

Scuola di Scienze  
Dipartimento di Fisica e Astronomia  
Corso di Laurea in Fisica

# **Proprietà in banda radio di nuclei galattici attivi**

**Relatore:**  
**Prof. GABRIELE GIOVANNINI**

**Presentata da:**  
**GAETANO RICCI**

Anno Accademico 2017/2018

# Indice

|          |  |           |
|----------|--|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduzione alle galassie attive</b>                       | <b>5</b>  |
| <b>2</b> | <b>Sorgenti estese</b>   | <b>6</b>  |
|          | 2.1 Galassie di Seyfert  | 6         |
|          | 2.2 Radiogalassie  | 7         |
| <b>3</b> | <b>Sorgenti compatte</b>                                       | <b>11</b> |
|          | 3.1 Quasar e Blazar  | 11        |
|          | 3.2 BL Lacertae (BL Lac)                                       | 13        |
| <b>4</b> | <b>Considerazioni relativistiche</b>                           | <b>15</b> |
|          | 4.1 Natura dei getti e meccanismo di emissione                 | 15        |
|          | 4.2 Moti apparenti superluminali                               | 16        |
|          | 4.3 Effetto Doppler relativistico                              | 18        |
| <b>5</b> | <b>Modelli unificati</b>                                       | <b>20</b> |
|          | 5.1 Morfologia di un AGN                                       | 20        |
|          | 5.2 Modello unificato per oggetti Radio quieti                 | 21        |
|          | 5.3 Modello unificato per oggetti quasar e radiogalassie FR II | 22        |
|          | 5.4 Modello unificato per BL Lac e radiogalassie FR I          | 22        |
| <b>6</b> | <b>4C 38.41</b>  | <b>21</b> |
|          | 6.1 Raccolta dati  | 23        |
|          | 6.2 Elaborazione dati  | 28        |

|          |   |           |
|----------|---|-----------|
| <b>7</b> | <b>Conclusioni</b>                                      | <b>30</b> |
|          | <b>Appendice A – Radiazione di sincrotrone</b>          | <b>31</b> |
|          | A.1 Moto di una particella carica in un campo magnetico | 31        |
|          | A.2 Radiazione emessa da un insieme di elettroni        | 33        |
|          | <b>Bibliografia</b>                                     | <b>34</b> |

## ABSTRACT

Questa tesi si propone di descrivere le principali proprietà di quella categoria di corpi celesti noti come AGN. La trattazione sviluppa questa analisi operando una prima divisione in sorgenti estese e sorgenti compatte, descrivendo poi nello specifico i corpi celesti appartenenti all'una o all'altra tipologia. In seguito, sono stati illustrati i vari modelli unificati, tentativi teorici orientati a descrivere questi oggetti diversi all'osservazione, come in realtà manifestazioni dello stesso oggetto. Nella sezione quarta di questa sede sono state operate le necessarie considerazioni relativistiche dovute alle alte velocità raggiunte dai getti espulsi da questo tipo di corpi. In merito a ciò è stato preso in esame il quasar a spettro piatto 4C 38.41. Osservando l'evoluzione dei suoi getti si è osservato un moto superluminale con un  $\beta_{apparente} \sim 9$ , spiegato con considerazioni di natura geometrica.

# CAPITOLO 1

## Introduzione alle galassie attive

Le galassie sono le strutture fondamentali del nostro universo, composte principalmente da stelle, nubi di polveri e gas interstellare. Al centro di alcune di esse è situato un nucleo compatto molto luminoso. Si parla dunque di galassia attiva quando una frazione significativa dell'energia emessa proviene proprio dal suo centro, ragion per cui questi oggetti sono conosciuti anche come nuclei galattici attivi o AGN. Le galassie attive irradiano un'energia enorme, superiore anche fino a mille volte quella di una galassia normale, non spiegabile anche sommando tutti i contributi delle reazioni nucleari delle stelle che la compongono. La piccola percentuale di galassie attive rispetto al totale, ci porta inoltre a pensare che esse siano oggetti dalla durata temporale inferiore rispetto alla vita di una galassia normale. Più precisamente le galassie attive non costituiscono una famiglia a parte di galassie in tutto e per tutto, ma rappresentano uno stadio evolutivo caratteristico della vita di ogni galassia.

In ogni regione dello spettro elettromagnetico le galassie attive emettono perciò molta più energia delle galassie normali alle corrispettive frequenze. Ad esempio, troviamo una forte emissione nella banda radio e nella banda X, a riprova di come i processi in atto all'interno di questi oggetti non siano imputabili ad attività meramente stellari. La radiazione è inoltre di tipo non termico. Anche la forte variabilità di luminosità di queste sorgenti ci allontana dall'ipotesi che i processi energetici provengano solo dalle stelle.

Dunque, dove traggono la loro energia questi oggetti? L'ipotesi più accreditata suppone che il motore di queste sorgenti consista in un buco nero super-massiccio posto al centro della galassia, il quale, risucchiando al suo interno materiale galattico, dia origine ad un meccanismo in grado di espellere getti energetici a velocità prossime a quelle della luce. Ulteriori dettagli verranno esplicitati nel capitolo 4 di questa trattazione.

Ad ogni modo, possiamo distinguere i nuclei galattici attivi in sorgenti estese o compatte, a seconda della loro morfologia e potenza irradiata. Fanno parte della prima categoria tutti gli oggetti la cui emissione proviene globalmente da tutta la struttura e non solo dal nucleo centrale che comunque si rivela essere più luminoso ed energetico. Nella seconda categoria fanno parte oggetti la cui emissione è concentrata essenzialmente in un punto molto più piccolo dell'intera galassia ospitante, ma al contempo molto più denso ed energetico.

# CAPITOLO 2

## Sorgenti estese

Fanno parte di questa categoria le galassie di Seyfert e le radiogalassie. Entrambi questi tipi di AGN sono associate a galassie di diverso genere, rispettivamente a galassie a spirale e a galassie ellittiche.

### 2.1 Galassie di Seyfert

Nel 1943 l'astrofisico Carl Seyfert individuò una categoria di galassie a spirali caratterizzate da un nucleo denso, compatto e dalla alta luminosità, paragonabile con quella del resto della galassia. Dal suo spettro elettromagnetico si osserva che il gas presente al suo interno è eccitato, con un alto grado di ionizzazione e in moto a grandi velocità attorno al nucleo centrale. Generalmente sono forti sorgenti di raggi infrarossi, ma non di onde radio. A seconda degli spettri suddividiamo questo tipo di galassie in Seyfert di tipo 1 e Seyfert di tipo 2.

Le Seyfert di tipo 1 hanno uno spettro di emissione in cui le righe permesse sono molto allargate. Dall'allargamento deduciamo che il gas ivi contenuto si muove alla velocità di circa 10000 km/s. Le righe proibite, al contrario, sono molto più strette. Considerato che righe con caratteristiche simili si originano nella stessa regione, per le Seyfert di tipo 1 le righe permesse si formano nelle Broad Line Region (BLR), ovvero le regioni nucleari più dense e interne, mentre quelle proibite provengono da regioni più esterne al nucleo, chiamate Narrow Line Region (NLR). Spesso questo tipo di galassie Seyfert sono forti sorgenti di raggi X.

Le Seyfert 2 presentano in emissione righe sia proibite che permesse molto strette, indicando una velocità minore di 1000 Km/s. Ciò ci porta a pensare che le nuvole di gas denso e veloce non siano visibili in quanto oscurato da un toro di polveri. Alcune di queste Seyfert emettono probabilmente nel radio. Sono infatti stati scoperti sorgenti-radio con spettri simili alle Seyfert 2 e quindi probabilmente classificabili come tali.

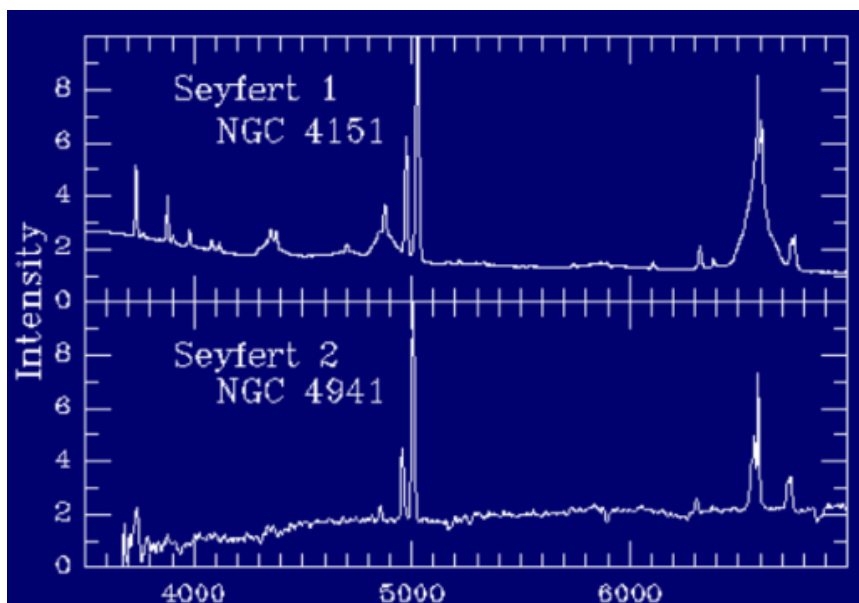


Figura 1: Spettri di emissione tra Seyfert 1 e Seyfert 2 a confronto.

## 2.2 Radiogalassie

In accordo con il loro nome, questi oggetti sono fortissime sorgenti di onde radio presentando radiazioni con potenza oltre 100 volte quella di normali galassie. Infatti, la luminosità in banda radio che emettono è molto superiore a quella in banda ottica: parliamo di luminosità radio che vanno da  $10^{40}$ - $10^{45}$  erg/s fino anche ad arrivare a  $10^{47}$  erg/s.

Dal punto di vista morfologico questi oggetti sono strutturati in maniera molto particolare. Presentano infatti due lobi di emissione, detti peculiarmente *radiolobi*, che si diramano perpendicolarmente al piano della galassia ellittica a cui sono associate. Queste strutture possono estendersi per lunghezze dell'ordine del kpc, arrivando in alcuni casi anche a 6 Mpc, ragion per cui deduciamo che una radiogalassia può essere 10 volte più estesa di una normale galassia come ad esempio la nostra. Da questo tipo di struttura deduciamo che probabilmente i lobi, orientati simmetricamente in due direzioni opposte, siano originati dall'espulsione di materia relativistica dal nucleo, ovvero di elettroni con velocità prossime a quella della luce che perdono energia trovandosi ad interagire con un campo magnetico, dando origine al fenomeno della radiazione di sincrotrone. È questo tipo di radiazione che giunge fino a noi.

Notando la grande distanza dal nucleo raggiunta dagli elettroni, possiamo ipotizzare che esistano regioni del lobo in cui gli elettroni subiscano brusche accelerazioni: sono gli **hot spots**. Queste regioni sono molto compatte e luminose e la loro origine è dovuta all'interazione con il mezzo intergalattico da parte dei cosiddetti **getti**. Questi non sono altro che "ponti" di plasma relativistico che traggono origine dal nucleo e riforniscono energeticamente il *radiolobo* per tutta la fase di attività del nucleo galattico. Osserviamo ad esempio il caso di Virgo A, radiogalassia associata con la galassia ottica M87.

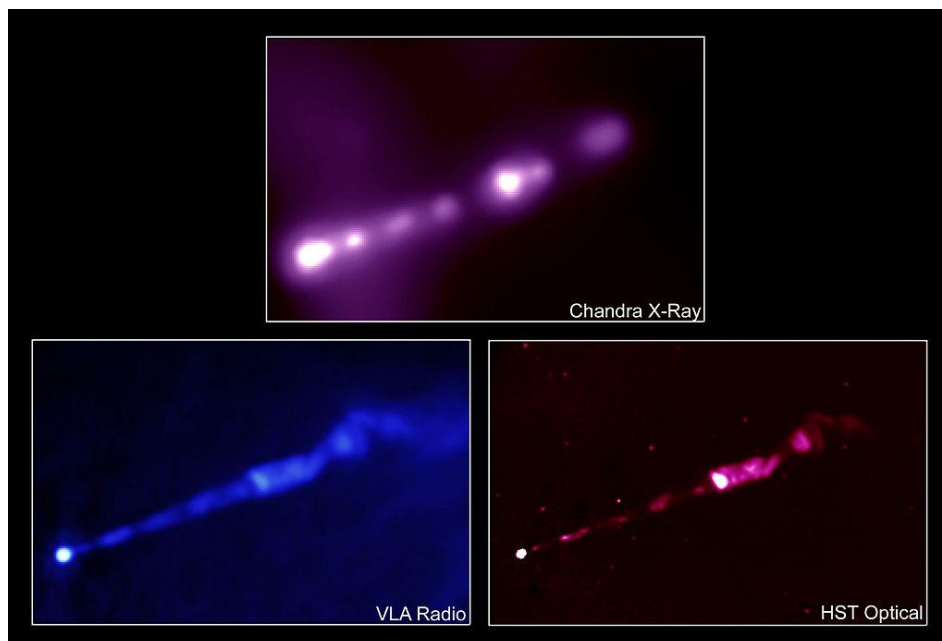
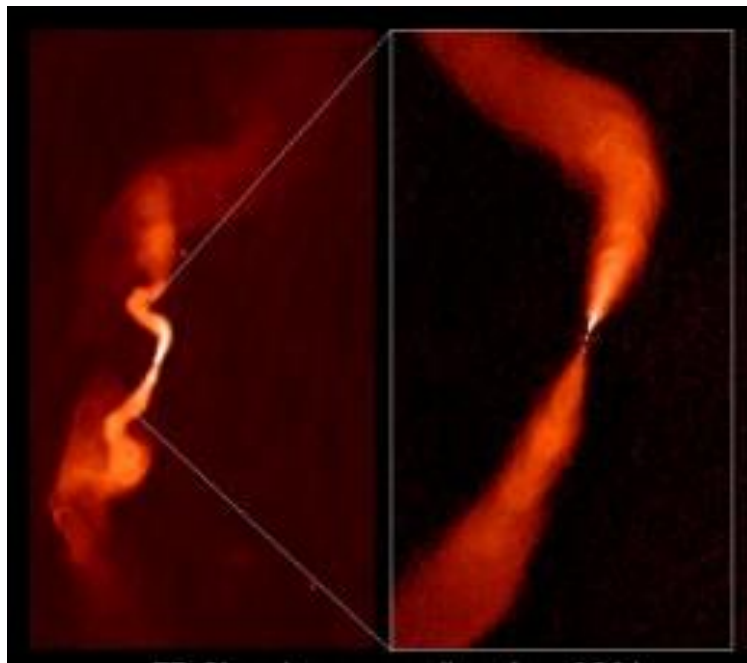


Figura 2: Getto della radiogalassia Virgo A, osservato in diverse bande elettromagnetiche

Dall'estensione spaziale dei *radiolobi* e dalla velocità di emissione dei getti dal nucleo possiamo stimare l'età dei *radiolobi*. L'emissione globale di questi oggetti, ovvero l'energia totale irradiata, arriva attorno ai valori di  $10^{58}$  -  $10^{60}$  erg in circa 100 milioni di anni, attraversati i quali la galassia abbandona la sua fase attiva, ponendo fine alla sua emissione. Deduciamo che la durata temporale di questi oggetti è molto breve se paragonata alla vita di una galassia in condizioni normali e ciò trova conferma nel fatto che osservando un gran numero di galassie, le radiogalassie rappresentino una bassa percentuale numerica. Non a caso, l'intensa attività nucleare di oggetti di questo tipo è considerata solo una fase della vita della galassia, probabilmente legata alle prime fasi di collasso dopo la loro formazione.

Nonostante queste caratteristiche comuni, è possibile operare una suddivisione delle radiogalassie dal punto di vista della potenza, delle dimensioni e della morfologia in due categorie. Questa classificazione fu operata nel 1974 da Fanaroff e Riley, da cui il nome delle tipologie FR I e FR II:

- Radiogalassie FR I: questa tipologia di radiogalassie presenta una forte luminosità in prossimità delle regioni centrali del nucleo, ma globalmente sono meno luminose e presentano potenze dell'ordine di  $10^{42}$  erg/s. Ciò è dovuto al fatto che la brillantezza dei loro lobi decresce lentamente verso l'esterno. Molte FR I sono chiamate "core-dominated", poiché la loro attività è concentrata essenzialmente nel nucleo centrale, sede tra l'altro dei caratteristici getti che si rivelano essere molto luminosi in questa zona.



*Figura 3: 3C31, radiogalassia di tipo FRI*



- Radiogalassie FR II: queste radiogalassie invece, si rivelano essere più luminose in zone lontane dal centro, grazie alla efficienza di trasporto dei getti che, anche se in questi oggetti sono molto deboli, possiedono velocità relativistiche. Inoltre, gli hotspots presenti nelle regioni periferiche accelerano gli elettroni portandoli a grandi distanze dal nucleo attivo. Contrariamente alle FR I quindi, la luminosità dei lobi cresce verso l'esterno e per questo sono anche chiamate “lobe-dominated” e inevitabilmente presentano dimensioni più estese con potenze dell'ordine di  $10^{47}$  erg/s.

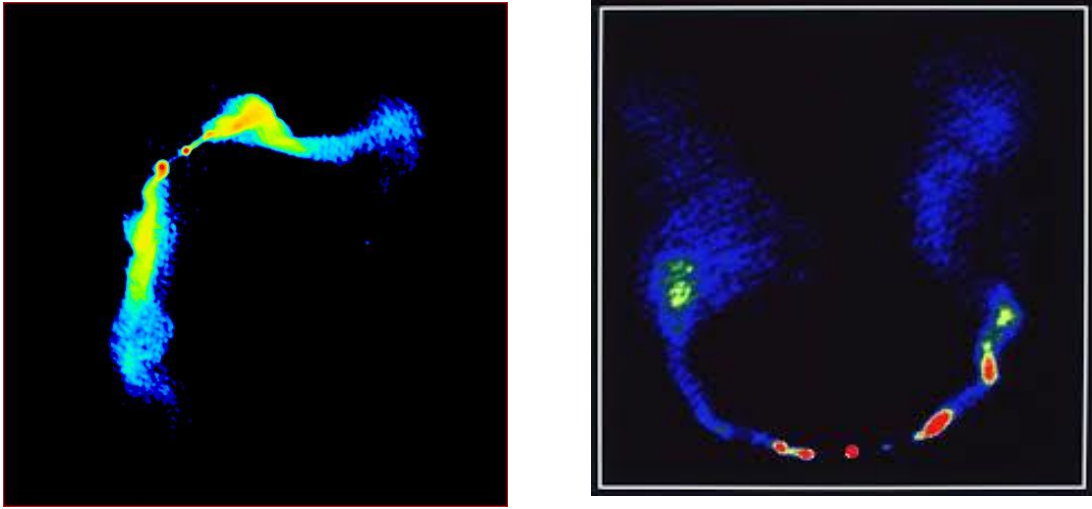


Figura 2: Nell'immagine a sinistra è mostrata la radiogalassia FR II Cetus A (3C 405). A destra vi è una immagine ottica della galassia ellittica NCG 5128 alla quale è stata sovrapposta l'immagine radio della radiogalassia FR II Centaurus A ad essa associata.

Vi è poi un'altra classe di oggetti dalla alta potenza radio chiamate *Compact Sources*, le quali possiedono dimensioni molto piccole, generalmente  $\leq 20$  kpc, e quindi sono contenute dalla galassia ottica. Molto probabilmente ci troviamo di fronte a radiogalassie giovani in cui i getti non sono ancora emersi dalla struttura galattica. Un'altra ipotesi è che le condizioni ambientali e la struttura gravitazionale della galassia non favoriscano l'emissione di questi getti, compattando la struttura in uno spazio molto esiguo.

Specialmente nei cluster non rilassati, non è difficile osservare radiogalassie dalla struttura detta “a coda” i cui getti è come se venissero piegati. In molte radiogalassie di tipo FR I accade infatti che i getti radio sono curvati all'indietro e ciò è dovuto al moto della galassia e del nucleo attivo attraverso il mezzo intergalattico oppure all'effetto distorcente del gas circostante. Esse sono perciò anche chiamate radiogalassie *testa-coda*. Possiamo dividerle in due categorie:

- Narrow Angle Tail, dette anche “NAT” associate a galassie situate tipicamente nelle periferie di ammassi, sono radiogalassie i cui getti si divaricano formando un angolo minore di  $10^\circ$ . I loro rami si sviluppano parallelamente e la loro struttura è la conseguenza del movimento della galassia all'interno dell'ammasso.
- Wide Angle Tail, dette anche “WAT” associate a galassie situate al centro di un ammasso, sono radiogalassie i cui getti si divaricano formando un angolo maggiore di  $10^\circ$ . In realtà non sono vere e proprie FR I poiché presentano caratteristiche intermedie, soprattutto nella struttura, con le FR II. La loro forma caratteristica, considerato anche l'ampio angolo di apertura, suggerisce che la distorsione dei getti è causata dall'interazione della WAT con masse gassose in movimento appartenenti all'ammasso ospitante.



*Figura 3: A sinistra è raffigurata la radiogalassia WAT 3C465, nel cluster Abell2634. A destra la NAT NGC1265, situata nell'ammasso di Perseo.*

# CAPITOLO 3

## Sorgenti compatte

Questi tipi di sorgenti hanno la caratteristica di presentare un'emissione originata principalmente da un nucleo centrale, molto piccolo se paragonato al resto della galassia ospitante. Appartengono a questa categoria gli oggetti Quasar, Blazar e BL Lac.

### 3.1 Quasar e Blazar

Negli anni '50 vennero rilevate e catalogate molte radiosorgenti. Purtroppo però, il potere risolutivo dei radiotelescopi di allora era molto scarso e non permetteva di determinare con precisione la posizione e la tipologia delle sorgenti. Ma nei primi anni '60, i nuovi radiotelescopi riuscirono a identificare la posizione di questi oggetti e alcune di esse vennero così identificate come nebulose o resti di supernove. Nel 1960 venne preso in considerazione l'oggetto radio precedentemente catalogato come 3C 48: esso era un oggetto blu, dalla luminosità molto debole e all'apparenza stellare. Lo studio dei suoi spettri di emissione però non presentava alcun tipo di somiglianza con le righe degli spettri tipiche delle stelle, per cui evidentemente si trattava di oggetti di natura diversa. Tuttavia, la somiglianza nell'ottico di queste sorgenti compatte con oggetti stellari portò al considerarle come oggetti quasi-stellari, da cui il nome "quasar" dato dall'astrofisico Hong-Yee Chiu.

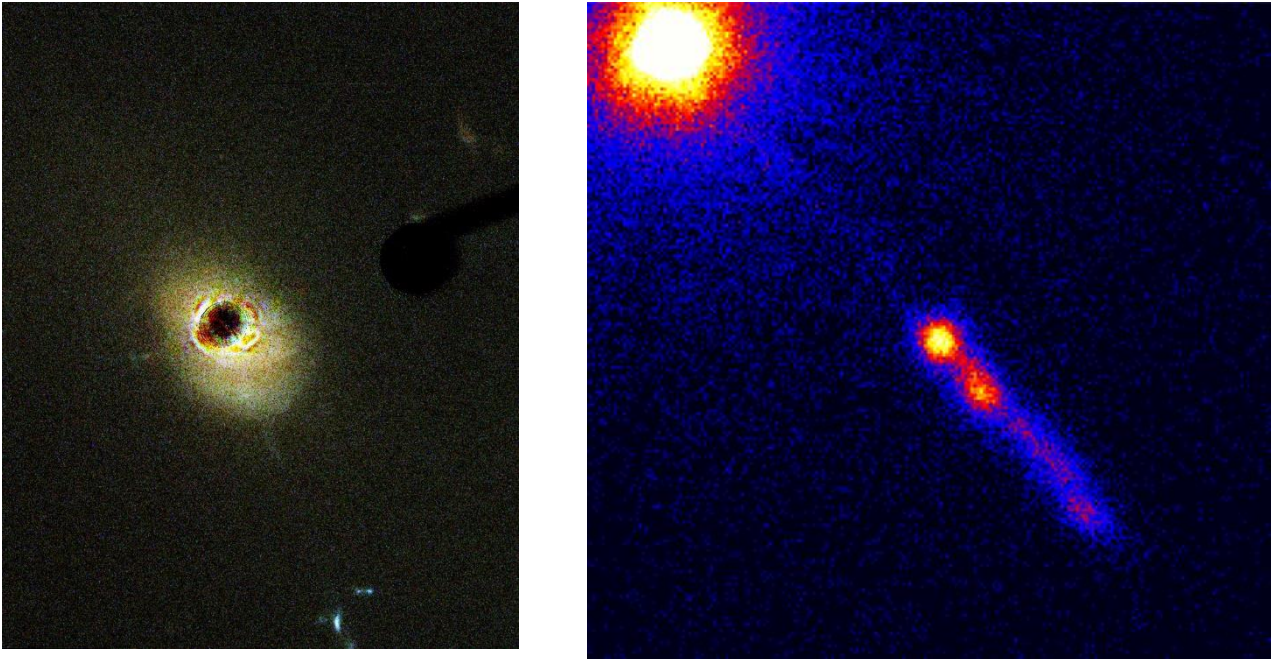
Un oggetto di rilevante importanza è sicuramente 3C 273. L'astronomo Maarten Schmidt nel 1964 riuscì ad analizzare lo spettro di emissione di questa sorgente, scoprendo righe spettrali distanziate tra loro similmente alle righe dell'idrogeno, ma spostate fortemente verso il rosso. Questo spostamento può essere calcolato con le leggi dell'effetto Doppler relativistico:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = z = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}} - 1 \quad (3.1.1)$$

e, nel caso di 3C 273, questo spostamento corrispondeva ad un valore 0.158 e ciò indicava una velocità di allontanamento equivalente a 0.146c. In altre parole, questo oggetto si stava allontanando da noi con una velocità di circa 48.000 km/s, una velocità decisamente troppo alta perché si potesse trattare di una stella. Secondo l'ipotesi che lo spostamento Doppler fosse dovuto all'espansione dell'universo, e quindi in realtà di un'espansione dello spazio in sé, possiamo trovare la distanza di questo oggetto in funzione della sua velocità. Secondo la legge di Hubble infatti, per oggetti collocati a distanze cosmologiche, la velocità di allontanamento di un corpo celeste è direttamente proporzionale alla sua distanza. La relazione è molto semplice:

$$v = Hd \quad (3.1.2)$$

in cui H è il valore della costante di Hubble, corrispondente a  $73.5 \frac{km}{s \cdot Mpc}$ . Conoscendo la velocità è stato possibile in questo modo trovare la distanza che per l'oggetto in questione si rivelava essere circa 2.5 miliardi di anni luce, un valore che sicuramente indicava la natura extragalattica di 3C 273. A partire da questo oggetto vennero successivamente esaminati altre radiosorgenti e quasar, rivelando tutte la stessa distanza cosmologica. Essi venivano identificati per la forte emissione nella banda ultravioletta, altra peculiarità degli oggetti quasar.



*Figura 4: Due immagini del quasar 3C 273. A sinistra un'immagine presa dal telescopio spaziale Hubble in cui è evidenziata una struttura circostante a corona, che indica la presenza della galassia attorno al quasar. A destra l'immagine X dello stesso oggetto, con il suo getto caratteristico, osservato dal Chandra X-ray Observatory.*

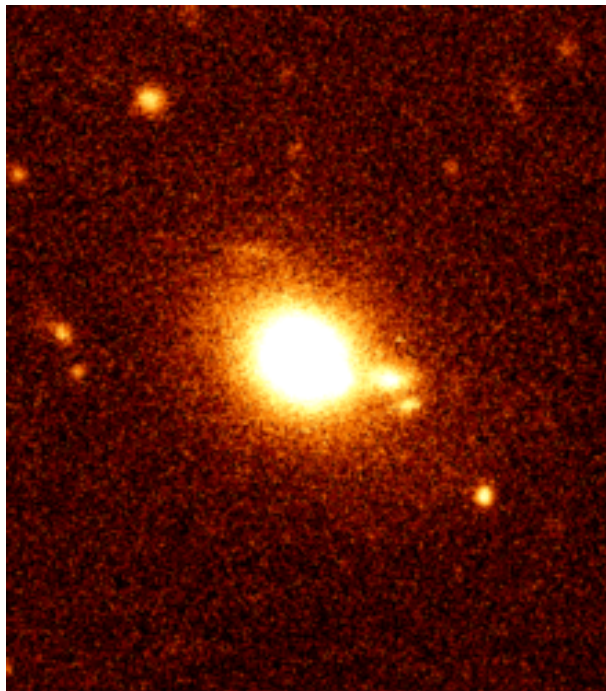
Considerando la distanza cosmologica e la luminosità apparente, può essere ricavata la luminosità assoluta, o intrinseca, degli oggetti in questione. Si trova così che i quasar possiedono luminosità dell'ordine di  $10^{13} L_{\odot}$ : oltre 1000 volte quelle delle galassie normali motivo per cui risulta ragionevole supporre che i quasar siano gli oggetti più luminosi dell'intero universo. Grazie a strumenti sempre più potenti si è compreso che la controparte ottica degli oggetti quasar sono galassie il cui nucleo è fortemente attivo. Per queste ragioni i quasar si collocano all'interno della categoria degli AGN.

Alcuni quasar possiedono luminosità tipicamente variabili, talvolta anche in maniera periodica, con tempi di scala di pochi giorni o settimane e questo ci fa dedurre che le dimensioni di questi oggetti siano al massimo di pochi-giorni luce. Da un punto di vista relativistico, infatti, un oggetto non può cambiare luminosità più velocemente del tempo che la luce impiegherebbe per attraversarlo. Osservando la sua variabilità si deduce che i quasar possiedono dimensioni confrontabili con quelle del nostro sistema solare ( $10^{16}$  m). Oggetti di questo tipo rientrano nella categoria degli oggetti chiamati "blazar" e si distinguono dai quasar per il fatto che il loro getto relativistico punta direttamente verso la nostra linea di osservazione, presentando spettri elettromagnetici completamente differenti. La variabilità della loro luminosità può essere spiegata in quanto il disco di accrescimento del buco nero super-massiccio è in grado di modificare in maniera costante l'asse del sistema e conseguentemente la direzione dei getti.

### 3.2 BL Lacertae (BL Lac)

Occupano un posto importante tra i blazar, gli oggetti di tipo BL Lac. Il nome di questi oggetti deriva dall'oggetto prototipo della classe scoperto da Hoffmeister nel 1929, chiamato BL Lacertae. Inizialmente venne considerato come una stella variabile, ma in seguito si comprese la sua natura di radiosorgente, osservando anche le deboli tracce di luminosità della galassia che ospitava questo oggetto. A partire da BL Lacertae venne così denominata una classe di oggetti dalle caratteristiche simili: essi sono sorgenti puntiformi associati a galassie giganti tipicamente ellittiche. I BL Lacertae si distinguono essenzialmente per una forte polarizzazione sia in banda ottica che in banda radio e lo spettro elettromagnetico non presenta righe di emissione come invece accadeva per i quasar, mostrando una forte somiglianza con quasar a spettro piatto. Ciò è spiegabile per assenza di gas ionizzato o alternativamente al fatto che l'emissione nel continuo è così intensa da nascondere le righe di emissione.

Altri blazar sono gli oggetti OVV (Optically Violent Variable), i quali variano enormemente la loro luminosità ottica, molto più che i semplici BL Lac. Da essi si differenziano inoltre anche per la presenza, sebbene molto deboli, di larghe righe di emissione.



*Figura 5: BL Lac H 0323+022, ESO*

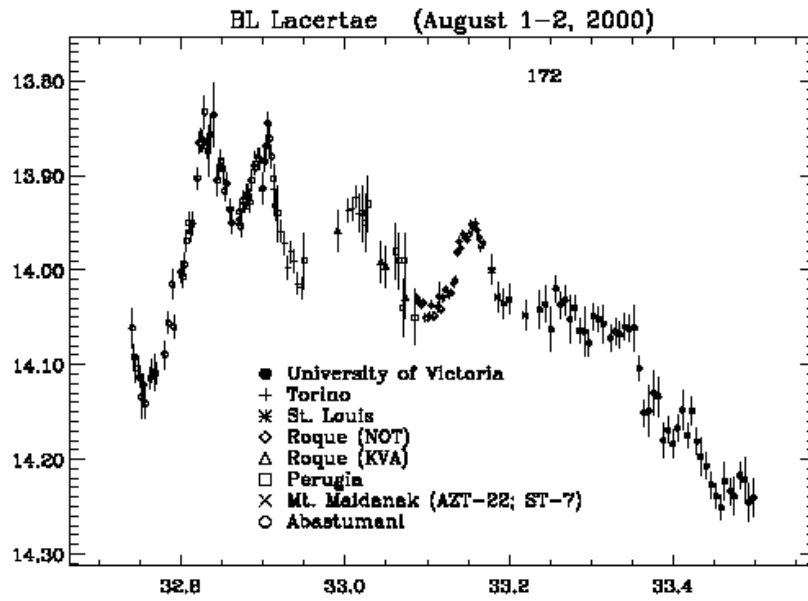


Figura 6: Curva di luce di una BL Lac nella notte tra il 1 e il 2 agosto del 2000. L'immagine mostra la forte variabilità luminosa di oggetti di questo tipo.

# CAPITOLO 4

## Considerazioni relativistiche

Gli oggetti esaminati finora nella nostra trattazione, presentano la comune caratteristica di emettere fasci luminosi denominati peculiarmente “getti”. L’elevata energia alla quale questi getti sono irradiati e la grande distanza dalla sorgente che essi possono raggiungere, ci pone davanti al problema di comprendere il meccanismo energetico che li produce.

### 4.1 Natura dei getti e meccanismo di emissione

Un getto relativistico è un getto di plasma estremamente potente che emerge dal centro di alcune galassie attive. Si pensa siano composti da una mistura di elettroni, positroni e protoni. La loro lunghezza può raggiungere alcune migliaia o addirittura centinaia di migliaia di anni luce.

Anche sommando le reazioni nucleari di tutte le stelle della galassia associata, non si otterrebbe un valore paragonabile alla potenza emessa. Si ritiene allora che gli AGN siano alimentati da un buco nero supermassiccio situato al centro del nucleo galattico, il quale, dotato di un disco di accrescimento, ingloba stelle e gas galattici producendo di conseguenza radiazioni con potenza enorme.

Quando infatti una massa gassosa si trova in prossimità dell’orizzonte degli eventi essa viene compressa, ma al tempo stesso ruotando, friziona su sé stessa aumentando la propria temperatura e liberando energia. In questo modo, se il buco nero accrescesse di ogni anno la sua massa anche solo di un valore pari a quello di una massa solare, l’energia emessa risulterebbe spiegata.

La presenza di campi magnetici e la rotazione differenziale nel disco di accrescimento danno origine ad un sistema disco-getto soggetto ad accelerazione magneto-centrifuga, in grado di produrre campi elettrici indotti che accelerano particelle cariche in direzione perpendicolare al piano del disco, lungo l’asse di rotazione del sistema. In seguito a questa accelerazione, le particelle cariche raggiungono velocità prossime a quelle della luce. Risulta spiegato il perché questi getti siano chiamati relativistici.

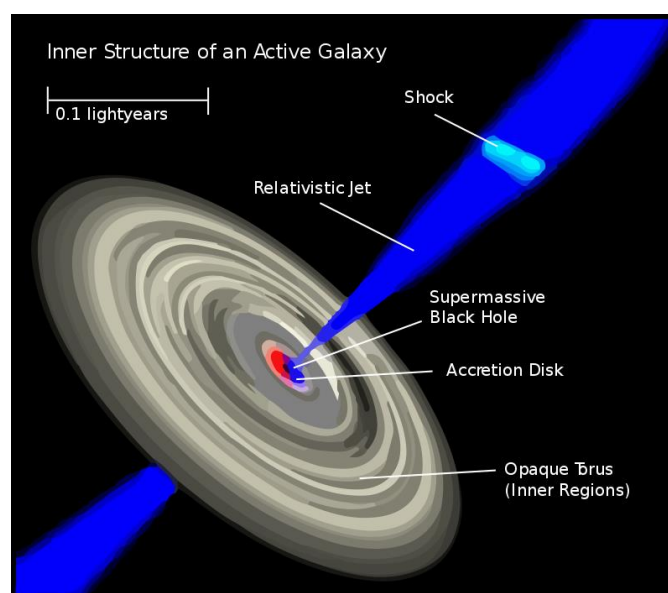
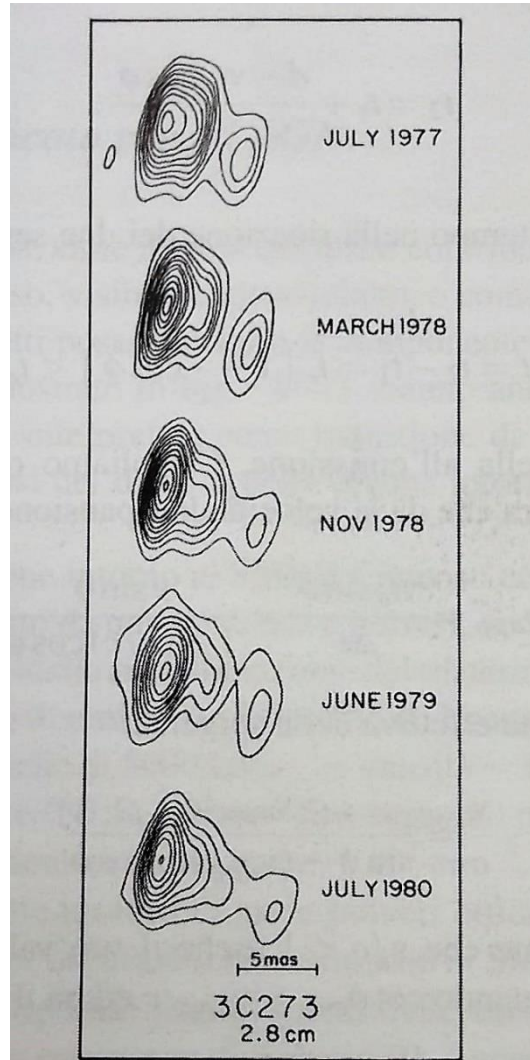


Figura 7: Schematizzazione figurativa del meccanismo di emissione dei getti in un AGN

## 4.2 Moti apparenti superluminali

Osservando nel corso degli anni getti provenienti da oggetti quasar, emerse una problematica non banale. Getti di alcuni quasar infatti sembrano allontanarsi dal nucleo con velocità superiori a quella della luce, violando di fatto la relatività ristretta.



*Figura 8: Moti superluminali dei getti del quasar 3C273 nel corso di tre anni.*

In figura 8 si nota come la distanza percorsa dal getto sia troppo grande per un tempo così piccolo. Per spiegare questo moto apparente si è ricorso a vari modelli. Uno di questi fu il modello ad albero di Natale secondo il quale il getto è in realtà composto da più parti che si illuminano in momenti diversi, generando una velocità apparente maggiore della velocità della luce. Il modello più attendibile utilizzato oggi avanza invece l'ipotesi che la sorgente sia in movimento a velocità prossime a quelle della luce verso di noi, lungo una direzione che formi un angolo  $\theta$  molto piccolo con la linea di osservazione. Osserviamo lo schema seguente.



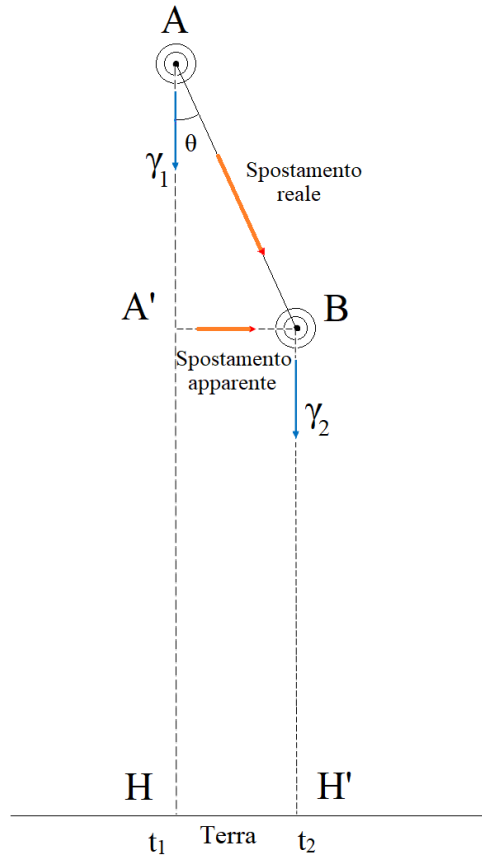


Figura 9: Schema di emissione di un getto relativistico

Chiamiamo  $t_1$  il tempo che il fotone  $\gamma_1$  ci impiega a raggiungere la Terra partendo dal punto A.

$$t_1 = \frac{AH}{c} \quad (4.2.1)$$

Per  $t_2$  invece intendiamo il tempo che il fotone  $\gamma_2$  impiega a raggiungere la Terra, partendo però dal punto B.

$$t_2 = \frac{BH}{c} \quad (4.2.2)$$

Se dovessimo ora calcolare la differenza temporale di arrivo sulla Terra tra i due segnali luminosi otteniamo un tempo dipendente dal moto della sorgente, in particolare dai parametri di velocità propria  $v$  e angolo  $\theta$  rispetto alla linea di vista:

$$\Delta t' = t_1 - t_2 = \frac{AH - BH}{c} = \frac{AH}{c} - \frac{v \Delta t \cos \theta}{c} \quad (4.2.3)$$

Questo porta all'effetto ottico secondo il quale la sorgente percorrerebbe lo spazio tra A' e B con una velocità apparente equivalente a:

$$v_{apparente} = \frac{A'B}{\Delta t'} = \frac{v \Delta t \sin \theta}{\Delta t \left(1 - \frac{v}{c} \cos \theta\right)} = \frac{v \sin \theta}{1 - \frac{v}{c} \cos \theta} \quad (4.2.4)$$

Definendo poi il coefficiente  $\beta$  come il rapporto  $\frac{v}{c}$  riscriviamo la relazione in termini di  $\beta$ :

$$\beta_{apparente} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (4.2.5)$$

e troviamo il valore massimo per  $\beta_{apparente}$  in funzione dell'angolo  $\theta$ :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \beta_{apparente}}{\partial \theta} &= 0 \\ \frac{\beta \cos \theta}{1 - \beta \cos \theta} - \frac{\beta^2 \cos^2 \theta}{(1 - \beta \cos \theta)^2} &= 0 \\ \frac{\beta (\cos \theta - \beta)}{(1 - \beta \cos \theta)^2} &= 0 \end{aligned} \quad (4.2.6)$$

da cui otteniamo infine:

$$\theta = \arccos \beta \quad (4.2.7)$$

Sostituendo la (4.2.7) nella (4.2.5) otteniamo un  $\beta_{apparente}$  massimo corrispondente a:

$$\beta_{apparente} = \frac{\beta \sqrt{1 - \beta^2}}{1 - \beta^2} = \frac{\beta}{\sqrt{1 - \beta^2}} = \gamma \beta \quad (4.2.8)$$

in cui  $\gamma$  è il fattore di Lorentz dato dal rapporto  $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$ .

Come si nota dalle formule matematiche, più l'oggetto si avvicina alla velocità della luce, più presenterà una velocità apparente maggiore.

### 4.3 Effetto Doppler relativistico

L'effetto fisico che descrive il cambiamento di frequenza ricevuta a causa del moto relativo della sorgente rispetto all'osservatore è chiamato effetto Doppler. Nella fattispecie, quando una sorgente è in avvicinamento, la sua frequenza di emissione subirà un incremento in modo proporzionale alla sua velocità. Per giustificare valori per  $\beta_{apparente}$  così elevati, si è perciò dovuto considerare la sorgente in questione in moto con velocità molto prossime a quella della luce. Ciò ci porta a non poter più considerare l'effetto Doppler classico, ma ad utilizzare la sua trattazione relativistica.

Nel caso di getti emessi da un AGN, supponiamo dunque che il fascio di emissione sia inclinato rispetto alla linea di osservazione di un certo angolo. Avremo dunque una frequenza osservata differente da quella emessa, equivalente a:

$$v_0 = \frac{v_e}{\gamma(1 - \beta \cos \theta)} \quad (4.3.1)$$

in cui

- $\beta$  corrisponde al rapporto  $\frac{v}{c}$  ;
- $\gamma$  corrisponde al valore  $\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}}$  ;
- $\theta$  indica l'angolo tra la direzione e del getto e la linea di vista.

In pratica sulla frequenza emessa opera un fattore  $D = \frac{1}{\gamma(\beta \cos \theta)}$  che chiameremo fattore Doppler. In particolare:

- $D > 1$  per sorgenti in avvicinamento
- $D < 1$  per sorgenti in allontanamento

Un'altra variazione dovuta a questo effetto è quella dei tempi di emissione. In questo caso la relazione è:

$$\Delta t_0 = \Delta t_e \gamma (1 - \beta \cos \theta) = \frac{\Delta t_e}{D} \quad (4.3.2)$$

Abbiamo inoltre la variazione degli angoli di osservazione per una sorgente in moto, fenomeno chiamato "Beaming relativistico". Infatti, se la radiazione è emessa entro un certo angolo solido, questo muterà di un fattore  $D^2$ :

$$\Delta \Omega_0 = \Delta \Omega_e \gamma^2 (1 - \beta \cos \theta)^2 = \frac{\Delta \Omega_e}{D^2} \quad (4.3.3)$$

Infine, sottolineiamo la variazione della luminosità totale:

$$L_0 = L_e D^4 \quad (4.3.4)$$

che varia di un fattore  $D^4$  e ciò spiega come il flusso osservato sia profondamente diverso tra sorgenti in allontanamento o in avvicinamento. Se la luminosità aumenta, ciò starà ad indicare getti che si muovono verso di noi ad angolo piccolo rispetto alla nostra linea di vista, cioè con un  $D > 1$ . Questo è il fenomeno del "Boosting relativistico". Nel caso contrario, avremo getti che si allontanano da noi con un conseguente decremento della luminosità osservata: avremo un  $D < 1$  e ciò corrisponderà al fenomeno fisico del "De-boosting relativistico".

# CAPITOLO 5

## Modelli unificati

Avendo fornito nei capitoli precedenti una panoramica sulle varie tipologie di nuclei galattici attivi, illustriamo ora i vari modelli che proseguono nella direzione di una descrizione unificante di tali oggetti.

### 5.1 Morfologia di un AGN

Recuperiamo attraverso un'immagine, la struttura generale di un AGN.

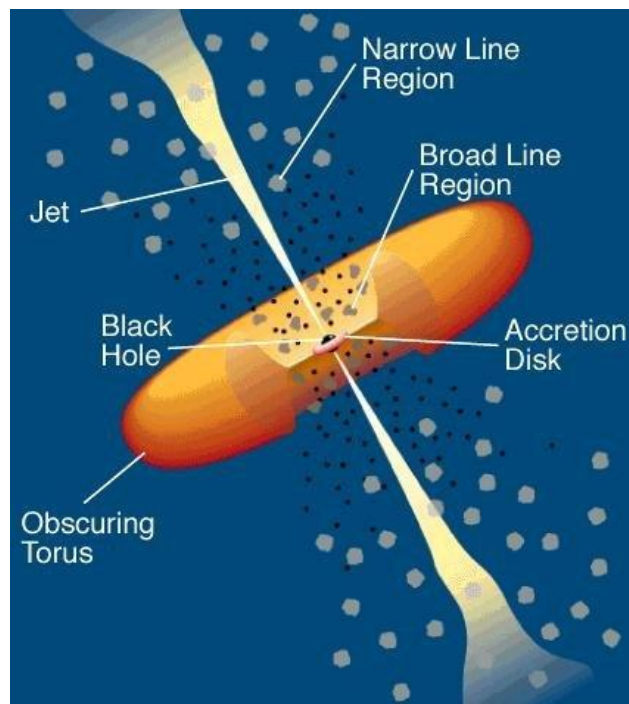


Figura 10: Schema raffigurativo della struttura di un AGN

Con l'aiuto della figura 10, possiamo ricapitolare la struttura di un nucleo galattico attivo. Esso risulta composto da:

- *Black Hole*, il quale costituisce il motore energetico dell'intero sistema. La sua massa è normalmente dell'ordine di  $10^8$ - $10^9 M_{\odot}$  ed è circondato da un disco di accrescimento.
- *Accretion Disk*, composto da gas spiraleggiante verso il centro fino ad essere inghiottito dal buco nero, liberando energia radiativa fino a quasi metà della sua massa a riposo. Probabilmente questo è il meccanismo di conversione di massa in energia più efficiente mai osservato nell'universo.
- *Broad Line Region (BLR)*, situata vicino al centro ad una distanza media di 1 pc. Lo spettro di emissione di questa regione presenta righe allargate e ciò indica gas in movimento a forti velocità, fino ad arrivare anche a  $10^4$  km/s. Attualmente si pensa che questo fenomeno sia causato dalla fotoionizzazione dovuta alle elevatissime temperature del disco di accrescimento.
- *Obscuring Torus (Toro di polveri)*, esso è situato a circa 30 pc dalla singolarità. Può essere immaginato, come si osserva dalla figura 10, come una "ciambella" di polveri e gas, ragion per cui è anche chiamata "molecular torus".

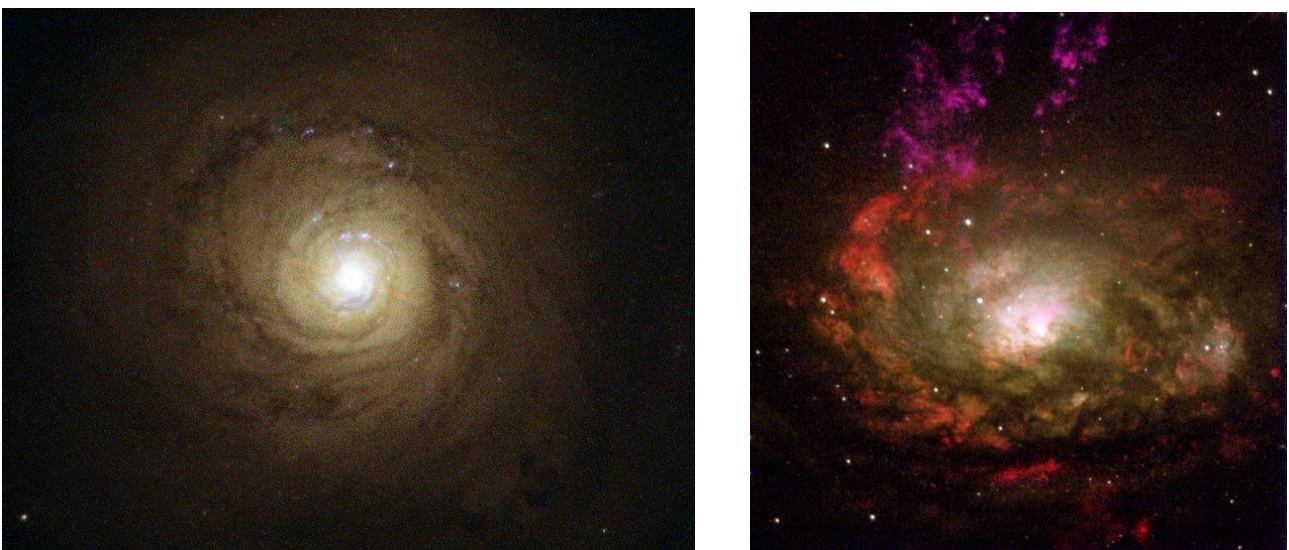
- *Narrow Line Region (NLR)*, situata lontano dal centro ad una distanza compresa tra i 10 e i 1000 pc dal buco nero. A differenza della BLR lo spettro di emissione di questa zona presenta righe strette per cui la velocità del gas che compone questa sezione non può superare valori di 1000 km/s.
- *Jets*: come già illustrato nella sezione 4.1, il buco nero centrale emette energia sottoforma di getti di plasma molto potente.

## 5.2 Modello unificato per oggetti Radio quieti

Tra gli oggetti presi in esame, le galassie di Seyfert sono sicuramente quelli più “tranquilli” da un punto di vista di emissione radio. Per queste galassie, avevamo poi operato in questa sede una distinzione tra tipo 1 e tipo 2, basata essenzialmente sui loro spettri di emissione. Ciò aveva portato ad una distinzione tra due zone della galassia in cui il gas presentava proprietà termodinamiche differenti.

Questo primo modello unificato prosegue nella direzione di spiegare Seyfert 1 e Seyfert 2 come se fossero lo stesso oggetto, osservato però da angolazioni differenti. Infatti, proprio a causa dell’Obscuring Torus, nello spettro ottico si manifesta una zona opaca che scherma il nucleo e la Broad Line Region, rendendo così visibile esclusivamente la Narrow Line Region: ciò accade nelle Seyfert di tipo 2. Ma se si osservasse lo stesso oggetto lungo l’asse del piano galattico e non lungo la perpendicolare, si vedrebbero il nucleo e la BLR senza problemi, osservando così una Seyfert di tipo 1.

Grazie a questo modello è possibile spiegare oggetti dallo spettro di emissione intermedio tra le Seyfert 1 e Seyfert 2. Ad esempio, nel caso della galassia Seyfert 2 NGC 1068, osserviamo deboli righe molto larghe nella serie di Balmer tipiche delle galassie Seyfert di tipo 1.



*Figura 11: A sinistra la galassia NGC 5548, esempio di Seyfert di tipo 1. A destra troviamo PGC 50779, oggetto meglio conosciuto con il nome di Galassia del Compasso, esempio di Seyfert di tipo 2.*

### **5.3 Modello unificato per oggetti quasar e radiogalassie FR II**

Questo modello invece, riguarda oggetti dalla forte emissione radio. In particolare, si muove nella direzione di unificazione di sorgenti estese con sorgenti compatte. Il discriminante è sempre rappresentato da una diversa orientazione dell'oggetto rispetto alla linea di vista. Se il nucleo galattico attivo è orientato con un angolo minore di  $45^\circ$ , noi osserveremo il nucleo molto luminoso, puntiforme e compatto e pertanto l'oggetto sarà classificabile come quasar. Al contrario, se l'angolo supera i  $45^\circ$ , l'AGN si classifica come FR II che ricordiamo essere quella categoria di radiogalassie caratterizzata da una forte emissione dai getti, ma da una debole emissione dal nucleo. Questa è proprio dovuta alla presenza del toro di polveri tra l'oggetto e la nostra linea di vista. Mediamente i quasar hanno angolo di inclinazione di circa  $30^\circ$ , a differenza delle FR II che hanno un angolo di inclinazione di circa  $75^\circ$ .

Anche morfologicamente vi è una somiglianza: sia quasar che FR II presentano strutture con lobi doppi e inoltre la presenza di uno spettro piano nel nucleo e ripido nel resto della sorgente per entrambi i tipi di oggetti, ha incoraggiato gli astrofisici a teorizzare un modello unificato di questo tipo.

### **5.4 Modello unificato per BL Lac e radiogalassie FR I**

Anche qui la teoria di unificazione per radiogalassie FR I e oggetti BL Lac sostiene che siano diverse manifestazioni dello stesso oggetto a seconda della diversa angolazione. Infatti, lo spettro radio di questi oggetti è fra loro compatibile ed entrambi sono associati a galassie giganti di tipo ellittico. Urry e Padovani nel 1992 stabilirono l'angolo di separazione tra i due oggetti, stimandolo a circa  $30^\circ$ . Se l'angolo di vista è più piccolo di  $30^\circ$  gradi ci troviamo di fronte ad una BL Lac, altrimenti ad una radiogalassia FR I.

# CAPITOLO 6

## 4C 38.41

La sorgente 1633+382, anche conosciuta come 4C 38.41 è un AGN classificato come sorgente quasar a spettro piatto. Essa possiede un red shift di 1.813 e il moto apparente dei suoi getti è superluminale.

Studiando la curva di luce di questo oggetto, si notò che molte occorrenze di emissioni di raggi  $\gamma$  erano abbinati ad attività di emissione nello spettro visibile e radio. Si trovò così una significativa correlazione tra alte energie (raggi  $\gamma$ , raggi X e ottico) e variazioni di densità di flusso per onde radio. Utilizzando semplici modelli venne stimata la distanza tra la zona di emissione alle alte energie e la zona di emissione radio, ottenendo un valore medio di circa 40 pc.

Tuttavia, tra il 2012 e il 2015, la sorgente ha emanato radiazioni dal meccanismo di emissione non ancora ben compreso. Osservando i più considerevoli aumenti di flusso il suo comportamento può essere spiegato con il modello shock-in-jet, in cui l'esplosione è causata da un'onda d'urto situata nel getto relativistico. Altre emissioni trovano invece una spiegazione convincente in variazioni dell'angolo di vista.

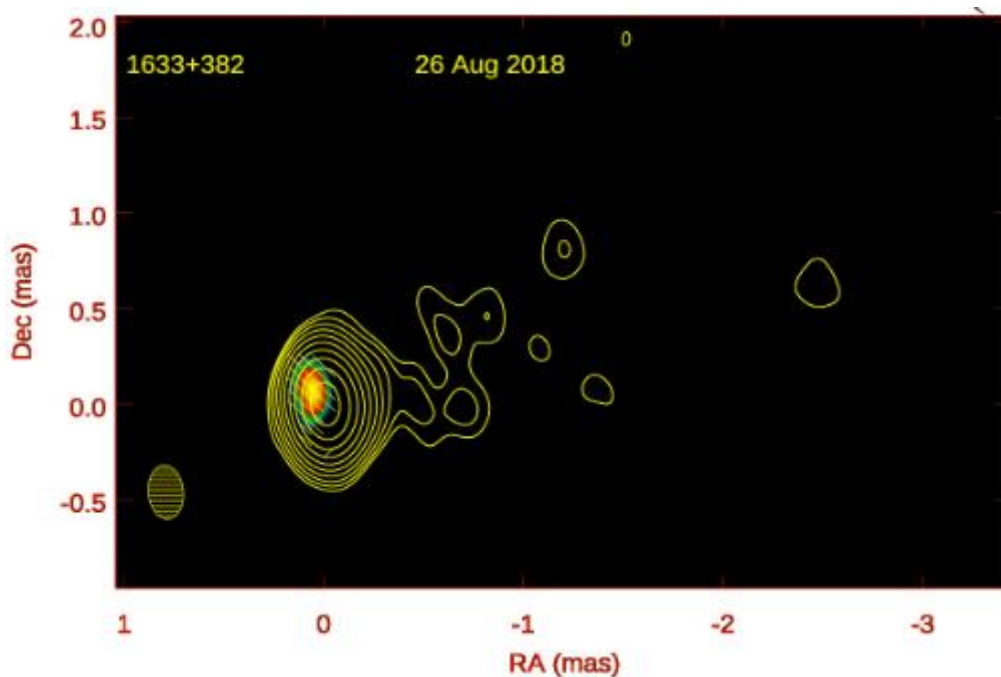


Figura 12: Il quasar 4C 38.41 visto il 26 agosto 2018 alla frequenza di 43 GHz.

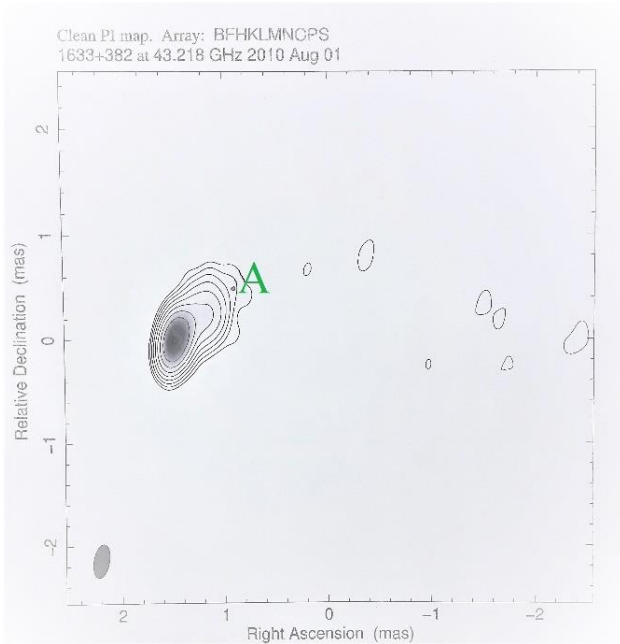
### 6.1 Raccolta dati

Grazie al Boston University Blazar Group, abbiamo ricavato per l'oggetto in questione una immagine per anno dal 2010 al 2017, alla frequenza di 43 GHz. L'oggetto si trova alle coordinate

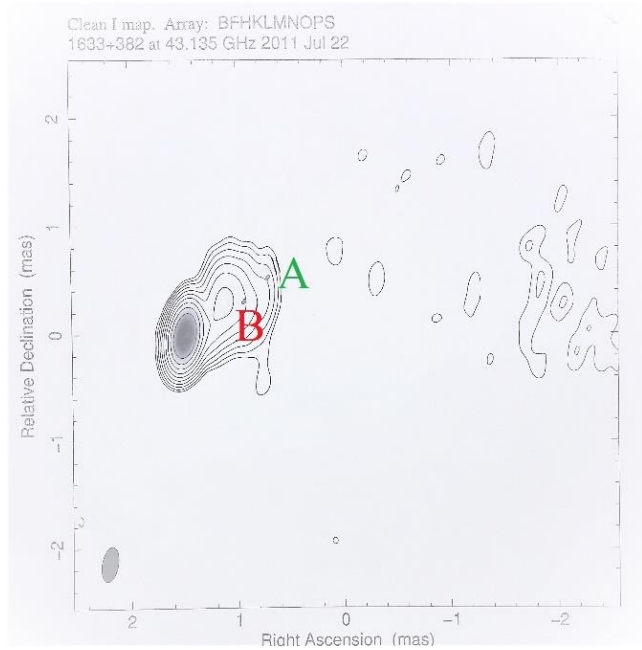
$$RA = 16^h 35^m 15.493^s$$

$$DEC = + 38^h 08^m 04.501^s$$

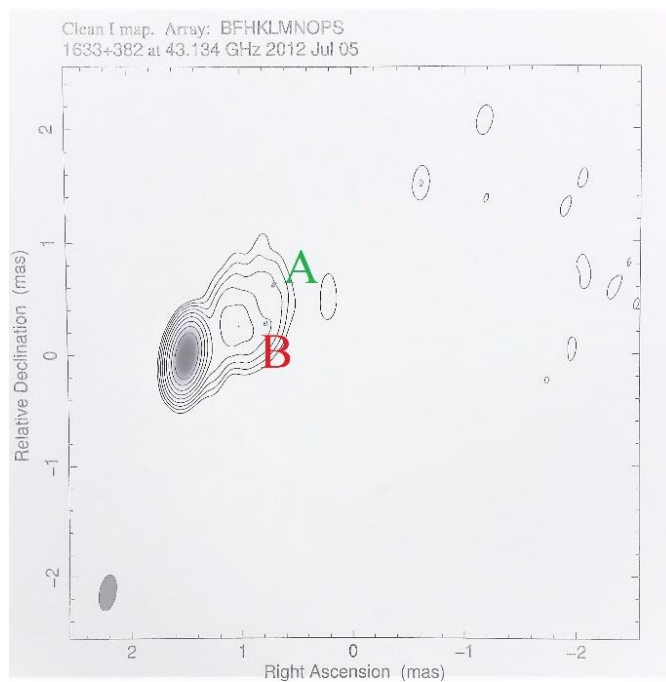
A partire dal 2010 abbiamo potuto osservare lo svilupparsi verso l'esterno di una componente che, per intenderci, chiameremo componente A ed alla nascita nel 2011 di una nuova componente che chiameremo B, anch'essa in moto verso le regioni esterne. Osserviamo le immagini seguenti.



*1 agosto 2010*



*22 luglio 2011*



*5 luglio 2012*



Nell'arco di tre anni la componente A cambia le sue coordinate celesti di qualche millisecondo d'arco, descrivendo uno spostamento che può tradursi in anni-luce:

| <i>Epoca</i>   | <i>Distanza dalla sorgente (mas)</i> | <i>Distanza dalla sorgente (pc)</i> | <i>Distanza dalla sorgente (anni-luce)</i> |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1 agosto 2010  | 1.716 mas                            | 14.373 pc                           | 48.043 anni-luce                           |
| 22 luglio 2011 | 2.178 mas                            | 18.705 pc                           | 60.978 anni-luce                           |
| 5 luglio 2012  | 2.310 mas                            | 19.838 pc                           | 64.672 anni-luce                           |

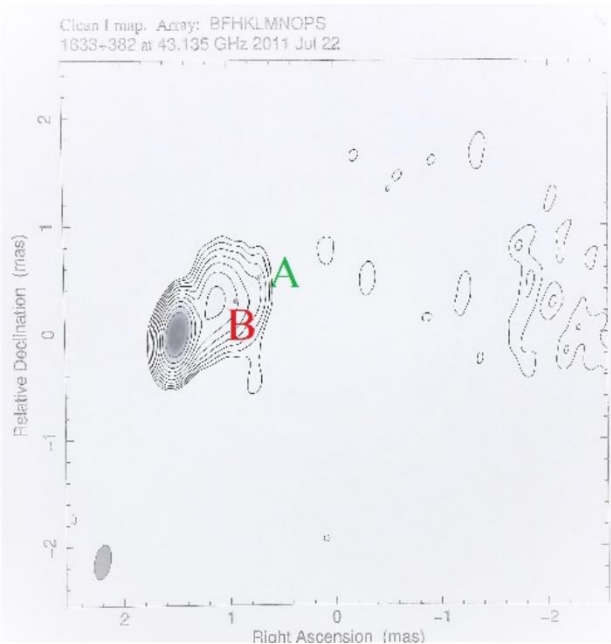
Dalle immagini ottenute noi abbiamo una distanza angolare e quindi espressa in millisecondo di arco. Per passare in parsec, assumendo il modello cosmologico ad oggi più accettato, utilizziamo il fattore di conversione di 8.588 pc/mas. Dai parsec per passare agli anni luce, moltiplichiamo i valori precedentemente ottenuti per 3.26.

Operando una semplice differenza tra il valore finale del 2012 e quello di partenza del 2010 otteniamo una distanza di 16.629 anni-luce percorsa in un tempo inferiore a 2 anni. Calcoliamo così il fattore  $\beta_{apparente}$ :

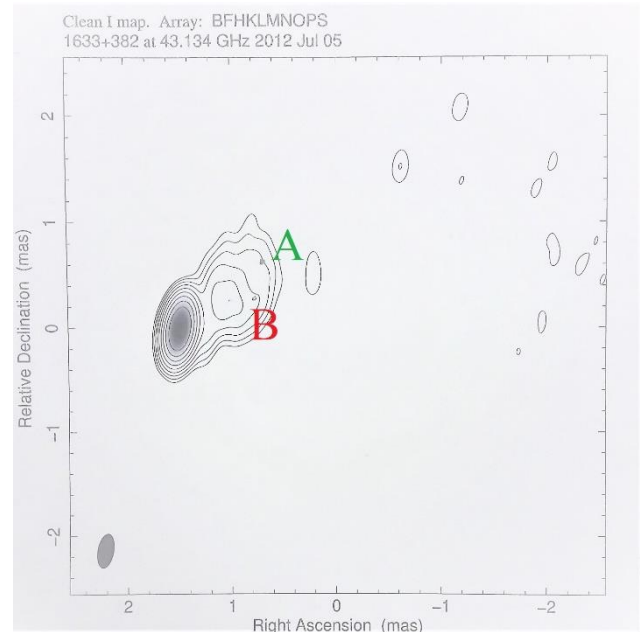
$$\beta_{apparente} = \frac{16.629 \text{ anni} - \text{luce}}{\Delta t} = 8.62 \quad (6.1.1)$$

in cui per  $\Delta t$  intendiamo il tempo trascorso tra le due misurazioni in anni. Dal 2012 in avanti non consideriamo più la componente A, poiché non la osserviamo più come parte della struttura principale osservata.

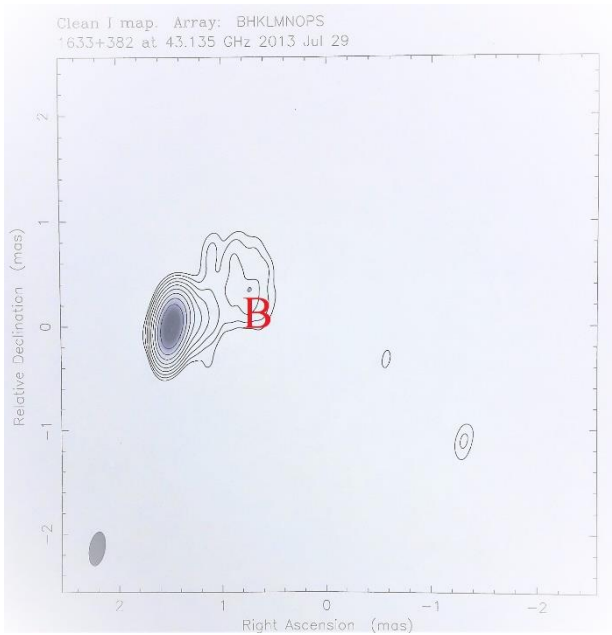
Dal 2011 risulta più definita la seconda componente B. Anche qui riportiamo una immagine annua per l'oggetto in questione.



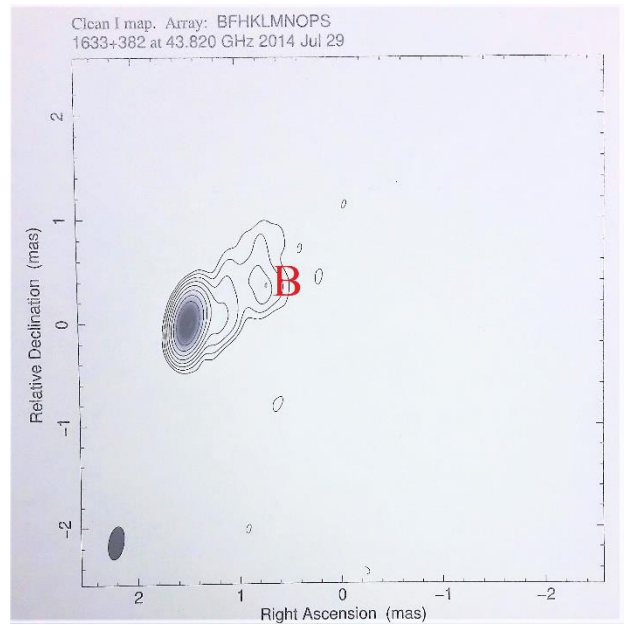
22 luglio 2011



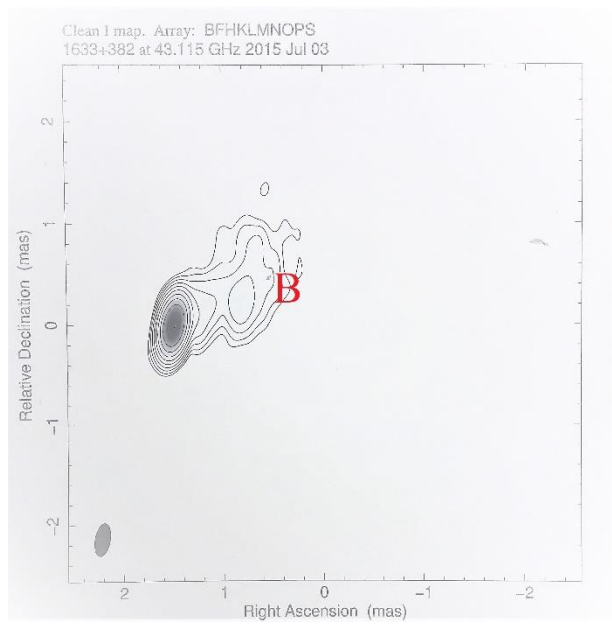
5 luglio 2012



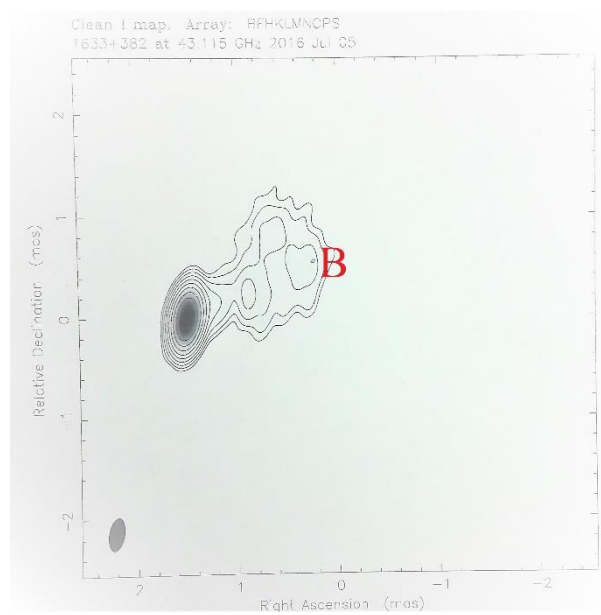
*29 luglio 2013*



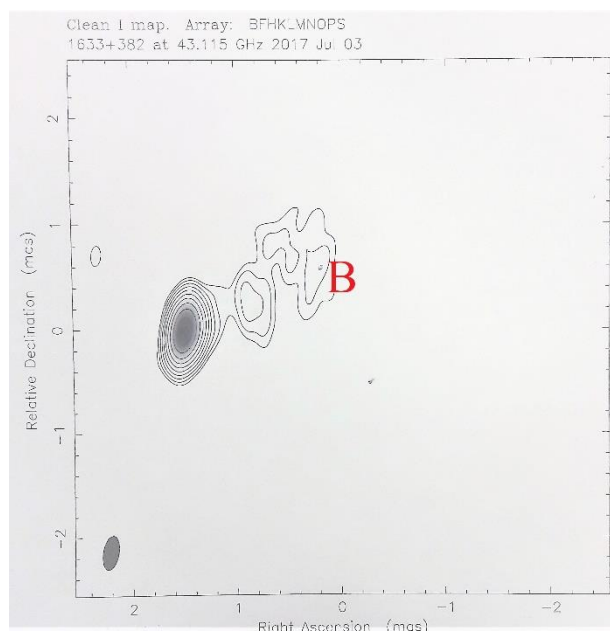
*29 luglio 2014*



*3 luglio 2015*



*5 luglio 2016*



3 luglio 2017

La componente B rimane ben definita a lungo e di seguito riportiamo i dati dal 2011 al 2017:

| <i>Epoca</i>   | <i>Distanza dalla sorgente (mas)</i> | <i>Distanza dalla sorgente (pc)</i> | <i>Distanza dalla sorgente (anni luce)</i> |
|----------------|--------------------------------------|-------------------------------------|--|
| 22 luglio 2011 | 1.122 mas                            | 9.636 pc                            | 31.413 anni-luce                           |
| 5 luglio 2012  | 1.254 mas                            | 10.769 pc                           | 35.107 anni-luce                           |
| 29 luglio 2013 | 1.716 mas                            | 14.737 pc                           | 48.043 anni-luce                           |
| 29 luglio 2014 | 1.782 mas                            | 15.304 pc                           | 49.891 anni-luce                           |
| 3 luglio 2015  | 2.178 mas                            | 18.705 pc                           | 60.978 anni-luce                           |
| 5 luglio 2016  | 2.904 mas                            | 24.940 pc                           | 81.304 anni-luce                           |
| 3 luglio 2017  | 3.036 mas                            | 26.703 pc                           | 84.998 anni-luce                           |

Anche in questo caso possiamo operare una differenza tra il valore finale e il valore iniziale e, dividendola per la frazione annua, ottenere un valore per  $\beta_{apparente}$ :

$$\beta_{apparente} = \frac{53.585 \text{ anni} - \text{luce}}{\Delta t} = 9.00 \quad (6.1.2)$$

Dal 2012 notiamo anche la nascita di un'ulteriore componente C, che non però non discuteremo in questa sede.

## 6.2 Elaborazione dati

Per la componente B, trovandoci di fronte ad un numero maggiore di valori rispetto al caso della componente A, risulta più adeguato operare una media della velocità del getto nell'arco dei 6 anni. Operiamo dunque un fit lineare disponendo i dati in un grafico rappresentate gli anni-luce percorsi in funzione delle epoche di osservazione:

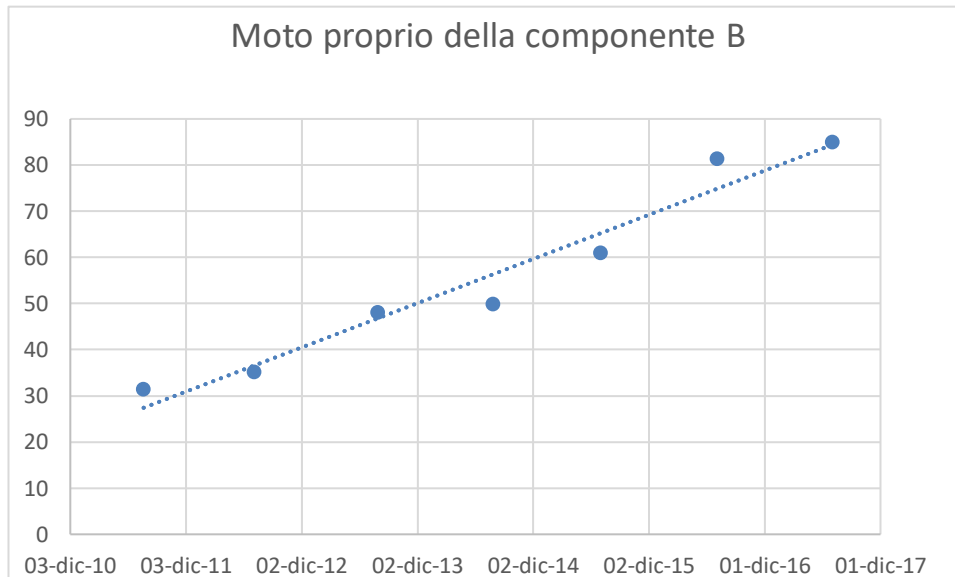


Figura 13: Sulle ascisse sono riportati i momenti dell'anno in cui sono state fatte le osservazioni, mentre sulle ordinate sono riportati gli anni-luce percorsi fino a quel momento.

Il grafico precedentemente riportato, presenta una relazione che lega anni luce percorsi con i tempi delle varie epoche di osservazione. Essa è di seguito riportata:

$$y = 0.026x - 1041.6 \quad (6.2.1)$$

in cui il coefficiente angolare 0.026 può essere moltiplicato per il numero di giorni dell'anno in modo da riuscire a ricavare il fattore  $\beta_{apparente}$  da noi cercato. Otteniamo così un valore di:

$$\beta_{apparente} = 9.49 \quad (6.2.2)$$

Per la componente B possiamo pertanto un valore per  $\beta_{apparente}$  di circa 9.

Fissato dunque questo valore, ci chiediamo quale sia l'angolo che minimizza la velocità reale del getto. Dagli argomenti esposti nella sezione 4.2 di questa trattazione abbiamo infatti spiegato le velocità apparenti superluminali dei getti relativistici caratteristi degli AGN come dovuti ad un moto reale verso l'osservatore con un angolo di apertura compreso tra 0 e 90°.

Riprendiamo ora l'espressione (4.2.5), ricavata nella sezione 4.2 riguardante i moti superluminali dei getti relativistici:

$$\beta_{apparente} = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta} \quad (6.2.3)$$

Essa mette in relazione la velocità apparente con la velocità reale ed un angolo di inclinazione. Ci chiediamo allora a quale angolo si ottiene la velocità reale minima per ottenere il valore apparente precedentemente determinato. Ribaltiamo a questo punto la nostra espressione ottenendo:

$$\beta = \frac{\beta_{apparente}}{\beta_{apparente} \cos \theta + \sin \theta} \quad (6.2.4)$$

Operando la derivata  $\frac{\partial \beta}{\partial \theta}$  otteniamo che il valore per la velocità reale minima si ha per:

$$\theta = \tan^{-1} \left( \frac{1}{\beta_{apparente}} \right) \quad (6.2.5)$$

Avendo ottenuto un  $\beta_{apparente} = 9$ , ricaviamo un angolo di inclinazione del getto rispetto alla linea di vista del valore di:

$$\theta = 6.34^\circ \quad (6.2.6)$$

il quale, sostituito nella (6.2.4), porta ad un valore del fattore relativistico reale di:

$$\beta = 0.99 \quad (6.2.7)$$

# CAPITOLO 7

## Conclusioni

Osservando il cambiamento morfologico della struttura di 4C 38.41, abbiamo individuato due componenti. Esse evolvono con un moto apparente superluminale di circa  $9c$ . Attraverso considerazioni di natura geometrica abbiamo calcolato per quale angolo l'oggetto possiede velocità reale minima, per ottenere una velocità apparente così elevata. Nel caso delle componenti A e B, la velocità reale minima è di  $0.99c$  ottenuta per un angolo di inclinazione di  $6.34^\circ$ .

L'oggetto in questione presenta uno spettro di emissione in cui i getti costituiscono una parte significativa, ragion per cui rientra nel modello unificato per quasar e radiogalassie di tipo FR II, che ricordiamo essere dominate dai getti (lobe-dominated). Secondo questo modello, la distinzione è operata in base all'angolo di inclinazione del getto. Avendo trovato un valore inferiore ai  $45^\circ$ , possiamo ritenere l'oggetto classificabile come quasar.

# APPENDICE A

## Radiazione di sincrotrone

La radiazione di sincrotrone è un tipo di radiazione elettromagnetica la cui particolarità consiste nell'essere generata dall'accelerazione di alcune particelle cariche le quali possiedono una velocità confrontabile con la velocità della luce e per cui hanno un  $\gamma > 1$ . L'accelerazione è centripeta ed è causata dalla presenza di un campo magnetico.

### A.1 Moto di una particella carica in un campo magnetico

Supponiamo di avere una particella in movimento lungo una certa direzione dotata di carica  $q$  e massa  $m$ . Essa è in aggiunta immersa in un campo magnetico  $\mathbf{B}$ , e pertanto risente della forza di Lorentz:

$$\mathbf{F} = \frac{q}{c} \mathbf{v} \times \mathbf{B} = \frac{q}{c} |\mathbf{v}| |\mathbf{B}| \sin \theta \quad (\text{A. 1.1})$$

La componente della velocità lungo la direzione parallela al campo magnetico, non subisce variazioni. Per cui l'accelerazione è dovuta esclusivamente alla componente perpendicolare al campo magnetico. Componendo insieme il moto circolare uniforme della carica con il moto rettilineo uniforme lungo la linea del campo magnetico si ottiene un moto totale di tipo elicoidale.

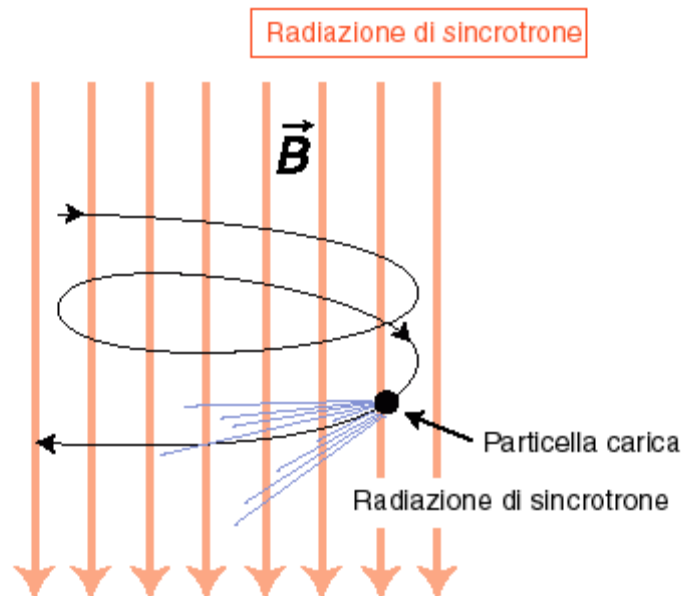


Figura 14: Moto elicoidale che una particella carica assume all'interno di un campo magnetico

Consideriamo come particella un elettrone di carica  $e$ , soggetto a accelerazione centripeta. Questa accelerazione provoca l'emissione di radiazione, la cui potenza può essere scritta in questo modo:

$$W = \frac{dE}{dt} = -\frac{2e^4}{3m^4c^7}E^2B_{\perp}^2 \quad (A.1.2)$$

La (A.1.2) è un'equazione differenziale in funzione dell'energia E. Da questa espressione possiamo ricavarci il tempo di dimezzamento, ovvero il tempo impiegato dall'elettrone per dimezzare la propria energia iniziale. Sapendo che l'energia di una particella relativistica in moto equivale a:

$$E = \gamma mc^2 \quad (A.1.3)$$

il tempo di dimezzamento può essere scritto come:

$$T = \frac{3m^3c^5}{2e^4B_{\perp}^2\gamma} \quad (A.1.4)$$

Come si nota, più è intenso il campo magnetico e più è veloce l'elettrone, meno tempo impiegherà l'elettrone per dimezzare il valore della sua energia.

La radiazione originata dall'accelerazione centripeta arriva fino a noi ed è osservabile se il cono di emissione punta verso la nostra direzione. In questo caso l'emissione di sincrotrone, per effetto del beaming relativistico, si distribuisce spazialmente in un cono dall'apertura angolare più piccola se vista dal sistema solidale con l'osservatore. Più l'elettrone è veloce più questo effetto è osservabile. L'angolo visto dall'osservatore  $\alpha_o$  e l'angolo nel sistema solidale con l'elettrone  $\alpha_e$  sono legati dalla seguente relazione:

$$\tan \alpha_o = \frac{\sqrt{1-\beta^2} \sin \alpha_e}{\cos \alpha_e + \beta} \quad (A.1.5)$$

in cui  $\beta$  è il fattore relativistico  $\frac{v}{c}$ . Notiamo come se  $\beta$  tende a 0, cioè l'elettrone ha velocità non confrontabili con quelle della luce, l'effetto di beaming relativistico è praticamente nullo e non c'è differenza tra gli angoli di sistemi di riferimento diversi.

La radiazione di sincrotrone ha uno spettro di emissione continuo, come si evince dalla figura 15.

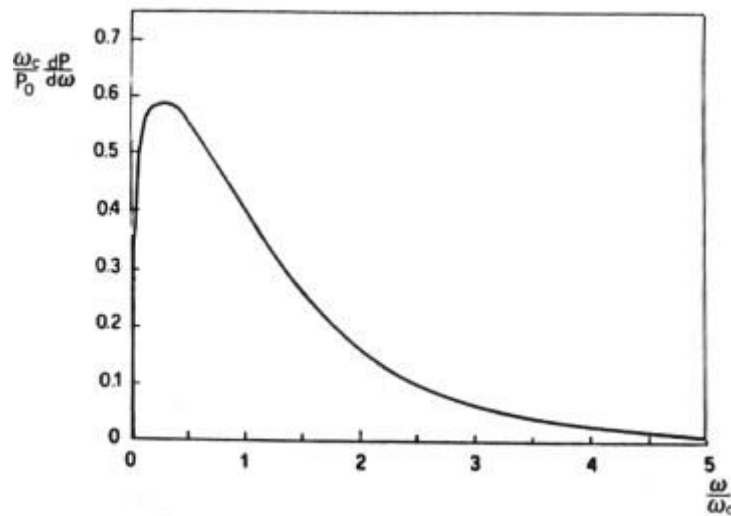


Figura 15: Spettro di emissione di sincrotrone



Questo spettro è dotato di una frequenza critica equivalente all'inverso del tempo  $\tau$  in cui si osserva l'emissione:

$$\omega_c = \frac{1}{\tau} = \frac{3e^3 B_{\perp}}{m^3 c^5} \quad (\text{A.1.6})$$

la quale è legata alla frequenza in cui si ha il picco di emissione in questo modo:

$$\omega_{max} = \frac{\omega_c}{4\pi} = \frac{3e^3 B_{\perp}}{4\pi m^3 c^5} \quad (\text{A.1.7})$$

## A.2 Radiazione emessa da un insieme di elettroni

La radiazione di sincrotrone è chiamata così per il nome dello strumento utilizzato per accelerare gli elettroni in laboratorio. Esso è sostanzialmente un disco dal raggio molto grande in cui gli elettroni sono "costretti" a girare. La radiazione emessa è, come detto nel paragrafo precedente, originata dall'accelerazione centripeta di questi elettroni e viene incanalata in ramificazioni esterne chiamate "beamline" in cui sono presenti strumenti per le opportune misurazioni.

In ambito astronomico, la radiazione di sincrotrone è un fenomeno osservato naturalmente. I forti campi magnetici presenti all'interno degli AGN interagiscono con elettroni relativistici dando origine a questa radiazione. Se dovessimo considerare il numero di elettroni che emette energie comprese tra  $E$  e  $E + \Delta E$ , scriveremmo:

$$N(E)dE = N_0 E^{-\delta} dE \quad (\text{A.2.1})$$

in cui  $N_0$  e  $\delta$  sono delle costanti.

Ad una data frequenza, qual è il valore della potenza emessa? Integrando tutti i contributi degli elettroni, si ottiene una potenza di questo genere:

$$W(\omega) \propto N_0 (B \sin \theta)^{\frac{\delta+1}{2}} \omega^{-\left(\frac{\delta+1}{2}\right)} \quad (\text{A.2.2})$$

Notiamo perciò che la potenza emessa per radiazione di sincrotrone ha un andamento di tipo esponenziale negativo:

$$W(\omega) \propto \omega^{-\alpha} \quad (\text{A.2.3})$$

in cui  $\alpha = \frac{\delta-1}{2}$  è l'indice spettrale il quale per radiosorgenti solitamente vale 0.75.

# BIBLIOGRAFIA

- [1] *Stelle, galassie e universo* Attilio Ferrari. Springer 2011
- [2] Progetto Blazar/Università di Boston: <https://www.bu.edu/blazars/VLBAproject.html>
- [3] <http://archive.oapd.inaf.it/MOSTRA/NEW/A5021QSO.HTM>
- [4] <http://archive.oapd.inaf.it/MOSTRA/NEW/A5022RAD.HTM>
- [5] *Exploring the Variability of the Flat-spectrum Radio Source 1633+382. II. Physical Properties*, J. Alaba, S. Lee, B. Rani, D. Kim, M. Kino, J. Hodgson, 2018
- [6] [https://it.wikipedia.org/wiki/Galassia\\_di\\_Seyfert](https://it.wikipedia.org/wiki/Galassia_di_Seyfert)
- [7] [https://it.wikipedia.org/wiki/Radiazione\\_di\\_sincrotrone](https://it.wikipedia.org/wiki/Radiazione_di_sincrotrone)