

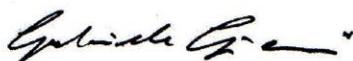
ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITA' DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

ATTIVITA' NON-TERMICA NEL NUCLEO DELLA
RADIOGALASSIA 3C 84

Relatore:

Prof. GABRIELE GIOVANNINI



Presentata da:

FRANCESCA MINEO

Sessione II
Anno Accademico 2012/2013

**QUESTA TESI E' STATA SVOLTA
NELL'AMBITO DELL'ATTIVITA' DI RICERCA DELL'ISTITUTO DI
RADIOASTRONOMIA / INAF DI BOLOGNA**

Indice

Introduzione	5
Nuclei galattici attivi (AGN)	7
1.2 Classificazione degli AGN.....	10
Fisica degli AGN	15
2.1 Moti superluminali.....	15
2.2 Laboratori relativistici.....	16
2.3 Meccanismi di emissione.....	19
Unificazione degli AGN	23
3.1 Morfologia degli AGN.....	23
3.2 Modelli unificati.....	25
Interferometria radio	27
4.1 Tipologie di interferometri.....	29
L'AGN 3C 84	33
5.1 Scopo della tesi.....	33
5.2 Generalità di 3C 84.....	33
5.3 Storia di 3C 84.....	35
5.4 Morfologia di 3C 84.....	36
Analisi delle proprietà nucleari di 3C 84	41
6.1 MOJAVE Database.....	41
6.2 Blazars/VLBA Project (Boston University).....	42
6.3 Il software AIPS.....	43
6.4 Analisi delle mappe.....	44
6.5 Curva di luce a 15.4 GHz.....	46
6.6 Flusso nucleare a 43 GHz.....	51
Conclusioni	59
7.1 Confronto con precedenti studi.....	59
7.2 Confronto con le emissioni gamma.....	60
Synchrotron ageing theory	63
Bibliografia	67
Ringraziamenti	69

Introduzione

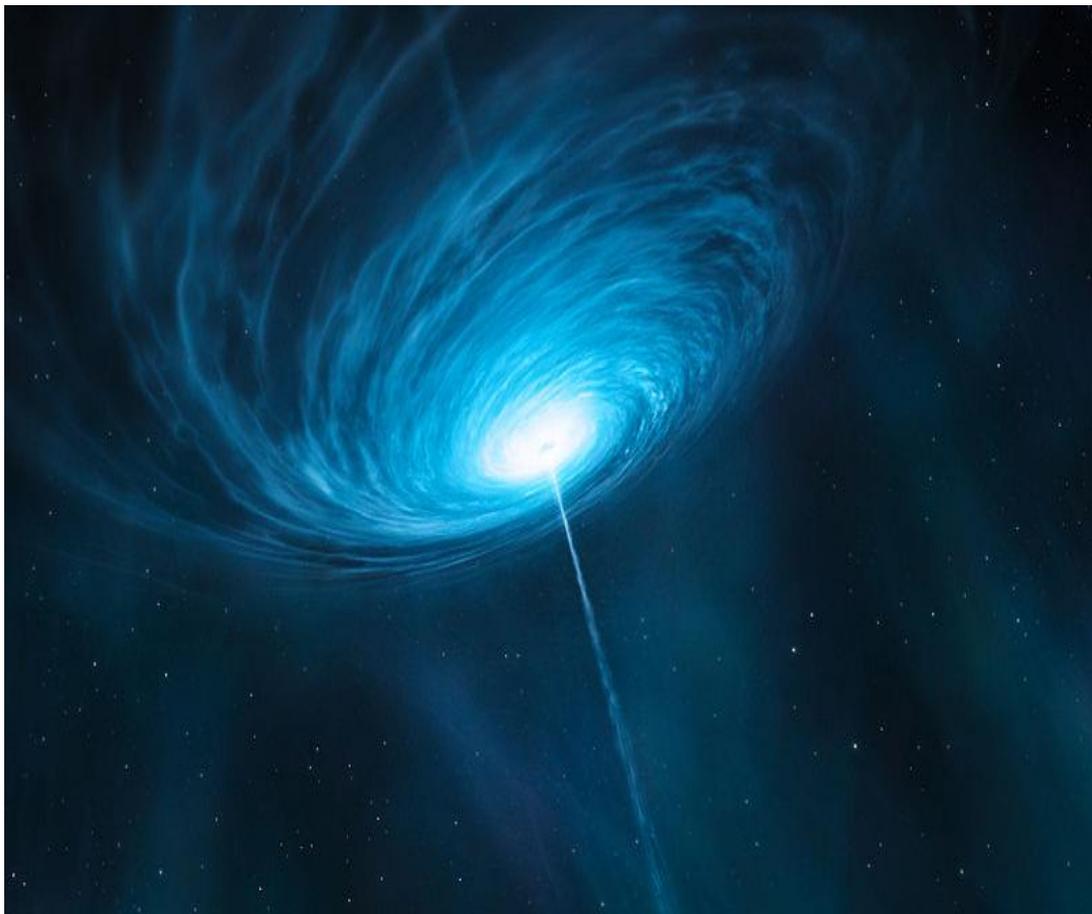


Fig.1 : Ricostruzione grafica di un AGN. Credit:ESO

La maggior parte dei corpi celesti che popolano l'universo emette "luce". Ciò significa che essi sono visibili dai nostri occhi quando li alziamo sul cielo notturno o al limite, se troppo lontani, da potenti telescopi ottici. Questa luminosità ha nella maggior parte dei casi un'origine termonucleare, dovuta cioè alla presenza di sorgenti come le stelle, in cui l'elevata temperatura interna legata alle reazioni di fusione che le mantengono in vita produce una radiazione di corpo nero in banda ottica.

Tuttavia, dato che la parte visibile costituisce solo una minuscola porzione dell'intero spettro elettromagnetico, andando ad indagare emissioni a differenti frequenze come il radio, l'infrarosso, l'ultravioletto, X e gamma, si rileva la presenza un'altra categoria di oggetti dalle caratteristiche peculiari che li rendono un'affascinante campo di studio per molteplici ragioni: i *Nuclei Galattici Attivi* (AGN) (figura 1). Sono abbastanza rari (costituiscono meno dell'1% del totale rispetto alle normali galassie) e dalla vita breve, spesso molto lontani e potenti, ferventi di un'intensa attività che sembra crescere col redshift; si ipotizza perciò che siano giovani e che ci aprano una finestra sul momento successivo al collasso iniziale proprio della vita di ogni galassia, rivelandosi fondamentali per elaborare eventuali teorie cosmologiche. Inoltre, sebbene spesso ospiti di galassie visibili anche in ottico, i loro meccanismi di emissione e gli speciali comportamenti necessitano di analisi e spiegazioni totalmente differenti.

Particolare è anche il metodo di rilevamento: per coprire infatti queste determinate frequenze è stata sviluppata una tecnica innovativa capace di dare ottimi risultati, perfino migliori di quelli dei telescopi tradizionali, l'interferometria radio.

La tesi si divide in due parti: la prima delinea un ritratto degli AGN, la seconda analizza il flusso proveniente dalla radiogalassia 3C 84 a 15.4 e 43 GHz e ipotizza un possibile sito di origine dell'aumento di brillantezza osservato.

Capitolo 1

Nuclei galattici attivi (AGN)

Le prime evidenze di sorgenti che presentavano emissioni non ottiche si ebbero alla fine degli anni '40. Il decorso della II guerra mondiale aveva infatti incentivato lo sviluppo di tecniche di indagine radar, che al termine degli scontri bellici furono poi applicate frequentemente anche all'astronomia. Si scoprirono e identificarono così le prime radiogalassie.

Fin dalle immediate analisi apparve lampante che la radiazione emessa non poteva avere origine dallo starburst ovvero dalla genesi stellare, infatti la potenza irradiata da questi nuclei appariva sorprendentemente più elevata.

Questo fatto fu confermato anche dall'analisi dell'atipicità dell'emissione: si presentava infatti fortemente polarizzata, e spaziava in un vasto range di frequenze che potevano arrivare ad avere picchi anche in X e gamma.

Per spiegare questo comportamento, già negli anni '50 fu avanzata una prima ipotesi che prevedeva il moto di elettroni relativistici in campi magnetici. E' noto infatti che una carica accelerata emette radiazione alla frequenza di Larmor; l'emissione fu così etichettata come emissione di sincrotrone.

Negli anni e nei decenni seguenti le indagini proseguirono e si intensificarono, e ben presto gli astrofisici si ritrovarono tra le mani una moltitudine di sorgenti con emissioni che spaziavano in tutto lo spettro, dai tratti anche molto differenti tra loro, a cui erano stati assegnati nomi esotici come BL LAC, OVV's, QUASAR, galassie di Seyfert, Liners ecc. (fig. 1.1)

Con il termine AGN si intendeva raccogliere insieme tutte queste varietà, che però a questo punto necessitavano di una spiegazione unificante.

Rimanevano inoltre molti misteri insoluti su loro comportamenti apparentemente paradossali: non pochi infatti presentavano getti che si muovevano a velocità superiori a quella della luce, minando uno dei cardini sacri della relatività ristretta.

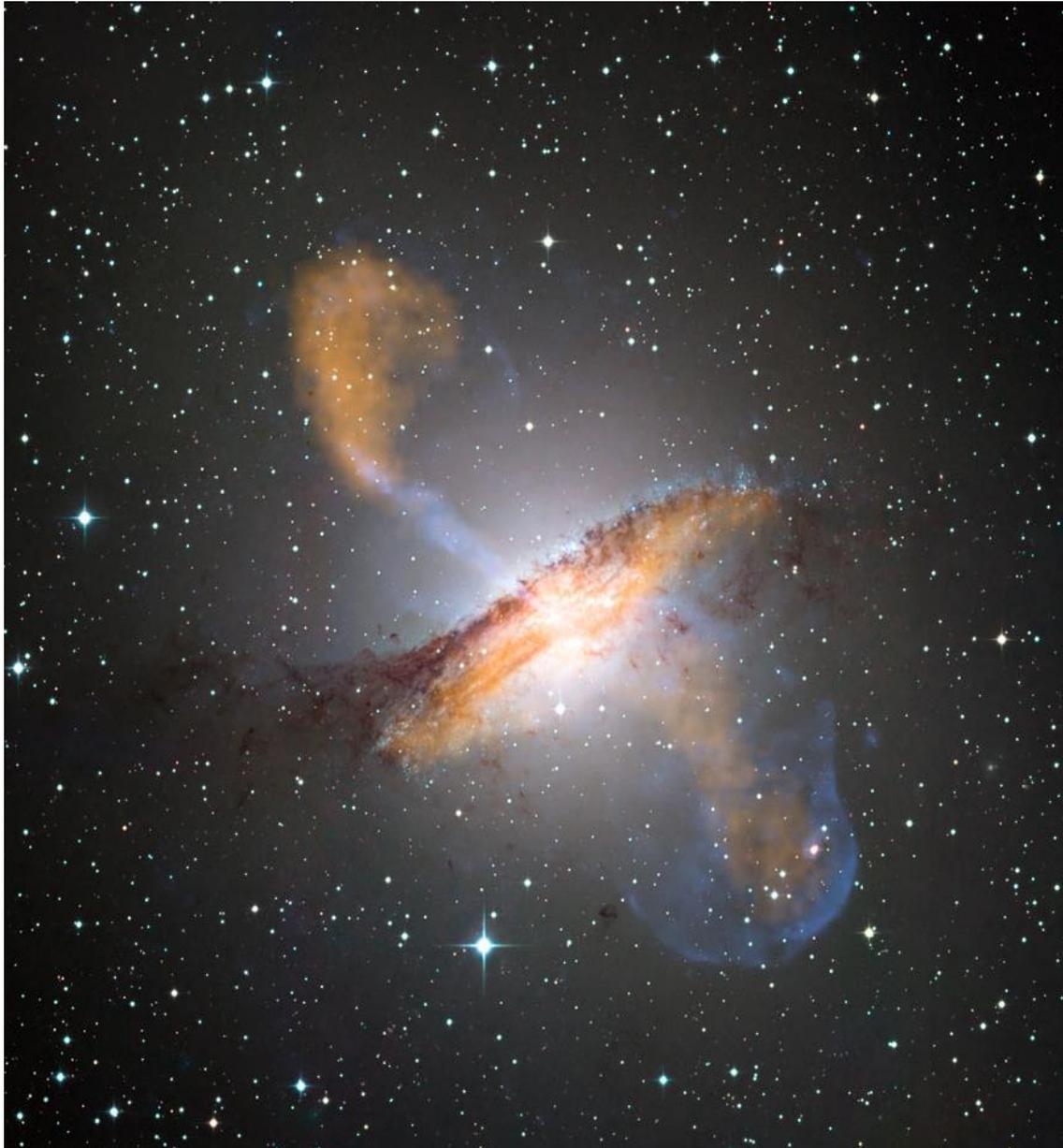


Fig. 1.1 Galassia Centaurus A rappresentata a diverse frequenze sovrapposte: ottico, X (parte visibile in blu) e microonde (parte in arancio). Credits: NASA

1.1 Osservabili astronomiche

Per la catalogazione e l'identificazione di un oggetto astronomico sono necessarie misurazioni di particolari grandezze. Esse sono: la potenza o luminosità, la brillantezza, lo spettro di radiazione e l'emissività specifica.

❖ Luminosità:

Luminosità assoluta monocromatica $L(\nu)$ [Watt/Hz o erg/sHz]:

Potenza (energia per unità di tempo) irradiata ad una determinata frequenza ν

Luminosità assoluta L o P [Watt o erg/s]:

Somma estesa a tutte le frequenze della luminosità monocromatica, ovvero

$$L = \int_0^{\infty} L(\nu) d\nu$$

Luminosità apparente o flusso $S(\nu)$ [$Jy = 10^{-26}$ Watt/Hzm²):

La relazione tra il flusso e la luminosità è la seguente:

$$S(\nu) = \frac{L(\nu)}{4\pi d^2} \quad \text{dove } d = \text{distanza di luminosità.}$$

❖ Brillanza

Flusso per unità di superficie emittente proiettata in direzione perpendicolare alla linea di vista $d\Sigma$ ovvero di angolo solido.

$$B(\nu) = \frac{S(\nu)}{\Delta\Omega} = \frac{L(\nu)}{4\pi d\Sigma}$$

Se una tale brillantezza fosse irradiata da un corpo nero, esso dovrebbe avere

$$\text{una temperatura } T_b = \frac{c^2 I_\nu}{2k\nu^2}$$

❖ Spettro di radiazione

Descrive l'andamento della luminosità in funzione della frequenza. Nel caso di una radiosorgente esso è peculiare poiché se l'emissione è quella di sincrotrone, graficandolo in scala bilogarithmica si ottiene una retta:

$$S(\nu) \approx \nu^{-\alpha}$$

Il coefficiente α è denominato *indice spettrale*.

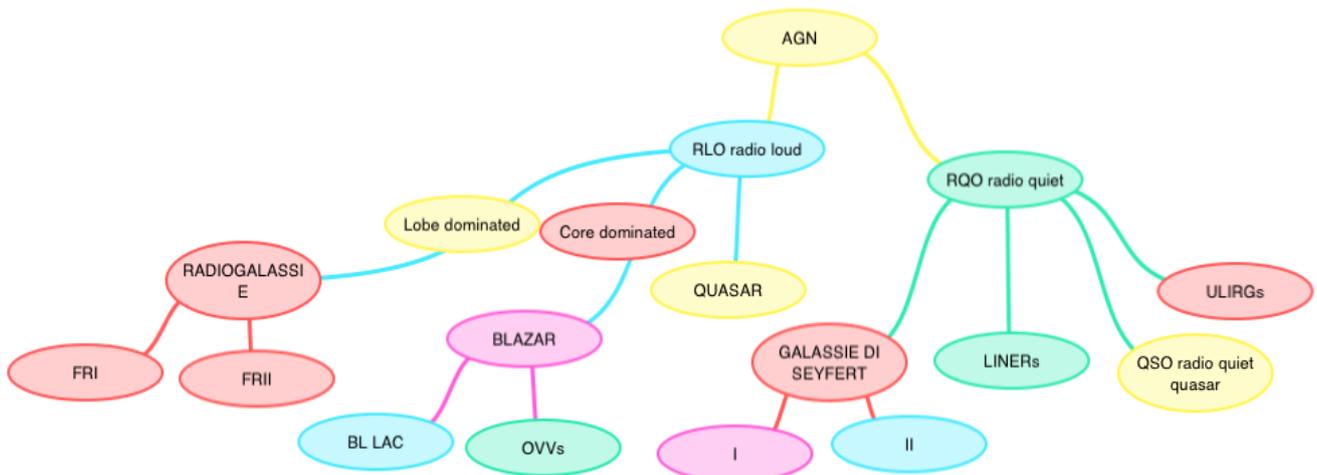
❖ Emissività specifica $J(\nu)$ [Watt/Hz m³):

Luminosità monocromatica per unità di volume

$$J(\nu) = \frac{L(\nu)}{dV} = \frac{L(\nu)}{d\Sigma dl}$$

1.2 Classificazione degli AGN

Il seguente schema mostra una possibile classificazione dei molteplici e numerosi oggetti che rientrano sotto la denominazione AGN:



A seguito viene presentata una sintetica descrizione di ognuno:

1.2.1 RLO: radio loud

Galassie caratterizzate da un'intensa attività radio, che supera le altre emissioni. Si possono riscontrare moti superluminali, e a sua volta vengono suddivise in:

- ❖ **Lobe dominated:** la dimensione dei lobi supera di gran lunga quella del nucleo, l'indice spettrale $\alpha > 0.7$
- ❖ **Core dominated:** la dimensione del nucleo è preponderante, $\alpha \approx 0.0$, e vi è alta irregolarità di flusso

❖ **Radiogalassie:** RLO per eccellenza, lobe dominated, nonché prime ad essere scoperte, emettono quasi esclusivamente a frequenze comprese tra $10^7 - 10^{11}$ Hz (lunghezze d'onda da 10^{-3} a 10^2 m circa) con una potenza monocromatica superiore a 10^{21} W/Hz alla frequenza di $1,4 \times 10^9$ Hz. In ottico corrispondono a galassie ellittiche giganti, da cui si ricava la distanza, poiché le emissioni di sincrotrone non permettono di stabilire il redshift. Si suddividono in FRI (Fanaroff-Riley di tipo I) o FR II a seconda che la potenza a 1,46 GHz sia rispettivamente minore o maggiore di $10^{24,5}$ W/Hz e provenga prevalentemente dai getti o dai lobi (fig. 1.2).

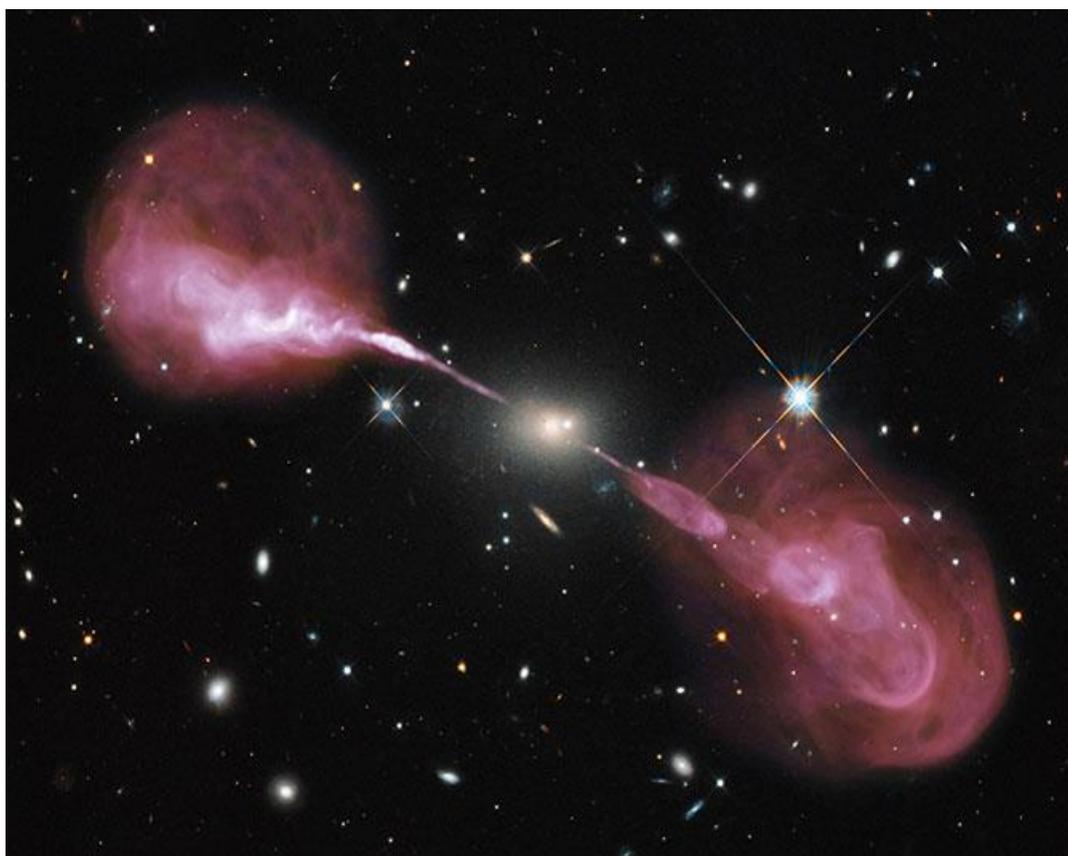


Fig. 1.2: Galassia ellittica Hercules A corrispondente alla radiogalassia 3C348 in cui sono chiaramente visibili sia i getti che i lobi. Credits: NASA/ESA

❖ **BLAZAR:** sono le sorgenti più violente ed altamente variabili (con mutamenti anche all'ordine del giorno) core dominated, dalla forte emissione polarizzata e in radio, a loro volta comprendono i BL LAC che presentano una scarsa emissione in ottico un basso redshift (sono cioè discretamente vicine), e gli OVVs (optical violent variable) che al contrario mostrano una forte emissione in ottico e variabilità anche di alcune ore (fig 1.3).

❖ **QUASAR (quasi-stellar radio sources):** L'indagine sui quasar è affascinante ed emblematica forse dell'intera categoria degli AGN. Scoperti attorno agli anni '50 si presentavano come stelle poiché apparivano puntiformi e gli elementi chimici erano quelli noti, però luminosissime e di cui in un primo momento non si riusciva ad identificare lo spettro, anche se spaziava in un continuo di frequenze maggiore di quello ottico. Le righe di emissione erano molto larghe, il flusso variabile con eccesso di UV. Se si fosse trattato di comuni stelle la loro smisurata potenza avrebbe fatto sì che distruggessero ogni altro corpo nelle vicinanze ed inoltre non si spiegava come potessero le sole reazioni termonucleari fornire una tale energia. Inoltre non potevano essere radiogalassie poiché puntiformi. Si intuì più tardi che tuttavia poteva trattarsi effettivamente di intere galassie, ma lontanissime, dal redshift elevatissimo di origine addirittura cosmologica e deformate da effetti relativistici, e il cui meccanismo di emissione non era termonucleare. La velocità dei getti inoltre superava a volte quella della luce.

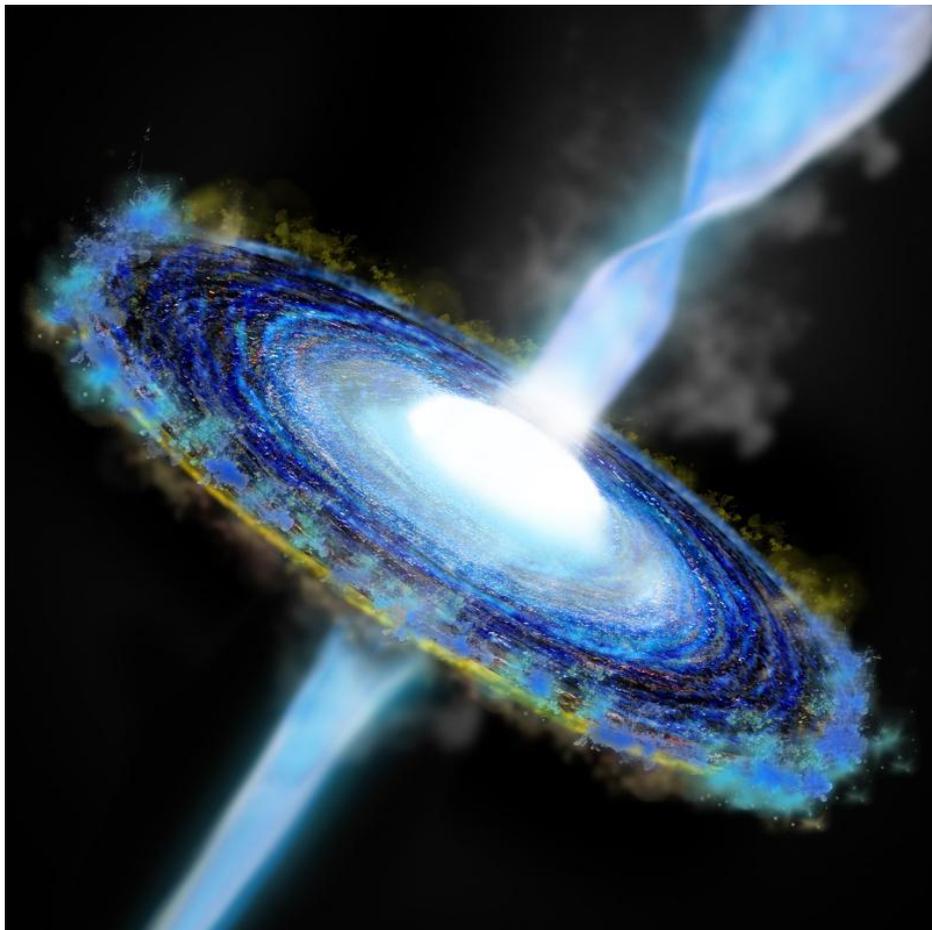


Fig. 1.3: ricostruzione grafica di un blazar.

1.2.2 RQO: radio quiet

L'attività radio non è preponderante, ma presentano discrete emissioni soprattutto al altre frequenze. Se ne riscontrano diversi tipi:

- ❖ **Galassie di Seyfert:** Scoperte da Seyfert negli anni '40, erano simili alle normali galassie ma molto più brillanti. Sono radiosorgenti deboli, suddivise in classi I e II a seconda che compaiano righe larghe o strette e predomini il nucleo o la struttura esterna. Nella maggior parte dei casi sono galassie a spirale. Spesso presentano emissioni nell'infrarosso e nell'ultravioletto.
- ❖ **LINERs (Low-Ionization Nuclear Emission Region):** Il loro tratto caratterizzante è la presenza di starburst (ovvero formazione di stelle molto massive e quindi dalla vita breve che diventano supernove esplosive) a bassa ionizzazione unito ad una ridotta luminosità superficiale. Presentano righe strette ed uno spettro simile alle Seyfert II.
- ❖ **QSO (Radio Quiet Quasar):** quasar con scarsa emissione in radio
- ❖ **ULRIGs (Ultra Luminous Infra-Red Galaxies):** Mostrano emissioni preponderanti nell'infrarosso, derivanti dalle polveri, sono principalmente galassie ellittiche o spirali dominate dal bulge.

Capitolo 2

Fisica degli AGN

2.1 Moti superluminali

Da alcune stime della velocità dei getti degli AGN si rilevò che in casi non rari essa poteva superare addirittura quella della luce.

In un primo tempo questa scoperta suscitò a ragione numerose controversie poiché paradossale, ma successivamente si intuì che i valori ottenuti dovevano essere puramente apparenti, quindi furono elaborate teorie coerenti con le leggi fisiche note per cercare di fornire una spiegazione.

Tralasciando quelle cosiddette “ad albero di Natale”, che suppongono che non si tratti in realtà di un moto vero e proprio ma di fenomeni indipendenti che interpretiamo come consecutivi, scartate poiché in realtà si nota davvero una continuità ed una struttura, rimane una soluzione basata su un semplice modello geometrico.

Supponiamo (vedi figura 2.1) che la sorgente sia al tempo iniziale t_0 posta in A ed emetta un fotone, ma si muova con velocità v lungo una direzione che forma un angolo piccolo \mathcal{G} con la linea di vista, raggiungendo B al tempo t_1 ed emettendo un secondo fotone. Il primo fotone ha intanto percorso una distanza pari a $AD = c\Delta t$, perciò l'osservatore misura un intervallo temporale

$$\Delta t_{oss} = \frac{AD - AC}{c} = \frac{c\Delta t - v\Delta t \cos \mathcal{G}}{c} = \Delta t(1 - \beta \cos \mathcal{G})$$

Egli allora stimerà la velocità apparente della sorgente come:

$$v_{app} = \frac{CB}{\Delta t_{oss}} = \frac{v\Delta t \sin \mathcal{G}}{\Delta t(1 - \beta \cos \mathcal{G})} = \frac{v \sin \mathcal{G}}{1 - \beta \cos \mathcal{G}}$$

Da cui, come ipotizzato:

$$\beta_{app} = v_{app} / c = \frac{\beta \sin \mathcal{G}}{1 - \beta \cos \mathcal{G}}$$

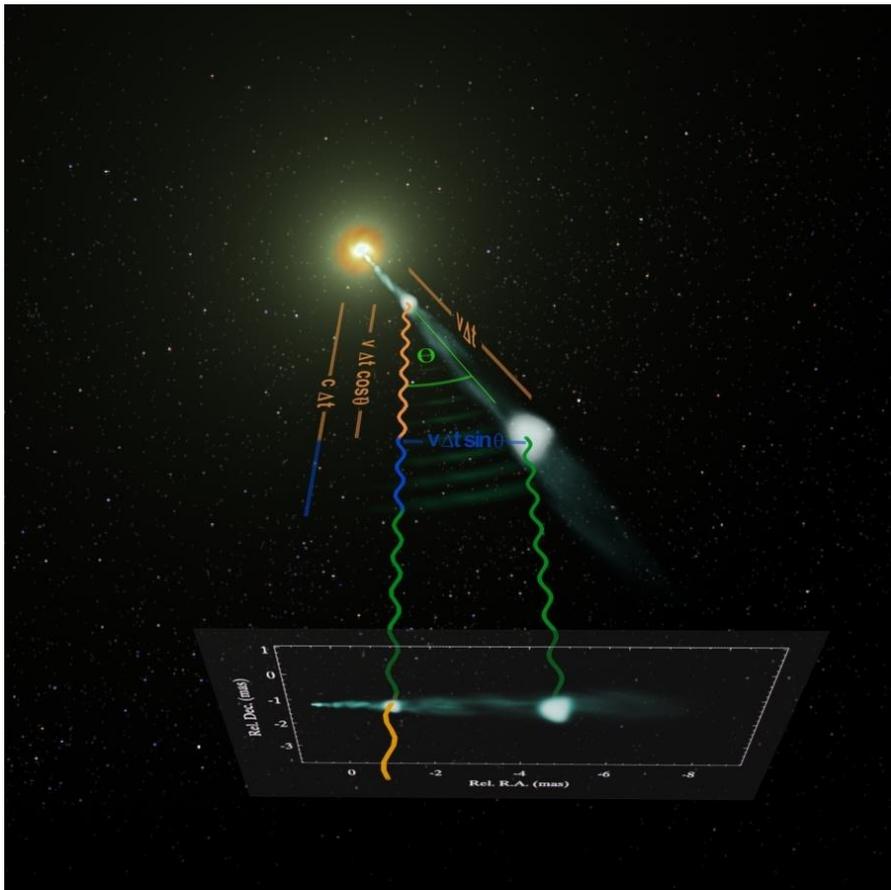


Fig. 2.1: schema del modello geometrico per il moto superluminale. Credits: W. Steffen (UNAM)

Si vede immediatamente che per β effettivi prossimi a 1, β_{app} può diventare anche molto grande: $\beta=0.98$ $\theta=0.1^\circ$ $\beta_{app}=3.9 > 1$ (fig. 2.2)

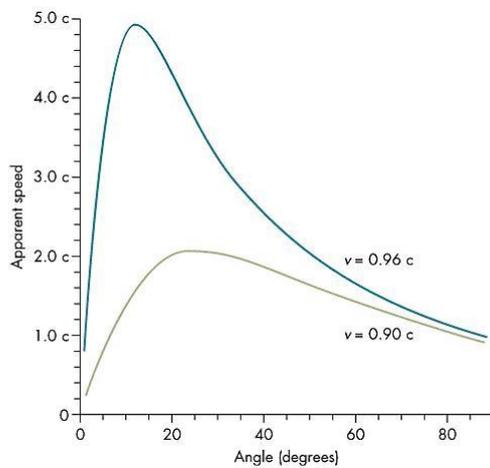


Fig. 2.2: esempi della variazione della velocità apparente superluminale dei getti degli AGN per velocità reali prossime a quelle della luce coniugate a piccoli angoli di vista

2.2 Laboratori relativistici

Sarebbe quindi impossibile comprendere gli AGN se non si conoscessero gli aspetti peculiari della relatività ristretta. Tenendo conto dei risultati più sorprendenti e lontani dal senso comune di questa teoria infatti si riescono a spiegare magistralmente le discrepanze e le apparenti stranezze osservate, riuscendo anche a vedere come oggetti apparentemente diversi si rivelino in realtà lo stesso ma osservato da angolazioni differenti.

Gli AGN sono perciò anche un perfetto laboratorio di verifica e approfondimento relativistico.

Analizziamo nel dettaglio come variano le grandezze usuali per velocità confrontabili con quella della luce. Sia S' un sistema in moto uniforme con velocità v ed S il sistema in cui l'osservatore è in quiete, ricordando le trasformazioni di Lorentz si avranno le seguenti variazioni:

❖ Fattore doppler (doppler boosting)

Se la sorgente si muove a velocità $v = \beta c$ e forma un angolo \mathcal{G} con la linea di vista, la frequenza misurata dall'osservatore sarà diversa da quella emessa, secondo la formula:

$$\nu_0 = \frac{\nu_e}{\gamma(1 - \beta \cos \mathcal{G})} = \delta \nu_e, \quad \delta = \text{fattore doppler}$$

$$\text{Dove } \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$$

Alcune importanti considerazioni:

Se la sorgente è in avvicinamento, cioè $\beta > 0$, $\delta > 0$, la frequenza osservata è maggiore di quella emessa (blueshift)

Se al contrario essa è in allontanamento, ovvero $\beta < 0$, $\delta < 0$, la frequenza osservata è minore di quella emessa (redshift).

Una novità rispetto all'effetto doppler classico è che quello relativistico si ha anche quando la sorgente è in moto trasversale.

Ad esempio se

$\mathcal{G} = 90^\circ$ si ottiene un fattore doppler $\delta = 1/\gamma$ diverso da 0!

Inoltre per $v \ll c$ si ritrova la formula classica.

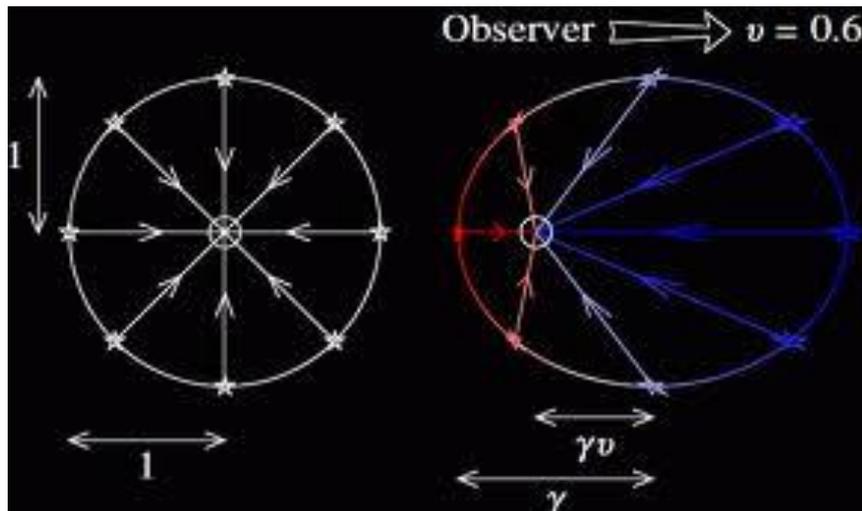


Figura 2.3:
Beaming
relativistico

❖ **Energia**

Per un fotone, applicando la quantizzazione, l'energia è $E = h\nu$, quindi tenendo conto delle correzioni relativistiche si avrà semplicemente

$$E = h\nu_0 = h\delta\nu_e$$

❖ **Tempo**

Correzione dovuta al moto relativistico della sorgente:

$$dt_0 = \gamma dt_e - \frac{\gamma v \cos \theta dt_e}{c} = \frac{dt_e}{\delta}$$

❖ **Angolo solido**

La radiazione emessa entro un certo angolo solido sarà rilevata dall'osservatore entro un angolo differente

$$d\Omega_0 = \frac{d\Omega_e}{\delta^2}$$

❖ **Luminosità**

Luminosità bolometrica

$$L_0 = \delta^4 L_e$$

Vi sono delle importanti conseguenze: un forte aumento di luminosità se la sorgente è in avvicinamento (boosting) e al contrario una sua riduzione se si allontana (deboosting). Questo può causare un'apparente deformazione dell'oggetto stesso.

Luminosità monocromatica:

$$L_0(\nu_0) d\nu_0 = \delta^4 L_e(\nu_e) d\nu_e, \text{ ma sapendo che } \nu_0 = \delta\nu_e \text{ si ottiene}$$

$$L_0(\nu_0) = \delta^3 L_e(\nu_e)$$

Invece se si tiene conto del fatto che la *radiazione è di sincrotrone*, cioè

$$L(\nu) \propto 1/\nu^\alpha :$$

$$L_0(\nu_0) = \delta^{3+\alpha} L_e(\nu_e)$$

2.3 Meccanismi di emissione

Come spiegare le emissioni in tutto lo spettro? Incredibilmente la fusione nucleare non risulta abbastanza potente, perciò vengono chiamati in causa altri meccanismi. Innanzitutto analizziamo lo spettro, che si presenta continuo e caratteristico poiché se tradotto in scala bilogarithmica è una semplice retta (fig. 2.4):

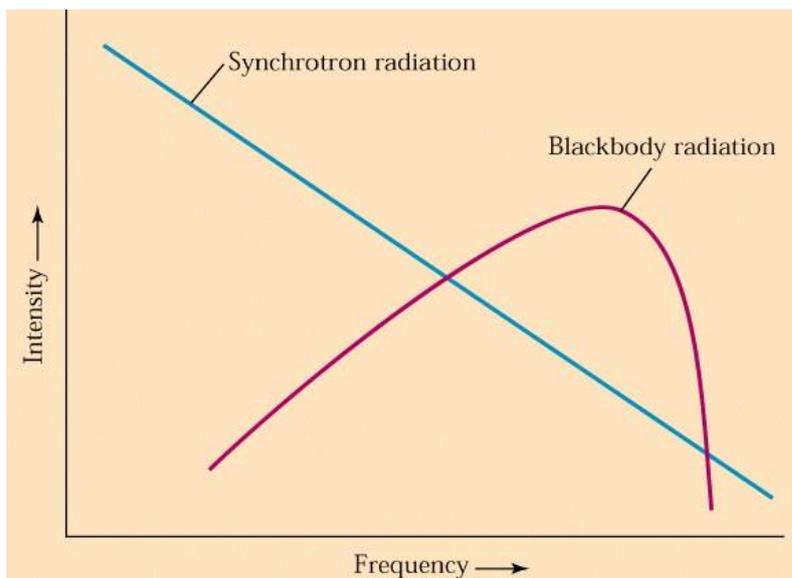


Fig. 2.4: confronto tra lo spettro termico e di sincrotrone in scala bilogarithmica

Un comportamento del genere può spiegarsi come un'*emissione di sincrotrone*, cioè originata da elettroni relativistici immersi in un campo magnetico. Consideriamo un particella di massa m e di carica e che si muove con velocità \vec{v} in un campo magnetico \vec{B} omogeneo.

La sua equazione del moto relativistica è

$$\frac{d(\gamma m \vec{v})}{dt} = e(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\frac{d(\gamma mc^2)}{dt} = 0 \text{ poiché non è presente il campo elettrico.}$$

Allora γ e \vec{v} sono costanti. Scomponiamo le due componenti parallela e perpendicolare della velocità:

$$\frac{d\vec{v}_{\parallel}}{dt} = 0$$

$$\frac{d\vec{v}_{\perp}}{dt} = \frac{e(\vec{v}_{\perp} \times \vec{B})}{\gamma m}$$

Si ricava allora $\vec{v}_{\parallel} = \text{costante}$, $\vec{v} = \text{costante}$ e allora anche $\vec{v}_{\perp} = \text{costante}$, cioè il moto perpendicolare è circolare uniforme con accelerazione centripeta, raggio e pulsazione:

$$a_{\perp} = \frac{e v_{\perp} B}{\gamma m}$$

$$r = \frac{m \gamma \vec{v}_{\perp}}{e B}$$

$$\omega = \frac{e B}{m \gamma}$$

L'elettrone descrive quindi un moto a elica (fig. 2.5):

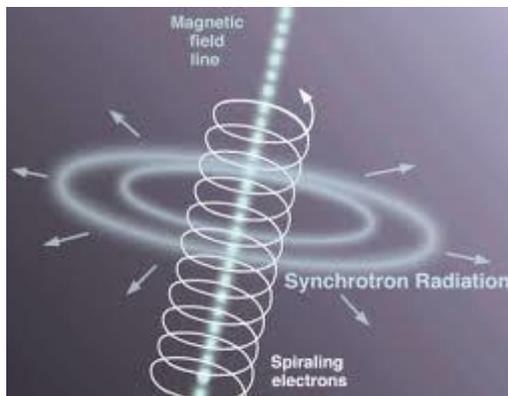


Fig. 2.5: moto elicoidale dell'elettrone che emette in sincrotrone

La potenza irradiata si ricava dalla formula di Larmor relativistica:

$$P = \frac{2e^2}{3c^3} \gamma^4 (\gamma^2 a_{\parallel}^2 + a_{\perp}^2) = \frac{2e^2}{3c^3} \gamma^4 a_{\perp}^2 = \frac{2e^4 \tau_{\perp}^2 B^2 \gamma^2}{3m^2 c^3}$$

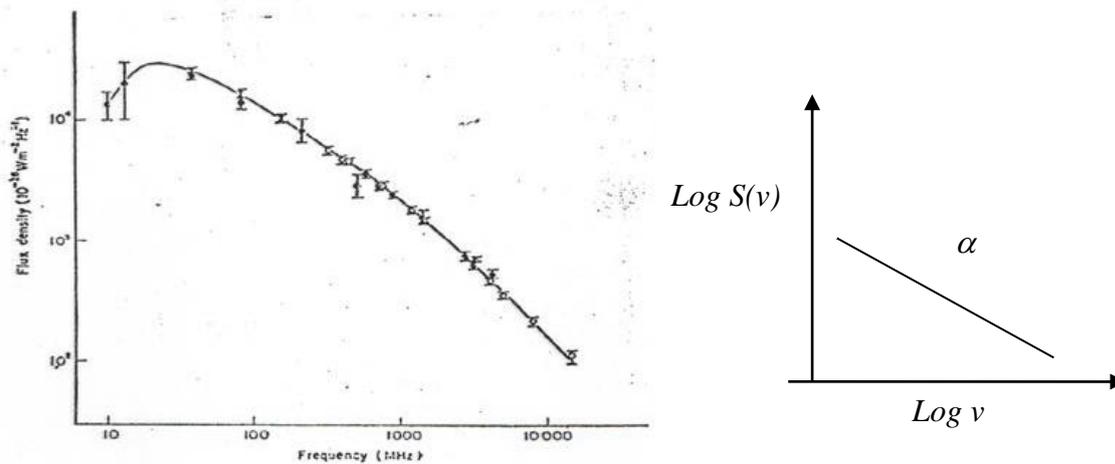


Fig. 2.6: (a) spettro di sincrotrone esponenziale con autoassorbimento a bassa frequenza (b) spettro in scala bilogarithmica che risulta una retta di pendenza α

L'indice spettrale energetico dei fotoni α si ottiene dal grafico:

$$\alpha = \frac{\ln(s_1 / s_2)}{\ln(\nu_2 / \nu_1)}$$

Altri possibili meccanismi di emissione sono il *Compton inverso* e il *Bremsstrahlung*

Il primo consiste al contrario del Compton classico nello scattering di elettroni su fotoni, che possono acquistare anche una considerevole quantità di moto raggiungendo frequenze molto elevate, utile per spiegare ad esempio le emissioni in X.

Il Bremsstrahlung si ha invece quando una particella carica è frenata dal campo elettrico proprio di un'altra particella, ad esempio un elettrone interagente con un nucleo atomico o ionico. Spesso si origina dal plasma.

Capitolo 3

Unificazione degli AGN

3.1 Morfologia degli AGN

A questo punto si dovrebbe riuscire a delineare un ritratto piuttosto preciso di come dovrebbe essere strutturato un qualsiasi Nucleo Galattico Attivo per poter mostrare tutte le sue caratteristiche fondamentali. Le ipotesi sulle sue componenti sono poi state suffragate dalle osservazioni.

A seguito sono illustrati i principali elementi costitutivi.

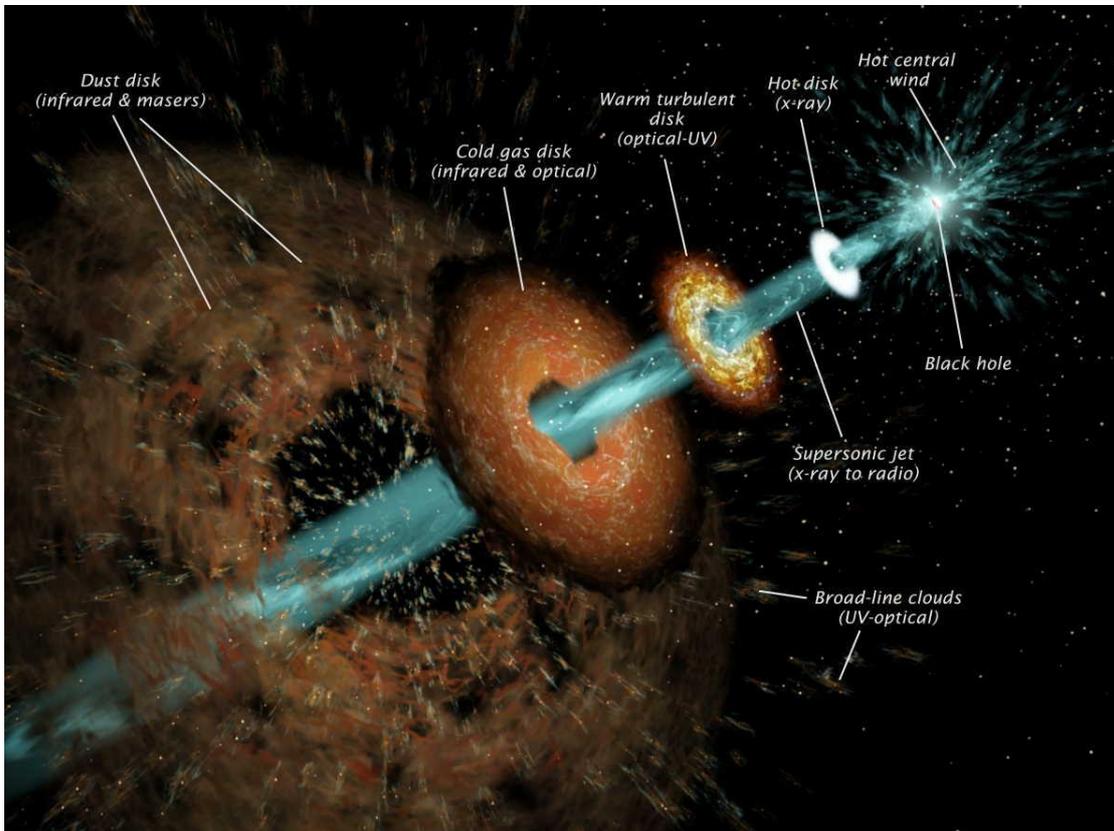


Fig. 3.1: illustrazione schematica della morfologia di un AGN. Credits: Steffen (UNAM)

- ❖ **SMBH: buco nero supermassiccio centrale**
Perché si originino una tale potenza è necessario che la sorgente sia estremamente massiva, perciò l'unico oggetto capace di fornirla non può che essere un buco nero; ma non è sufficiente nemmeno un "comune" buco nero residuo di una stella di grandissima massa. Occorre un corpo mastodontico, di massa almeno $10^6 - 10^{10}$ volte quella del sole.
- ❖ **Campo magnetico di dimensioni galattiche:** Fondamentale per ottenere l'emissione di sincrotrone osservata, deve presentarsi pressoché uniforme su scale del kpc; i meccanismi relativi alla sua formazione rimangono ancora in gran parte da indagare.
- ❖ **Disco di accrescimento rotante**
La grande radiazione rilasciata è frutto di un disco di materia rotante che precipita sul buco nero e converte la sua massa in energia per viscosità. Questa liberandosi diventa calore che fa sì che la materia si trasformi a sua volta in plasma, il quale si suppone produca il grande campo magnetico necessario per l'emissione di sincrotrone.
- ❖ **Toro oscurante**
Consta di materiale opaco quale polveri o gas orbitanti sempre per attrazione gravitazionale attorno al buco nero e può raggiungere i 100 pc
- ❖ **Broad e narrow line regions (BLR-NLR)**
Nubi di gas e polveri; le prime ad alta densità formano righe allargate, mentre le seconde formano righe strette, anche proibite e sono al contrario a bassa densità.
- ❖ **Getti, lobi, plumes e hotspots**
Fortemente caratteristici degli AGN, i getti si originano nel nucleo e si proiettano per grandi distanze. La loro particolarità è l'emissione di sincrotrone che infatti è caratterizzata da una spiccata direzionalità, e trasportano particelle, campo magnetico, energia e plasma verso l'esterno. Si riscontrano anche in ottico, x e gamma. Essi terminano negli hotspots, che si creano dal frenamento dei getti ad opera della materia interstellare e lasciano dietro di sé enormi lobi non relativistici dalle dimensioni molto maggiori di quelle del nucleo (dai Kpc ai Mpc) e di forma ellissoidale. L'indice spettrale è compreso tra 0,7 e 1,0 caratteristico dell'emissione di sincrotrone.

3.2 Modelli unificati

Le varie classificazioni sono davvero differenti intrinsecamente o noi le interpretiamo come tali solo perché le osserviamo da diverse angolazioni? Alcuni studiosi hanno avvalorato la seconda ipotesi, cercando di dimostrare che il discriminante può essere quasi esclusivamente l'angolo di vista.

3.2.1 Modelli:

Modello Orr Browne

Questo modello ipotizza per primo che le sorgenti estese, come le radiogalassie FR II con nucleo e lobi luminosi siano tali perché ortogonali alla linea di vista, mentre le sorgenti puntiformi e molto brillanti devono essere necessariamente osservate a piccoli angoli per cui si ha un'apparente amplificazione di luminosità (secondo la teoria del beaming relativistico). La velocità dei getti viene inoltre considerata relativistica mentre quella dei lobi classica, assunzione supportata dal calcolo del tempo intercorso dalla loro formazione alla dissipazione di energia.

Modello Barthel

Estensione successiva del modello precedente, unifica sia le sorgenti lobe e core dominated che le quasar e le radiogalassie, definendo le prime come osservate ad angoli di circa 30° mentre le seconde a circa 70° . L'angolo critico a cui le due tipologie appaiono indistinguibili è stimato sui 45° .

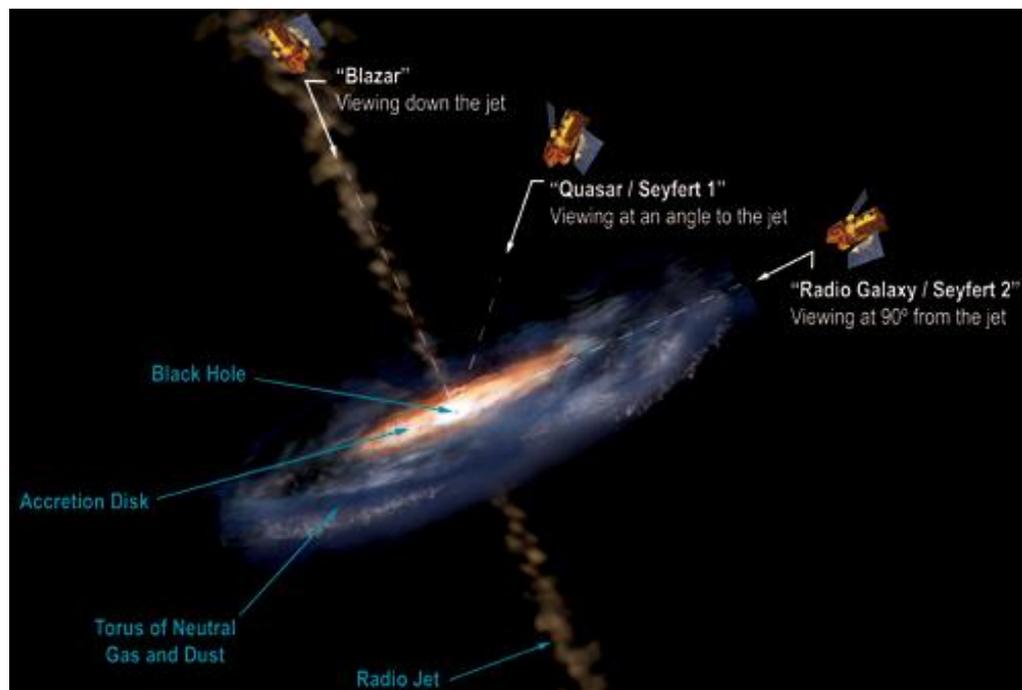


Fig. 3.2: modelli unificati in cui il tipo di galassia dipende dall'angolo di osservazione.
Credits: A. Simonnet, Sonoma State University

3.2.2 Unificazioni:

Unificazione FRI-BL Lac

Questa coppia di sorgenti mostra caratteristiche comuni, a parte le solite già menzionate differenze di luminosità ed estensione: emissione radio con stesse proprietà isotrope, stessa funzione di luminosità radio e X, asimmetria di polarizzazione dei lobi accoppiati, appartenenza a galassie ellittiche giganti situate in ammassi a basso redshift.

Perciò adottando i modelli precedenti si può ipotizzare una loro coincidenza, mascherata dall'angolo di orientazione.

Unificazione FRII-QUASAR

Anche in questo caso è stata verificata da Barthel una probabile corrispondenza tra i due oggetti. Calcolando infatti la probabilità che una sorgente si trovi in un cono di inclinazione rispetto alla linea di vista minore di un angolo ϕ si trova:

$P(\theta < \phi) = 1 - \cos \phi$. Applicando il ragionamento al suo campione ne stimò il 29% come Quasar ed il 71% come FRII, ottenendo angoli medi rispettivamente di 31 e 69 gradi.

Sorsero tuttavia dei problemi: i quasar anche se prossimi alla linea di vista spesso non mostrano piccole dimensioni lineari, ed inoltre ad un'analisi più approfondita l'asimmetria tra i due getti è troppo grande per essere spiegata con il solo beaming.

Unificazione Seyfert I-Seyfert II

I due tipi di galassie sembrano ancora una volta la stessa sorgente, in cui domina il toro di gas e polveri. Se esso si frappone alla direzione di osservazioni si vedranno solo le narrow lines, mentre ad uno sguardo perpendicolare esso non apparirà e si sarà liberi di osservare anche le broad lines.

Capitolo 4

Interferometria radio

Oggetti come gli AGN, o meglio in particolare le radiosorgenti, non possono essere studiati con i comuni telescopi ottici, anche perché molto lontani (nelle quasar il redshift z può raggiungere anche valori elevati); si è quindi sviluppata una particolare tecnica osservativa denominata **interferometria radio**, che presenta notevoli vantaggi.

Lo spettro radio comprende lunghezze d'onda che vanno da pochi millimetri a decine di metri. Analizzando la risoluzione di un telescopio in funzione del suo diametro, data dalla formula

$R = 1.22 \frac{\lambda}{D}$ (diffrazione di Fraunhofer) si vede immediatamente che se per i

telescopi ottici erano sufficienti diametri di pochi di metri, nel caso delle onde radio, perché due oggetti separati vengano osservati come tali e non sovrapposti, occorrerebbero dimensioni almeno 10^6 volte maggiori!

Inoltre sebbene l'atmosfera sia abbastanza trasparente alle onde radio, a causa dello sviluppo tecnologico sono oggi presenti numerose fonti artificiali di disturbo che causano un notevole margine di rumore alle misurazioni.

Le tecniche interferometriche riescono ad ovviare anche a ciò, grazie ad una migliore pulizia del segnale.

L'idea base è quella di costruire un gigantesco reticolo di diffrazione formato da molti telescopi coordinati (questo concetto è denominato **sintesi di apertura**: si ottiene lo stesso effetto di un telescopio pieno lavorando con pochi elementi costitutivi). In questo modo si ha il doppio vantaggio di ottenere un diametro effettivo dato dalla distanza tra due elementi di base (**baseline**) e di diminuire il rumore poiché anche se presente in una singola antenna, dopo essere stato combinato con una seconda per ottenere la figura di interferenza esso si elimina dato che il suo sfasamento non è compreso in quello geometrico considerato.

Una singola unità è formata da:

Antenna: convoglia la radiazione verso il fuoco, meglio se in forma parabolica

Ricevitore: rileva il segnale, è posto nel fuoco

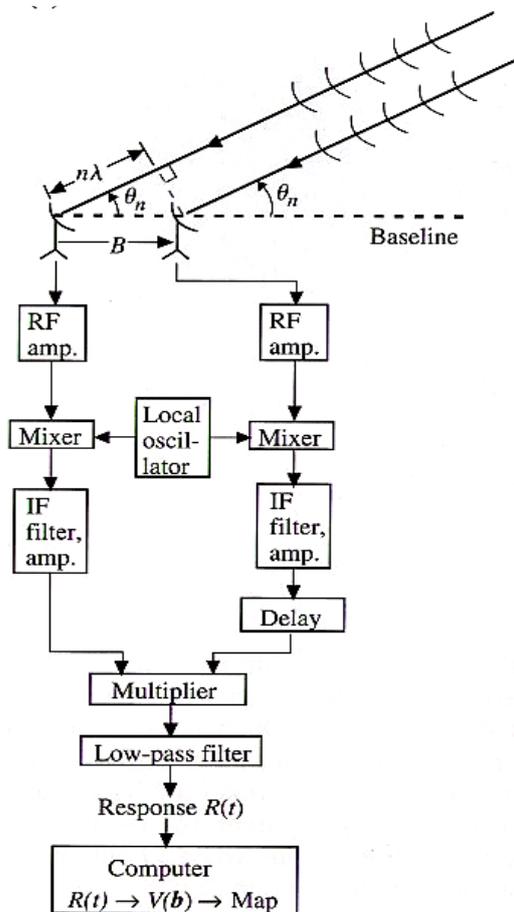


Fig. 4.1: struttura schematica di un interferometro.

Collegando due unità si ottiene l'interferometro più semplice formato da una sola baseline. I ricevitori essendo distanziati generano uno sfasamento geometrico di percorso che causa l'interferenza e la diffrazione, $l = D \cos \vartheta$. La baseline è in grado di misurare la potenza di una sorgente ad una determinata frequenza in un determinato punto. Per misurazioni estese si considera il piano formato dalle coppie (u,v) , proiezioni delle coordinate (x,y) della baseline perpendicolarmente alla linea di vista in unità λ . Affinché siano coperti tutti i punti di questo piano occorrerebbe allora modificare la posizione delle baselines. La rotazione della terra aiuta in ciò, offrendo lo stesso effetto senza bisogno di spostare materialmente le antenne o costruire altre. Inoltre, per ottenere risoluzioni diverse di sorgenti più o meno estese si costruiscono molte baselines, ognuna con diversa distanza D tra le antenne.

Le caratteristiche desiderabili perché si abbia un buon telescopio dovrebbero perciò essere:

sensibilità: capacità di rilevare segnali anche molto deboli (aumenta se aumenta il numero di antenne)

risoluzione: capacità di distinguere oggetti molto vicini (aumenta se aumenta la distanza tra le antenne, o passo del reticolo)

Il ricevitore misura il campo elettrico dell'onda incidente; ovviamente assumendo che il segnale di una singola baseline abbia stessa frequenza e fase (coerenza). Ciò che interessa fisicamente è la **funzione di brillantezza** del cielo $B(x,y)$ che tabula grandezze reali; tuttavia nella pratica il radiotelescopio misura la **visibilità di frangia**, una funzione complessa ed hermitiana ($V(-u,-v) = V^*(u,v)$) che corrisponde alla sua antitrasformata di Fourier.

$$V(u, v) = V_0 e^{-i\phi} \propto \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} B(x, y) e^{2\pi i(ux+vy)} dx dy$$

Invertendola si ottiene il risultato voluto.

Successivamente le varie funzioni vengono analizzate da un correlatore centrale, che è in grado di assemblare le misurazioni delle singole baseline considerando gli sfasamenti, riuscendo ad aumentare sia la sensibilità del complesso che la copertura angolare dell'area di cielo.

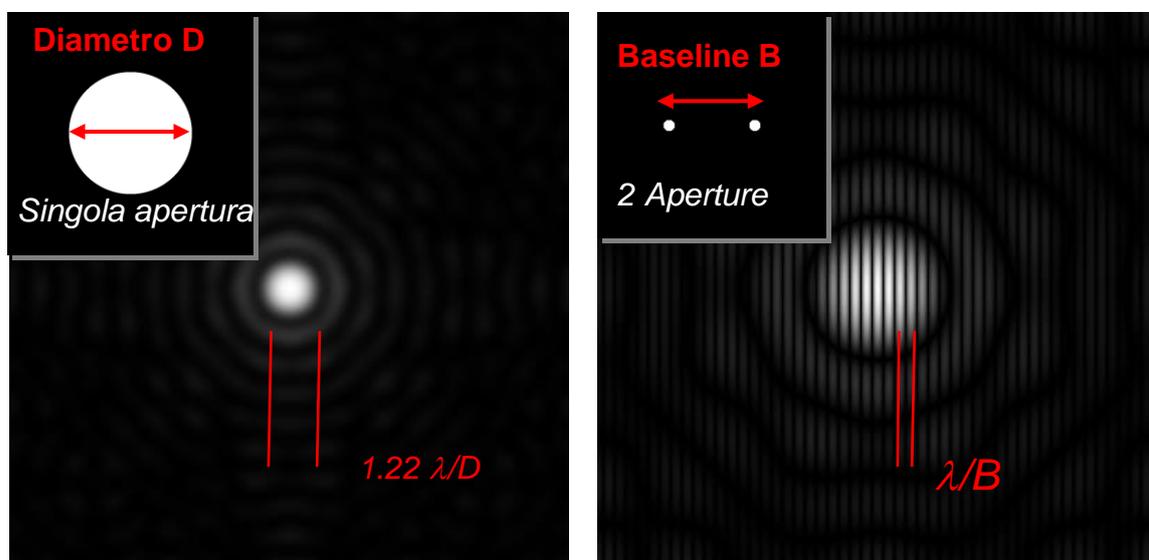


Fig. 4.2: a sinistra: figura di diffrazione ottenuta da un singolo telescopio; a destra: figura di interferenza e diffrazione ottenuta da due telescopi coordinati (baseline)

4.1 Tipologie di interferometri

Esistono vari interferometri, quelli classici materialmente connessi tramite cavi e quelli che utilizzano la tecnica VLBI.

Tra i telescopi classici, quello che mostra attualmente migliori prestazioni è il VLA.

4.1.1 VLA (Very Large Array, Mexico)

Il Very Large Array, situato in Messico, fu uno dei primi radiointerferometri ad essere costruito. E' formato da ben 27 radio antenne con configurazione ad Y,

ognuna di 25 metri di diametro e può essere utilizzato in 4 diverse configurazioni. Il piano (u,v) è completamente coperto in 8 ore, grazie alla configurazione scelta. Può spaziare su un range di lunghezze d'onda da 400 a 0.7 cm, e raggiungere una risoluzione angolare di 0.04 secondi d'arco.

4.1.2 VLBI (Very Long Baseline Interferometry)

Questo sistema di antenne fu progettato più tardi ed è talmente esteso che i singoli telescopi non sono più nemmeno materialmente connessi tramite cavi, ma i dati sono registrati in loco ed elaborati a posteriori. Ogni antenna ha perciò un orologio atomico (di solito un maser a idrogeno) connesso ad un GPS per ulteriori sincronizzazioni; inoltre possiede un oscillatore locale che converte il segnale di riferimento ad una frequenza intermedia che viene registrata su un hard disk e poi inviata all'unico correlatore centralizzato in grado di elaborare i dati dei diversi telescopi.

Ultimamente si sono costruite anche antenne nello spazio per avere risoluzioni accuratissime, ad esempio il progetto russo RAS attraverso il Radio Astron ha ottenuto risoluzioni di $1 \mu as$!

European VLBI Network (EVN)

Composto da ben 18 antenne situate in vari stati europei, ma anche in Russia, Cina, Sud Africa e Porto Rico (un radiotelescopio del complesso è presente anche a Medicina, vicino a Bologna) è il VLBI più sensibile e raggiunge risoluzioni di 0.15 millisecondi d'arco(mas). Purtroppo, a causa della casualità della disposizione delle antenne la copertura del piano (u,v) non è troppo ottimale ma si stanno progettando nuove antenne per completarla.

Very Long Baseline Array (VLBA)

Consta di 10 antenne dal diametro di 25 m ciascuna, dislocate attraverso gli Stati Uniti, le Hawaii e le Isole Vergini, mentre la correlazione avviene in New Mexico. Dal costo di 85 milioni di dollari, il suo hard disk raggiunge un terabyte di memoria; la baseline maggiore si aggira intorno agli 8600 km mentre quella minore ai 200 km; le risoluzioni più accurate sono all'ordine dei miliardesimi ed opera a 10 frequenze discrete che vanno da circa 1 a 96 GHz.

I dati utilizzati nella parte sperimentale della tesi sono stati dedotti da questo radiointerferometro.

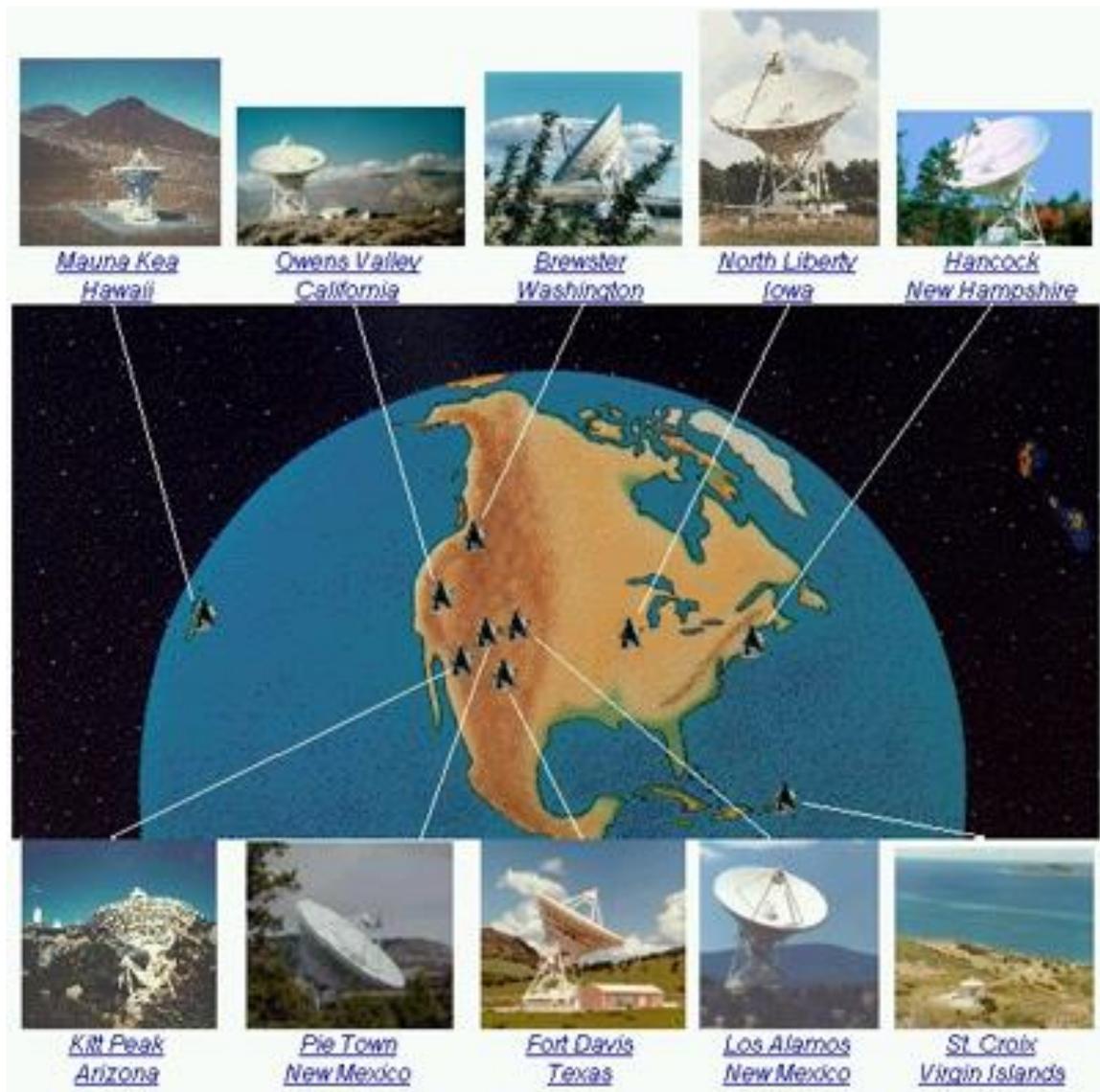


Fig. 4.3: Dislocazione delle 10 radioantenne dell'interferometro VLBA negli Stati Uniti.
Credits: NRAO

Capitolo 5

L'AGN 3C 84

5.1 Scopo della tesi

La seguente tesi si propone di analizzare in dettaglio le proprietà nucleari dell'AGN 3C 84.

Questa sorgente si presenta variabile a scale temporali diverse, e potrebbe rappresentare un'evidenza a supporto della teoria della presenza di una ciclicità nelle attività dei Nuclei Galattici Attivi.

Negli ultimi anni infatti (a partire dal 2003-2005) si sono osservati forti incrementi delle emissioni radio e gamma in concomitanza con la comparsa di un nuovo getto nelle vicinanze del nucleo, che si inseriscono in uno scenario di ripresa dell'attività all'ordine dei centomila anni. Lo studio approfondito della regione centrale potrebbe quindi gettare luce sulle ragioni e i meccanismi di emissione nonché sulla natura degli AGN.

Per fare ciò ci si avvarrà dei dati forniti dalle osservazioni della rete VLBA ed archiviati nel database pubblico MOJAVE, oltre ad ulteriori misurazioni nucleari fornite dal Progetto Blazar dell'Università di Boston. Successivamente le mappe saranno elaborate tramite il programma per il calcolo astronomico AIPS. I commenti finali relativi ai risultati ottenuti (grafici, fit, variazioni morfologiche) verranno confrontati ed eventualmente integrati con precedenti studi della stessa sorgente presenti in letteratura.

5.2 Generalità di 3C 84

Il Nucleo Galattico Attivo denominato 3C 84 (altri nomi riscontrabili sono 0316+431 o J0319+4130) è situato all'interno dell'ammasso di Perseo, rivelandosi quindi una delle radiogalassie FRI più vicine con un redshift z di appena 0.0176.

In ottico corrisponde alla galassia ellittica gigante NGC 1275, anche se spesso a causa dell'estrema luminosità e delle righe è stata anche classificata come galassia di Seyfert.

Le sue coordinate esatte sono 3 h 19 m 48.160 s in ascensione retta (RA) e +41d 30' 42.104" in declinazione (DEC).

Emette preponderatamente in radio, mostrando attualmente a frequenze comprese tra $10^{14} - 10^{15}$ Hz una struttura a lobi multipli, che si estende dal sub-pc alle decine e centinaia di kpc.

Al centro si osserva un nucleo di circa 1 pc composto da altre tre sotto-strutture, quindi due getti che terminano in due grandi lobi all'ordine delle decine di pc di cui quello a sud molto più evidente. A basse frequenze (circa 1 GHz) si osserva anche una terza zona radiativa estesa fino a circa 30 pc. Altre strutture che non saranno approfondite raggiungono scale del kpc.

La massa del SMBH è stimata attorno alle $3.4 \cdot 10^8$ masse solari. Il diametro dell'asse maggiore è 69.41 kpc, mentre quello minore 49.28 kpc.

I getti non mostrano moti propri relativistici, avendo una velocità massima di 266 $\mu\text{as}/\text{y}$ ovvero 0.31 c.

Lo spettro radio si dimostra piatto, cioè con un indice spettrale $\alpha < 0.7$; si riscontrano anche emissioni ad altre frequenze, fino ad arrivare a picchi in X e gamma.

Nella seguente trattazione e in tutti i calcoli seguenti si assumono come parametri cosmologici $H_0 = 73.0$, $\Omega_{\text{materic}} = 0.27$, $\Omega_{\Lambda} = 0.73$, la radiazione cosmica di fondo alla temperatura di 3K e l'equivalenza 1 mas = 0.353 pc



Fig. 5.1: Immagini ottiche di 3C 84. Credits: Harvard University

5.3 Storia di 3C 84

In letteratura si rintracciano numerosi riferimenti e studi di questo oggetto galattico, osservato già da poco prima degli anni '60.

La presenza di dati relativi ad epoche estese ci permette quindi di studiare nel dettaglio, oltre alle usuali caratteristiche, anche la sua evidente variabilità.

Le attività radio e gamma infatti non appaiono immutabili nel tempo, ma constano di aumenti e diminuzioni e sarebbe quindi molto interessante accertarsi se questa sorgente compia un processo ciclico di rinascita, e in caso affermativo su quali scale temporali e per quali meccanismi e se le emissioni a differenti frequenze siano oppure no correlate.

Inoltre la sua vicinanza ci permette di raggiungere risoluzioni piuttosto accurate e quindi di osservare separatamente le varie componenti del nucleo, anche se purtroppo risultano ancora insufficienti a comprenderne appieno tutti i dettagli.

In generale, questi sono i principali avvenimenti degni di nota dell'intero AGN [A]:

- *1959*: primo radio outburst rilevato, da cui si suppone si siano creati i getti e i 2 lobi attualmente visibili su scala dei 10 pc.
- *1980*: forte picco radio, poi decrescente, si osserva un'espansione adiabatica dei lobi
- *2003*: visibile a 43 GHz l'emergere di una nuova struttura nel nucleo che si somma alle due precedenti, denominata C3.
- *2005*: di nuovo una forte esplosione radio.
- *2007-2008*: Visibile anche a 22GHz l'emergere della nuova struttura C3. Essa forma un angolo di 40° con c1 e c2 e si allontana da esse con una velocità media apparente di $0.23c$. Qui tuttavia sorgono problemi interpretativi, poiché il modello relativistico non è concorde con le osservazioni. Possibili soluzioni saranno discusse in seguito.
- *2008*: forte emissione di radiazione gamma rilevata dal telescopio LAT. Si discuterà se possa esistere una correlazione tra questa e l'incremento delle attività radio.
- *Inizio 2009, successivamente fine 2010*: due emissioni brevi ed intense di radiazione gamma uscenti dal nucleo

Tutti i dati precedenti e quelli a seguire derivano dalla correlazione delle osservazioni dei telescopi VLBI per le onde radio e LAT (Fermi Telescope) per i raggi gamma.

[A] La sintesi è stata estrapolata dai seguenti articoli astronomici: [1], [2], [3], [4], [5], rintracciabili nella bibliografia.

5.4 Morfologia di 3C 84

5.4.2 Regione intergalattica (10-100 kpc)

L'emissione radio di 3C 84 si estende a larghissima scala fino alle decine e centinaia di kpc. Quest'area è stata la prima ad essere indagata, a causa delle risoluzioni non molto accurate di cui si disponeva nel passato, ed è costituita da radiazione a bassa frequenza, relitto di attività antiche, che si estende molto al di là del corrispettivo ottico arrivando quasi a toccare le radiosorgenti vicine, come ad esempio 3C 83.1.

La sua struttura è complessa, e potrebbe esser suddivisa in ulteriori zone a seconda della frequenza e risoluzione angolare.

Dalle analisi effettuate negli anni '70 (Miley e Perola; art. [6]) si possono identificare emissioni a 1.4 GHz su due diverse scale di 30'' e di 5'', corrispondenti rispettivamente a circa 10 e 100 kpc.

Sinteticamente le principali caratteristiche della struttura sono:

- *Frequenze di rilevazione:* basse frequenze, 333 MHz (0.3 GHz) 1.4 GHz, 0.6 GHz
- *Struttura:* varia, molto estesa, relitto
- *Età:* $10^8 - 10^5$ yr
- *Emissioni:* radio a basse frequenze <2 GHz

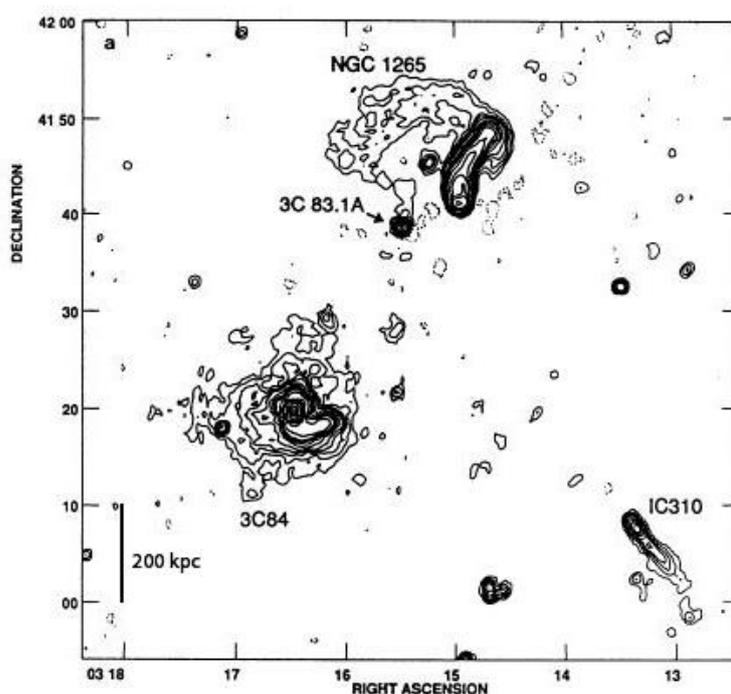


Fig. 5.2: Mappa della regione intergalattica di 3C 84 a 0.333 GHz che si estende fino a 100 kpc dal nucleo (contando anche la radiazione debole nei perimetri si arriva a 300 kpc). Nell'immagine è visibile anche la galassia vicina 3C 83 per rendere ancora più efficacemente le dimensioni di questa struttura.

Credits: rif. [8]

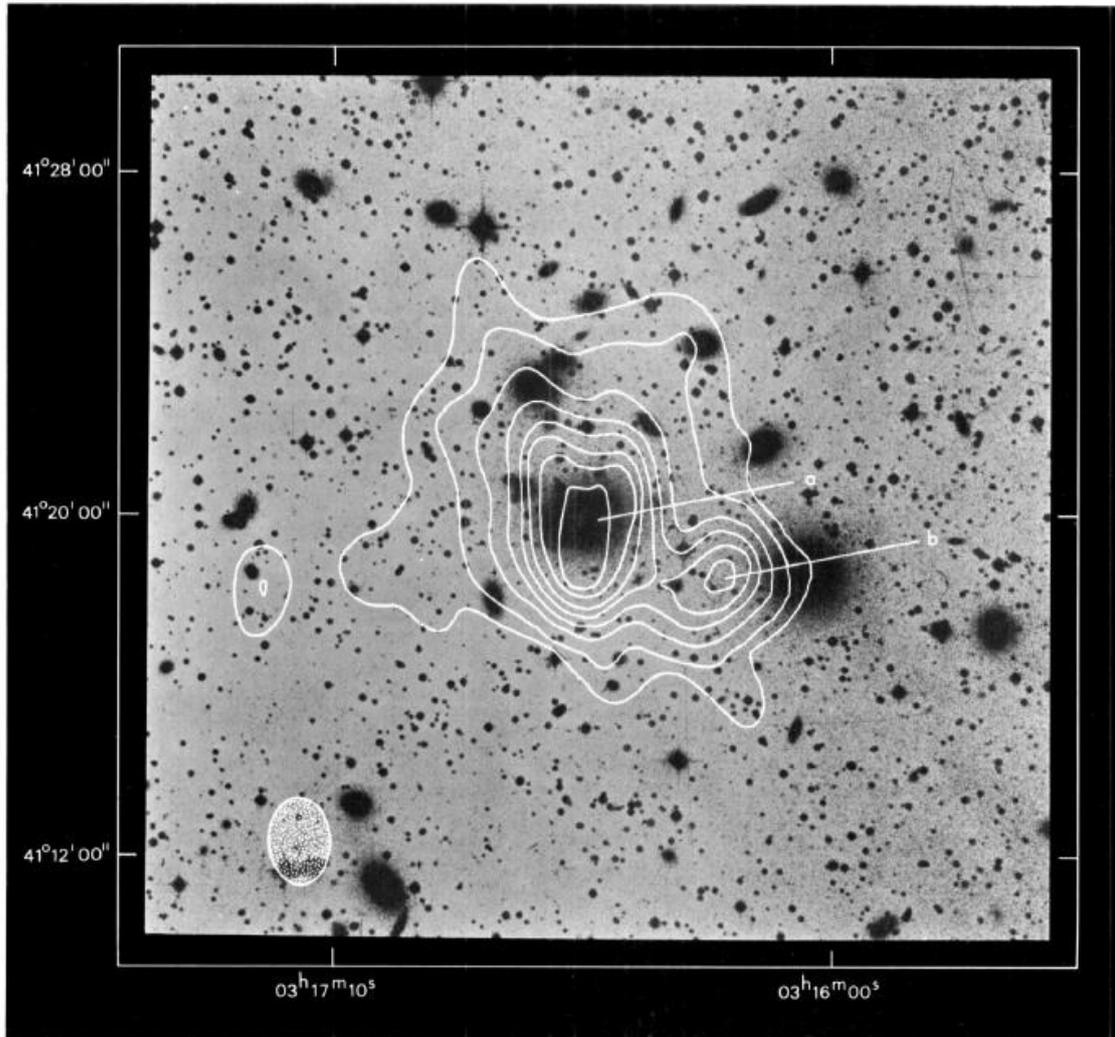


Fig. 5.3: Mappa della regione di 3C 84 del 1975 a 1.4 GHz che si estende fino a 5' (100 kpc). L'immagine radio è sovrapposta a quella ottica (in nero) per mostrare che la radiazione periferica può arrivare a sfiorare la galassia vicina.
Credits: art. [6]

5.4.2 Regione esterna A (30-35 pc)

Visibile solo a radiofrequenze basse, ovvero minori di 5 GHz si estende fino a ben 30 pc dal nucleo ed è di gran lunga molto più antica delle altre come dimostra anche lo spettro ripido, segno che la radiazione ha avuto molto tempo per allontanarsi dal nucleo e raffreddarsi.

- *Frequenze di rilevazione:* <5 GHz; in particolare 0.3, 0.6 e 1.4 GHz.
- *Struttura:* Mostra un'estensione notevole e piuttosto uniforme, non sono visibili hotspots ma appare come un gigantesco lobo espanso. $\beta_{apparente}$ risulta uguale a solo 0.003. Si suppone che questa struttura si sia formata dall'interazione di 2 getti, quello del '59 e uno risalente a 10^5 anni fa.
- *Età:* Attraverso la Synchrotron Ageing Theory (vedi Appendice) si ritiene antichissima e la sua formazione si fa risalire a circa $1.3 \cdot 10^5$ anni fa, segno di un ciclo di ricorrenza nell'attività degli AGN dell'ordine dei centomila anni.
- *Emissioni:* radio a basse frequenze, estese
- *Problemi aperti:* Un problema aperto è il calcolo dettagliato dell'età della struttura nonché la sua collocazione all'interno di una teoria che spieghi la ciclicità e la ricorrenza delle emissioni degli AGN. Si era infatti ipotizzata una somiglianza con i microquasars, in cui il tempo di ricorrenza è proporzionale alla massa del buco nero. Tuttavia un semplice calcolo fornisce una discrepanza di almeno 2 ordini di grandezza, chiamando in causa meccanismi differenti. Si suppone comunque che AGN con attività ricorrente siano in realtà più frequenti di quanto appaia dalle osservazioni, ma che in molti casi non si riescano a rilevare perché troppo distanti e quindi dalle emissioni troppo deboli.

5.4.3 Regione intermedia B (<10-15 pc)

La zona intermedia si estende da 1 a circa 10-15 pc ed è caratterizzata dai getti e dai lobi più estesi ed evidenti.

- *Frequenze di rilevazione:* 22, 8.4 GHz
- *Struttura:* Presenta due getti che terminano negli hotspots e in due lobi molto estesi, dei quali quello sud decisamente più evidente. Il contro-getto nord è caratterizzato da un $\beta = 0.3-0.5$ e da un angolo $\vartheta = 30-55^\circ$. Il getto sud invece mostra un $\beta = 0.4$.
- *Età:* Questa struttura si è originata dal nucleo a partire dall'esplosione del 1959, ipotesi suffragata oltre che dall'evidenza dell'outburst dal calcolo dell'età di sincrotrone e dell'età cinematica del lobo sud, che forniscono entrambe una datazione di circa 50 anni.

- *Emissioni:* L'emissione è di sincrotrone ovvero soprattutto radio a frequenze minori di quelle del nucleo; l'analisi a multifrequenze in punti diversi dei lobi ne ha permesso la datazione.
- *Problemi aperti:* Piccole discrepanze tra il calcolo dell'età di sincrotrone e di quella cinematica, discusse nell'appendice.

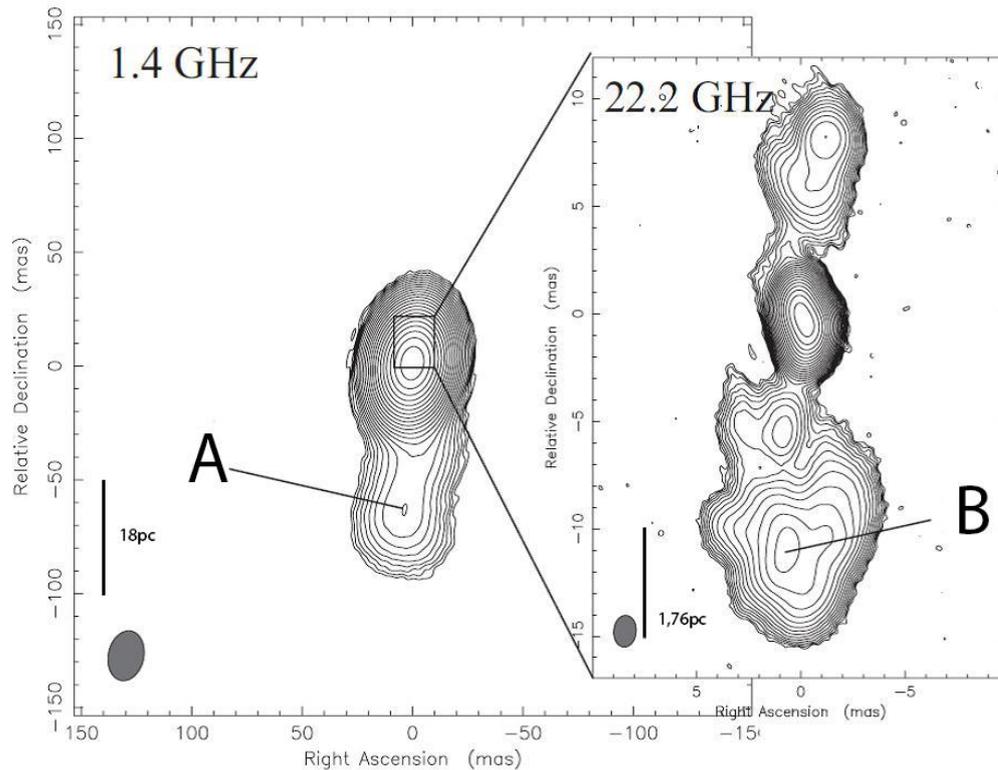


Fig. 5.4: Mappa della regione esterna A (30 pc) con ingrandimento su quella intermedia B (15 pc) fornita da VLBA nel 2008; Credits: art. [4]

5.4.4 Regione centrale C (<1 pc)

La regione centrale dell'AGN mostra un diametro di circa 1 pc e si è potuta studiare discretamente bene grazie alla sua vicinanza che permette risoluzioni all'ordine del sub-pc.

- *Frequenze di rilevazione:* Visibile a 22, 43, 37 GHz (radio) e in gamma (GeV, TeV)

- *Struttura:* Si osservano attualmente 3 sottostrutture di dimensioni del sub-pc, denominate C1, C2 e C3. C1 è considerato il nucleo vero e proprio, C2 un getto mediamente stabile, situato alla distanza di 1 mas e formando un angolo di -141° con esso. La componente C3 ha avuto un'origine molto recente, ovvero attorno al 2003 a 43GHz e in soli 4 mesi del 2007 a 22GHz, in corrispondenza di un incremento dell'emissione radio che si suppone si sia originata proprio in questo sito. Essa si è staccata da C1 con un β apparente medio di 0.23 e formando un angolo di 40° . Tuttavia vi sono problemi interpretativi riguardanti il fitting di questo β .
- *Età:* L'età di formazione di C3 è visibile dalle osservazioni dirette ed è stimata attorno al 2003-2007
- *Emissioni:* Si riscontrano picchi di emissioni sia radio che gamma in differenti periodi, quindi non visibilmente collegate tra loro ma quasi sicuramente provenienti in prevalenza dalla nuova struttura C3 ed in minima parte anche da C1. L'emissione radio infatti è aumentata nel 2003, 2005, 2007/2008 mentre quella gamma ha avuto picchi brevi ed intensi alla fine del 2008, all'inizio del 2009 ed alla fine del 2010. L'argomento sarà ripreso più nel dettaglio in seguito
- *Problemi aperti:* Di interesse sono l'origine dell'emissione gamma e la sua ipotetica relazione con quella radio e il fitting del β apparente di C3.

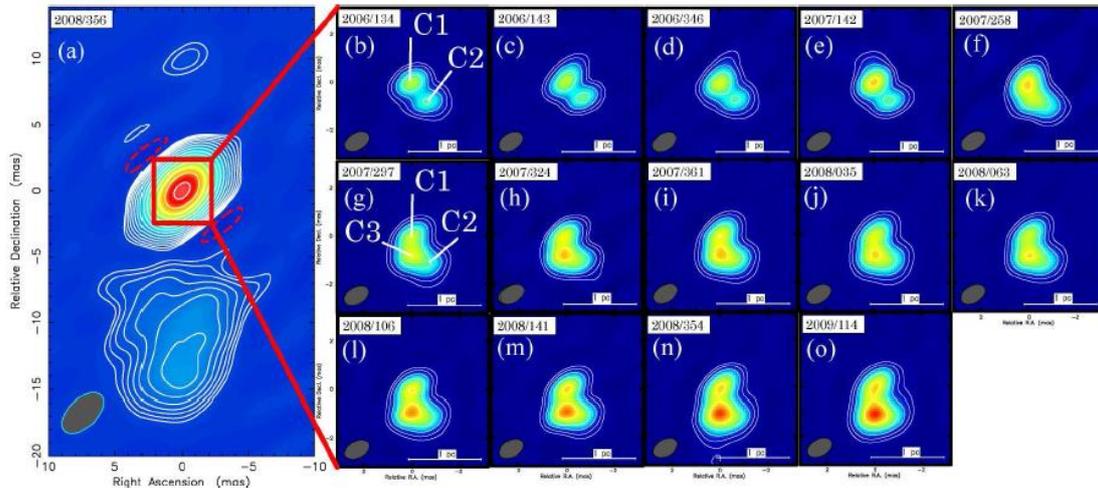


Fig. 5.5: (a) regione centrale C di 3C 84 a 8 GHz immersa nella regione intermedia B; (b) dettaglio delle componenti C1, C2, C3 a 22 GHz ed evoluzione della struttura nel tempo ricavate da VLBA. C3 è distinguibile a partire dal 2007. Credits: art. [1]

Capitolo 6

Analisi delle proprietà nucleari di 3C 84

In questo contesto si inserisce la mia analisi della variabilità nucleare.

In un primo tempo mi sono servita delle immagini dell'interna regione intermedia fornite da VLBA a 15.4 GHz e catalogate nella banca dati MOJAVE relative a 29 epoche dal 1995 al 2012. Da esse, tramite il software AIPS ho ricavato i dati desiderati, in particolare quelli relativi al flusso dell'intera struttura e poi di quella nucleare con i quali ho tracciato le curve di luce.

Successivamente per un'analisi della zona centrale a risoluzione maggiore ho attinto un altro campione di 8 epoche più recenti a 43 GHz dal database del Progetto Blazar dell'Università di Boston con le quali ho potuto tracciare l'andamento dei flussi delle tre sub-componenti separatamente per fornire un'ipotesi sul sito di origine dell'incremento di brillantezza osservato.

6.1 MOJAVE Database

I dati inizialmente utilizzati per l'analisi dell'AGN 3C84 sono stati forniti dal database pubblico MOJAVE (Monitoring Of Jets in Active galactic nuclei with VLBA Experiments) (<http://www.physics.purdue.edu/MOJAVE/>) che si propone di svolgere un programma sistematico a lungo termine di monitoraggio dell'emissione radio e della variazione di polarizzazione dei getti associati alle galassie attive. Le osservazioni raccolte sono fornite dal radiointerferometro VLBA a 2 cm (15.4 GHz) che permette di raggiungere risoluzioni accurate dell'ordine del milliarcsecond.

I suoi obiettivi sono quelli di catalogare in maniera quanto più completa possibile in termine di epoche e di risoluzioni angolari un campione di dati e mappe dettagliati di un gran numero di AGN, così da riuscire ad indagare i meccanismi che regolano l'evoluzione dei Nuclei Galattici Attivi ed in particolare la formazione dei getti.

A differenza della rete VLBA alla quale comunque si appoggia, incorpora dati di differenti classi di oggetti astronomici per lunghi periodi, sia in radio che in gamma (si avvale anche del supporto del telescopio della NASA LAT, facente parte del Fermi Telescope). L'obiettivo è infatti quello di comparare diverse e numerose

sorgenti per sviluppare teorie generali sulla formazione, evoluzione e cinematica dei getti degli AGN, argomento sul quale rimangono molte questioni aperte.

Alcuni interrogativi a cui cerca di dare risposta sono ad esempio: qual è la distribuzione delle velocità superluminali e delle velocità intrinseche nei getti? Dove viene accelerato e collimato il plasma da cui si originano? Sono davvero dovuti ad un flusso di materia o piuttosto alla propagazione di uno shock? Le diverse componenti del getto seguono diverse traiettorie? E queste sono curve o rettilinee, accelerate o decelerate?

Esiste una relazione tra la velocità del getto e la natura della galassia ospite e la sua luminosità?

Come sono correlate le emissioni radio e quelle gamma?

Tutte le osservazioni catalogate sono svolte a partire dal 1994 ad intervalli temporali che possono spaziare da 4 settimane a 12 mesi, a seconda dei tempi di ricorrenza dell'attività dello specifico AGN.

Per la mia indagine ho estratto da questo database 29 osservazioni dell'AGN 3C 84 a epoche diverse comprese dal 1995 al 2012 con intervalli di pochi mesi fornite da VLBA a 15.4 GHz.

I dati scaricati sono poi stati elaborati tramite il software AIPS.

6.2 Blazars/VLBA Project (Boston University)

Successivamente ho attinto altre 8 epoche nucleari a 43 GHz dal 2010 al 2013 dall'archivio dell'Università di Boston.

Il Progetto Blazar (<http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>) raccoglie infatti immagini mensili scansionate da VLBA di 34 getti di altrettanti Blazar (la componente interna C di 3C 84 può essere ritenuta tale perché molto potente e frequentemente variabile) a 43 GHz. Questi dati in banda radio vengono poi associati e comparati con altre osservazioni in gamma e in X fornite rispettivamente dal Fermi Telescope della NASA, AGILE e dai telescopi RXTE e Swift.

Sarebbe estremamente interessante capire come queste diverse emissioni siano collegate e se si originino in punti diversi del getto, più o meno vicini al buco nero centrale.

Una questione che questo progetto cerca di risolvere è appunto dove venga fornita agli elettroni l'energia necessaria perché emettano in sincrotrone e in quale modo il gas che precipita dentro il SMBH sia in grado di creare dei getti così veloci ed energetici.

La teoria più accreditata ritiene che eventi situati nelle vicinanze del buco nero iniettino energia extra nei getti. Questo disturbo energetico si propaga dal centro verso l'esterno generando un'onda d'urto (shock) che fornisce energia agli elettroni presenti. Il disturbo è visibile attraverso la radiazione a microonde, infrarossa e ottica; l'accelerazione degli elettroni si esplica attraverso l'emissione di sincrotrone.

Possono essere raggiunte energie ancora maggiori quali X e gamma attraverso il successivo scattering degli elettroni con i fotoni (Compton inverso) presenti per il meccanismo di sincrotrone oppure nelle nubi calde vicine.

Il modo in cui il Blazar diventa più brillante alle diverse frequenze è quindi indicativo delle condizioni fisiche del getto che sono deducibili su scala molto più dettagliata di quella fornita da telescopi come VLBA. Le immagini sono comunque necessarie per individuare i punti in cui sono collocate le regioni di incremento di flusso; se nella parte di getto visibile oppure ancora più nelle vicinanze del buco nero centrale.

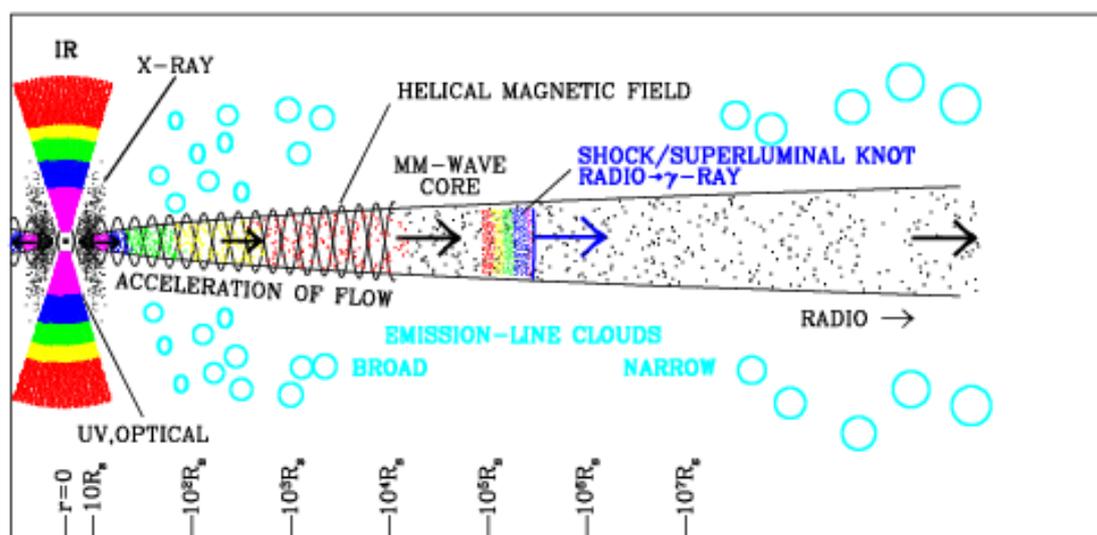


Fig. 6.1: Illustrazione sintetica delle emissioni alle varie frequenze che si originano in diversi punti del getto.

Credits: Blazar Project/Boston University

6.3 Il software AIPS

L' Astronomical Image Processing System ovvero AIPS è un software sviluppato negli anni '70 dalla NRAO (National Radio Astronomy Observatory) per l'analisi dei dati astronomici, e anche se con qualche aggiornamento rimane tutt'oggi il principale motore di elaborazione delle immagini fornite attraverso la sintesi di Fourier dai telescopi VLA e VLBA. E' utilizzabile su un grande numero di sistemi operativi grazie alla sua estrema flessibilità.

Le mappe sono processate nel formato FITS (Flexible Image Transport System) per essere in seguito facilmente visualizzate ed elaborate.

Il programma contiene più di 300 applicazioni eseguibili denominate 'tasks' che permettono svariate operazioni tra cui la calibrazione, la visualizzazione delle mappe nel piano (u,v) e la costruzione di grafici, la combinazione di dati, il filtraggio, la stima di particolari parametri astronomici quali il flusso ed inoltre svariate applicazioni grafiche.

I dati elaborati vengono poi salvati e memorizzati su disco tramite una numerazione progressiva.

6.4 Analisi delle mappe

Le immagini ottenute a 15.4 GHz sono state analizzate dapprima morfologicamente per avere un'idea generale della struttura e della variazione della sorgente, quindi con strumenti matematici del programma per entrare più nel dettaglio.

La sorgente appare costituita da una regione centrale che si mantiene sempre la più brillante dell'ordine del pc e da due lobi molto più estesi in cui il flusso è più debole che raggiungono i 15 pc.

Nell'arco di tempo considerato (17 anni, dal 1995 al 2012) mostrano entrambe variazioni sia morfologiche che intensive.

Il nucleo diventa molto più grande col passare del tempo mutando da circa 4,5 mas di lunghezza a circa 6 mas. Anche il picco del flusso radio, che qui ha sede, cresce notevolmente: se nel 2005 si aggirava intorno a 2,761 Jy nel 2012 è quasi triplicato arrivando ad un valore di 7,929 Jy.

I lobi si mantengono in posizione più o meno stabile, anche la loro forma è circa costante a parte in alcune epoche in cui sembra restringersi, anche se probabilmente solo a causa di un indebolimento di flusso.

Il lobo sud appare notevolmente più esteso di quello nord, in generale almeno più del doppio anche se il rapporto varia a seconda dei periodi, e spesso è chiaramente visibile anche il getto di collegamento tra questo e il nucleo.

Nelle appendici estremali dei lobi (sud per il lobo inferiore, nord per quello superiore) appaiono diversi picchi, a volte uno di essi emerge in modo più netto; probabilmente queste sono le zone degli hotspots che hanno lasciato dietro di sé i lobi, come conferma il fatto che a partire da questi punti i contorni di flusso vanno sempre più indebolendosi per diventare molto tenui nelle zone periferiche.

Fig.6.2: Mappa delle regioni centrale e intermedia <15 pc di 3C 84 a 15.4 GHz del 9/10/1995 rilevata da VLBA. Sono visibili chiaramente il nucleo compatto e brillante < 1 pc e i due lobi di cui quello a sud molto maggiore

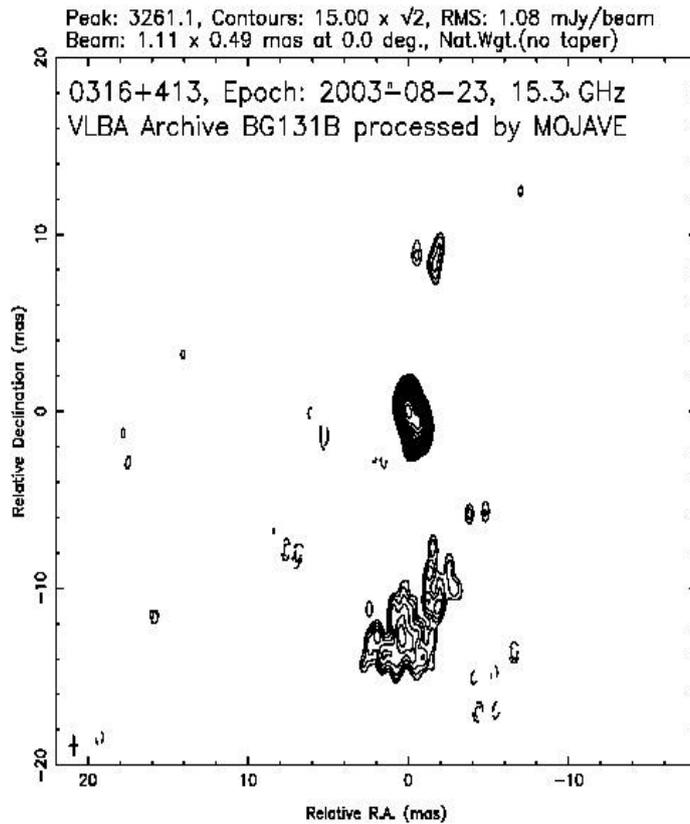
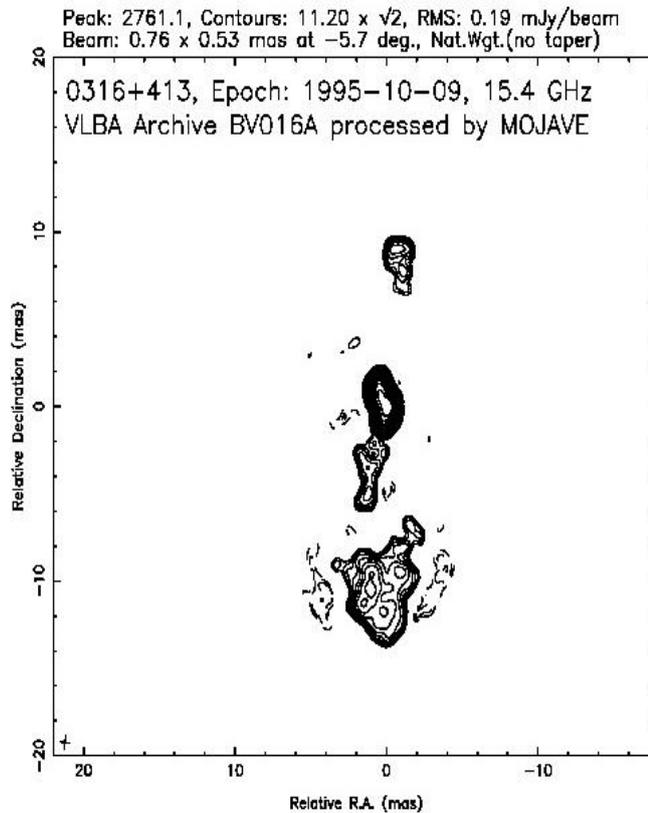


Fig.6.4: Mappa di 3C 84 a 15.4 GHz del 28/11/2012; il nucleo appare molto più grande rispetto al 1995 e il picco del flusso ha raggiunto un valore quasi triplo, dell'ordine di circa 8 Jy



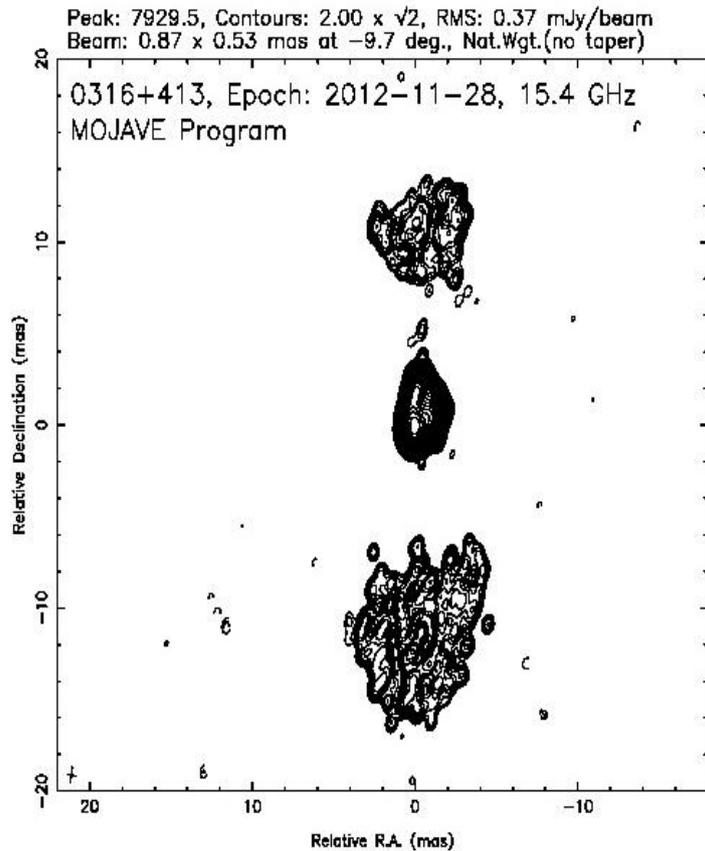


Fig.6.3: Mappa di 3C 84 a 15.4 GHz del 23/08/2003, periodo corrispondente alla comparsa a 43 GHz della struttura C3 all'interno del nucleo, qui non visibile perché manca la risoluzione adatta e la frequenza è troppo bassa

6.5 Curva di luce a 15.4 GHz

29 epoche

La curva di luce di una sorgente astronomica rappresenta la variazione del suo flusso in funzione del tempo.

Per la stima del *flusso totale* della sorgente ho eseguito sulle mappe la corrispondente task di AIPS.

Ho eseguito questo procedimento per tutte e 29 le epoche, quindi ho plottato i risultati ottenuti in un grafico per verificarne l'andamento.

Successivamente ho voluto calcolare separatamente il *flusso proveniente dalla sola regione centrale* per capire se l'aumento visibile nel primo grafico sia da addebitare a questa regione oppure no.

Per fare ciò ho ripetuto le operazioni precedenti ma selezionando la regione del nucleo. Questo procedimento comporta com'è logico un errore manuale, ma in questo caso ci si può accertare con diverse prove che appare del tutto trascurabile poiché la regione centrale ha un flusso molto elevato mentre quella adiacente quasi nullo.

Riporto tutti i risultati ottenuti in una tabella.

La data è stata convertita in data giuliana, più consona alle misurazioni astronomiche e più utile per tracciare i grafici.

Data	Data giuliana	Flusso totale *10 (Jy)	Errore 3% *10 (Jy)	RMS *10 (Jy)	Flusso nucleo *10 (Jy)	Errore nucleo 3% *10 (Jy)
09/10/1995	2449999,50	1,50	0,05	0,00002	1,25	0,04
06/04/1997	2450544,50	1,71	0,05	0,0002	1,12	0,03
07/12/1997	2450789,50	1,68	0,05	0,00006	1,06	0,03
17/05/1998	2450950,50	1,64	0,05	0,00001	1,06	0,03
27/12/1999	2451539,50	1,48	0,04	0,0001	1,02	0,03
28/01/2000	2451571,50	1,43	0,04	0,00002	0,94	0,03
27/09/2000	2451814,50	1,31	0,04	0,0001	0,87	0,03
18/03/2001	2451986,50	1,30	0,04	0,0001	0,93	0,03
02/11/2001	2452215,50	1,36	0,04	0,0002	0,94	0,03
07/01/2002	2452281,50	1,24	0,04	0,0002	0,86	0,03
13/12/2002	2452621,50	1,07	0,03	0,0003	0,87	0,03
13/01/2003	2452652,50	1,45	0,04	0,0003	0,98	0,03
23/08/2003	2452874,50	1,05	0,03	0,0001	0,92	0,03
29/05/2004	2453154,50	1,10	0,03	0,0001	0,97	0,03
09/08/2004	2453226,50	1,33	0,04	0,00004	0,97	0,03
05/03/2005	2453434,50	1,30	0,04	0,00005	1,00	0,03
17/11/2005	2453691,50	1,34	0,04	0,00006	1,11	0,03
06/09/2006	2453984,50	1,07	0,03	0,00008	0,88	0,03
02/03/2007	2454161,50	1,33	0,04	0,00005	1,09	0,03
06/09/2007	2454349,50	1,41	0,04	0,00005	1,19	0,04
25/08/2008	2454703,50	1,69	0,05	0,00004	1,41	0,04
30/01/2009	2454861,50	1,83	0,05	0,00003	1,57	0,05
27/10/2009	2455131,50	1,97	0,06	0,00005	1,73	0,05
06/08/2010	2455414,50	2,22	0,07	0,00004	2,02	0,06
20/11/2010	2455520,50	2,27	0,07	0,00003	2,06	0,06
27/02/2011	2455619,50	2,13	0,06	0,00006	1,95	0,06
12/12/2011	2455907,50	2,65	0,08	0,00006	2,57	0,08
04/03/2012	2455990,50	2,81	0,08	0,00005	2,68	0,08
28/11/2012	2456259,50	2,89	0,09	0,00004	2,75	0,08

Tab. 6.5: Misure di flusso delle regioni B e C a 15.4 GHz per 29 epoche dal 1995 al 2012 fornite dall'analisi tramite AIPS delle mappe registrate da VLBA. Sono riportati anche gli errori strumentali e il rumore.

Questi sono invece i grafici dell'andamento dei flussi delle due regioni, da cui è visibile un incremento progressivo:

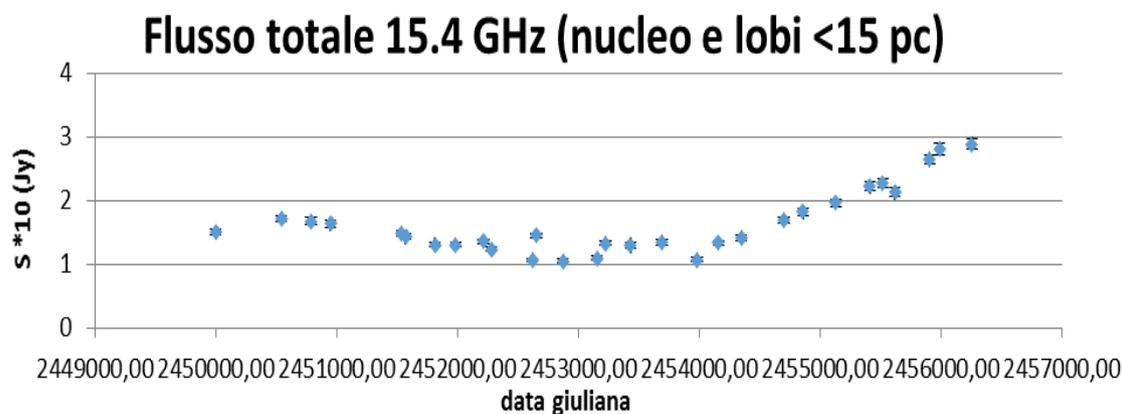
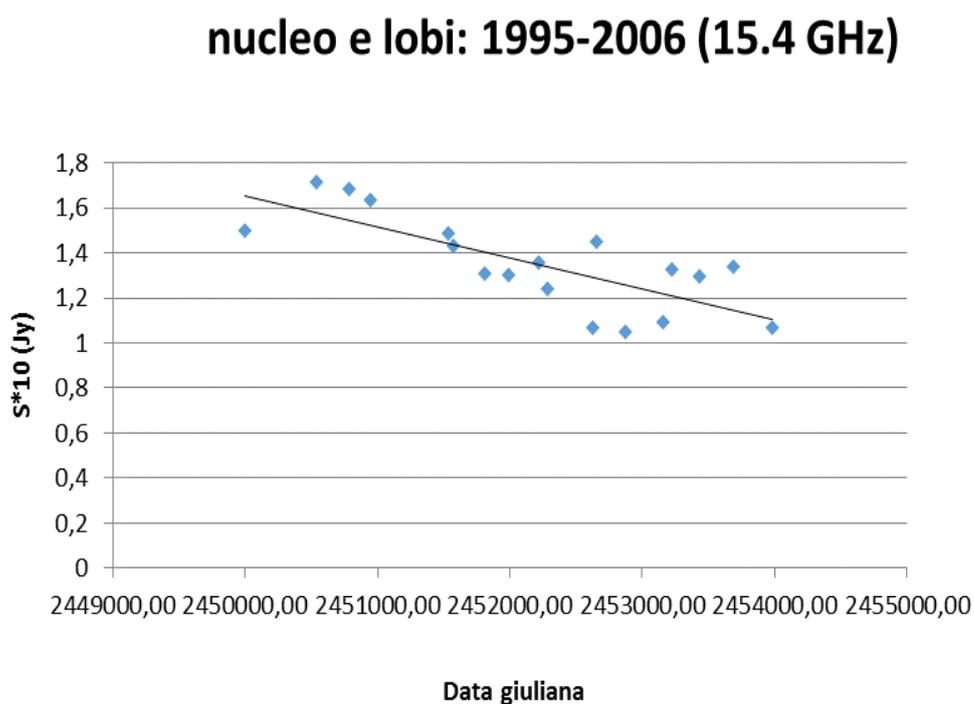
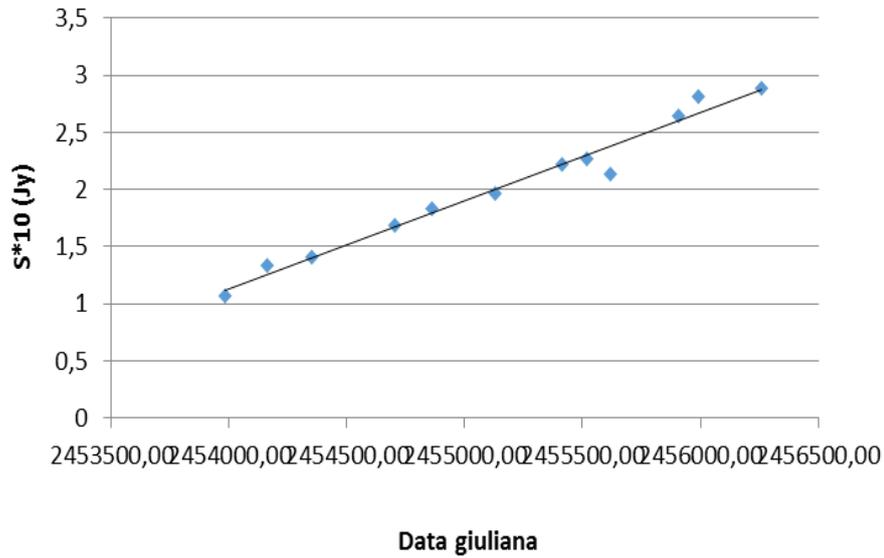


Grafico 6.6: Curva di luce a 15.4 GHz dell'intera regione intermedia B con barre di errore strumentale palesemente trascurabile.



nucleo e lobi: 2006-2012 (15.4 GHz)



Grafici 6.7: Curve di luce con possibile fitting lineare della regione B prima e dopo il 2006. Si nota dapprima un calo e poi un repentino aumento.

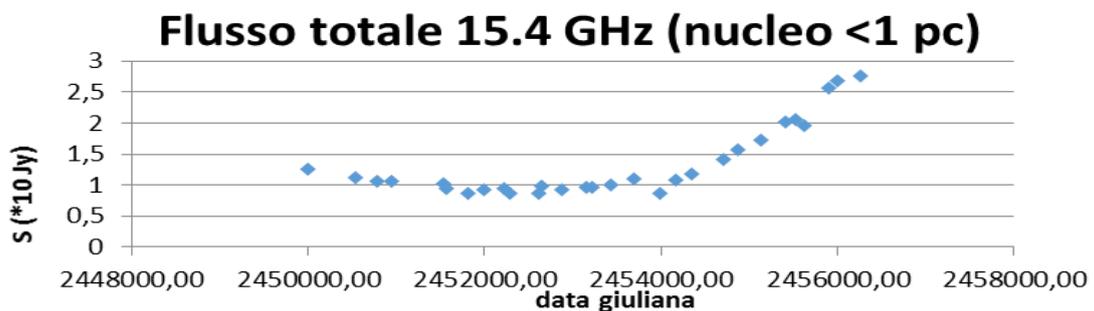


Grafico 6.8: Curva di luce del solo nucleo (regione C) a 15.4 GHz. Anche in questo caso l'epoca che fa da spartiacque tra la costanza e l'aumento del flusso risulta il 2006.

6.5.1 Calcolo degli errori

Gli errori sul flusso totale fornito da VLBA ed elaborato da AIPS sono da addebitare alla calibrazione (3%) e al rumore di fondo (RMS), che risultava dell'ordine delle decine di mJy.

Ho calcolato entrambe le componenti, anche se appare evidente che il primo è dominante e che sono errori minimi e trascurabili nei grafici. In quello del flusso relativo al nucleo sono stati direttamente omissi.

6.5.2 Commenti:

Per quanto riguarda il flusso totale dell'intera zona B <15 pc (nucleo e lobi) si nota un leggero calo fino al 2006 seguito da un repentino aumento dal 2006 ad oggi. Non è facile eseguire un fitting perfetto di questi dati anche perché il flusso considerato è la somma di molte componenti che andrebbero analizzate a parte. Tuttavia, se suddividiamo le epoche in 2 periodi precedenti e successivi al 2006, soprattutto per la seconda parte è possibile eseguire una regressione lineare crescente abbastanza buona.

Il flusso del solo nucleo al contrario si mantiene costante fino al 2006, fatto che può portare all'ipotesi che siano i lobi a perdere luminosità in queste epoche. Per quanto riguarda il secondo periodo successivo al 2006 si nota un incremento di flusso anche nel nucleo, e ciò potrebbe significare che sia esso stesso la causa avendo ripreso la propria attività.

Per confermare queste ipotesi è stata eseguita un'ulteriore indagine a risoluzione ancora maggiore, grazie ai dati forniti dal progetto Blazar dell'Università di Boston che si avvale delle registrazioni di VLBA.

6.6 Flusso nucleare a 43 GHz

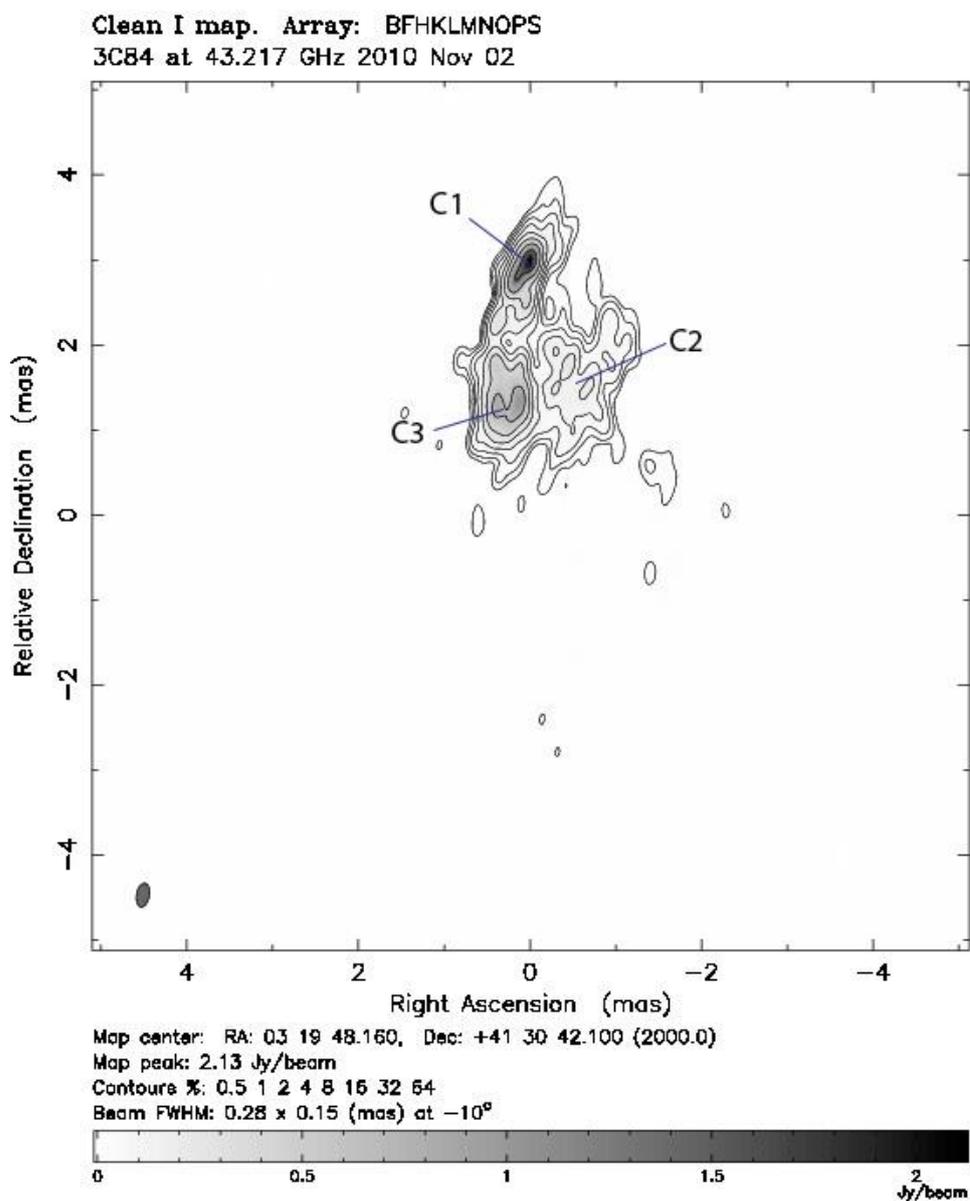
8 epoche

Il nucleo si rivela una struttura complessa, in cui le 3 parti C1, C2 e C3 non risultano nettamente distinte ma si mescolano spazialmente e temporalmente.

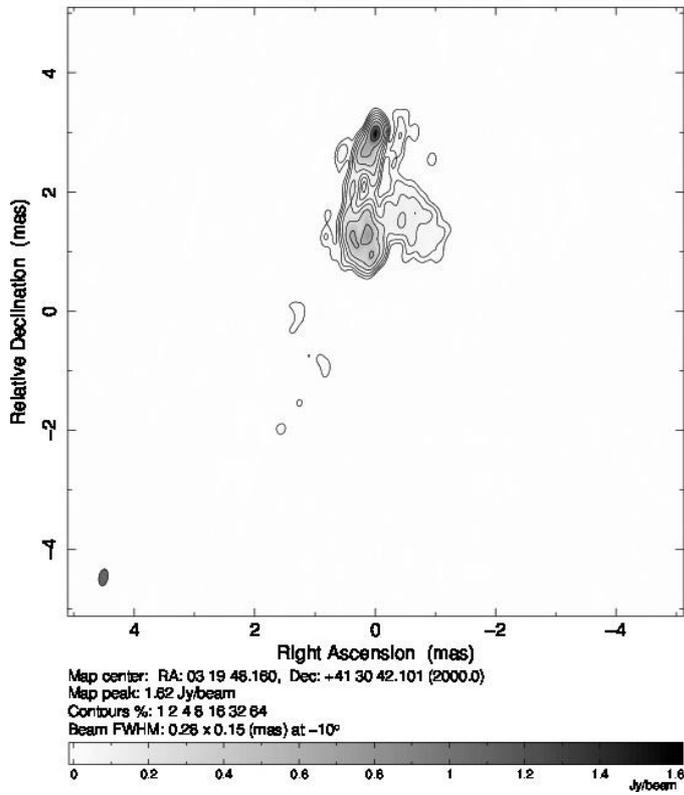
Il database del Progetto Blazar dell'Università di Boston ha fornito altre 8 epoche della regione nucleare a risoluzione più accurata (sub-pc).

Purtroppo questi dati coprono un periodo di tempo più limitato e recente che parte da Novembre 2010 e arriva a Febbraio 2013.

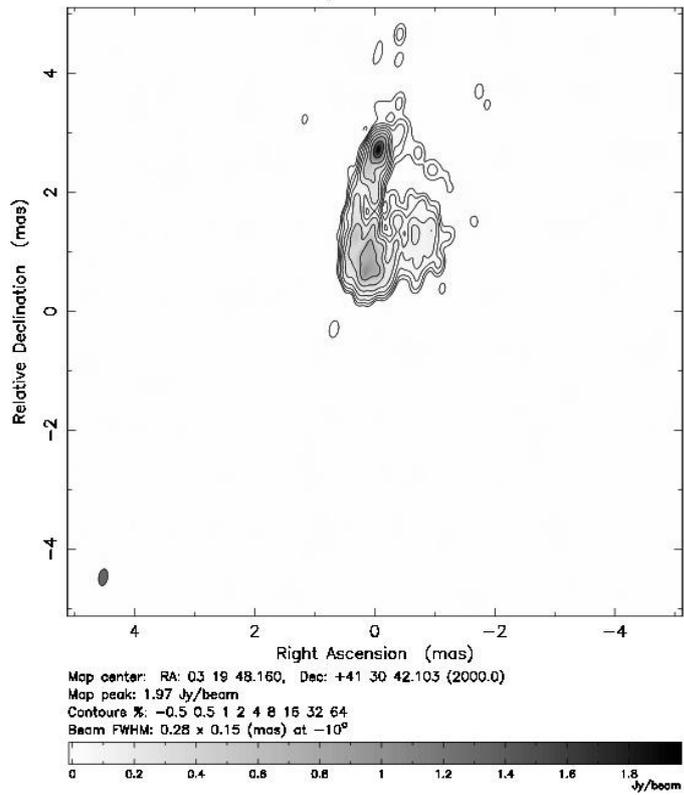
Le mappe sono registrate a 43 GHz.



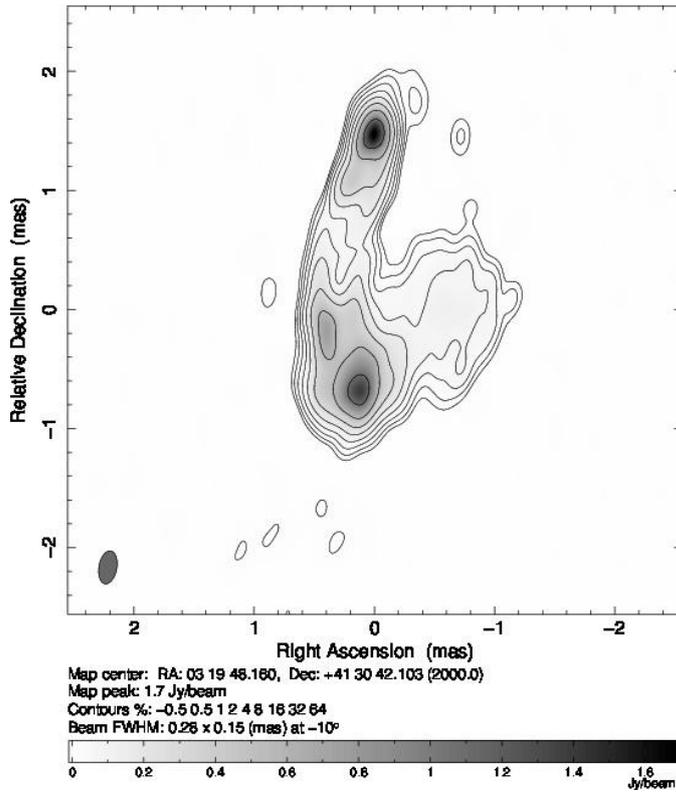
Clean I map. Array: BFHKLMOPS
3C84 at 43.136 GHz 2011 Apr 21



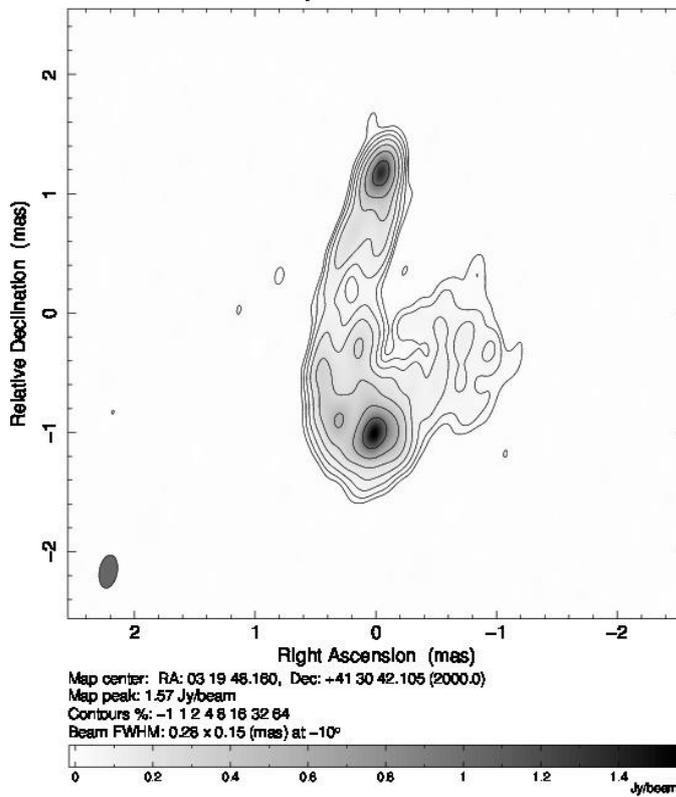
Clean I map. Array: BFHKLNOPS
3C84 at 43.135 GHz 2011 Aug 23



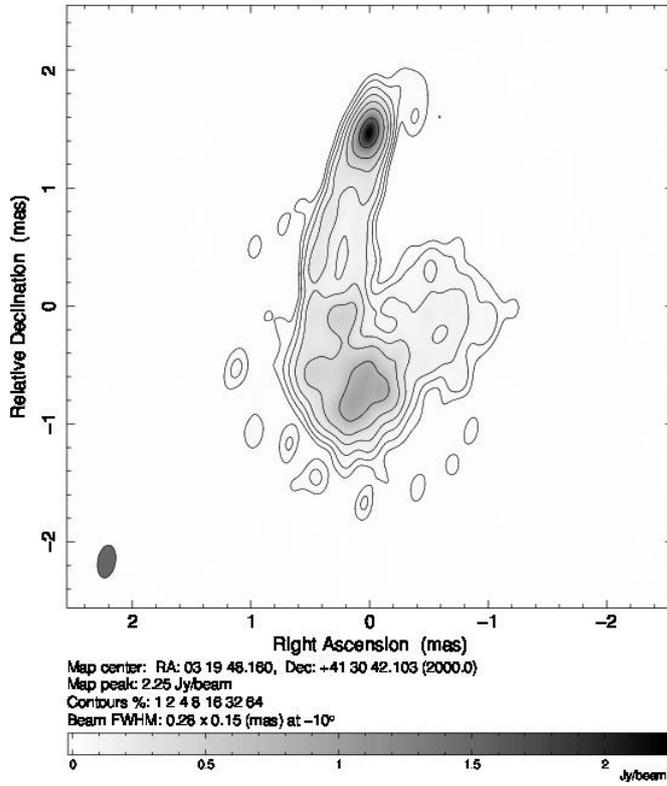
Clean I map, Array: BFHKLMNOPS
3C84 at 43.135 GHz 2011 Dec 02



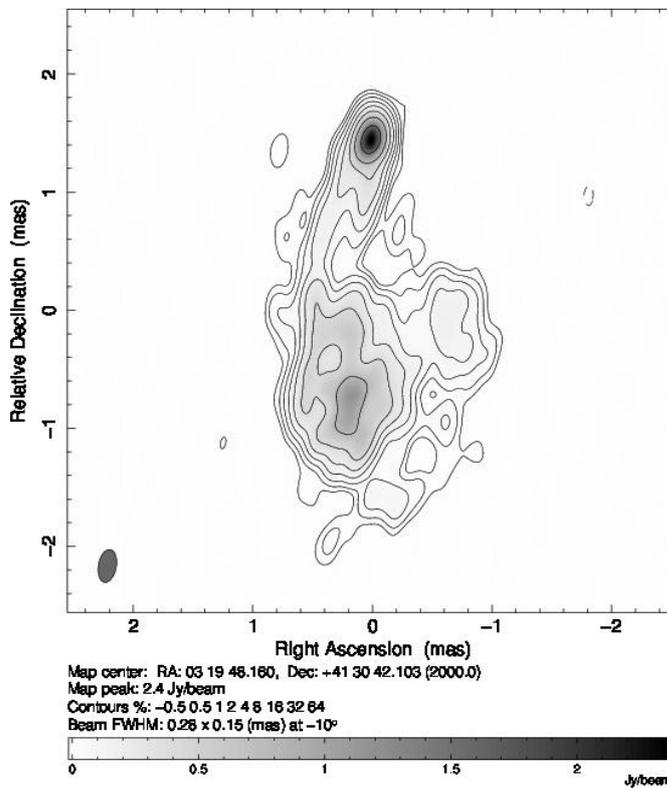
Clean I map, Array: BFHKLMNOPS
3C84 at 43.134 GHz 2012 Apr 02

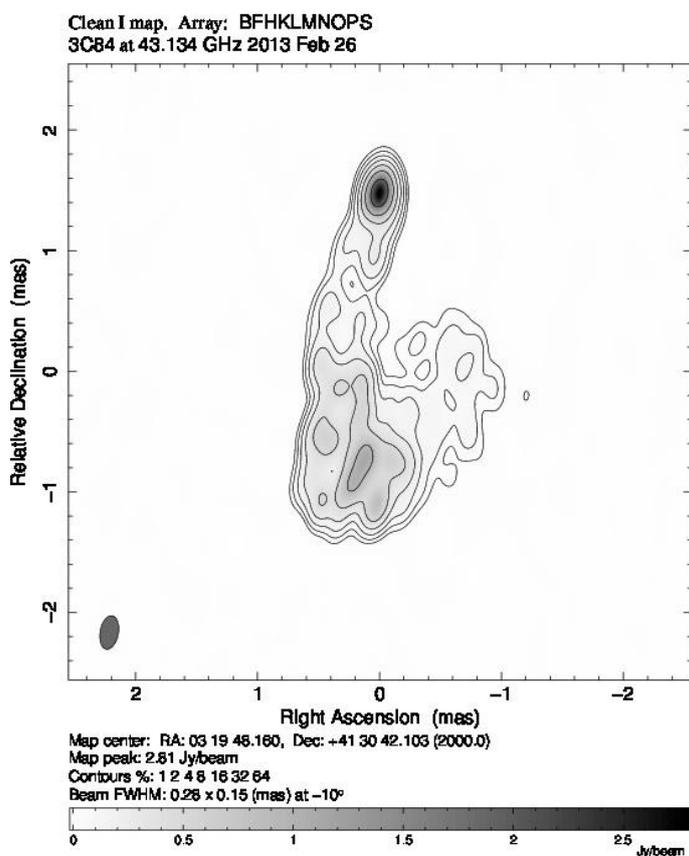


Clean I map, Array: BFHKLMNOPS
3C84 at 43.134 GHz 2012 Aug 13



Clean I map, Array: BFHKLMNOPS
3C84 at 43.134 GHz 2012 Dec 22





Mappe 6.9: Immagini che mostrano l'evoluzione temporale (2010-2013) a 43 GHz e ad alta risoluzione della regione nucleare C in cui sono ben visibili le componenti C1, C2, C3 (VLBA).

Ho calcolato tramite AIPS il flusso totale del nucleo C quindi separatamente delle sue tre componenti. E' d'obbligo un commento sulla procedura di calcolo, che comporta un inevitabile errore manuale di valutazione: per selezionare di volta in volta la regione voluta infatti occorreva deciderne arbitrariamente i confini, che si presentavano non esattamente inequivocabili.

Le regioni potevano cambiare anche notevolmente a seconda delle epoche, e il flusso variava non indifferentemente includendo aree più o meno estese.

In linea di massima, ho cercato di valutare C1 come il solo nucleo brillante situato a nord, escludendo la protuberanza che si allungava dalla sua parte inferiore; C3 aveva centro nell'estremità sud-ovest e si estendeva per una zona ellissoidale, escluso il getto di collegamento con C1; C2 era tutta la restante parte debolmente brillante situata a sud-est.

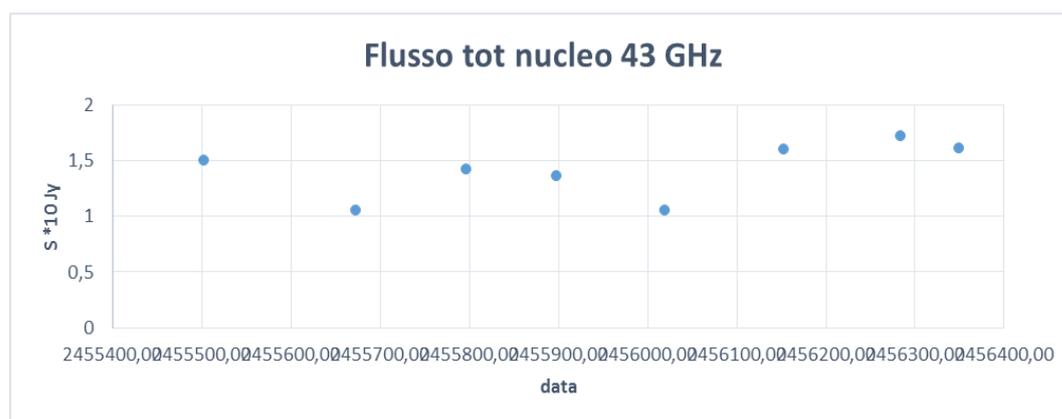
In questo modo il flusso totale è maggiore della somma delle componenti separate.

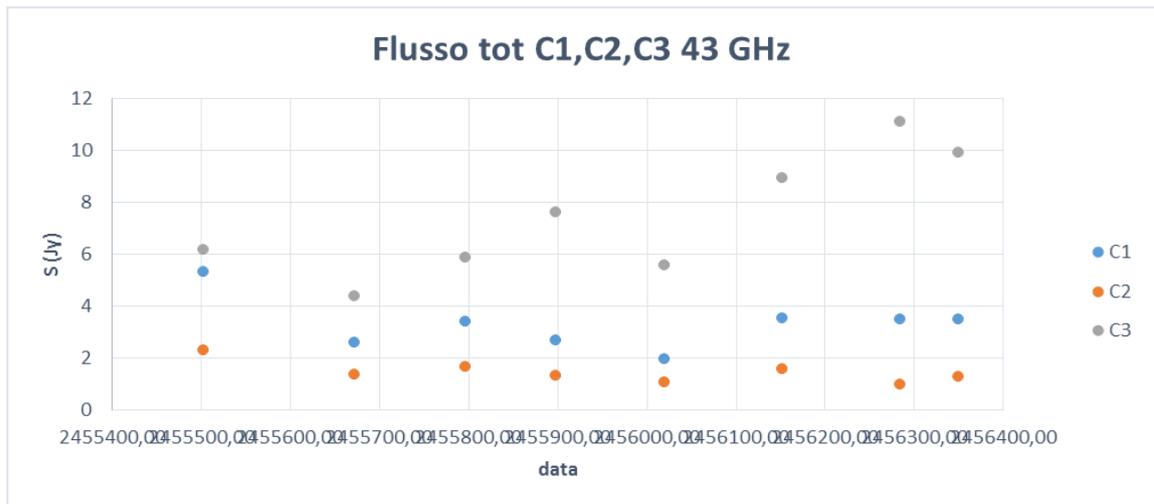
La tabella riassume le misurazioni eseguite:

Data	Data giuliana	Flusso tot 43 GHz *10 (Jy)	Errore tot (3%) *10 (Jy)	Flusso C1 (Jy)	Flusso C2 (Jy)	Flusso C3 (Jy)
02/11/2010	2455502,50	1,50	0,05	5,31	2,32	6,18
21/04/2011	2455672,50	1,05	0,03	2,60	1,36	4,38
23/08/2011	2455796,50	1,42	0,04	3,39	1,67	5,86
02/12/2011	2455897,50	1,36	0,04	2,70	1,34	7,61
02/04/2012	2456019,50	1,06	0,03	1,94	1,05	5,55
13/08/2012	2456152,50	1,60	0,05	3,53	1,57	8,93
22/12/2012	2456283,50	1,72	0,05	3,48	0,98	11,12
26/02/2013	2456349,50	1,61	0,05	3,49	1,29	9,91

Tab. 6.10: Misure di flusso totale del nucleo e delle tre componenti a 43 GHz.

A seguito riporto i grafici delle curve di luce:





Grafici 6.11: Curve di luce a 43 GHz dal 2010 al 2013 del nucleo e delle sue 3 componenti.

6.6.1 Calcolo degli errori:

La stima dell'errore di queste ultime 8 epoche non è semplice a causa dell'arbitrarietà della scelta dei confini delle diverse componenti nucleari, che appaiono strettamente interconnesse e mutevoli nel tempo.

La loro incertezza può essere comunque assimilabile allo stesso ordine di grandezza dell'errore del 3% se si stabilisce una convenzione sui confini delle regioni considerate (vedi inizio del paragrafo 6.6). Questo errore non è in ogni caso stimabile numericamente quindi è stato eseguito un semplice arrotondamento dei dati all'ordine della seconda cifra decimale.

Per quanto riguarda il flusso totale dell'intero nucleo questa questione non si presenta e rimane la sola incertezza strumentale del 3%.

6.6.2 Commenti:

Dall'analisi dettagliata sulle componenti C1, C2 e C3 del nucleo nel periodo 2010-2013 emerge chiaramente (grafico 6.11) che la componente C2 si mantiene costante a circa 1,4 Jy e risulta la più debole; il nucleo C1 appare invece più luminoso, in media circa 3 Jy e mostra un possibile calo fino a Febbraio/Marzo 2011 dopodiché' mantiene il proprio valore. La componente C3 invece è di gran lunga la più luminosa e variabile: si nota un iniziale calo dal 2010 a Febbraio 2011, quindi un aumento fino a Dicembre 2011 seguito da un piccolo calo e da Marzo 2012 un nuovo ripido aumento fino al 2013.

I valori minimi e massimi risultano rispettivamente circa 4 e 11 Jy, quindi in generale l'incremento di luminosità di questa nuova componente in soli 3 anni appare notevole.

Capitolo 7

Conclusioni

L'analisi della variazioni di flusso dell'AGN 3C 84 nell'intera regione intermedia compresa nei 15 pc ha rilevato dalla comparazione dei dati a 15.4 GHz di 29 epoche forniti dal database MOJAVE/VLBA un iniziale calo dal 1995 al 2006 seguito da un aumento dal 2006 al 2012.

Per la comprensione più approfondita del sito di origine sono state effettuate successive misurazioni nelle stesse epoche sul solo nucleo: il risultato emerso (flusso stabile fino al 2006 seguito da un aumento) ha portato all'ipotesi che fino al 2006 i lobi abbiano perso brillantezza, mentre l'incremento successivo di luminosità sia da attribuire proprio alla zona nucleare.

Come ultimo passo si è voluta risolvere ancora più in dettaglio la zona centrale, che è risultata composta da altre tre diverse componenti, di cui una prima può essere considerato il nucleo vero e proprio (C1), una seconda un relitto debole di un getto precedentemente originatosi da esso (C2) ed infine terzo recente e brillante getto (C3).

Sono state quindi analizzate ulteriori 8 epoche a 43 GHz, purtroppo tutte recenti (2010-2013) alla risoluzione del sub-pc fornite dal Progetto Blazar dell'Università di Boston, in cui si sono potuti calcolare i flussi separati delle tre zone nucleari.

E' emerso che il sito responsabile dell'incremento di flusso può essere identificato con la nuova componente C3.

7.1 Confronto con precedenti studi

I risultati della ricerca eseguita mostrano un ottimo accordo con quelli delle analisi svolte in passato.

Infatti anche i dati a 22 e 43 GHz di epoche precedenti (vedi paragrafo 5.3) evidenziano la comparsa all'interno del nucleo di una nuova componente molto brillante C3 nel periodo 2003-2005 in concomitanza con un aumento di flusso a queste frequenze.

In particolare sono stati eseguiti anche studi a 22 GHz sulla variazione nel tempo della distanza di questo nuovo getto dalla componente C1 dal 2007 al 2009, per poterne calcolare la velocità di allontanamento.

Il fitting di questi dati non è tuttavia immediato, poiché la totalità dei punti non sembra giacere su un'unica retta. $\beta_{apparente}$ infatti è variato nel tempo da un valore di 2.3 nel 2007/142 fino ad arrivare a 0.23 al 2007/297. In media comunque si è avuto $\bar{\beta} = 0.23$ (figura 7.1).

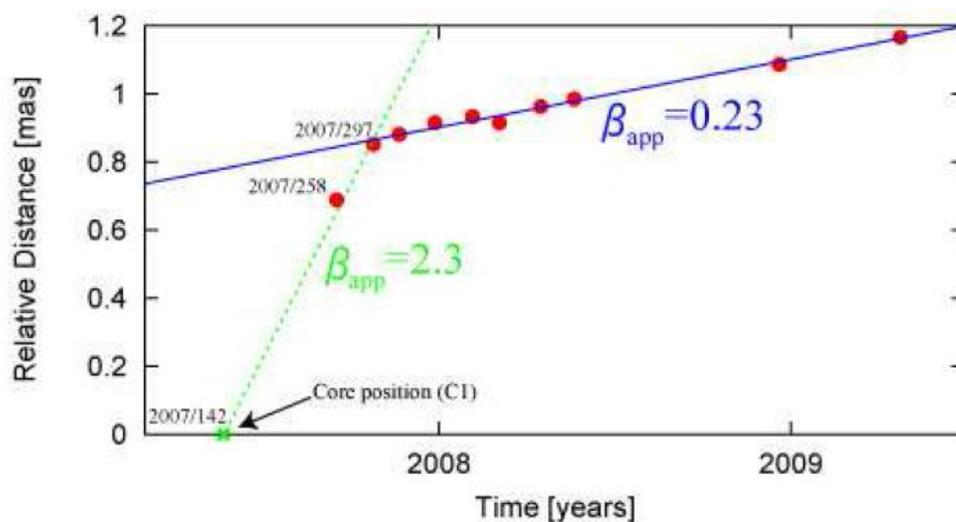


Fig. 7.1: Fitting della velocità di allontanamento del getto C3 da C1. Credits: art. [1], [2].

Una semplice interpretazione potrebbe essere che il getto C3 decelerì nel tempo a causa del frenamento della materia interstellare. Questo modello richiede un β reale anch'esso variabile da 0.995 a 0.87 in soli 0.16 pc con un angolo di 20° .

Questa ipotesi sarebbe anche in grado di spiegare un incremento di radiazione gamma osservato.

7.2 Confronto con le emissioni gamma

Sono state rilevate anche emissioni gamma dai satelliti LAT (facente parte del Fermi Telescope) e TEVCAT, ma non dall'EGRET, che ha indagato periodi di tempo

precedenti e con sensibilita' sette volte minori (art. [3], [4]). Le radiazioni sono dell'ordine del GeV e del TeV.

Esse sono apparse episodicamente (a periodi di giorni e mesi) ed intensamente nelle date

- Fine 2008
- Inizio 2009
- Fine 2010

apparentemente non in stretta correlazione con le emissioni radio, che invece impiegavano mesi ad incrementarsi, anche se comunque in concomitanza con il loro aumento.

A supporto della teoria della decelerazione di C3, le indagini portano a ritenere che anche questa radiazione sia strettamente collegata al nuovo sito, che produrrebbe queste emissioni ritardate ad alta potenza per Compton inverso, a causa della collisione degli elettroni del getto con il mezzo interstellare.

Appendice

Synchrotron ageing theory

Per la datazione di una sorgente si usa solitamente la cosiddetta *teoria cinematica*, che è anche la più semplice: si misura la velocità relativa di separazione degli hotspots che insieme alla loro distanza ne fornisce l'età:

$$t_{cin} = \frac{l}{v_{sep}}$$

Nel caso delle sorgenti che emettono in sincrotrone si può applicare anche un altro metodo come ulteriore supporto alla convalida del risultato ottenuto.

Esso consiste nello stimare l'età degli elettroni emessi dal getto tramite la misura di una particolare frequenza detta *breaking frequency*.

La popolazione di elettroni necessaria per ottenere una radiazione di sincrotrone deve essere omogenea e isotropa e avere una distribuzione energetica con andamento a potenza, ovvero con densità di particelle

$$N(E)dE = N_0 E^{-\delta} dE$$

Essa dà origine ad una radiazione relativistica collimata estesa a tutto lo spettro, ma con un picco attorno alla frequenza:

$$\nu_{syn} = \frac{3e}{4\pi m_e^3 c^5} (B \sin \theta) e^2$$

La potenza emessa risulta:

$$-\frac{dE}{dt} = \frac{2e^4}{3m_e^4 c^7} (B \sin \theta) E^2$$

e l'emissività monocromatica totale di tutti gli elettroni:

$$J(\nu) \propto N_0 (B \sin \theta)^{1+\alpha} \nu^{-\alpha}$$

Dove $\alpha = (\delta - 1) / 2$ è l'indice spettrale energetico dei fotoni e δ l'indice energetico degli elettroni.

Breaking frequency

L'energia di una particella quindi decresce col tempo

$$E = \frac{E_0}{1 + b(B \sin \vartheta)^2 E_0 t} \quad \text{con } b = 2.37 \cdot 10^{-6} \text{ unità c.g.s.}$$

e trascorso un periodo t^* (che possiamo chiamare vita media della particella) si sarà dimezzata. In particolare le particelle più energetiche cioè emittenti a frequenze maggiori perderanno più energia avendo una vita più breve.

Possiamo definire allora anche un'energia E^* , direttamente proporzionale a una frequenza ν^* detta *breaking frequency*, tale che le particelle con $E_0 > E^*$ ($\nu > \nu^*$) avranno perso praticamente tutta la loro energia al tempo t^* .

Questo produce un cambiamento nello spettro: la parte con $\nu < \nu^*$ rimarrà inalterata mentre per le particelle più energetiche cioè con $\nu > \nu^*$ il flusso tenderà rapidamente a 0.

Nel caso si verifichi una nuova iniezione di particelle lo spettro per $\nu > \nu^*$ assumerà un indice $\alpha = -0.5$

Anche uno spettro non spezzato ma molto ripido è indice di un'età avanzata della sorgente, infatti quella che osserviamo è solo l'area delle frequenze $> \nu^*$.

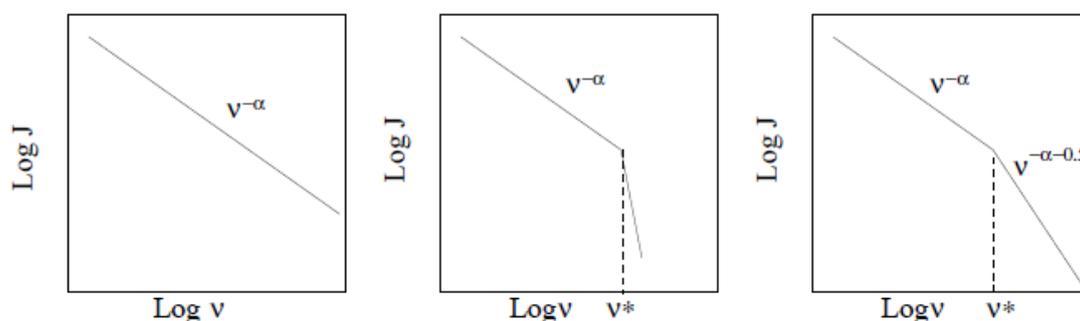


Fig. A.1: Spettri di sincrotrone. A sinistra: spettro standard. Al centro: aged spectrum (spettro invecchiato) descrittivo di un singolo evento di produzione delle particelle; si noti la presenza della breaking frequency ν^* la cui misura fornisce l'età della sorgente. A destra: aged spectrum ma con una nuova iniezione di particelle. Credits: art. [7]

La breaking frequency è direttamente proporzionale all'età della sorgente:

$$t^* = k \frac{B^{0.5}}{B^2 + hB_{CMB}} [(1+z)\nu^*]^{-0.5}$$

Dove le costanti dipendono dalla natura del mezzo:

$k=1060$ mezzo anisotropo

1590 mezzo isotropo

$h= 2/3$ mezzo anisotropo

1 mezzo isotropo

Stima del campo magnetico

Il calcolo di t^* però presuppone anche la conoscenza del campo magnetico \vec{B} , purtroppo non ricavabile dalle formule precedenti.

Per ottenerlo si adotta un espediente, ovvero lo si deduce dal postulato di minimizzazione dell'energia totale, che risulta a causa del teorema di equipartizione dovuta per metà alla componente cinetica degli elettroni e per metà a quella potenziale del campo magnetico.

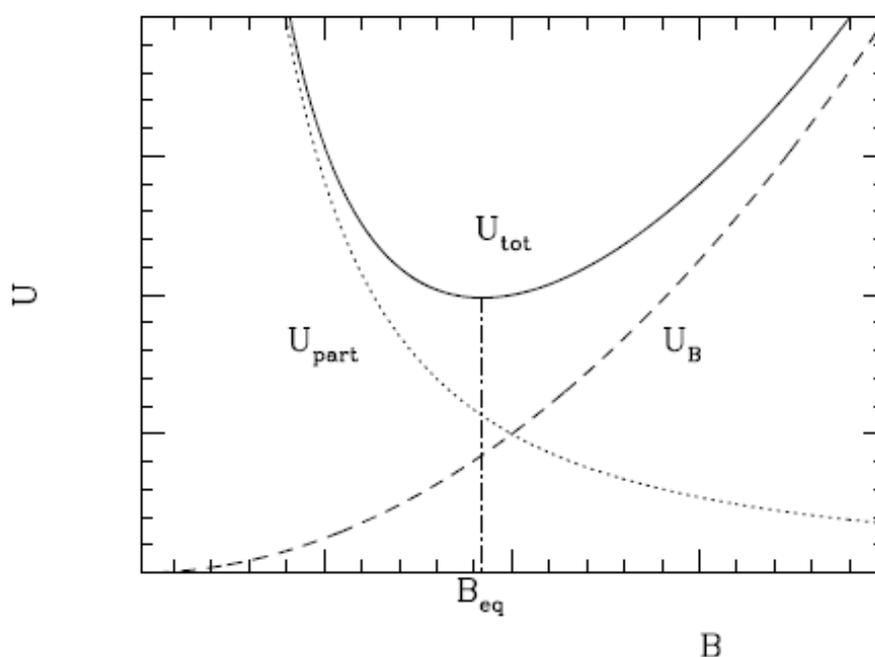


Fig. A.2: Andamento energetico di una radiosorgente in unità arbitrarie.

L'energia totale è minima quando il contributo delle particelle relativistiche e del campo magnetico sono circa uguali. A ciò corrisponde anche il campo magnetico di equipartizione.

$$U_{tot} = U_{el} + U_{pr} + U_B = \frac{1}{2}U_{part} + \frac{1}{2}U_B \text{ dal teorema di equipartizione}$$

$$U_B = \frac{B^2}{8\pi} \Phi V \propto B^2$$

con Φ = filling factor (frazione del volume V della sorgente occupata da B)

$$U_{part} = U_{el} + U_{pr} \propto B^{-3/2}$$

$$\frac{dU_{tot}}{dB_{eq}} = 0 \Rightarrow B_{eq}$$

Si ottiene allora tramite calcoli che omettiamo un campo magnetico di equipartizione:

$$B_{eq} = \left(\frac{24\pi}{7} u_{min} \right)^{1/2}$$

Dove la densità di energia minima u_{min} è calcolabile da grandezze direttamente misurabili (brillanza I_0 , frequenza della sorgente ν_0 , redshift z , distanza della sorgente d , fattore di proporzionalità tra l'energia dei protoni e degli elettroni k).

$$u_{min} = 1.23 \cdot 10^{-12} (1+k)^{4/7} (\nu_0)^{4\alpha/7} (1+z)^{\frac{12+4\alpha}{7}} I_0^{4/7} d^{4/7}$$

A.1 Datazione dei lobi <15 pc

Nel caso specifico del calcolo dell'età dei lobi compresi tra i 15 pc si è attuata un'analisi a multifrequenze (0.3, 0.6, 1.4 GHz) nelle diverse aree del lobo sud da cui poi si sono ricavate le varie breaking frequencies. La minore è risultata nella regione più a nord del lobo con un valore di 2.5 ± 1.2 GHz.

Le due datazioni calcolate risultano allora:

- **età cinematica:** 36 ± 3 yr dal 2000
- **età di sincrotrone:** 243^{+94}_{-43} yr dal 1995

Nonostante queste cifre non coincidano appieno, risultano comunque una buona conferma del fatto che la sorgente è giovane, e supportano la tesi che sia nata con l'outburst del 1959.

A.2 Datazione del lobo <30-35 pc

La breaking frequency è risultata 0.75 GHz fornendo un'età di circa $1.3 \cdot 10^5$ anni.

Bibliografia

- [1] “VLBI Monitoring of 3C 84 (NGC 1275) in early phase of the 2005 outburst”, Nagai, Suzuki, Asada, Kino, Kamenno, Doi, Inoue, Kataoka, Bach, Hirota, Matsumoto, Honma, Kobayashi, Fujisawa, 2010.
- [2] “VLBI monitoring of 3C 84 in gamma-ray active phase”, Nagai, Suzuki, Asada, Kino, Kamenno, Doi, Inoue, Bach, 2010.
- [3] “Exploring the central sub-parsec region of the gamma-ray bright radio galaxy 3C 84 with VLBA at 43 GHz in the period of 2002-2008”, Nagai, Suzuki, Asada, Kino, Inoue, Orienti, Giovannini, Giroletti, Lahteenmaki, Tornikoski, Leon-Tavares, Bach, Kamenno, Kobayashi, 2012.
- [4] “VLBI and single dish monitoring of 3C 84 in the period of 2009-2011” Nagai, Orienti, Kino, Suzuki, Giovannini, Doi, Asada, Giroletti, Kataoka, D’ammando, Inoue, Lahteenmaki, Tornikoski, Leon-Tavares, Kamenno, Bach, 2012.
- [5] “Probing the nature of multiple lobelike eission in 3C 84”, Nagai, Asada, Doi, Kamenno, Inoue, 2009.
“Constraining the synchrotron age of 3C 84”, Nagai, Asada, Doi, Kamenno, Inoue, 2009.
- [6] “The Large Scale Radio Structure of NGC 1275”, Miley e Perola, 1975
- [7] “Clusters of galaxies in the radio: Relativistic plasma and ICM/Radio Galaxy interaction processes” from “A Pan-Chromatic view of clusters of galaxies and the large-scale structure”, Giovannini e Ferretti, Springer, 2008.
- [8] Università di Harvard: <https://www.cfa.harvard.edu/~jzhao/EG/clusters/3C84/>
- [9] Progetto Blazar/ Università di Boston: <http://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>
- [10] Mojave Database: <http://www.physics.purdue.edu/MOJAVE/>
- [11] IRA/ISAF: <http://www.ira.inaf.it/Home.html>
- [12] <http://ned.ipac.caltech.edu/>

- [13] http://cdsads.u-strasbg.fr/abstract_service.html
- [14] <http://www.vlba.nrao.edu/>
- [15] “Introduzione alla relatività ristretta”, R.Resnick, Casa Editrice Ambrosiana, 2006.
- [16] “Stelle, galassie e universo. Fondamenti di astrofisica”, A.Ferrari, Springer, 2011.
- [17] “Correlazione tra emissione nucleare e diffusa in Nucleo Galattici Attivi”, Filippo Poggioli, 2011-2012
- [18] “Analisi ad alta risoluzione della struttura radio e studio multi-frequenza del TeV blazar Markarian 421”, Maria Grazia Blasi, 2011-2012
- [19] “Nuclear properties of a sample of BL Lac objects in the radio and gamma-ray bands” Biagina Boccardi, 2010-2011
- [20] “Studio della variabilità di Blazar con il radiotelescopio di Medicina”, Matteo Rossini, 2011-2012.

Ringraziamenti

Ringrazio la mia famiglia, i miei amici e i miei colleghi per il supporto. Un ringraziamento particolare anche al prof. Giovannini per l'estrema disponibilità.