/14. **Figura 6.13:** Componenti C, D ed E in data 06/10/16.

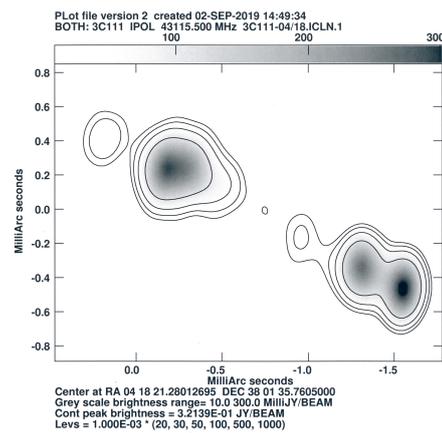
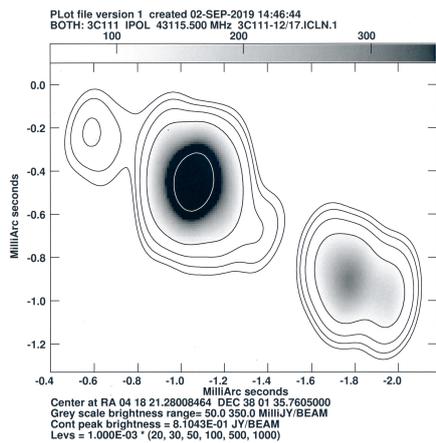


Figura 6.12: Componenti C, D, E ed F in data 24/12/17. **Figura 6.14:** Componenti C, D, E ed F in data 19/04/14.

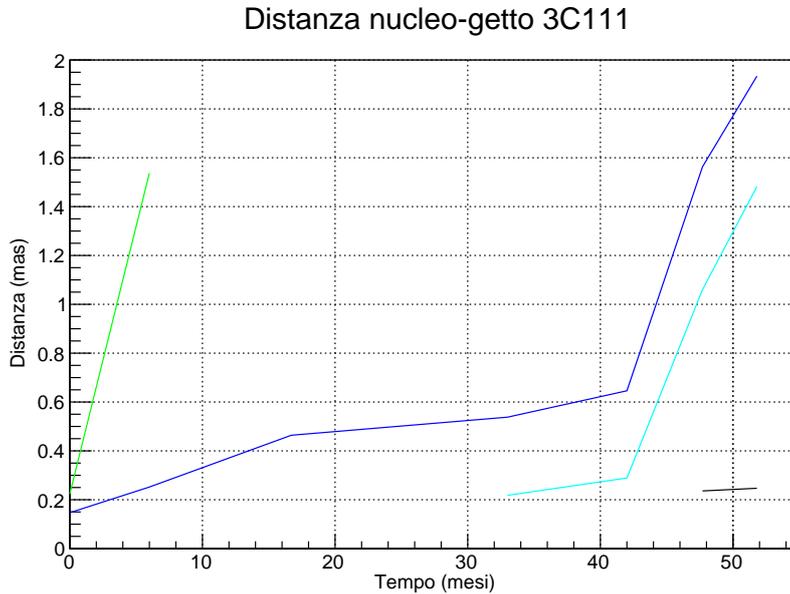


Figura 6.15: Distanza tra il nucleo C e le componenti del getto: B in verde, D in blu, E in azzurro ed F in nero.

in un'unica misurazione in cui è già molto distante dal nucleo, per cui nelle seguenti misurazioni non è stato possibile analizzarla.

In seguito si sono ricavati i valori delle velocità apparenti delle singole componenti espresse in funzione di c di cui si riportano i valori in tabella 6.7. Tramite la formula 3.4, considerando la velocità massima della componente del getto B, è stato possibile stimare un θ_{max} pari a 14° . Conoscendo i valori della velocità apparente ed effettiva ed avendo stimato l'angolo massimo è stato possibile anche ricavare il doppler factor di 3C111 che risulta $D = 8.02$.

Le componenti B ed F sono caratterizzate da un unico valore della velocità per cui non sono state riportate nel grafico in quanto non significative riguardo all'evoluzione del getto nel periodo dato; le componenti D ed E presentano forte velocità relativistiche in corrispondenza dello stesso arco temporale come si può vedere in figura 6.16.

L'AGN 3C111 risulta molto più complesso rispetto ai due precedenti in quanto presenta molte più componenti, alcune delle quali risultano a volte

<i>periodo</i>	B-C (c)	D-C(c)	E-C (c)	F-C (c)
01/14 – 07/14	8.02	0,75		
07/14 – 06/15		0.68		
06/15 – 10/16		0.17		
10/16 – 07/17		0.44	0.29	
07/17 – 12/17		6.00	5.05	
12/17 – 04/18		3.40	3.87	0.16

Tabella 6.7: Velocità apparente delle componenti del getto B, D, E ed F.

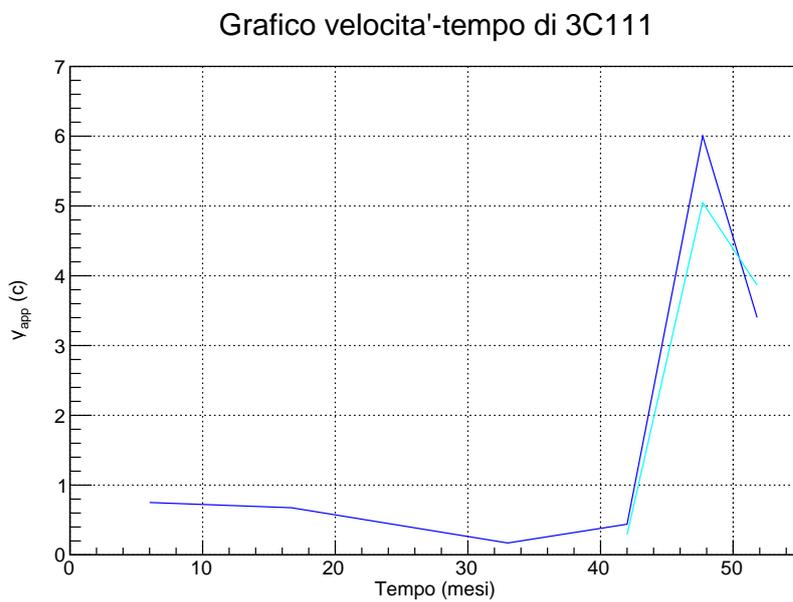


Figura 6.16: Velocità delle componenti D in blu ed E in azzurro.

più luminose del nucleo stesso. Ciò rende più difficile rintracciarle all'interno dei grafici. Di particolare interesse sarebbe studiare il comportamento delle componenti E ed F tra il 03/07/17 ed il 16/04/18 per comprendere la ragione del fenomeno che le rende così intense e luminose.

Conclusioni

Analizzando i dati relativi a 3C84 nel periodo compreso tra novembre 2017 e marzo 2019 è apparso evidente che le velocità di espansione della componente C3 rispetto alla componente C1 sono estremamente variabili, a causa del materiale gassoso attorno alla sorgente che rallenta l'espansione del getto stesso. Si è calcolata una velocità media di espansione del getto pari a 0.511 c e, assumendo tale velocità costante, si è stimato che la sorgente si espanderà fino a coprire regioni di 10 kpc in $6.4 \cdot 10^4$ anni.

L'analisi del getto relativo a 0336-019 nel periodo tra luglio 2011 e luglio 2018 ha portato a individuare quattro diverse componenti, ciascuna delle quali si allontana progressivamente dal nucleo centrale C con velocità lineari. Tale risultato indica che il getto non incontra materiale gassoso in quanto la sorgente è già completamente formata e che le velocità ottenute sono quelle effettive di propagazione del getto e non quelle di espansione della sorgente. Considerata la velocità apparente massima del getto raggiunta dalla componente B si è stimato un angolo di inclinazione $\theta_{max} = 10^\circ$ che comporta un doppler factor di $D_{max} = 10.90$.

Il getto relativo a 3C111 è risultato il più complesso tra le tre sorgenti in quanto presenta numerose sottostrutture delle quali sono state considerate cinque componenti principali tra gennaio 2014 e aprile 2018. Dall'analisi di moto proprio si sono ricavate velocità diverse, indici di una possibile variazione nell'attività della sorgente. La velocità massima ottenuta dalla componente B ha portato a stimare un angolo di inclinazione $\theta_{max} = 14^\circ$ e un relativo doppler factor $D_{max} = 8.02$. Peculiare per questa sorgente è un

brusco aumento della velocità di due componenti diverse nello stesso istante di tempo. Quando disponibili sarà importante verificare se nello stesso periodo si sono rilevate variazioni a diversa lunghezza d'onda.

Bibliografia

- [1] *Gamma-Ray Emission from the Broad-Line Radio Galaxy 3C 111* R. C. Hartman, M. Kadler, and J. Tueller.

- [2] *The Nuclear Structure of 3C 84 with Space VLBI (RadioAstron) Observations* Gabriele Giovannini, Monica Orienti, Tuomas Savolainen, Hiroshi Nagai, Marcello Giroletti, Kazuhiro Hada, Gabriele Bruni, Jeffrey Hodgson, Mareki Honma, Motoki Kino, Yuri Y. Kovalev, Thomas Krichbaum, Sang-Sung Lee, Andrei Lobanov, Bong Won Sohn, Kirill Sokolovsky, Peter Voitsik, J. Anton Zensus.

- [3] *Is 3C111, an apparently normal radio galaxy, the counterpart of 3EG J0416+3650?* V. Sguera, L. Bassani, A. Malizia, A. J. Dean, R. Landi, J. B. Stephen.

- [4] *The spectacular radio-near-IR-X-ray jet of 3C111: X-ray emission mechanism and jet kinematics* Devon Clautice, EricS. Perlman, Markos Georganopoulos, Matthew L. Lister, Francesco Tombesi, Mihai Cara, Herman L. Marshall, Brandon Hogan, Demos Kazanas.

- [5] *VLBA polarimetric monitoring of 3C111* T.Beuchert, M. Perucho, C. Grobberger, R. Schulz, I.Agudo, C. Casadio, J. L. Gómez, M. Gurwell, D. Homan, Y.Y. Kovalev, M. L. Lister, S. Markoff, S. N. Molina, A. B. Pushkarev, E. Ros, T. Savolainen, T.Savolainen, T. Steinbring, C. Steinbring, C. Thum, J.Wilms.

- [6] *A gamma-ray flare of quasar CTA 026* J. R. Mattox, J. C. Hallum, A. P. Marscher, S. G. Jorstad, E. B. Waltman, H. Terasranta, H. D. Aller, And M. F. Aller.
- [7] *Markarin 501 E 4C 38.41: analisi del nucleo e dei getti ad alta risoluzione* G. Vecchioni, G. Giovannini.
- [8] *Attività non-termica nel nucleo della radiogalassia 3C84* F. Mineo, G. Giovannini.
- [9] *Proprietà in banda radio di nuclei galattici attivi* G. Ricci, G. Giovannini.
- [10] *Il recente getto di 3C84: analisi del moto proprio e interazione con l'ambiente* A. Margheri, G. Giovannini.
- [11] *Ricerca delle emissioni alle alte energie da parte delle radiogalassie FRI FRII* P. Ippoliti.
- [12] *Proprietà nucleari degli oggetti di tipo BL Lac e delle radiogalassie* D. D'Antonio, G. Giovannini.
- [13] *Boston University Blazar Group*
<https://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>
- [14] *Ned Wright's Cosmology Calculator*
<http://www.astro.ucla.edu/wright/CosmoCalc.html>
- [15] *Software AIPS*
<http://www.ira.inaf.it/astro-lib/aips.html>
- [16] *EVN*
<https://www.evlbi.org/>
- [17] *VLBA*
<https://science.nrao.edu/facilities/vlba/introduction-to-the-VLBA>