

Scuola di scienze
Corso di Laurea in Fisica

**OSSERVAZIONI RADIO DI BL LACERTAE DURANTE UN EPISODIO DI
VARIABILITÀ MULTI-FREQUENZA**

Relatore:
Chiar.mo Prof. GABRIELE GIOVANNINI

Correlatore:
Dr. MARCELLO GIROLETTI

Tesi di Laurea di:
IVAN GIOVANNI NICOLA DI RICO

Sessione III
Anno Accademico 2012-2013

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

Indice

Introduzione	1
1 I Nuclei Galattici Attivi	3
1.1 Morfologia	3
1.2 La classificazione degli AGN	6
1.3 Le unificazioni	9
2 La radioastronomia, il monitoraggio dei Blazar e il radiotelescopio di Medicina	11
2.1 Le campagne di osservazione dei Blazar	12
2.2 Il radiotelescopio di Medicina	15
3 L'analisi di BL Lacertae	18
3.1 Procedura di analisi	18
3.2 Dati ricavati	23
3.3 Indice di variabilità	25
3.4 Discussione dei risultati	26
4 Riassunto e conclusioni	31
Bibliografia	33
Fonti delle immagini	33

Introduzione

La presente tesi unisce in sé una parte compilativa e una sperimentale.

Il lavoro sperimentale è consistito nell'analisi di dati relativi all'emissione radio dell'oggetto astronomico BL Lacertae. Scopo di tale analisi è stato quello di ricavare il comportamento dell'emissione radio dell'oggetto per il periodo in cui sono stati presi i dati (da circa metà dicembre 2012 a circa metà aprile 2013).

BL Lacertae ricade sotto la categoria di oggetti del profondo cielo chiamati Nuclei Galattici Attivi (AGN). Si dà dunque inizialmente una descrizione degli AGN: della loro morfologia, proprietà e classificazione. Nell'ambito di questa classificazione BL Lacertae rientra tra i cosiddetti *blazar*; al fine di dare uno sguardo teorico completo all'oggetto si espongono allora i *modelli di unificazione* relativi ai blazar.

Nel Capitolo 2 si dà una descrizione della radioastronomia, del suo ruolo nel monitoraggio dei blazar (con menzione delle motivazioni di tale monitoraggio), e infine del radiotelescopio di Medicina, che è stato lo strumento col quale sono stati prelevati i dati di questa tesi.

Il capitolo successivo riguarda il lavoro sperimentale eseguito. Esso è introdotto da un sunto delle cause storiche del presente lavoro di tesi. Seguono procedure di analisi, elenco dei dati ricavati, calcolo dell'*indice di variabilità* e discussione dei risultati.

La tesi è infine chiusa da un capitolo riassuntivo e di presentazione delle conclusioni tratte.

Capitolo 1

I Nuclei Galattici Attivi

La locuzione *Nucleo Galattico Attivo* (in letteratura *Active Galactic Nucleus*, AGN) indica tradizionalmente l'oggetto centrale delle cosiddette galassie attive, e la fonte della loro estrema luminosità, che può essere superiore anche di un fattore 1000 rispetto a quella delle normali galassie.

Gli AGN sono dunque sorgenti estremamente energetiche, la cui attività non può essere ricondotta a quella dei normali processi termici di stelle, polveri e gas interstellare (si dice che presentano emissione *non-termica*). Poiché così energetici, essi hanno presumibilmente una durata breve, cosa che combacerebbe con l'osservazione che le galassie attive occupano una percentuale piuttosto bassa sul totale delle galassie dell'universo osservabile – meno dell'1%.

Qui di seguito si presenta una breve descrizione degli AGN. Si parlerà poi della loro classificazione, della correlazione di questa con i cosiddetti modelli unificati, e infine ci si concentrerà sugli oggetti BL LAC.

1.1 Morfologia

Il centro e motore di un AGN è costituito da un SMBH, un *Super Massive Black Hole*. Il buco nero è circondato da un *disco di accrescimento* di materia calda, e con quest'ultimo si trova nascosto all'interno di un cosiddetto *toro oscurante* di polveri rotanti. Sopra e sotto il disco di accrescimento si trovano due regioni piene di nuvole di gas e polveri, la più vicina al buco nero chiamata BLR (*Broad Line Region*) e la più lontana NLR (*Narrow Line Region*). Tutte le strutture menzionate hanno dimensioni dell'ordine del pc.

Parte dei nuclei galattici attivi sono anche i *getti*. Questi sono delle espulsioni di materiale con velocità ultra-relativistiche, provenienti dalle circostanze del buco nero e dirette lungo l'asse di rotazione del toro oscurante, che, disperdendosi nella parte finale, vanno a formare dei *lobi*, e degli *hot spots* se si addensano in punti caldi. I getti hanno dimensioni tipiche che vanno dal kpc al Mpc.

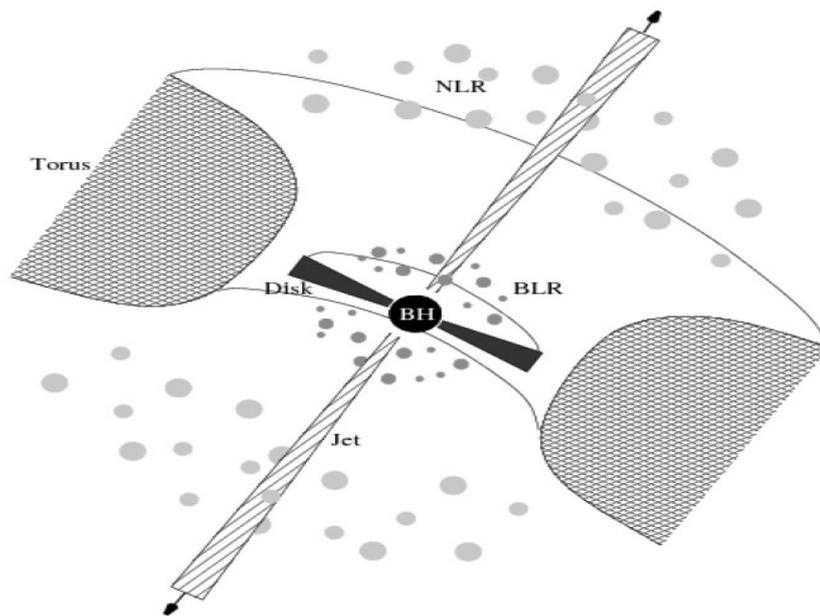


Fig. 1.1 Schema comunemente accettato di AGN. Non sono illustrati i lobi e gli eventuali hotspots.

Il Super Massive Black Hole

Gli AGN più potenti possono avere una luminosità di 10^{47} erg s^{-1} , implicante masse dell'ordine di $10^9 M_{\odot}$, d'altra parte il loro raggio è dell'ordine dei 10^{12} metri. Le densità conseguenti indicano dunque la presenza, al centro dell'AGN, di un buco nero super massivo. Il buco nero sostiene la struttura dell'AGN grazie all'immensa quantità di energia gravitazionale liberata dalla materia che vi cade all'interno.

Disco di accrescimento

Si tratta di materia rotante a velocità ultra-relativistiche e in caduta a spirale nel buco nero. Le enormi velocità generano varie forme di instabilità fluide e magneto-idrodinamiche che si traducono nella conversione dell'energia rotazionale in energia termica e in emissione di radiazione. Spesso, il disco risulta invisibile per via del toro oscurante, ma può essere rilevato grazie al *blue-bump*, un picco caratteristico di emissione ultravioletta.

Toro oscurante

Materia rotante come il disco d'accrescimento, trovandosi più distante dal buco nero ha velocità e densità molto minori, da cui la sua estensione molto più ampia. Ha una forma a ciambella e assorbe quasi totalmente le radiazioni provenienti dal disco d'accrescimento, per cui se la linea di vista nei confronti dell'AGN giace sul piano di rotazione, la luminosità del nucleo galattico attivo risulterà notevolmente ridotta.

Broad e Narrow Line Regions

Si tratta di regioni piene di materiale non in caduta nel buco nero ma ruotante attorno al suo asse di rotazione con velocità elevate. Ionizzandosi, il materiale emette radiazione con delle righe di emissione caratterizzanti.

Le BLR sono regioni a righe di emissione larghe, più vicine al nucleo, con velocità tipiche di 5000 km s^{-1} e densità dell'ordine di 10^{10} particelle su cm^3 . Le NLR sono regioni a righe di emissione strette, più lontane dal nucleo, con velocità tipiche minori e densità molto basse, anche dell'ordine di 10^4 particelle su cm^3 .

Getti, lobi, pennacchi e hotspots

Parte del materiale del disco di accrescimento viene accelerato, durante la sua caduta, in maniera sufficiente a sfuggire alla morsa gravitazionale del buco nero, e viene proiettato lungo l'asse di rotazione dello stesso a velocità ultra-relativistiche. In tal modo si formano i cosiddetti *getti*, i quali vengono osservati per via dei forti campi magnetici presenti, che fanno emettere al plasma di cui sono costituiti radiazione non-termica di sincrotrone perlopiù in banda radio, ma in alcuni casi anche in ottico, in X e in gamma. Nella parte finale i getti si disperdono in *lobi*, detti *plumes* o *pennacchi* se particolarmente ampi, e talvolta formano zone ad alta densità, gli *hotspots* che emettono radiazione indipendentemente dal resto dell'AGN.

Un fenomeno molto interessante rivelato nei getti radio grazie a osservazioni ad altissima risoluzione angolare è quello dei cosiddetti *moti superluminali* delle componenti: alcune sottostrutture sembrano muoversi a velocità $v_{app} > c$, un paradosso solo apparente che viene spiegato tramite la combinazione di effetti di proiezione e velocità molto alte (ma comunque $< c$) lungo una direzione vicina alla linea di vista. Il moto relativistico dei getti produce molti complessi cambiamenti nel sistema di riferimento degli osservatori, in particolare amplificando molto la luminosità totale quando il getto è osservato lungo l'asse di rotazione del SMBH o con angolazioni piccole rispetto allo stesso.

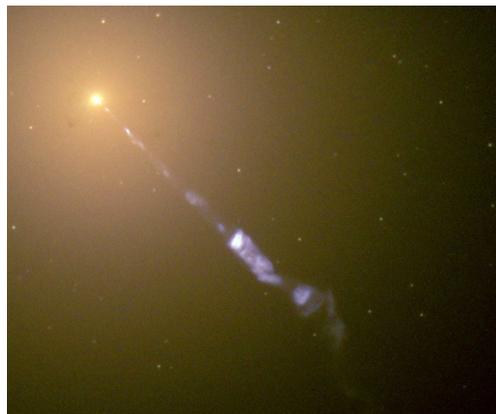


Fig. 1.2 La radiogalassia M87 emette un getto di 5000 anni luce ($\approx 4,7 \times 10^{18} \text{ m}$). Qui un'immagine in ottico.

1.2 La classificazione degli AGN

Gli AGN vengono separati in due grandi gruppi, a seconda della loro emissione nel radio: gli *oggetti radio forti* o RLO (*Radio Loud Objects*), detti anche *radiosorgenti*, la cui attività nel radio è molto intensa, e gli *oggetti radio quieti* o RQO (*Radio Quiet Objects*), che presentano un'emissione radio molto debole se non del tutto mancante.

I RLO vengono suddivisi in base all'elemento strutturale che contribuisce maggiormente alla loro emissione: si parla di radiosorgenti *estese* o *lobe-dominated* quando l'emissione radio proviene prevalentemente dai lobi, si parla di radiosorgenti *compatte* o *core-dominated* quando la loro emissione proviene perlopiù dal nucleo.

All'interno dei due gruppi di RQO e RLO sono possibili ulteriori suddivisioni: tra gli AGN di tipo RQO si identificano le Galassie di Seyfert, le Quasar *Radio Quiet*, le Galassie LINER (*Low-Ionization Nuclear Emission Region*) e le ULIRG (*Ultra Luminous Infra-Red Galaxies*). Tra gli AGN di tipo RLO abbiamo radiogalassie di tipo FR I e FR II, Quasar *Radio Loud* e Blazar. Questi ultimi comprendono gli oggetti di tipo BL-Lac, argomento di questa tesi. Ci si concentrerà dunque sull'analisi degli oggetti RLO e sulle correlazioni esistenti tra di essi.

Le Radiogalassie

Le radio galassie sono galassie caratterizzate dalla presenza di forte emissione radio con spettro a legge di potenza $F(\nu)\mu\nu^{-\alpha}$ e un elevato grado di polarizzazione lineare. Queste due caratteristiche indicano che la radiazione emessa è di tipo sincrotrone. Le luminosità radio sono maggiori di quelle in ottico, così come le dimensioni dell'emissione radio possono raggiungere i 10^6 parsec, ovvero grandezze molto più estese della galassia ospite.

Le radiogalassie vengono suddivise a seconda di dimensioni, potenza di emissione e morfologia, in due sottoclassi secondo una suddivisione originariamente proposta da Fanaroff e Riley: radiogalassie di tipo FR I e radiogalassie di tipo FR II.

- **FR I:** Hanno potenze tipiche di circa 10^{42} erg s⁻¹; sono le meno estese e luminose, *lobe-dominated* e dominate dai getti anche visivamente. Questi ultimi sono infatti molto grandi e brillanti; sono inoltre turbolenti, con morfologie distorte e irregolari (interpretate come dovute all'interazione col mezzo intergalattico), avvolti in intensi campi magnetici provenienti dal nucleo.
- **FR II:** Con potenze tipiche di 10^{47} erg s⁻¹ sono anche più grandi delle FR I; la loro emissione radio proviene prevalentemente dagli hotspots nei lobi. I lobi sono molto grandi relativamente alla struttura complessiva, ben collimati e dotati di campi magnetici allineati. Spesso si osserva un solo getto; si interpreta l'apparente mancanza dell'altro come risultato dell'attenuazione per effetto Doppler della radiazione da esso emessa (i getti hanno velocità ultrarelativistiche).

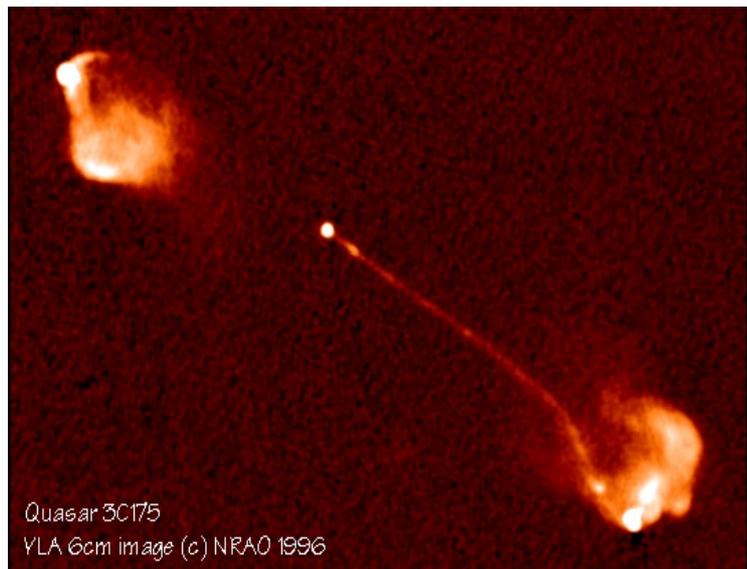
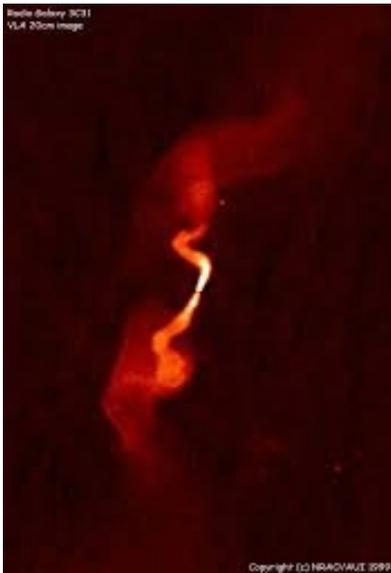


Fig. 1.3 Immagini nel radio di due radiogalassie. A sinistra, 3C31, una radiogalassia di tipo FR I. A destra, una radiogalassia di tipo FR II, 3C175.

Le Quasar

La sigla QUASAR sta per *QUAsi Stellar radio source*. Difatti le prime Quasar vennero rilevate all'inizio degli anni '50 come sorgenti radio molto potenti ma al contempo molto piccole, abbastanza da far sì che il loro nucleo non potesse essere risolto dai telescopi a terra. Furono quindi inizialmente credute stelle. Successivamente però se ne analizzò lo spettro e si trovò un forte spostamento verso il rosso delle righe spettrali. Ciò poneva le Quasar su distanze di ordine cosmologico e le identificava come tra le più potenti sorgenti luminose conosciute, con una luminosità 1000 volte superiore a quella delle normali galassie. Sono perciò ascrivibili a AGN.

Sebbene inizialmente scoperte nel radio, le Quasar emettono su tutte le bande e la loro caratteristica è quella di avere un picco di emissione nell'ultravioletto, e non nel radio. Si è in seguito scoperto che solo il 10% delle Quasar può essere identificata come una forte radiosorgente, e la maggior parte delle Quasar hanno un'attività radio molto ridotta, venendo chiamate *Radio Quiet Quasar*.

Le Quasar sono tutte sorgenti variabili, e variabili in modo irregolare, con tempi scala dei giorni e in taluni casi delle ore.

Gli oggetti di tipo BL Lac

Gli oggetti di tipo BL Lac (o più brevemente “BL Lacs”) sono anch'essi AGN *core-dominated*, molto compatti, con una forte componente radio. Presentano luminosità elevate anche in ottico, in X e in gamma e generalmente presentano emissione variabile in modo estremo e totalmente irregolare su tutte le bande. Inizialmente anch'essi creduti di natura stellare, decenni dopo furono associati a sorgenti radio e si vide che presentavano molte caratteristiche rassomiglianti a quelle delle Quasar. Presentano forte emissione nel radio e una notevole componente in X e in gamma; sono caratterizzati dall'aver una radiazione non termica fortemente polarizzata – circa 30-40% di polarizzazione lineare – sia nel radio che nell'ottico.

Queste caratteristiche li accomunano ai quasar radio loud, insieme ai quali formano la cosiddetta classe dei “**blazar**”. A differenza delle Quasar, i BL Lacs hanno una luminosità inferiore (ma comunque al di sopra di 10^{42} erg s^{-1}) e uno spettro ottico dotato di righe di emissione e di assorbimento estremamente deboli (in contrasto con quelle delle Quasar, invece molto larghe), cosa che ha reso molto difficile analizzare la loro distanza col metodo del redshift. Parimenti difficile è risolvere osservativamente il loro circondario, cosa che possono fare solo gli strumenti più sensibili. Dei BL-Lac risolti, circa il 90% risiede in galassie ellittiche. Il loro prototipo è BL Lacertae, il primo oggetto di questo tipo a essere stato scoperto.

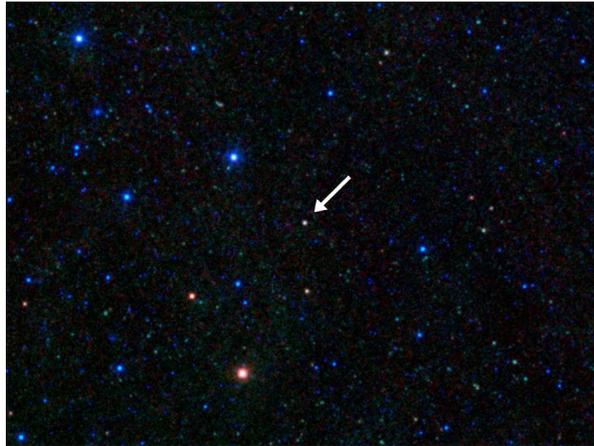


Fig. 1.4 Un blazar trovato con il telescopio spaziale WISE (Wide-field Infrared Survey Explorer) della NASA.

BL Lacertae

Prototipo e rappresentante di tutti gli oggetti di tipo BL-Lac. Si trova all'interno della Costellazione della Lucertola alle coordinate di Ascensione Retta 22h 02m 43.29s e Declinazione $+42^{\circ} 16' 40''$. L'AGN fu rilevato per la prima volta nel 1929, e si pensò che fosse una stella variabile. Venne poi identificato con una sorgente radio nel 1968, e nello stesso periodo si rilevarono tracce di una galassia ospite [5]. Nel 1974 venne misurato il suo redshift, che risultò pari a $z = 0.07$, corrispondente ad una velocità di recessione di 21 000 km/s rispetto alla Via Lattea [6] e una distanza di 290 Mpc. La sua magnitudine apparente varia tra 14 e 17. In radio la sua densità di flusso a 1.4 GHz è di 6.05 ± 0.18 Jy (Fonte: NRAO VLA Sky Survey). In seguito la sorgente è stata rivelata anche come sorgente X e gamma.



Fig. 1.5 BL Lacertae.

1.3 Le unificazioni

Lo studio delle caratteristiche dei diversi tipi di AGN ha portato nel tempo all'identificazione di analogie tra di essi. Molti AGN vengono oggi pensati come lo stesso tipo di oggetto, visto da angolazioni differenti. Di seguito la descrizione di due di queste unificazioni concettuali, pertinenti a questa tesi.

Unificazione FR II – Quasar

Ipotizzata per la prima volta da Barthel. La sorgente appare una radiogalassia di tipo FR II se osservata da un'angolazione grande rispetto al suo asse e una Quasar se osservata da un'angolazione piccola. Barthel verificò la sua ipotesi analizzando un campione di sorgenti con orientazione casuale, e trovò che il 29% delle sorgenti erano quasar e il 71% erano radiogalassie di tipo FR II. Considerando che la probabilità di vedere una sorgente secondo un certo angolo di vista θ minore di φ era $P(\theta < \varphi) = 1 - \cos \varphi$, stimò l'angolo critico per la distinzione dei due oggetti (FR II e Quasar) in $\theta_c = 44.4^\circ$, e comunque compreso tra 40° e 50° .

In questo studio si riscontrano tuttavia alcuni problemi. Le Quasar prossime alla linea di vista dovrebbero avere dimensioni lineari piccole, ma ciò non è quello che si osserva. Inoltre nei modelli di unificazione, quando si osservano gli AGN ad angoli piccoli il getto in avvicinamento dovrebbe essere intensificato dal Doppler beaming. Questo è effettivamente ciò che accade nell'unificazione ipotizzata da Barthel, ma l'asimmetria tra il getto in avvicinamento e quello in allontanamento risulta essere troppo elevata per essere spiegata col solo Doppler beaming.

Unificazione FR I – BL Lac

La sorgente appare una radiogalassia di tipo FR I se osservata da un'angolazione grande rispetto al suo asse, un oggetto di tipo BL Lac se osservata da angolazioni piccole.

Gli astrofisici Padovani e Urry valutarono l'angolo critico dal quale cambia la natura apparente dei due AGN in $\theta_c \approx 30^\circ$. Questa unificazione è suggerita dall'emissione radio con proprietà isotrope analoghe nei due oggetti, dalla funzione di luminosità radio e X simile, dall'asimmetria di polarizzazione dei lobi accoppiati, dai moti relativistici nei nuclei di molte FR I, dall'appartenenza dei due oggetti a galassie simili (ellittiche giganti con magnitudine $M \approx -25$) e a ammassi moderatamente ricchi e con basso redshift.

Capitolo 2

La radioastronomia, il monitoraggio dei Blazar e il radiotelescopio di Medicina

Per *radioastronomia* si intende l'astronomia effettuata attraverso l'uso di tutte quelle tecniche coinvolte nella rilevazione delle onde radio, ovvero delle onde elettromagnetiche di lunghezza d'onda compresa nel *range* $10^{-3} \text{ m} \div \infty$.

La radioastronomia terrestre coinvolge la rilevazione di un range più ristretto, causa l'assorbimento, da parte dell'atmosfera terrestre, di molte lunghezze d'onda. Da terra è oggi possibile rilevare onde radio con frequenza compresa tra 300 GHz, relativa alla lunghezza d'onda di 10^{-3} m , e 15 MHz (lunghezza d'onda $\lambda \approx 20 \text{ m}$).

Se si volesse dare una data d'inizio alla radioastronomia, questa sarebbe il 1931. In quell'anno, il fisico e radio ingegnere Karl Guthe Jansky mostrò che la radiazione elettromagnetica a una lunghezza d'onda di $\lambda = 14.6 \text{ m}$, ricevuta da griglie di antenne radio sensibili, doveva essere emessa da sorgenti extraterrestri non-solari. Nel 1937, un altro radio ingegnere, Grote Reber, riprese il lavoro di Jansky e decise di effettuare rilevazioni per una lunghezza d'onda più corta, di 1.87 m, ottenendo in verità risultati astronomicamente più interessanti di quelli del collega. Durante la seconda guerra mondiale, nel tentativo di costruire strumenti radar sempre più efficienti si ebbero notevoli sviluppi nella fisica delle onde radio, e dopo la guerra fu quindi possibile sfruttare un *range* di lunghezze d'onda nella banda del radio sempre più ampio.

La radioastronomia risulta importante ai fini dello studio del profondo cielo, in quanto la radiazione radio viene tipicamente emessa da processi cosiddetti *non-termici*, ovvero che non coinvolgono la liberazione di energia termica e che quindi sono invisibili in tutte le altre lunghezze d'onda. Per le considerazioni cui si è accennato nel capitolo 1, la radioastronomia ha quindi rivestito un ruolo fondamentale nella scoperta degli AGN, e tuttora è importantissima ai fini del loro studio. La radiazione di sincrotrone, emessa da particelle cariche muovendosi attorno a linee di forza di un campo di induzione magnetica secondo traiettorie curve, viene emessa prevalentemente nella banda radio (anche se può arrivare fino alle bande X); questa radiazione è responsabile di una larghissima parte dell'emissione degli AGN, soprattutto di quella proveniente dai getti.

Lo strumento principale della radioastronomia è il radiotelescopio, ovvero un telescopio specializzato nel rilevare le onde radio provenienti dalle varie radiosorgenti dell'Universo. Il radiotelescopio può presentarsi in due forme: una singola antenna parabolica con dimensioni dell'ordine di $10 \div 10^2 \text{ m}$, o una struttura di più antenne collegate con la tecnica dell'*interferometria*, che può raggiungere dimensioni dell'ordine di $10^2 \div 10^5 \text{ m}$. I dati analizzati nella presente tesi sono stati raccolti da un'antenna singola presente nella Stazione radioastronomica di Medicina, di cui viene presentata una breve descrizione nella sezione 2.2.



Fig 2.1: Il radiotelescopio di Arecibo, in Puerto Rico. Con un diametro di 305 m è il più grande radiotelescopio ad antenna singola del mondo.

2.1 Le campagne di osservazione dei Blazar

Lo schema comunemente accettato di AGN presenta molti dettagli poco compresi e irrisolti. Per spiegare tali dettagli, sono stati elaborati diversi modelli relativi alla dinamica degli AGN e in particolare dei getti. Uno degli strumenti fondamentali per restringere il numero di questi modelli ritenuti plausibili è quello dello studio della variabilità dell'emissione degli AGN, per il quale sono state realizzate molte campagne di osservazione a lungo termine e su più frequenze.

Difatti, dai tempi scala delle variazioni è possibile ricavare numerose informazioni sui meccanismi alla base delle caratteristiche osservate degli AGN. Variazioni irregolari e flares isolati possono ad esempio indicare l'iniezione improvvisa di nuova materia nei getti, mentre da variazioni periodiche si possono ricavare maggiori dettagli sulla dinamica (ad esempio se vi è una precessione del SMBH). È possibile inoltre analizzare le dimensioni degli AGN: variazioni rapide indicano perturbazioni veloci nel propagarsi lungo l'AGN e dunque che esso è un oggetto compatto; variazioni lente indicano un oggetto probabilmente grande, anche per velocità su scala relativistica.

La campagna più grande ed estesa di osservazione della variabilità dei blazar in particolare – di cui fa parte BL Lacertae - è stata condotta nelle frequenze radio. Alcuni progetti, come quello della Michigan University, condotto sulle frequenze di 4.8, 8.0 e 14.5 GHz e su oltre 200 sorgenti, si sono prolungati per decenni e continuano tuttora. L'Università di Bologna vanta una campagna svoltasi tra il 1975 e il 1990, condotta su 125 sorgenti alla frequenza di 408 MHz.

Queste campagne, compresa quella condotta dall'Università di Bologna, hanno però avuto un problema: sono state effettuate prelevando dati delle varie sorgenti, e alle varie frequenze, non simultanei tra di loro, distanziati anche di un mese o più. Per lo studio dei modelli descrittivi la

dinamica degli AGN questa non costituisce una procedura ideale, in quanto non si riesce a combinare i dati per avere una visione d'insieme di quello che sta accadendo.

A dicembre 2004 [8] è stata allora iniziata una campagna di osservazione mensile condotta simultaneamente su 35 AGN e su più frequenze radio (5, 8, 22 e 43 GHz) ai radiotelescopi di Medicina e Noto (U. Bach et al.). La campagna è stata affiancata da contemporanee osservazioni in ottico e nel vicino infrarosso, di cui non si parlerà nella presente tesi, e i dati sono stati completati da osservazioni alle alte energie condotte dai satelliti AGILE, dell'ASI, e *Fermi* GST (*Gamma ray Space Telescope*), un telescopio spaziale della NASA con partecipazione dell'ASI. I dati ottenuti hanno infine permesso di costruire delle SEDs (*Spectral Energy Distributions*), ovvero dei grafici della luminosità o della densità di flusso delle sorgenti in funzione della frequenza osservata, dipendenti dal tempo che finalmente potevano essere usate come test per i vari modelli della dinamica degli AGN.

IAU Name	Other Name	RA and Dec (J2000) [h:m:s] [d:m:s]	Type	z
0219+428	3C 66A	02:22:39.6 +43:02:08	Q	0.44
0235+164	AO0235+16	02:38:38.9 +16:36:59	Q	0.94
0336-019	CTA 026	03:39:30.9 -01:46:36	Q	0.85
0420-014	PKS 0420-01	04:23:15.8 -01:20:33	Q	0.91
0440-003	NRAO 190	04:42:38.6 -00:17:43	Q	0.84
0528+134	PKS 0528+134	05:30:56.4 +13:31:55	Q	2.06
0716+714	S5 0716+71	07:21:53.4 +71:20:36	BL	>0.3
0735+178	PKS 0735+17	07:38:07.3 +17:42:19	BL	0.42
0736+017	PKS 0736+01	07:39:18.0 +01:37:05	Q	0.19
0827+243	OJ 248	08:30:52.1 +24:11:00	Q	0.94
0829+046	OJ 49	08:31:48.9 +04:29:38	BL	0.17
0836+710	S5 0836+71	08:41:24.3 +70:53:42	Q	2.17
0851+202	OJ 287	08:54:48.8 +20:06:31	BL	0.31
0954+658	S4 0954+65	09:58:47.2 +65:33:55	BL	0.37
1156+295	4C +29.45	11:59:31.8 +29:14:44	Q	0.73
1219+285	W Com	12:21:31.7 +28:13:58	BL	0.10
1226+023	3C 273	12:29:06.7 +02:03:09	Q	0.16
1253-055	3C 279	12:56:11.1 -05:47:21	BL	0.54
1334-127	PKS 1335-127	13:37:39.8 -12:57:25	BL	0.54
1354+195	4C +19.44	13:57:04.4 +19:19:07	Sy	0.72
1510-089	PKS 1510-08	15:12:50.5 -09:06:00	Q	0.36
1606+105	4C +10.45	16:08:46.1 +10:29:08	Q	1.23
1611+343	DA 406	16:13:41.0 +34:12:48	Q	1.40
1633+382	S4 1633+38	16:35:15.4 +38:08:04	Q	1.81
1641+399	3C 345	16:42:58.8 +39:48:37	Q	0.59
1730-130	NRAO 530	17:33:02.6 -13:04:49	Q	0.90
1741-038	PKS 1741-03	17:43:58.8 -03:50:05	Q	1.05
1807+698	3C 371	18:06:50.7 +69:49:28	BL	0.05
2200+420	BL Lac	22:02:43.2 +42:16:40	BL	0.07
2223-052	3C 446	22:25:47.2 -04:57:01	BL	1.40
2230+114	CTA 102	22:32:36.4 +11:43:50	Q	1.04
2251+158	3C 454.3	22:53:57.7 +16:08:54	Q	0.86
2344+092	4C 09.74	23:46:36.8 +09:30:45	Q	0.68

Fig. 2.2: Il campione di AGN analizzato nella campagna iniziata nel dicembre 2004. Da sinistra a destra: Nome IAU della sorgente, altri nomi assegnati, posizione nel cielo, tipologia di sorgente (Quasar, BL Lac o Galassia di Seyfert), redshift.

Nel dicembre 2011 è stata introdotta, nell'ambito di questa campagna, la tecnica del *cross-scan*, di cui si parla nella sezione successiva dedicata al radiotelescopio di Medicina. Con la tecnica del *cross-scan*, nel corso dell'anno 2012, è stata in particolare analizzata la variabilità di un campione di radiosorgenti costituito dai blazar (quindi dagli oggetti di tipo Quasar e BL Lac) presenti nella tabella in Fig. 2.2 e da altri blazar per un totale di 36 sorgenti. L'analisi è stata effettuata alla frequenza di 8 GHz, e la si menziona in quanto per essa sono stati utilizzati i medesimi strumenti impiegati per questo lavoro di tesi (si veda il Capitolo 3). Di seguito il campione di blazar analizzato:

Nome IAU	Altro Nome	R.A. & Dec. (J2000) [h:m:s] [d:ms]	Tipo	z
0219+428	3C 66A	02:22:39.6+43:02:08	Q	0.44
0235+164	AO 0235+16	02:38:38.9+16:36:59	Q	0.94
0336-019	CTA 026	03:39:30.9-01:46:36	Q	0.85
0355+508	NRAO 150	03:59:29.7-50:57:50	Q	1.52
0420-014	PKS 0420-01	04:23:15.8-01:20:33	Q	0.91
0440-003	NRAO 190	04:42:38.6-00:17:43	Q	0.84
0528+134	PKS 0528+134	05:30:56.4+13:31:55	Q	2.06
0716+714	S 50716+71	07:21:53.4+71:20:36	BL	>0.3
0735+178	PKS 0735+17	07:38:07.3+17:42:19	BL	0.42
0736+017	PKS 0736+01	07:39:18.0+01:37:05	Q	0.19
0827+243	OJ 248	08:30:52.1+24:11:00	Q	0.94
0829+046	OJ 49	08:31:48.9+04:29:38	BL	0.17
0836+710	S 50836+71	08:41:24.3+70:53:42	Q	2.17
0851+202	OJ 287	08:54:48.8+20:06:31	BL	0.31
0954+658	S 40954+65	09:58:47.2+65:33:55	BL	0.37
1101+384	Mrk 421	11:04:27.3+38:12:32	BL	0.03
1156+295	4C +29.45	11:59:31.8+29:14:44	Q	0.73
1219+285	W Com	12:21:31.7+28:13:58	BL	0.10
1226+023	3C 273	12:29:06.7+02:03:09	Q	0.16
1253-055	3C 279	12:56:11.1-05:47:21	BL	0.54
1334-127	PKS 1335-127	13:37:39.8-12:57:25	BL	0.54
1354+195	4C +19.44	13:57:04.4+19:19:07	Q	0.72
1510-089	PKS 1510-08	15:12:50.5-09:06:00	Q	0.36
1606+105	4C +10.45	16:08:46.1+10:29:08	Q	1.23
1611+343	DA 406	16:13:41.0+34:12:48	Q	1.40
1633+382	S 41633+38	16:35:15.4+38:08:04	Q	1.81
1641+399	3C 345	16:42:58.8+39:48:37	Q	0.59
1652+398	Mrk 501	16:53:52.2+39:45:37	BL	0.03
1730-130	NRAO 530	17:33:02.6-13:04:49	Q	0.90
1741-038	PKS 1741-03	17:43:58.8-03:50:05	Q	1.05
1807+698	3C 371	18:06:50.7+69:49:28	BL	0.05
2200+420	BLLac	22:02:43.2+42:16:40	BL	0.07
2223-052	3C 446	22:25:47.2-04:57:01	BL	1.40
2230+114	CTA 102	22:32:36.4+11:43:50	Q	1.04
2249+185	3C 454	22:51:34.7+18:48:40	Q	1.76
2344+092	4C 09.74	23:46:36.8+09:30:45	Q	0.68

Fig. 2.3: Da sinistra a destra: Nome IAU della sorgente, altri nomi, posizione nel cielo, tipologia di Blazar (Quasar o BL Lac), redshift.

Le conclusioni ottenute sono rinvenibili nella tesi di Matteo Rossini, *Studio della variabilità di blazar con il radiotelescopio di Medicina*.

2.2 Il radiotelescopio di Medicina

La Stazione radioastronomica di Medicina, che ha raccolto i dati utilizzati in questa tesi, è gestita dall'INAF, l'Istituto nazionale di Astrofisica, e comprende due radiotelescopi. Il più grande è chiamato Croce del Nord, ed è costituito di una serie di archi di parabola disposti in due bracci perpendicolari di 560 e 625 metri di lunghezza. L'altro è una singola antenna di 32 metri di diametro, completamente orientabile e dotata di numerosi ricevitori a diverse frequenze; quest'ultimo radiotelescopio è stato quello utilizzato per la raccolta dei dati presentati in questa tesi.

La parabola da 32 metri è impiegata sia per osservazioni interferometriche, che ad antenna singola. In ambito interferometrico l'antenna lavora in contemporanea con le altre antenne del consorzio EVN (*European Very Long Baseline Interferometry Network*), collocate in diversi paesi Europei, allo scopo di produrre immagini ad altissima risoluzione, estremamente utili per analisi molto dettagliate delle sorgenti radio. Il radiotelescopio può ricevere segnali radio in bande comprese tra 1.4 GHz e 23 GHz, ed è sfruttato anche per progetti ad antenna singola quali la spettrometria di sorgenti maser-H₂O e del metanolo, ovviamente lo studio della variabilità di flusso di varie sorgenti compatte extragalattiche, osservazioni polarimetriche di regioni della galassia, lo studio di comete, l'indagine di sistemi planetari extrasolari, l'osservazione radar di asteroidi potenzialmente pericolosi per la Terra (in collaborazione con la NASA).



Fig 2.4: Il radiotelescopio ad antenna singola di Medicina.

(Si faccia riferimento alla Fig. 2.4). Il radiotelescopio possiede un riflettore primario, quello di 32 metri di diametro, costituito da 240 pannelli di alluminio sorretti da una travatura reticolare posteriore. Questa travatura dello specchio primario ne sorregge uno secondario, posto a circa 9 metri di distanza, tramite un sistema a quattro travi inclinate di 45° (quadrupode). Si tratta di un riflettore iperbolico di 3.2 metri di diametro, costituito da un unico pannello, con tre attuatori fissati sul retro che ne consentono lo spostamento angolare. Inoltre tutto l'insieme è in grado di traslare lungo due assi (orizzontale e verticale). Questa struttura particolare consente di impostare, quando risulta necessario o conveniente, la configurazione Cassegrain, che sfrutta la geometria dei due

specchi per far convergere il segnale nel vertice della parabola, in cui vi è maggiore e più accessibile spazio per alloggiare i ricevitori ed eseguirne la manutenzione.

Di recente è stata introdotta la tecnica del *cross-scan*, menzionata nella sezione precedente. Con tale tecnica il radiotelescopio segue ciascuna sorgente per alcuni minuti, effettuando dalle sette alle quindici scansioni dell'area di cielo che la circonda; ciascuna scansione viene effettuata in una direzione perpendicolare a quella seguita nella scansione precedente (mantenendo alternativamente costanti le coordinate astronomiche di Ascensione Retta e Declinazione dei punti osservati). La radiazione viene raccolta su un ricevitore a 8 GHz posto nel fuoco primario della parabola. Questo ricevitore è dotato di due diversi canali di funzionamento, indicati con 0 e 1, sintonizzabili sui due stati di polarizzazione dell'onda elettromagnetica incidente. Grazie a ciò vengono effettuate due misure indipendenti ad ogni scansione della sorgente, permettendo di avere una distribuzione dei risultati e una deviazione standard più affidabili, e aumentando la probabilità di non perdere dati a causa di possibili interferenze, in quanto un disturbo in uno dei due canali non necessariamente si presenta anche in quello in entrata nell'altro.

Capitolo 3

L'analisi di BL Lacertae

Il 9 aprile 2012 il Large Area Telescope (LAT), uno degli strumenti a bordo del telescopio spaziale *Fermi*, rilevò un sensibile aumento del flusso elettromagnetico nella banda del gamma (flusso gamma) proveniente da BL Lacertae, che risultò quel giorno pari a $(2.3 \pm 0.3) \times 10^{-6} \text{ n}_\gamma \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (n_γ indica qui un conteggio di fotoni), circa 13 volte superiore alla media registrata nel secondo catalogo del LAT [11].

Il 10 aprile 2012 ci si accorse che l'8 di aprile, l'oggetto aveva raggiunto un massimo nell'ottico, suggerendo la possibilità che i due massimi fossero correlati [12]. Queste osservazioni dettero il via ad una maggiore attenzione su BL Lacertae su tutte le frequenze.

Alla fine di ottobre 2012 venne iniziato il programma *Target Of Opportunity* (TOO), in cui si iniziò a osservare BL Lacertae anche con l'interferometro terrestre Submillimeter Array e con gli osservatori spaziali Swift e Herschel Space Observatory [13]. Tra il 4 e il 13 novembre si registrò un picco di emissione nella banda del radio con lunghezza d'onda dell'ordine del millimetro, e poi del centimetro; vennero quindi intensificate le osservazioni di BL Lacertae coi radiotelescopi di Medicina e Noto a una alla settimana, allo scopo di vedere se ci sarebbe stato un picco anche nelle densità di flusso radio a 5, 8 e 22 GHz.

In quest'ultimo quadro si inserisce il presente lavoro di tesi, che analizza la variabilità della densità di flusso radio di BL Lacertae durante otto epoche, la prima con data gregoriana 19 dicembre 2012, l'ultima con data 12 aprile 2013. Si è analizzato l'oggetto sulla frequenza di 8 GHz (il che è anche il motivo per cui non sono state analizzate le epoche corrispondenti a tutte le settimane del periodo considerato, in quanto nelle altre si sono effettuate osservazioni sulle altre due bande radio), e i dati sono stati rilevati in modalità *cross-scan*, descritta nella sezione 2.2.

3.1 Procedura di analisi

Per rendere più comprensibile ciò che segue, occorre fare delle precisazioni sui termini “scansione” e “campionamento”. A una scansione della sorgente effettuata dall'antenna, per lo scrivente è corrisposto all'atto pratico un singolo file di dati registrati sul computer; per “campionamento” si intenderà invece una singola rilevazione di conteggi tra le molteplici che sono state effettuate dall'antenna all'interno di ciascuna singola scansione.

Ora, i dati sono stati analizzati in questo modo:

- Per prima cosa si è utilizzato, per ogni epoca, un programma scritto con linguaggio idl che operava sulle varie scansioni. Il programma elaborava ogni scansione estraendone i dati relativi a epoca, elevazione e azimut dell'antenna, rapporto segnale-rumore per ciascuno dei due canali 0 e 1 (quelli di cui si è parlato nella sezione 2.2) e, sempre per ciascuno dei due canali, un particolare numero di conteggi, non corrispondente a nessun singolo campionamento ma bensì all'area del fit gaussiano elaborato con la formula (1) (si veda appresso). Il programma mostrava poi dei grafici dei conteggi per campionamento insieme a

due rette mostranti l'andamento dell'elevazione e dell'azimut dell'antenna al passare del tempo (Fig. 3.1). In un altro file rappresentava i fit gaussiani calcolati con la formula (1) (Fig. 3.2); infine, terminava eseguendo un fit dell'andamento medio di tutte le scansioni relative all'epoca considerata, chiamato "stacked" (lo si tenga ben presente in quanto verrà menzionato ancora in seguito), i cui dati venivano mostrati anch'essi in un file di testo e anche graficati (Fig. 3.4); questi ultimi grafici "stacked" sono stati particolarmente utili per capire se le varie scansioni dell'antenna erano andate a buon fine. Ciò infatti non poteva sempre essere dedotto dai grafici dei conteggi delle singole scansioni, tranne in alcuni casi evidenti come quello mostrato in figura 3.3;

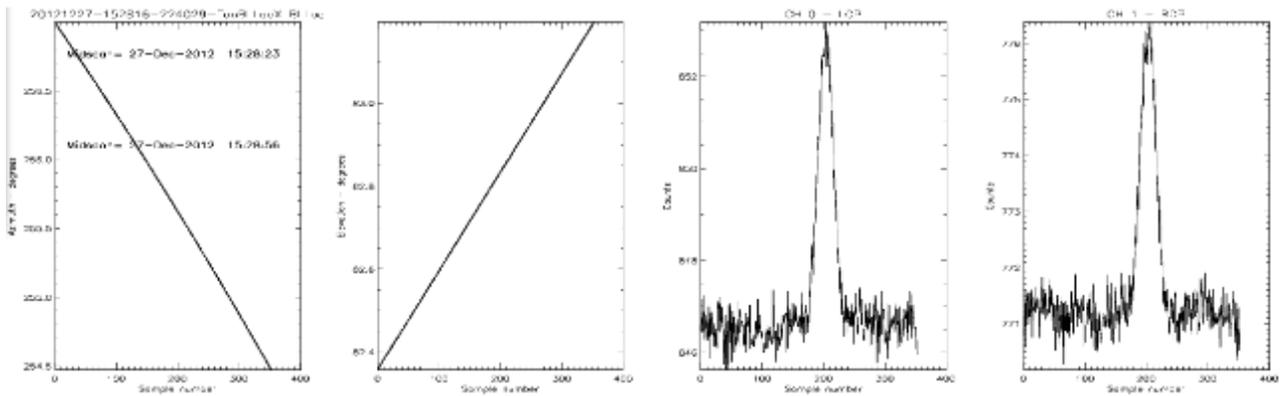


Fig. 3.1: Elaborazione di una scansione da parte del programma *idl*. Le due rette a sinistra rappresentano le coordinate di Azimut ed Elevazione dell'antenna in funzione del numero di campionamenti già eseguiti. I due grafici a destra risultano dai conteggi presi ad ogni campionamento nel canale 0 e nel canale 1.

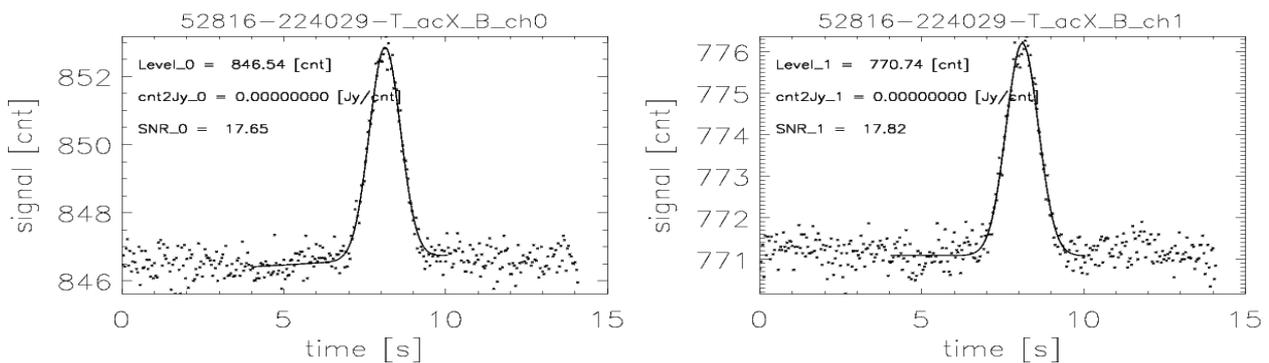


Fig. 3.2: Fit gaussiani dei conteggi per campionamento, ovvero dei conteggi nel tempo, della scansione mostrata in Fig. 3.1.

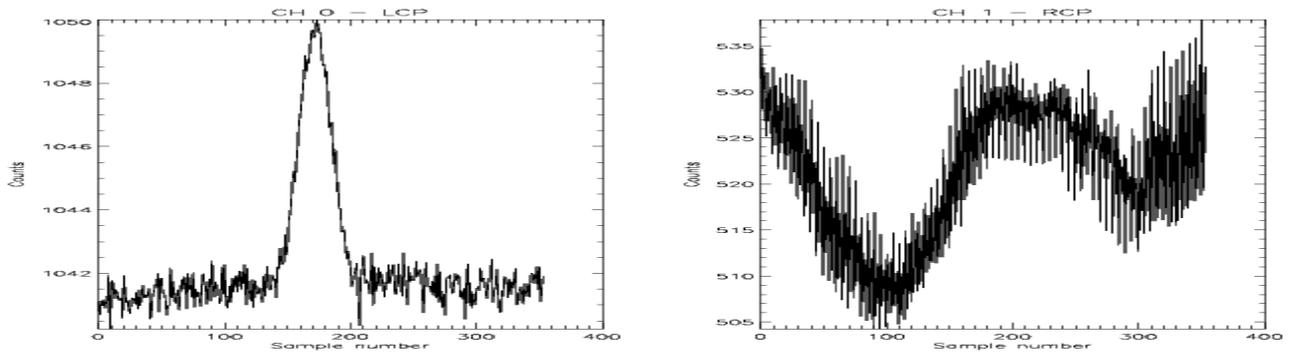


Fig 3.3: A sinistra il grafico, o “plot”, dei conteggi della scansione effettuata col canale 0 alle 19:09:51 dell'epoca 56280.523 (corrispondente al 19-12-2012). Il grafico rappresenta un esempio di scansione andata a buon fine: è evidente il picco centrale di conteggi elevatisi al di sopra del rumore di fondo, corrispondente ad una sorgente nitida. A destra, il plot dei conteggi effettuati contemporaneamente col canale 1; in questo caso la sorgente non è stata rilevata.

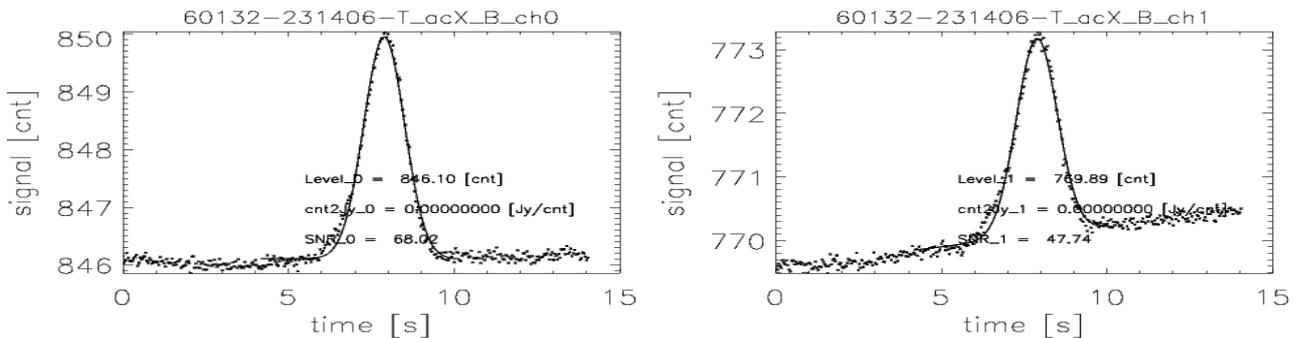


Fig. 3.4: Esempio di fit gaussiani "stacked" nel canale 0 e nel canale 1, relativi all'epoca 56288.668 (27-12-2012). In ascissa i campionamenti vengono sostituiti dal tempo trascorso.

I fit gaussiani dei conteggi nel tempo sono stati calcolati con la formula:

$$(1) \quad f(t) = a + bt + S \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-t_{\max})^2}{2\sigma^2}}$$

Dove la variabile t è ovviamente il tempo, a è il livello del rumore di fondo, b la pendenza della retta dei conteggi di fondo, che dipende in generale dall'elevazione dell'antenna, t_{\max} è l'istante in cui il numero di conteggi è stato massimo, S è la densità di flusso rilevata. Trascurando i termini relativi al rumore di fondo e all'elevazione dell'antenna, che non hanno significato sperimentale rilevante e servono solo come necessario termine correttivo (il numero di conteggi rilevati dipende anche dall'elevazione dell'antenna al momento del campionamento per via di deformazioni gravitazionali), si osserva che ciò che rimane ha proprio la forma di una distribuzione normale o gaussiana. La deviazione standard σ è ricavabile considerando che la velocità v di scansione dell'antenna è di 4° al minuto, e che la larghezza della gaussiana, in questo caso intesa come la Full Width at Half Maximum (FWHM, definita come la differenza fra i valori assunti dalla variabile indipendente t

quando la variabile dipendente $f(t)$ è pari a metà del suo valore massimo) deve essere equivalente (dal punto di vista temporale), alla risoluzione, o *beam*, della parabola (che è invece una quantità spaziale, e più precisamente una grandezza angolare, esprimibile quindi in radianti), data da:

$$B = 1.22 \frac{\lambda}{D}$$

Con λ : lunghezza d'onda della radiazione e.m. radio incidente e D : diametro della parabola di Medicina (32 m). Si ha:

$$B = FWHM = 2\sigma \sqrt{2\ln 2}$$

(La seconda uguaglianza è dimostrabile dalla definizione di FWHM e dalla forma generale della gaussiana [14])

Da cui

$$\sigma = \frac{B}{2\sqrt{2\ln 2}}$$

σ è quindi inizialmente esprimibile in radianti. Riesprimendola in gradi (g), si può utilizzare la formula $\sigma(t) = \sigma(g)/v$ (analogo a tempo = spazio/velocità) per ottenere l'espressione di σ in termini di tempo, che sarà quella che entrerà nella funzione $f(t)$.

Poiché le osservazioni sono state eseguite ad una frequenza di 8 GHz, si ottiene che

$$B \approx 0.0013$$

$$\sigma \approx 0.49 \text{ s}$$

- Si sono esaminati, per ciascuna epoca, tutti i grafici e i file di testo restituiti dal programma, in modo da capire quali scansioni andavano eliminate in quanto non avevano rilevato la sorgente (come è accaduto per il canale 1 nel caso di Fig. 3.3). Talvolta tra una scansione e un'altra, sebbene i grafici rimanessero “buoni”, mostranti un picco centrale, il numero di conteggi (qui si intende quello risultante dal calcolo dell'area sottostante la funzione $f(t)$) risultava nettamente diverso (con un salto superiore al 10% del totale); ciò indicava che c'erano probabilmente dei problemi relativi alla rilevazione, in quanto le dimensioni degli AGN sono dell'ordine del kpc e una perturbazione che vari la densità di flusso non può propagarsi nell'arco dei pochi minuti intercorrenti tra un scansione e l'altra. Più di una volta si è presentata un'alternanza dei conteggi, tra un valore più alto e uno più basso entrambi approssimativamente costanti a meno degli errori; in questi casi si è attribuito il problema a un errore di puntamento dell'antenna, per cui in una delle direzioni in cui essa effettuava i *cross-scan* passava troppo lontano dalla sorgente, e si è dunque deciso di eliminare le scansioni presentanti conteggi più bassi. Nell'analisi dei grafici si è stati attenti anche all'eventuale presenza di altri picchi oltre a quello centrale; essi potevano indicare infatti la presenza di interferenze cospicue che avrebbero reso dubbia la rilevazione della sorgente;

- Per ogni epoca l'antenna ha effettuato delle scansioni anche di particolari sorgenti chiamate *calibratori*. Questi calibratori sono radiosorgenti di variabilità pressoché nulla e la cui densità di flusso è nota. Prelevando il numero dei loro conteggi è dunque possibile ricavare il fattore di conversione da conteggi a Jansky (unità di misura della densità di flusso, $1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$). I calibratori scansionati sono stati 3C286, NGC7027 e 3C84, con densità di flusso 5.2, 3.23 e 5.79 Jy rispettivamente. Per ricavare da loro il fattore di conversione, si è utilizzato un secondo programma idl che ha effettuato le medesime elaborazioni dell'altro programma idl in modo da far sì che si potessero identificare le scansioni andate male (e ciò è un'operazione fondamentale, dato il ruolo dei calibratori), ma che in più forniva un file col fattore di conversione (chiamato *gain*) e relativo errore per ciascuno dei due canali. I due fattori di conversione (quello per il canale 0 e quello per il canale 1) G_j ($j=0,1$) erano ricavati mediando i fattori di conversione g_{ij} ottenibili da ciascuna singola scansione i -esima. Questi fattori g_{ij} erano inizialmente determinati dal programma secondo la formula:

$$g_{ij} = \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f_i(t) dt}{S_c}$$

(Dove l'integrale al numeratore è il numero di conteggi risultante dall'area sottostante $f(t)$ per quella particolare scansione, e S_c rappresenta la densità di flusso del calibratore) e poi corretti (sempre dal programma) secondo un fattore di correzione chiamato *gain curve*, il cui valore dipendeva dall'elevazione dell'antenna al momento della scansione.

Il programma forniva inoltre anche dei grafici di questi ultimi fattori di conversione in funzione delle elevazioni delle singole scansioni, e dell'orario in cui queste erano state fatte (Fig. 3.5).

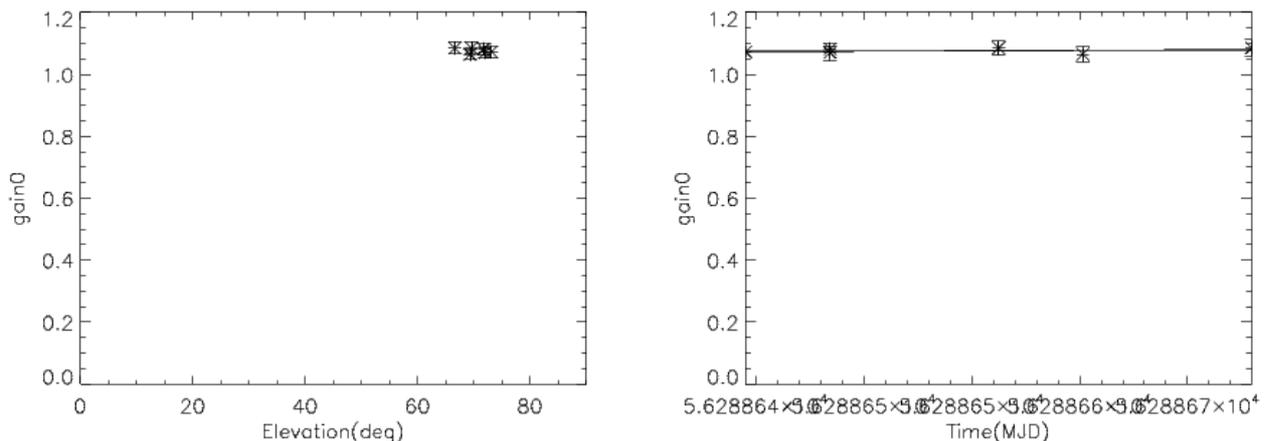


Fig. 3.5: Grafici dei fattori g_{i0} dell'epoca 56288.668. Le misure sono indicate da crocette con barre d'errore.

- Per ciascuna epoca si sono infine potute ricavare le densità di flusso date dal canale 0 e dal canale 1, moltiplicando il numero di conteggi dato in ciascun file "stacked" per un particolare canale j , per il fattore di conversione G_j ottenuto dai calibratori. Per il calcolo degli errori sulle

densità di flusso si sono considerati i conteggi e i fattori G_j come indipendenti e si è quindi sommato in quadratura i rispettivi errori.

Per il calcolo della densità di flusso totale per ciascuna epoca, infine, si è utilizzata una *media pesata* delle densità di flusso nei due canali, secondo la formula:

$$S = \frac{\omega_0 S_0 + \omega_1 S_1}{\omega_0 + \omega_1} \quad \text{con} \quad \omega_j = \frac{1}{\sigma_j^2} \quad j = 0,1$$

Dove σ_j è l'errore sulla densità di flusso S_j . L'errore su S sarà dato da:

$$\sigma = \frac{1}{\sqrt{\omega_0 + \omega_1}}$$

3.2 Dati ricavati

Di seguito si danno delle tabelle relative ai dati ricavati coi programmi idl menzionati sopra, per finire con le densità di flusso e relativi errori calcolati per ciascuna epoca.

In ambito astronomico le epoche sono in genere convenzionalmente indicate tramite la loro data Giuliana modificata (*MJD, Modified Julian Date*), che si ottiene dalla data Giuliana JD tramite l'espressione $MJD = JD - 2400000$. La data Giuliana di un'epoca risulta dal conteggio dei giorni a partire da lunedì 1° gennaio 4713 a.C. considerando che un giorno giuliano dura quanto un giorno solare.

Nella prima tabella si riportano anche le date gregoriane; successivamente queste non verranno ripetute.

DATA GREG.	EPOCA	DURATA	ELEV(r)	ELEV(d)
19 dic 2012	56280.523	12m 28s	1.0402	59.6279
27 dic 2012	56288.668	33m 37s	1.3425	76.9602
8 gen 2013	56300.481	36m 59s	1.0930	62.6577
14 gen 2013	56306.438	12m 27s	0.9771	56.0128
22 gen 2013	56314.426	4m 49s	1.0194	58.4358
28 gen 2013	56320.417	12m 36s	1.0545	60.4480
4 feb 2013	56327.421	12m 53s	1.1549	66.2062
12 apr 2013	56394.224	8m 6s	1.0903	62.5006

Fig. 3.6: Sono elencate data gregoriana delle scansioni, epoca in MJD, durata delle osservazioni, elevazione dell'antenna in radianti e poi in gradi.

EPOCA	DURATA	CONT 0	ERR. CONT 0	GAIN 0	ERR. GAIN 0
56280.523	12m 28s	8.314	0.025	0.841	0.016
56288.668	33m 37s	6.479	0.031	1.076	0.009
56300.481	36m 59s	8.282	0.028	0.831	0.024
56306.438	12m 27s	9.191	0.031	0.790	0.026
56314.426	4m 49s	9.190	0.038	0.813	0.032
56320.417	12m 36s	9.459	0.029	0.811	0.027
56327.421	12m 53s	8.493	0.026	0.865	0.029
56394.224	8m 6s	8.475	0.032	0.964	0.048

Fig. 3.7: Insieme all'epoca e alla durata, sono elencati i conteggi in canale 0, gli errori sui conteggi, il gain (il fattore G_0) e l'errore sul gain sempre sul canale 0.

Nella prima epoca il canale 1 è risultato difettoso: nessuna delle scansioni ha rilevato la sorgente. Ne consegue che non abbiamo dati in merito.

EPOCA	DURATA	CONT 1	ERR. CONT 1	GAIN 1	ERR. GAIN 1
56280.523	12m 28s	Scansioni difettose	Scansioni difettose	Scansioni difettose	Scansioni difettose
56288.668	33m 37s	5,247	0,029	1.121	0.260
56300.481	36m 59s	5.563	0.022	1.212	0.033
56306.438	12m 27s	6.096	0.023	1.184	0.030
56314.426	4m 49s	6.213	0.027	1.200	0.045
56320.417	12m 36s	6.159	0.020	1.199	0.036
56327.421	12m 53s	5.940	0.022	1.188	0.049
56394.224	8m 6s	6.304	0.022	1.267	0.069

Fig. 3.8: Tabella analoga a quella di Fig. 3.7, ma relativa al canale 1.

EPOCA	S_0 (Jy)	σ_0 (Jy)
56280.523	6.99	0.13
56288.668	6.97	0.07
56300.481	6.88	0.20
56306.438	7.26	0.24
56314.426	7.47	0.30
56320.417	7.67	0.26
56327.421	7.35	0.25
56394.224	8.17	0.41

Fig. 3.9: Densità di flusso e relativi errori nel canale 0.

EPOCA	S_1 (Jy)	σ_1 (Jy)
56280.523	Scansioni difettose	Scansioni difettose
56288.668	5.88	1.36
56300.481	6.74	0.19
56306.438	7.22	0.18
56314.426	7.46	0.28
56320.417	7.39	0.22
56327.421	7.06	0.29
56394.224	7.99	0.44

Fig. 3.10: Densità di flusso e relativi errori nel canale 1.

Per la prima epoca, vista l'assenza dei dati relativi al canale 1, si è deciso di tenere come densità di flusso quella relativa al canale 0, che viene ripresentata, invariata, nella tabella delle densità di flusso totali:

EPOCA	S (Jy)	σ (Jy)
56280.523	6.99	0.13
56288.668	6.97	0.07
56300.481	6.81	0.14
56306.438	7.23	0.15
56314.426	7.46	0.20
56320.417	7.51	0.17
56327.421	7.23	0.19
56394.224	8.08	0.30

Fig. 3.11: Densità di flusso con relativi errori per le varie epoche.

3.3 Indice di variabilità

Poiché BL Lacertae è un oggetto che presenta una variabilità apprezzabile (non debole), un ottimo indicatore di quanto effettivamente vari la sua emissione è l'*indice di variabilità* (per antonomasia), che può essere per l'appunto utilizzato solo quando la variabilità intrinseca dell'oggetto è maggiore delle incertezze presenti sulle singole densità di flusso.

L'indice è definito come segue:

$$V = \frac{(S_{\max} - \sigma_{\max}) - (S_{\min} + \sigma_{\min})}{(S_{\max} - \sigma_{\max}) + (S_{\min} + \sigma_{\min})}$$

S_{\max} è la densità di flusso massima tra quelle delle varie epoche, S_{\min} la densità di flusso minima, e σ_{\max} e σ_{\min} sono i rispettivi errori.

Nel periodo analizzato risulta che S_{\max} è rappresentata dalla densità di flusso ricavata per l'epoca 56394.224 (l'ultima) mentre S_{\min} rappresenta la densità di flusso ricavata per la seconda epoca, 56288.668. Risulta allora che

$$V = 0.05$$

3.3 Discussione dei risultati

Per una discussione dei risultati si presenta innanzitutto la *curva di luce* ricavabile dai dati sopra elencati. La curva di luce è il grafico delle densità di flusso di una sorgente in funzione del tempo.

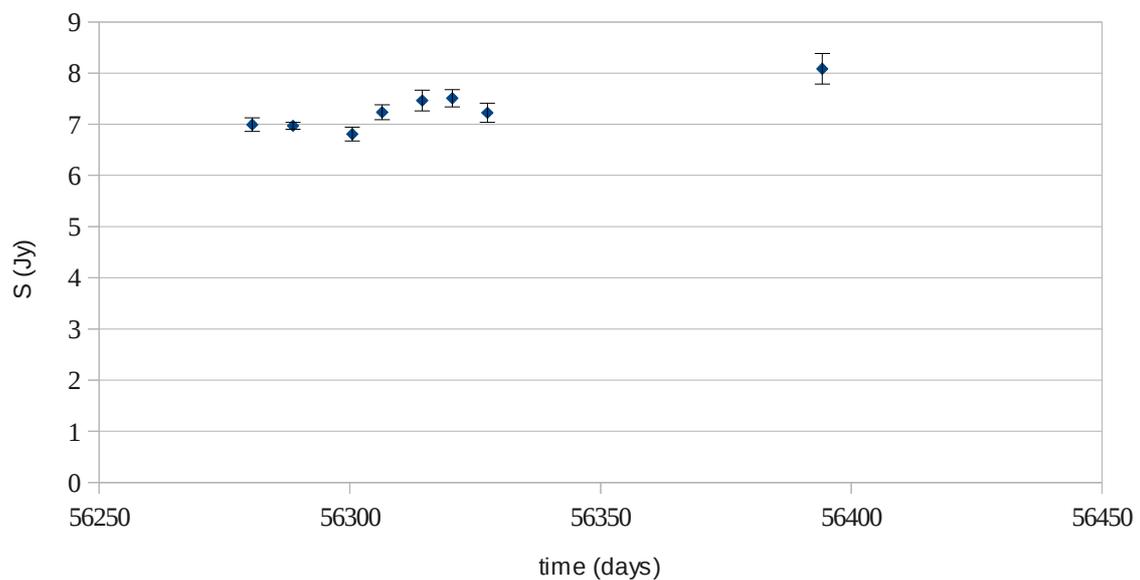


Fig. 3.12 Curva di luce ricavata per *BL Lacertae*.

Di seguito, allo scopo di capire meglio ciò che accade, una versione più espansa dello stesso grafico:

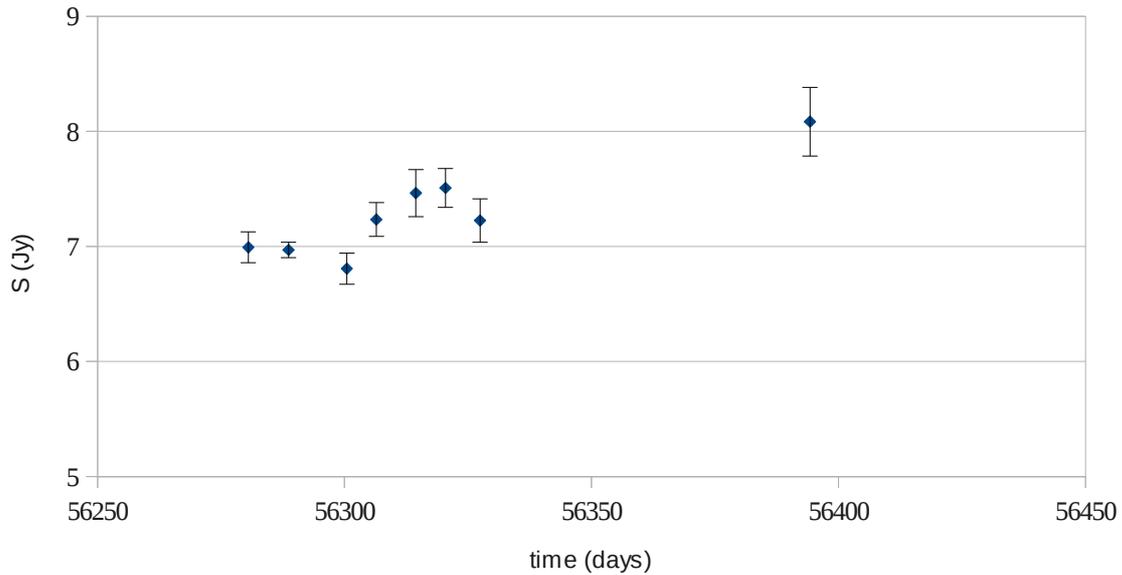


Fig. 3.13.

Si nota la variabilità della sorgente: considerando le scale temporali, dell'ordine delle decine di giorni, questa risulta essere molto accentuata.

Nella quinta e sesta epoca BL Lacertae ha mostrato in particolare un'emissione superiore a quella presentata dalle prime tre epoche anche considerando le barre d'errore.

Il trend dell'emissione radio risulta essere in generale crescente.

Quest'ultima osservazione sembra essere rafforzata anche dal confronto con ciò che è stato ricavato nella tesi di M. Rossini, *Studio della variabilità di blazar con il radiotelescopio di Medicina*, che tra gli oggetti considerati prendeva in esame anche BL Lacertae e che rappresenta uno studio utile da confrontare col presente in quanto le epoche analizzate precedono immediatamente quelle di questa tesi.

La curva di luce ottenuta nella tesi di M. Rossini è stata la seguente:

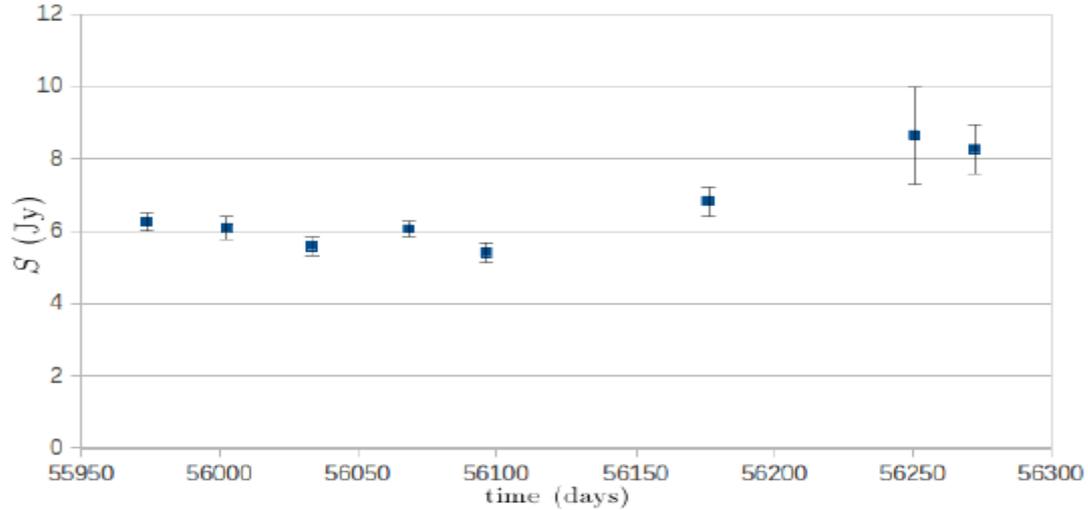


Fig. 3.14 Curva di luce per BL Lacertae nel periodo precedente a quello analizzato.

E si era ottenuto un valore per la media pesata delle densità di flusso alle varie epoche pari a

$$\bar{S}_R = (6.34 \pm 0.26) \text{ Jy}$$

([15]). Il valore per la media pesata ottenibile dai dati in questa tesi è invece di

$$\bar{S} = (7.085 \pm 0.046) \text{ Jy}$$

L'estremo superiore dei valori ottenuti da Rossini per la media pesata delle densità di flusso è pari a

$$S_{Rmax}^- = (6.34 + 0.26) \text{ Jy} = 6.6 \text{ Jy}$$

Mentre l'estremo inferiore dei valori per la media pesata delle densità di flusso, ottenuto in questa tesi è di

$$S_{min}^- = (7.085 - 0.046) \text{ Jy} = 7.039 \text{ Jy}$$

Tra le epoche considerate da M. Rossini e quelle analizzate in questa tesi, si è avuta dunque una crescita delle densità di flusso nella banda degli 8 GHz pari ad almeno 0.439 Jy in valore assoluto. Considerando le medie pesate, la differenza percentuale risulta essere pari a circa il 12%.

Si noti che l'incertezza associata al valor medio delle misure presentate in questa tesi (0.046 Jy) è di un fattore 5.6 volte migliore dell'incertezza associata al valor medio ottenuto in precedenza (0.26 Jy). Questo è dovuto a due fattori principali: da un lato le osservazioni effettuate nell'ambito della campagna *Target of Opportunity* si sono basate su durate di osservazione maggiori, che hanno permesso di migliorare il rapporto segnale-rumore; dall'altro, le procedure di calibrazione e analisi sono state nel frattempo riviste e migliorate.

Il valore relativamente piccolo dell'indice di variabilità V , 0.05, inferiore anche a quello ricavato da Rossini, $V = 0.12$ ([15]), lo si attribuisce alla ristrettezza del periodo considerato (che in M. Rossini era molto più ampio), che non permette variazioni macroscopiche dell'oggetto BL Lacertae più significative di quelle ottenute.

Capitolo 4

Riassunto e conclusioni

Riassumendo, il radiotelescopio da 32 m di Medicina ha effettuato una campagna intensiva di osservazioni di BL Lacertae dal mese di dicembre 2012 al mese di aprile 2013, a complemento del monitoraggio mensile effettuato dal 2004 e in seguito all'annuncio di elevata attività in altre bande di osservazione. Nella presente tesi si sono analizzati i dati relativi a tale campagna di osservazione e alla frequenza radio di 8 GHz.

Nella frequenza radio considerata, la sorgente ha mostrato valori di densità di flusso compresi fra 6.97 ± 0.07 e 8.08 ± 0.30 Jy; il massimo lo si è raggiunto nel giorno 12 aprile 2013, che è anche l'ultima epoca analizzata, a conferma di un trend delle densità di flusso che appare crescente.

La media pesata dei valori delle densità di flusso risulta maggiore del 12%, e comunque anche maggiore in valore assoluto, rispetto alla media pesata analoga effettuata per le osservazioni antecedenti a quelle del periodo considerato, dimostrando che anche nel radio la sorgente ha attraversato un periodo di particolare attività, così come nell'ottico, in X e in gamma. Ciò implica che i meccanismi di emissione di queste tre bande sono collegati tra loro.

Dai dati ricavati per la variabilità è ora possibile fare anche una stima delle dimensioni di BL Lacertae. Poiché i tempi scala delle variazioni sono dell'ordine delle decine di giorni, considerando velocità di propagazione delle perturbazioni di scala relativistica, risulta una dimensione, per l'oggetto considerato, dell'ordine del centesimo di pc. Ciò indica che siamo in presenza di un oggetto estremamente compatto anche per i modelli classici di AGN. Esso potrebbe dunque essere unico nel suo genere e perciò meritevole di ancora maggiori ricerche. Nell'ottica dei modelli di unificazione, la rapidità delle variazioni potrebbe voler dire che osservando BL Lacertae diamo uno sguardo diretto al cuore dei suoi meccanismi, ancora una volta suggerendo che debba essere posta una ancor maggiore attenzione all'oggetto.

Bibliografia

- [1] A. Ferrari - *Stelle, galassie e universo. Fondamenti di astrofisica*, Springer, 2011
- [2] John A. Peacock - *Cosmological physics*, Cambridge University Press, 1999
- [3] M. Rossini - *Studio della variabilità di blazar con il radiotelescopio di Medicina*, Tesi di laurea triennale in Fisica
- [4] K. Rholfs, T. L. Wilson - *Tools of Radio Astronomy*, Springer, 2004
- [5] <http://adsabs.harvard.edu/abs/1968Natur.218..663S>
- [6] <http://adsabs.harvard.edu/abs/1974ApJ...189L...5O>
- [7] U. Bach et al. - *Multi-frequency monitoring of γ -ray loud blazars. Light curves and spectral energy distributions*, A&A, 464, 175-186, 2007
- [8] <http://www3.mpifr-bonn.mpg.de/staff/ubach/bmonit/>
- [9] <http://www.ira.inaf.it/Library/rapp-int/401-07.pdf>
- [10] J. R. Taylor – *Introduzione all'analisi degli errori. Lo studio delle incertezze nelle misure fisiche*, Zanichelli, 2010
- [11] <http://www.astronomerstelegram.org/?read=4028>
- [12] <http://www.astronomerstelegram.org/?read=4031>
- [13] <http://www.astronomerstelegram.org/?read=4557>
- [14] <http://mathworld.wolfram.com/GaussianFunction.html>
- [15] Pag. 32 della tesi di Rossini.
- [16] <http://www.med.ira.inaf.it/>

Fonti delle immagini

- [] <http://ned.ipac.caltech.edu/level5/March12/Middelberg/Middelberg3.html> per lo schema di AGN
- [] <http://apod.nasa.gov/apod/ap110828.html> per l'immagine di M87
- [] https://www.astro.virginia.edu/class/whittle/astr553/Topic15/t15_FR_classification.html per l'immagine di 3C31
- [] <http://www.cita.utoronto.ca/~everett/agnOverview/agnOverview.html> per l'immagine di 3C175

[] http://www.nasa.gov/mission_pages/WISE/multimedia/pia15424.html per l'immagine del blazar

[] http://www.daviddarling.info/encyclopedia/B/BL_Lacertae_object.html per l'immagine di BL Lacertae

[] http://en.wikipedia.org/wiki/File:Arecibo_Observatory_Aerial_View.jpg per l'immagine del radiotelescopio di Arecibo

[] <http://www.med.ira.inaf.it/Photo%20Gallery/Jad2.jpg> per l'immagine del radiotelescopio di Medicina