

Scuola di Scienze
CORSO DI LAUREA IN FISICA

Tesi di Laurea in
ASTROFISICA

PROPRIETÀ RADIO DEI BLAZAR E LORO USO
NELL'IDENTIFICAZIONE DI SORGENTI GAMMA
EXTRAGALATTICHE

CANDIDATA

Schieda Paola

RELATORE

Chiar.mo Prof.

Giovannini Gabriele

CORRELATORE

Dott. Giroletti Marcello

Anno Accademico 2014/2015

Sessione III

Questa tesi è stata svolta nell'ambito delle ricerche dell'Osservatorio di
Radioastronomia di Bologna.

Sommario

Introduzione	4
1. Le galassie attive e i Blazar.	5
1.1. Il modello unificato degli AGN	7
1.2. Un particolare tipo di AGN, i Blazar	8
2. Lo studio della banda radio	11
2.1. I radiotelescopi e i radiointerferometri	11
2.2. Le survey radio, NVSS e FIRST	13
3. Lo studio della banda gamma	15
3.1. Il satellite Fermi	15
3.2. Il telescopio a produzione di coppie, Large Area Telescope	16
3.3. Le survey gamma	17
3.4. Il catalogo di Fermi 3FGL	18
3.5. Il catalogo degli AGN, il 3LAC	19
4. Lo studio dei Blazar	21
4.1. Il BZCAT	21
5. Le problematiche dei Blazar ad altissima energia	22
6. Descrizione e risultati del lavoro svolto sui Blazar	23
6.1. Ricerca e analisi dei Blazar	23
6.2. La distinzione tra BL Lac e FSRQ	28
6.3. I Blazar gamma	32
7. La ricerca di nuovi Blazar	39
7.1. Il parametro Blazar	41
7.2. Le sorgenti non Blazar	45
8. Conclusioni	47
9. Bibliografia	50

Introduzione

Lo studio dei blazar è un argomento relativamente nuovo se paragonato ad altri ambiti di ricerca. L'osservazione di un oggetto del tutto nuovo, luminosissimo e che, a prima osservazione, pareva di natura stellare, risale agli anni 50, quando fu osservato per la prima volta un Quasar. Successivamente fu scoperto che questo oggetto non era una stella ma un qualcosa di ben più interessante e soprattutto mai visto prima. Un'altra caratteristica dei blazar fu scoperta quando fu osservata per la prima volta una sorgente di nome BL Lacertae, anch'essa inizialmente scambiata per una stella, successivamente riconosciuta come sorgente extragalattica, diede il nome ad una categoria di oggetti che presentavano tutti le stesse proprietà della sorgente osservata per prima. Quasar e oggetti di tipo BL Lacertae sono molto legati tra loro, infatti il nome Bl-azar non è altro che l'unione di questi due nomi.

L'identificazione di un blazar è molto difficile, questo è un oggetto molto particolare e che ha un'attività molto ricca. Nella pratica l'identificazione di un blazar avviene confrontando la sua emissione in banda radio con la sua emissione in banda gamma, che sono entrambe proprie dei blazar. Il problema è che non si dispone di un telescopio in grado di rivelare con estrema precisione entrambe le bande, quindi si procede utilizzando i dati radio provenienti da un dato radiotelescopio e i dati in banda gamma provenienti da un altro telescopio. Quando le emissioni nelle due bande presentano, ad esempio, una variabilità simultanea, l'identificazione è certa. Ma questa minoranza di casi non è molto frequente e quindi spesso si procede con un'analisi probabilistica basata sulle posizioni delle sorgenti.

Il lancio di Fermi nel 2008 ha portato ad un fortissimo aumento del numero di sorgenti gamma note e, fra queste, la maggior parte sono blazar. Una significativa frazione di queste sorgenti Fermi (circa il 30%) rimane non identificata.

In questo lavoro vengono inizialmente caratterizzate le proprietà radio dei blazar e in particolare dei blazar gamma noti finora. In seguito verrà approfondita l'analisi delle sorgenti Fermi non identificate per stabilire una possibile compatibilità con le proprietà dei blazar e quindi per cercare di capire se queste sorgenti possano essere a loro volta dei blazar non ancora riconosciuti.

1. Le galassie attive e i Blazar

Il termine "Galassia" deriva dal greco "galaxìas" che può essere tradotto con il termine "latteo" (o di latte) che, a sua volta, deriva dal termine greco "gala-galaktos" cioè "latte". È un riferimento alla "Via lattea", la galassia in cui ci troviamo. Il termine deriva da un famoso mito greco sulla nascita di Eracle, figlio di Zeus ed Alcmena. Secondo il mito, il dio greco cerca di far diventare immortale il neonato facendogli bere il latte materno della moglie Era, mentre lei sta dormendo. Ma Era si sveglia e si accorge di quello che sta succedendo, respinge quindi il bambino facendo schizzare il latte nel nero cielo notturno. Ha così origine, secondo il mito, la "Via Lattea".

Dopo la scoperta dell'esistenza di altre galassie oltre quella in cui ci troviamo, il termine "galassia" non è più un sinonimo di "Via lattea" e definisce un grande insieme di stelle, gas e polveri legati tra loro dalla forza di gravità.

Una galassia attiva invece è una galassia che presenta una luminosità anomala, poiché largamente superiore, anche fino a 1000 volte, a quella delle galassie ordinarie. Le forme di attività di una galassia attiva sono rilevate in diverse bande spettrali: onde radio, infrarossi, raggi X, gamma, UV o anche lungo tutto lo spettro elettromagnetico. Gran parte della sua energia inoltre non deriva dalle componenti della galassia, cioè stelle polveri e gas, come per quelle ordinarie, ma da regioni e processi fisici differenti: infatti sembrerebbe derivare dal suo nucleo, cioè dalla regione al centro della galassia. Per questo, per indicare le galassie di questo tipo, viene spesso usata l'abbreviazione "AGN", dall'inglese "Active Galactic Nuclei", cioè "nuclei galattici attivi", termine che ormai è utilizzato come sinonimo di "galassie attive". La forte attività di queste galassie fa sì che la loro "vita" sia molto breve, in accordo con il fatto che queste sono una percentuale molto piccola di oggetti del nostro universo. Per via di queste loro proprietà, e in base anche alle considerazioni sull'evoluzione delle galassie, si pensa che questo tipo di galassie non sia una famiglia a parte tra tutti i vari tipi, bensì una fase dello stadio evolutivo della loro vita, molto probabilmente una fase di riassetto dopo un'interazione fra galassie.

Come per le galassie ordinarie, vi sono diversi tipi di AGN.

Un primo tipo sono le galassie di Seyfert, che si possono pensare come le fasi attive delle galassie a spirale. Queste prendono il nome dal loro scopritore, e sono classificate in Seyfert di tipo 1 e di tipo 2. Hanno un nucleo molto compatto e abbastanza luminoso, con una

luminosità di circa 10^{40} erg/s, uno spettro ricco di righe di emissione, che sono molto larghe per le Seyfert di tipo 1, prodotto forse da gas densi fortemente ionizzati in moto a velocità molto elevate, ed è presente anche una componente non termica. Le Seyfert sono forti sorgenti infrarosse e, in alcuni casi, presentano anche una forte emissione X. Non sono invece forti sorgenti radio.

Il secondo tipo di AGN sono le Radiogalassie, cioè le fasi attive delle galassie ellittiche. Queste si differenziano dalle Seyfert perché sono forti sorgenti radio, tanto che le luminosità radio sono circa 10 volte maggiori della luminosità ottica di queste galassie. Lo spettro ci suggerisce che il tipo di radiazione emessa è di tipo sincrotrone non-termico da plasma relativistico. Le radiogalassie sono formate da due lobi opposti, simmetricamente, alla galassia ottica. Le dimensioni delle radiogalassie sono molto maggiori di quelle della galassia ottica e arrivano fino a 1 Mpc. Queste caratteristiche indicano che le radiogalassie si formano dall'espulsione di materiale relativistico dal nucleo della galassia ottica.

Il terzo tipo di AGN sono i Quasar. La scoperta dei quasar risale agli anni 50 quando furono osservate per la prima volta delle sorgenti radio molto compatte, che apparentemente sembravano di natura stellare, i cui spettri presentavano un forte spostamento verso il rosso. Dallo spostamento Doppler, l'oggetto pareva essere ad una distanza cosmologica e fu chiaro che doveva trattarsi di una galassia che appariva come una stella, furono per questo chiamati Quasar cioè "quasi-stellar radio source". Successivamente fu scoperto che lo spettro di un quasar ha un forte picco nell'ultravioletto mentre solo una piccola parte di loro emette nella banda radio.

Infatti possiamo dividere la grande famiglia dei quasar in tre tipi: i quasar radio dallo spettro piatto (o FSRQ da Flat Spectrum Radio Quasar), i quasar radio dallo spettro ripido (o SSRQ da Steep Spectrum Radio Quasar) ed infine i quasar che non emettono nella banda radio (o QSO quasi-stellar object).

I Quasar di tipo FSRQ e SSRQ, detti radio loud Quasar poiché emettono in banda radio, sembrerebbero avere un getto visibile in banda radio ed ottica. Il loro spettro presenta sia righe di assorbimento che di emissione.

Riassumendo, possiamo definire i Quasar, indipendentemente dai vari tipi in cui sono divisi, come oggetti con un nucleo non termico molto compatto e brillante, che presentano delle forti righe di emissione nello spettro ottico.

Infine l'ultimo tipo di AGN sono i blazar, oggetti molto variabili, compatti e luminosi con uno spettro privo di righe di emissione. Hanno una forte emissione in bande X e gamma. I blazar sono oggetti che hanno un getto visibile che punta nella nostra direzione di vista. Secondo questa definizione appartengono alla categoria "blazar" anche i FSRQ, che quindi presentano caratteristiche che li fanno rientrare sia nella categoria quasar che in quella blazar e rappresentano quindi un punto di intersezione tra le due grandi classi.

I blazar, quindi, si possono dividere in due grandi famiglie: i FSRQ e i blazar di tipo BL Lacertae, o BL Lac, dal nome della prima sorgente osservata con queste caratteristiche. Questa grande famiglia di AGN, che racchiude oggetti di tipo Quasar, oggetti di tipo BL Lac e oggetti di natura intermedia tra i due, è stata per questo chiamata "Bl-azar", che indica appunto la combinazione di questi due diversi tipi di oggetti.

1.1. Il modello unificato degli AGN

Nonostante i vari AGN siano molto differenti tra loro, vi sono alcune caratteristiche che li accomunano, in particolare si tratteranno gli AGN con un forte rapporto radio/optico, cioè quando la luminosità radio è almeno 10 volte la luminosità ottica, queste sorgenti sono definite come sorgenti "radio loud".

Nonostante su scale temporali brevi questi siano oggetti molto variabili, in generale la luminosità degli AGN si mantiene costantemente molto elevata rispetto a quella della galassia ospite.

Tramite la sua luminosità si può calcolare la massa teorica che dovrebbe avere un oggetto di questo tipo e, da questa, si può calcolare il suo raggio di Schwarzschild. Questo risulta maggiore o dell'ordine del raggio stimato delle sorgenti e ci suggerisce che all'interno degli AGN vi siano dei buchi neri supermassivi (o SMBH, Super-Massive Black Holes).

Attorno alla regione del buco nero supermassivo vi è una regione di gas e polveri formate da materiale fotoionizzato, da qui si osservano due diversi tipi di righe di emissione, le righe di emissione larghe (broadline regions) provenienti dalla regione più vicina al nucleo, che si muove a velocità molto elevate, e le righe di emissione strette (narrow-line regions), provenienti dalle regioni più lontane dal nucleo e con velocità inferiori. Queste linee di emissione vengono osservate a causa del continuo assorbimento e riemissione di energia da parte del buco nero. Tra queste due regioni si osserva un toro formato da gas e polveri.

Vi sono inoltre dei getti supersonici di materiale relativistico dovuto a radiazione di tipo sincrotrone non-termica, osservata appunto nella banda radio e, per le sorgenti più potenti, anche nella banda X e gamma.

Lo studio dei vari tipi di AGN ha permesso la formulazione di una teoria che spiega l'esistenza di queste svariate classi di oggetti. Secondo questa teoria, detta modello unificato degli AGN, i vari tipi di galassie attive non sarebbero differenti, bensì oggetti di natura simile che, invece, appaiono diversi in base all'inclinazione del disco rispetto alla linea di vista e in base alla quantità di materia inghiottita dal buco nero.

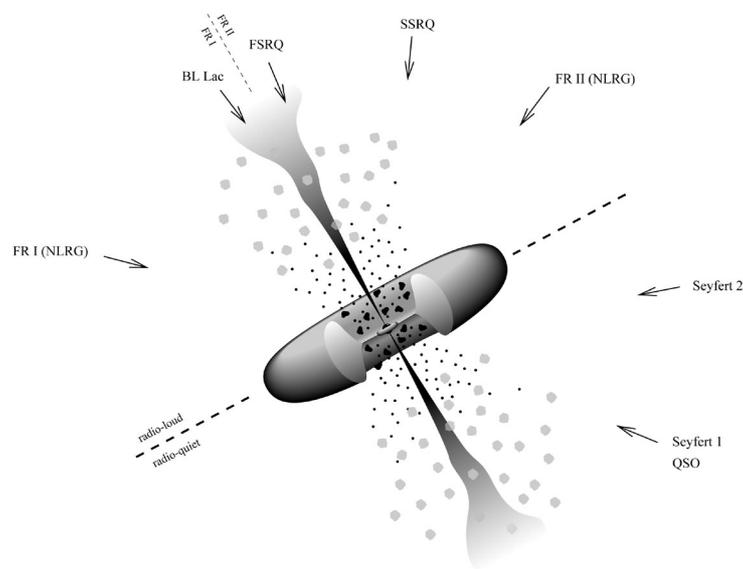


Figura 1 Schema del Modello Unificato degli AGN.

1.2. Un particolare tipo di AGN, i Blazar

I Blazar sono tra i fenomeni più energetici dell'universo.

È indispensabile per i blazar lo studio della "spectral energy distribution", o SED, definita come il prodotto tra la densità di flusso ad una data frequenza ν e la frequenza stessa, di fondamentale importanza è lo studio di νF_ν in funzione della frequenza ν .

Le SED dei blazar hanno due componenti dovute ad emissioni non-termiche, una in banda radio, IR e ottica e l'altra in banda X e gamma. La prima è causata da radiazione di

sincrotrone dovuta ad elettroni relativistici mentre la seconda, invece, è provocata da fotoni di bassa energia diffusi ad alta frequenza per effetto Compton inverso.

I blazar si dividono in base alla frequenza nella quale si presenta il picco della prima componente: se la frequenza del picco è $<10^{14}$ Hz, allora si ha un blazar a bassa frequenza (o LSP cioè Low-Synchrotron peaked), se la frequenza è compresa tra 10^{14} Hz e 10^{15} Hz, si ha un blazar a frequenza intermedia o (ISP cioè Intermediate-synchrotron peaked) se invece è maggiore di 10^{15} allora si ha un blazar ad alta frequenza (o HSP cioè high-synchrotron peaked).

Come per gli AGN, i blazar si formano grazie alla caduta di materiale all'interno del SMBH. All'esterno vi è una regione di gas e polveri con densità molto variabile e si osserva un toro opaco formato dagli stessi materiali, perpendicolarmente al disco di accrescimento del SMBH, anche per i blazar, vi è un getto relativistico di plasma caratterizzato da un moto superluminale del materiale al suo interno.

Dalle caratteristiche rilevate sembrerebbe che i FSRQ siano associati a radiogalassie molto potenti mentre i BL Lac sarebbero invece deboli radiogalassie, entrambi associati a galassie ellittiche giganti.

Secondo il modello unificato degli AGN, i blazar sarebbero degli AGN i cui getti formano un angolo di circa zero gradi rispetto alla linea di vista. Per questo dei blazar con proprietà simili potrebbero apparire anche molto diversi anche per variazioni d'inclinazione di pochissimi gradi rispetto alla linea di vista.

I getti appaiono molto diversi anche l'uno dall'altro, a causa degli effetti relativistici dovuti al moto del plasma che può raggiungere anche velocità dell'ordine del 99% della velocità della luce. Una prima conseguenza è che il getto che si avvicina appare più luminoso e spostato verso il blu, mentre il getto opposto appare meno luminoso e spostato verso il rosso. Ma vi sono anche effetti che modificano l'immagine osservata dei getti dovuti all'aberrazione della luce e alla dilatazione temporale.

Date le proprietà di questi oggetti, risulta indispensabile, per l'individuazione corretta di un blazar, riuscire a studiare il suo spettro nella sua interezza, ovvero riuscire a osservare l'emissione dalla banda radio, in cui potrebbe presentarsi il primo picco dello spettro, alla banda gamma, in cui potrebbe presentarsi invece il secondo picco.

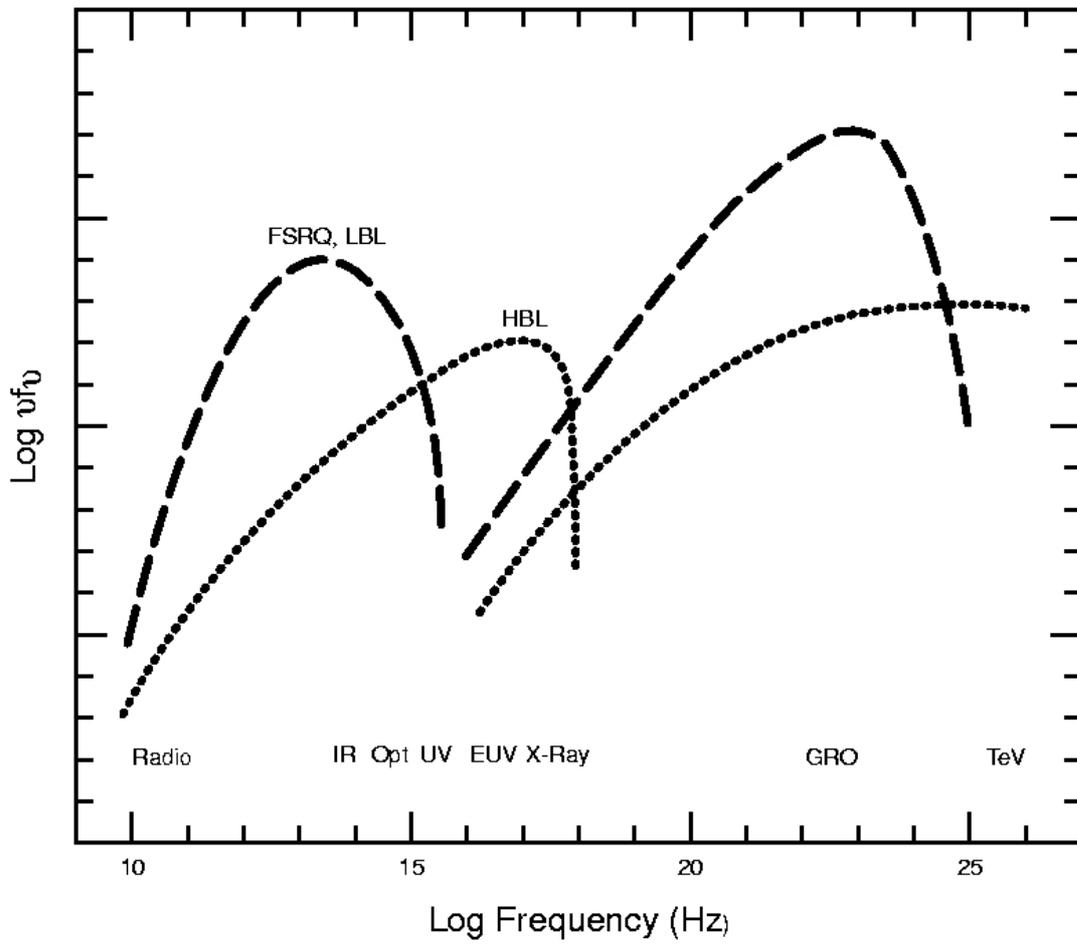


Figura 2 SED tipica dei Blazar, classificata in base ai vari tipi.

2. Lo studio della banda Radio

2.1. I radiotelescopi e i radiointerferometri

Lo strumento in grado di misurare le emissioni in banda radio delle svariate sorgenti emittenti nel nostro universo è chiamato radiotelescopio, ed è di solito formato da una grande antenna con un ricevitore o da più antenne collegate tra loro, che forniscono l'immagine radio dell'oggetto osservato. L'uso di più radiotelescopi, combinati tra loro per ottenere un'unica immagine, è detto interferometria radioastronomica.

Il principio di funzionamento di un radiotelescopio è molto semplice: l'antenna è costruita con un materiale conduttivo che reagisce quando un'onda radio la colpisce, questo genera un impulso elettrico, cioè quindi una piccola corrente, che viene rilevata da un ricevitore e convertita in un segnale, che poi viene analizzato tramite un computer. La forma più diffusa di antenna è quella a parabola, grazie alla sua proprietà di riflettere le onde tutte in un unico punto, il fuoco della parabola.

Normalmente i radiotelescopi sono antenne con un diametro molto grande, questo perché la loro risoluzione angolare, o capacità di distinguere i dettagli, dipende dalla lunghezza d'onda osservata divisa per la grandezza dell'antenna.

Tutti i segnali che arrivano dallo spazio sono molto deboli, le onde radio, la luce visibile, i raggi X e anche le onde gravitazionali. Qualsiasi strumento in grado di rivelare questo tipo di emissioni sarebbe più sensibile se avesse la maggiore superficie possibile. In pratica però questo è possibile solo per i radiotelescopi: dato che l'incertezza nella banda radio è proporzionale alla lunghezza d'onda, è possibile costruire un telescopio molto grande con una piccola incertezza. Questo invece non è possibile per le altre bande, in cui le incertezze hanno diverse dipendenze, quindi si deve trovare un "compromesso" tra la "grandezza" e l'"accuratezza" del telescopio.

Il più grande radiotelescopio è quello che si trova ad Arecibo, nell'isola di Porto Rico, che ha un diametro di circa 305m ed è formato da un'unica antenna fissa, in grado di muovere i suoi ricevitori.

Costruire un'antenna molto grande non basta però ad avere una risoluzione angolare sufficiente: il rapporto tra la lunghezza d'onda e le dimensioni dell'antenna, che dovrebbe essere un numero piccolo per poter vedere nel dettaglio, risulta sempre più grande del dovuto,

cioè anche con l'antenna più grande non si avrebbe una risoluzione angolare significativamente migliore di quella dell'occhio umano.

Proprio per questo, spesso invece di un'antenna singola, i radiotelescopi sono formati da più antenne combinate tra loro in modo da formare un'antenna equivalente dal diametro molto più grande di quello delle singole antenne utilizzate. Questo permette di ottenere una risoluzione in grado di risolvere molte più sorgenti, poiché la risoluzione combinata è data dalla distanza massima tra le antenne.

Avendo a che fare con molte antenne, vi saranno, nei segnali ottenuti, delle tipiche frange di interferenza, dovute al fatto che i segnali che arrivano da un'antenna all'altra non si sovrappongono perfettamente. I segnali in arrivo avranno sicuramente una differenza di cammino dovuta alla distanza tra le due antenne, cioè la stessa onda arriva a due diverse antenne con una differenza di fase. Rimettendo in fase i due segnali si osserveranno le frange di interferenza. Vi saranno inoltre delle ulteriori correzioni dovute al movimento di rotazione della terra, che creano un'ulteriore differenza di fase nelle onde dovuta allo "spostamento" dell'antenna a causa della rotazione terrestre.

Vi sono molti radiointerferometri e, tra questi, vi è anche un radiointerferometro italiano chiamato "Croce del Nord" che si trova a Medicina, Bologna.

Il più grande insieme di radiotelescopi è il "Very Large Array" o VLA che si trova a Socorro, in Nuovo Messico, negli USA. Questo è formato da 27 antenne con un diametro di circa 25m (82 piedi), posizionate lungo tre bracci, a formare una Y. Ogni braccio è formato da 9 antenne, il braccio che si trova a nord è lungo 11 miglia (circa 18km) mentre gli altri due sono lunghi 13 miglia (circa 21km). La combinazione di questi ricevitori fornisce un'immagine equivalente che si avrebbe con un'antenna di 40km di diametro. La frequenza rilevata dalle antenne va da 1.0 Ghz fino a 50 Ghz, con una risoluzione che va da 0.2 arcosecondi a 0.004 arcosecondi.

Il riferimento che ha ogni antenna è uno strumento, chiamato "oscillatore centrale locale" in grado di "dare il tempo" alla grande orchestra di antenne. Questo riceve i dati da ogni singola antenna, li sincronizza e li invia ad un supercomputer in grado di analizzare questo grande insieme di dati, che può arrivare anche a 16 quadrilioni di operazioni al secondo. Tutti questi dati vengono poi analizzati per creare una mappa del cielo in cui si trovano tutte le sorgenti radio.



Figura 3 Immagine del Very Large Array o VLA.

2.2. Le survey radio, NVSS e FIRST

Una survey del cielo non è altro che una mappa o un'immagine di una regione del cielo o anche un insieme degli spettri di quegli oggetti. Spesso, date le difficoltà nell'osservazione e nella mappatura di porzioni di cielo, queste sono fatte solamente per un'unica banda dello spettro elettromagnetico. Una survey radio quindi non è altro che una mappa del cielo che comprende tutte le sorgenti radio presenti in quella porzione di cielo.

Le survey FIRST e NVSS sono entrambe mappe del cielo fatte grazie al lavoro del radiointerferometro Very Large Array.

La NRAO VLA Sky Survey, o NVSS, (Condon et al. 1998) è una survey continua a 1.4GHz, cioè 20cm, che racchiude la porzione di cielo a nord di -40 gradi di declinazione, cioè 82% della sfera celeste. Questa survey ha una risoluzione spaziale di 45 arcosecondi. Vi sono dei

termini correttivi da considerare, infatti vi sono fluttuazione di luminosità e soprattutto le incertezze della declinazione ed ascensione retta che sono minori di 1" per le sorgenti con un flusso maggiore di 15mJy e possono arrivare a 7" per le sorgenti più deboli, con un flusso di 2.3mJy. Le immagini che vengono prodotte sono un insieme di "cubi" continui di $4^\circ \times 4^\circ$.

La Faint Images of the Radio Sky at Twenty-cm ,o FIRST, (Becker et al 1995) è anch'essa una survey a 1.4 GHz, cioè a 20 cm, da cui prende il nome. Questa ha una risoluzione di 5 arcosecondi, cioè è una survey VLA ad alta risoluzione: riesce a catturare sorgenti compatte e molto deboli, con un flusso maggiore di 1mJy/beam (che ci dà la sensibilità grazie alla quale la sorgente viene risolta) con un errore minore di 1". Rispetto alla survey NVSS, la survey FIRST però viene fatta su un'area di cielo minore.

La combinazione di queste due survey ci dà molte più informazioni rispetto allo studio delle due mappe prese singolarmente. Infatti la FIRST, che è più sensibile, permette di vedere in modo più accurato le sorgenti e quindi viene usata principalmente per risolvere le sorgenti e stimare la loro struttura, soprattutto nel caso delle sorgenti quasi puntiformi. La NVSS invece non riesce a distinguere nel dettaglio, avendo una risoluzione maggiore, ma ci permette di stimare in modo più accurato il flusso di una sorgente, che verrebbe sottostimato invece dalla FIRST nel caso delle sorgenti non puntiformi.

3. Lo studio della banda Gamma

3.1. Il satellite Fermi

La storia dei telescopi che indagano nelle alte energie inizia il 9 agosto 1975 con il lancio del satellite astronomico dell'ESA "Cos-B", per lo studio delle sorgenti gamma nello spazio. Dopo 6 anni e mezzo di attività furono molti i risultati ottenuti da Cos-B, tra cui un primo catalogo di più di 25 sorgenti gamma e una mappa della via lattea.

Il suo successore più famoso fu il telescopio EGRET, Energetic Gamma Ray Experiment Telescope, lanciato nel 1991 e che si trovava nel Compton Gamma-ray Observatory (o CGRO). EGRET rivelò l'esistenza di molte nuove sorgenti gamma, alcune ancora oggi non identificate, mostrando un universo in banda gamma molto ricco e dinamico. Per la prima volta, grazie a questo telescopio spaziale, venne fatta una survey del cielo in un range che va dai 30 MeV ai 10 GeV.

Un contributo importante da segnalare è anche quello dato dall'Astrorivelatore Gamma a Immagini Leggero, o AGILE, telescopio italiano lanciato nel 2007.

Il Fermi Gamma-ray Space Telescope (precedentemente chiamato GLAST da Gamma-ray Large Area Space Telescope) è un telescopio spaziale frutto di una collaborazione internazionale, lanciato l'11 giugno 2008.

È progettato per studiare il cielo in un range compreso tra i 10 keV e i 300 GeV.

La sua strumentazione comprende: il LAT o Large Area Telescope, ovvero telescopio di grande area, che può captare radiazione dai 20 MeV a 300 GeV, e il GBM o Gamma-ray Burst Monitor, ovvero rivelatore di lampi gamma, con una sensibilità che va dagli 8 keV ai 40 MeV, che riesce a captare raggi gamma fino a circa un MeV e lampi gamma con energia maggiore di 150 keV.

La porzione di cielo vista da Fermi è molto grande, infatti è circa il 20% di tutto il cielo.

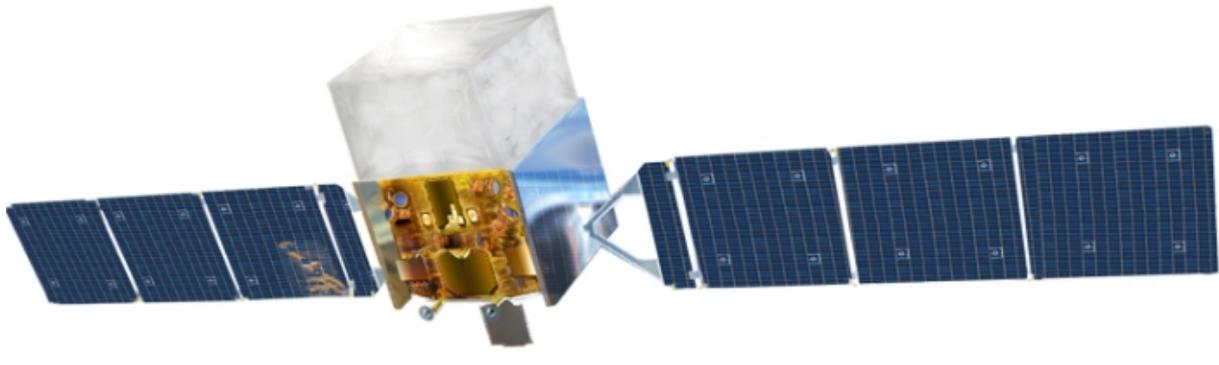


Figura 4 Il satellite Fermi.

3.2. Il Telescopio a produzione di coppie, Large Area Telescope

I raggi gamma ad alta energia interagiscono con la materia principalmente tramite il processo chiamato "produzione di coppie" o "creazione di coppie elettrone positrone". Quando un fotone (o nel caso più generale un bosone) altamente energetico interagisce con la materia, che si può pensare come l'interazione con un singolo nucleo atomico, si può considerare questo processo come un urto anelastico che coinvolge il fotone e il nucleo considerato. Il risultato di quest'urto è la creazione di una coppia di particella-antiparticella, che si dividono equamente l'energia del fotone incidente.

Si tratta di un processo molto "delicato", che obbedisce alle leggi di conservazione tipiche dei processi subatomici, dove la somma dei numeri quantici delle grandezze conservate deve essere pari a zero, ad esempio un bosone, con carica elettrica zero, produrrà una coppia di particella-antiparticella che dovranno avere due cariche tali che la loro somma sia pari a zero. Il processo di produzione di coppie è legato a fenomeni più "conosciuti" all'interno della fisica delle particelle, cioè all'effetto fotoelettrico e allo scattering Compton: si tratta infatti dello stesso principio che varia solo in base all'energia con la quale si verifica il fenomeno.

Per quanto riguarda il fenomeno della produzione di coppie, il caso più comune si ha quando da un fotone che interagisce con un nucleo atomico si formano un elettrone ed un positrone, processo che avviene ad energia minore. Man mano che aumenta l'energia disponibile per il fenomeno si può avere la produzione di un protone ed un antiprotone, aumentando ancora l'energia di un neutrone e di un antineutrone.

Il Large area Telescope o LAT sfrutta il principio della produzione di coppie per "rilevare" raggi gamma altamente energetici.

Questo è formato da sedici "torri", disposte quattro per ogni lato, con un'area di 40cm^2 e un'altezza di 40cm. Ogni torre è formata da diversi strati alternati tra loro, in modo da avere uno strato che forma la coppia elettrone-positrone e uno strato in grado di rivelarla, ed un calorimetro. La produzione di coppie avviene in uno strato di lamine sottili di tungsteno e viene rivelata grazie a delle lamine di silicio.

Un fotone incidente passa attraverso uno "scudo anti-coincidenza" sensibile alle particelle cariche e successivamente in vari livelli di fogli di conversione, composti da materiali con un alto numero atomico (che sono appunto gli strati di tungsteno). Il fotone, avendo attraversato questi strati di materiali pesanti, si converte nella coppia elettrone-positrone, che vengono rivelate da un rivelatore in grado di monitorare il loro percorso. Infine la loro energia viene misurata dal calorimetro.

Il calorimetro, contenuto in ogni torre, è formato da dodici barre di Ioduro di Cesio e dei fotodiodi, ed è in grado di distinguere con maggiore precisione i raggi cosmici adronici e di misurare la dispersione di energia. I calorimetri sono fondamentali per distinguere con maggiore precisione, tra i fotoni che "passano" all'interno dei macchinari, i fotoni ad alta energia che formeranno le coppie elettrone-positrone dagli altri raggi cosmici. Una prima selezione viene fatta dagli "scudi anti-coincidenza" che scartano le particelle cariche non azionando i macchinari al passaggio di queste particelle, che quindi non vengono rivelate. Tra le particelle rivelate, quindi, sono i calorimetri a fare la selezione più precisa.

Conoscendo l'energia e il percorso della coppia elettrone-positrone, si può risalire all'energia e al percorso del raggio gamma incidente e quindi direttamente alla sorgente che l'ha prodotto.

3.3. Le survey gamma

Lo scopo del satellite Fermi è quello di rilevare, localizzare e caratterizzare le varie sorgenti gamma presenti nel cielo. Il risultato di questo lavoro è una survey in banda gamma della porzione di cielo vista dal satellite. Vi sono però molti problemi nella misurazione in banda gamma.

Innanzitutto risulta molto difficoltoso distinguere i raggi gamma che daranno vita a coppie di elettroni-positroni dai raggi cosmici formati da particelle cariche. Fermi è dotato di una

strumentazione in grado di "riconoscere" solamente i raggi gamma altamente energetici ma, nonostante questo, spesso è difficile isolare una sorgente gamma dal rumore di fondo.

Un secondo problema è dovuto alla grande incertezza posizionale delle sorgenti gamma viste da Fermi, a causa del metodo di tracciamento del percorso elettrone-positrone che ci fa risalire alla sorgente. Si possono trovare incertezze anche di 10 arcominuti, ed è difficile spesso capire quale sorgente all'interno di questa regione emetta la radiazione gamma. L'incertezza viene espressa tramite il raggio di errore al 95% e tramite un angolo θ_{95} , dove il raggio di errore si riferisce ad un ellisse in cui si troverebbe la sorgente, conosciuto tramite l'asse maggiore e l'asse minore, inclinati rispetto al nord celeste di un angolo θ_{95} .

3.4. Il catalogo di Fermi 3FGL

Attualmente il catalogo più aggiornato di tutte le sorgenti gamma, tra i 100 MeV e i 300 GeV, scoperte da Fermi è il 3FGL o third Fermi Large Area Telescope source catalog, basato su un'osservazione che va dal 4 agosto 2008 fino al 31 luglio 2012 ovvero i primi quattro anni di attività del LAT di Fermi (Acero et al 2015).

Il 3FGL si presenta come il successore dei cataloghi 0FGL, 1FGL e 2FGL, basati sull'osservazione del cielo dopo tre mesi dal lancio di Fermi, dopo undici mesi e dopo due anni rispettivamente.

Rispetto al suo predecessore, il 2FGL, il 3FGL risulta molto più preciso grazie ad un miglioramento di elaborazione e correzione dei dati che permette di risalire con maggiore precisione alla posizione della sorgente e che permette di confrontare in modo più accurato i dati ottenuti con le survey ad altre lunghezze d'onda.

Il catalogo contiene 3033 sorgenti, 238 sorgenti si ritiene siano state identificate con certezza tramite le loro controparti osservate in altre lunghezze d'onda, 1010 sorgenti non sono ancora state identificate mentre più di 1100 sorgenti sembrerebbero appartenere alla famiglia degli AGN di tipo Blazar. Molte sorgenti sono state identificate come Pulsar.

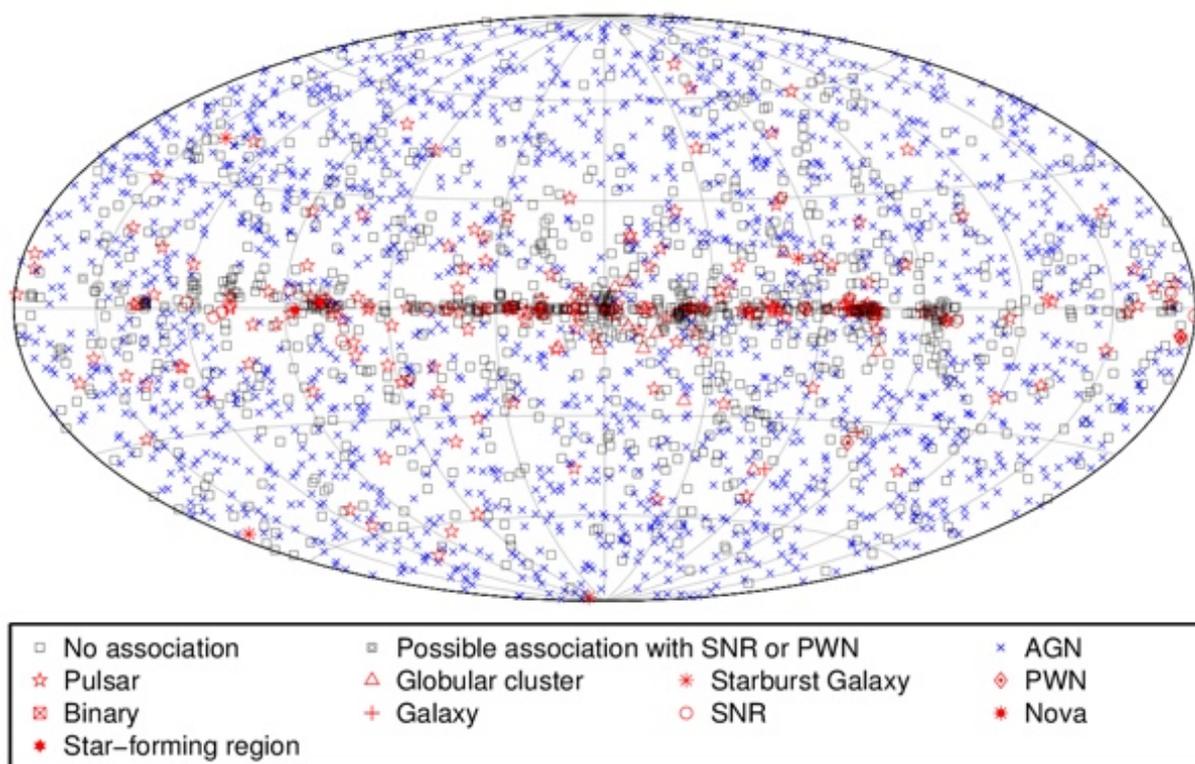


Figura 5 Le sorgenti presenti nel catalogo 3FGL.

3.5. Il catalogo degli AGN, il 3LAC

Il catalogo 3LAC o third Catalog of Active Galactic nuclei , è il catalogo degli AGN individuati da Fermi (Ackermann et al. 2015).

Si basa sul catalogo 3FGL e contiene 1591 AGN presenti ad una latitudine galattica maggiore di 10° , con 28 sorgenti che hanno associazioni multiple e con il 71% di sorgenti in più rispetto al suo predecessore basato sul catalogo 2FGL.

Il 98% delle 1591 sorgenti sono blazar, di cui circa un terzo sono di tipo sconosciuto, a causa della mancanza di informazioni dettagliate sul loro spettro, che impediscono di stabilire con certezza le varie linee spettrali. I blazar si dividono equamente in flat spectrum radio quasar (FSRQs) e BL Lac, e tra questi ultimi la maggior parte sono BL Lac HSP o high-synchrotron-peaked.

Stabilire con sicurezza la natura di una sorgente individuata è molto difficile. Per poter affermare che una sorgente del catalogo 3FGL è un AGN, bisogna cercare di associarla con un'altra sorgente, trovata magari grazie ad una survey in un'altro tipo di banda, che

posizionalmente sia compatibile con la sorgente gamma e che presenta strutture spettrali tipiche di un AGN. Se la probabilità stimata dal confronto è superiore all'85% viene stabilita un'associazione. In 26 casi si osserva una variabilità correlata nei dati gamma e nei dati ad altre lunghezze d'onda. In questi casi l'associazione viene stabilita con certezza e si ha un'identificazione certa.

	N° di elementi
Totali	1591
BL LAC	632
FSRQ	467
Blazar di tipo sconosciuto	460
AGN non Blazar	32

Tabella 1 Conteggio sorgenti 3LAC.

4. Lo studio dei Blazar

4.1. Il BZCAT

Il catalogo Roma-BZCAT è un catalogo che vuole raggruppare tutti i blazar verificati come tali, è arrivato alla quinta edizione, dopo dieci anni di studi (Massaro et al. 2015). Il nome ci dà anche un suggerimento sulla storia di questo catalogo, questo infatti ha origine dagli studi iniziati all'Università La Sapienza di Roma.

Contiene 3561 sorgenti che, o sono blazar già verificati oppure, anche se non verificati, presentano tutte le caratteristiche per essere potenziali blazar. Una caratteristica fondamentale è che tutti i blazar presenti in questo catalogo hanno una possibile controparte in banda radio. Sono infatti esclusi i cosiddetti "radio quiet BL Lac", cioè quelli che non emettono in banda radio, per evitare possibili associazioni errate o "contaminazioni" nel loro spettro (in ogni caso si tratta di poche unità di oggetti, quindi estremamente rari). Sono inclusi invece i BZU, o blazars of uncertain type, cioè i blazar di tipo sconosciuto, che sono quelle sorgenti per le quali non vi sono dati sufficienti per una chiara classificazione. Sono presenti anche i BZG blazar, o blazar candidates, sorgenti che sembrerebbero essere blazar date le loro proprietà ma la loro emissione è dominata dallo spettro in banda ottica-UV della galassia ospitante. In conclusione tutte le sorgenti contenute nel catalogo, scritte secondo la convenzione adottata per la quinta edizione, sono: 5BZB cioè BL Lac, 5BZG cioè i possibili candidati BL Lac, 5BZQ che sono i FSRQ, e i 5BZU blazar di tipo sconosciuto. Al nome del tipo di sorgente segue la sigla J2000 ad indicare le coordinate equatoriali troncate. Nel catalogo sono presenti 1151 BL lac (contando tra questi anche i 92 BZG) 1909 FSRQ e 227 BZU.

Questo catalogo è nato in primo luogo per trovare controparti a sorgenti ad alta energia. Raggruppa infatti tutti i dati possibili unendo vari cataloghi già esistenti e vari dati basati sulle osservazioni del cielo, tra questi sono stati considerati anche le survey FIRST e NVSS. È stato infatti di grande importanza anche per la creazione dei cataloghi 1LAC, 2LAC e 3LAC, infatti ha permesso l'identificazione o l'associazione con controparti a diversa banda per le sorgenti gamma scoperte da Fermi, dati che poi sono stati aggiunti anche al catalogo stesso nelle varie edizioni.

5. Le problematiche dei Blazar ad altissima energia

Lo studio delle sorgenti con un'energia > 100 GeV (o Very High energy gamma rays) risulta molto difficoltoso a causa del fatto che i telescopi spaziali (cioè in questo caso Fermi) non hanno una sensibilità sufficiente per ottenere una serie adeguata di dati sulle sorgenti, risulta quindi difficile rivelare e caratterizzare adeguatamente queste sorgenti. Il problema principale è che ci sono pochi fotoni (poiché il numero è inversamente proporzionale all'energia), ci vorrebbe quindi un'area di raccolta molto grande, che un telescopio spaziale non può possedere.

L'osservazione di queste sorgenti viene fatta, quindi, tramite grandi telescopi Čerenkov presenti sulla terra, che misurano la radiazione Čerenkov prodotta dall'interazione dei fotoni ad altissima energia con l'atmosfera, infatti sono chiamati IACT o VHE Imaging Atmospheric Čerenkov Telescopes. Questi telescopi, proprio perché grandi, hanno un campo di vista molto limitato e si concentrano prevalentemente sulle sorgenti note: infatti la differenza tra il funzionamento tra Fermi e i telescopi IACT è che Fermi fa delle survey mentre IACT osserva solamente dei punti singoli, poiché fare una survey richiederebbe un tempo infinito.

La presenza di un getto relativistico espulso dal SMBH, tipico dei blazar, ci dà, fisicamente, una connessione tra l'emissione radio e l'emissione gamma a VHE per i blazar. Purtroppo però i blazar ad alte ed altissime energie sono difficilmente rivelabili dagli strumenti di cui disponiamo oggi. Vari studi su questa correlazione tra i flussi radio e gamma hanno confermato che questi sono ben correlati, sia per il caso dei BL Lac che per i FSRQ, anche nei casi in cui si arriva ai limiti della rilevabilità delle sorgenti da parte di Fermi. Anche con questa correlazione però, non si possono studiare le proprietà della banda gamma tramite quella radio, come il caso della misurazione della luminosità gamma, cioè dell'energia emessa. Infatti, nonostante sia confermato il fatto che molte sorgenti a VHE siano blazar che emettono nel radio, sembrerebbe che le luminosità gamma a VHE e quelle radio siano invece inversamente correlate. Si parla infatti della "Blazar sequence" che esprime proprio la correlazione inversa tra la frequenza del picco e la luminosità dei blazar.

In futuro si pensa che molti problemi verranno risolti grazie al telescopio SKA o Square Kilometre Array, in Australia, grazie alle sue caratteristiche: opererà in un ampio raggio di frequenze (dai 15 MHz ai 30GHz) e sarà 50 volte più sensibile di ogni altro radiotelescopio (Giroletti et al. 2015). Poiché al momento questi strumenti non sono ancora utilizzabili, devono essere usati altri metodi per lo studio e l'associazione dei blazar.

6. Descrizione e risultati del lavoro svolto sui Blazar

Circa il 30% delle sorgenti Fermi ad alte energie non è associata a controparti di bassa energia, soprattutto quando si tratta di sorgenti gamma molto deboli.

Una prima causa è il fatto che l'ellisse di errore è molto più grande per le sorgenti gamma viste da Fermi rispetto all'errore che si ottiene per le sorgenti radio. In secondo luogo, queste sono associabili a sorgenti con una densità di flusso radio bassa, e poiché il numero per volume di queste sorgenti radio è molto grande, diventa difficile identificare la controparte corretta. Quindi la non associazione potrebbe essere causata dal fatto che statisticamente non si riesce a trovare una correlazione soddisfacente con la possibile controparte a bassa energia.

Una possibile soluzione, che è proposta in questo lavoro, è uno studio e una caratterizzazione delle proprietà radio dei blazar e delle sorgenti Fermi associate, per poi ricercare proprietà simili nelle non associate.

6.1. Ricerca e analisi dei Blazar

Il primo punto del lavoro è stato l'analisi dei dati delle survey radio FIRST e NVSS, partendo dal catalogo NVSS-FIRST di Kimball et al. Questo catalogo contiene 580846 sorgenti presenti sia nella NVSS che nella FIRST e fornisce la densità di flusso di ciascun oggetto nelle due survey. Queste ultime sono effettuate alla stessa frequenza ($\nu=1.4\text{GHz}$), pertanto ogni differenza fra i due valori deve essere dovuta a variabilità o alle diverse regioni spaziali campionate dalle due survey (più compatte nella FIRST, più estese nella NVSS).

Un incrocio tra queste survey e il BZCAT, basato esclusivamente sulle posizioni delle sorgenti, permette di isolare, tra le varie sorgenti radio, quelle che sono associate a blazar. Infatti si associa a tutte le sorgenti radio un blazar del BZCAT con coordinate radio coincidenti entro un certo margine di errore. Analizzando le densità di flusso, è evidente che le proprietà dei possibili blazar, rispetto a tutto il campione di sorgenti NVSS o FIRST, sono molto diverse.

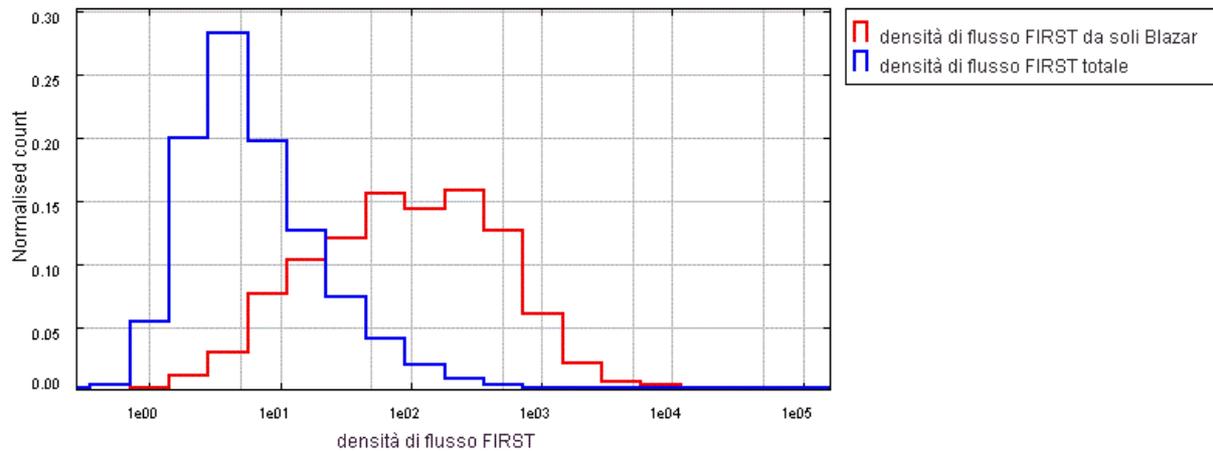


Figura 6 Densità di flusso FIRST in mJy per il caso dei soli Blazar (in rosso) densità di flusso totale (in blu). È stata utilizzata una scala logaritmica per l'asse x. I conteggi normalizzati sono necessari per poter comparare le figure.

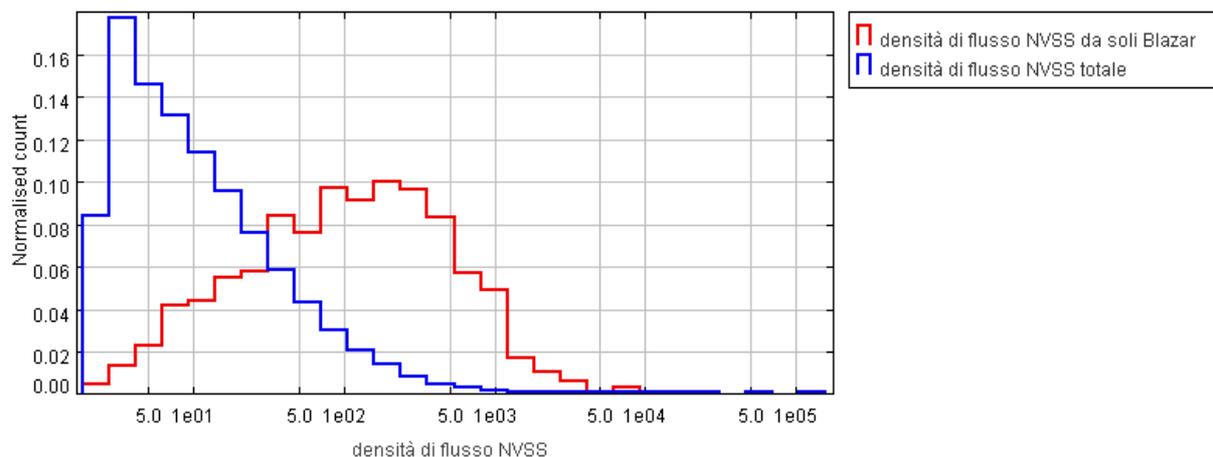


Figura 7 Densità di flusso NVSS in mJy per il caso dei soli Blazar (in rosso) densità di flusso totale (in blu). È stata utilizzata una scala logaritmica per l'asse x. I conteggi normalizzati sono necessari per poter comparare le figure.

Innanzitutto, come mostra la tabella 2, i blazar rappresentano una piccolissima frazione (circa lo 0,3%) dell'intera popolazione di sorgenti radio. Esaminando anche le figure 6 e 7 si può notare inoltre come la distribuzione dei blazar sia significativamente spostata verso destra, a valori della densità di flusso più alti, rispetto al caso totale. Questo infatti è vero sia per le densità di flusso FIRST che per le densità di flusso NVSS, come espresso anche nella tabella 2, in cui sono presenti i valori medi delle grandezze espresse in mJy ($1\text{mJy}=10^{-29}\text{ W/Hz m}^2$). I blazar, infatti, si distinguono perché sono più compatti e brillanti rispetto a tutto il campione delle sorgenti NVSS-FIRST.

	N° sorgenti	$\langle \log_{10} S_N \rangle$	$\langle \log_{10} S_F \rangle$	$\langle S_F/S_N \rangle$
NVSS-FIRST	580846	1.02	0.80	0.75
BZCAT tutte	1635	2.00	1.96	0.95
BZCAT FSRQ	767	2.37	2.35	0.97
BZCAT BL Lac	791	1.62	1.56	0.92

Tabella 2 Conteggio e media delle densità di flusso FIRST-NVSS espressi in mJy. S_N e S_F indicano rispettivamente le densità di flusso NVSS e FIRST.

Un dato importante è l'analisi del rapporto tra le due densità di flusso FIRST/NVSS.

Come per le densità di flusso, anche questo è molto differente per i blazar e per tutte le sorgenti, essendo molto più vicino a 1 per i blazar, ad indicare che si tratta di sorgenti compatte: infatti la densità di flusso in entrambe le survey è originata dalla stessa componente, che deve essere rivelata per intero da entrambe le survey e, in modo particolare, da quella con risoluzione maggiore, si tratta quindi necessariamente di sorgenti compatte.

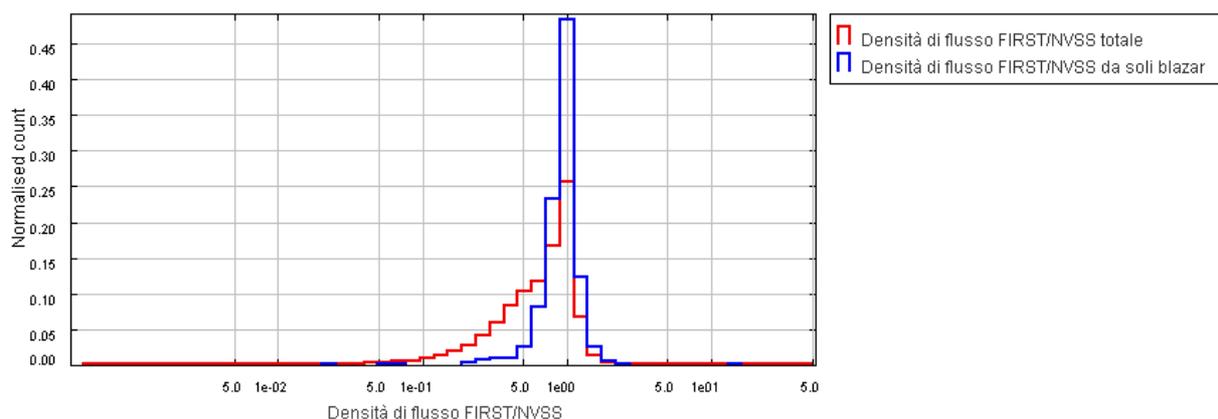


Figura 8 Rapporto tra la densità di flusso FIRST e quella NVSS per il caso totale (rosso) e per i soli Blazar (in blu). La curva dei Blazar risulta in prima approssimazione simmetrica mentre nel caso totale la curva è più asimmetrica avendo un'area più grande a sinistra. È stata utilizzata una scala logaritmica per l'asse x.

Il passo successivo per l'analisi delle sorgenti è stato il calcolo della luminosità.

Il termine luminosità, per una sorgente luminosa, può essere pensato come un sinonimo di potenza della sorgente: è infatti la quantità di energia elettromagnetica emessa per unità di tempo, e si misura in erg/s cm^2 .

La luminosità si può calcolare grazie alla distanza di luminosità. Questa distanza, che è calcolabile conoscendo il redshift (cioè lo spostamento verso il rosso) della sorgente, è legata all'espansione dell'universo. Infatti, la luce che ci arriva da una sorgente che si trova ad una

certa distanza, è più debole di quella che ci sarebbe dovuta arrivare basandoci sulla posizione che doveva avere la sorgente al momento dell'emissione.

Quindi questa è una funzione che dipende dal redshift della sorgente, dalla costante di Hubble H_0 , dalla densità totale della materia dell'universo Ω_M , e dalla densità della radiazione Ω_λ , con $H_0=67,15$ km/sMpc, $\Omega_M=0.3$ e $\Omega_\lambda=0.7$.

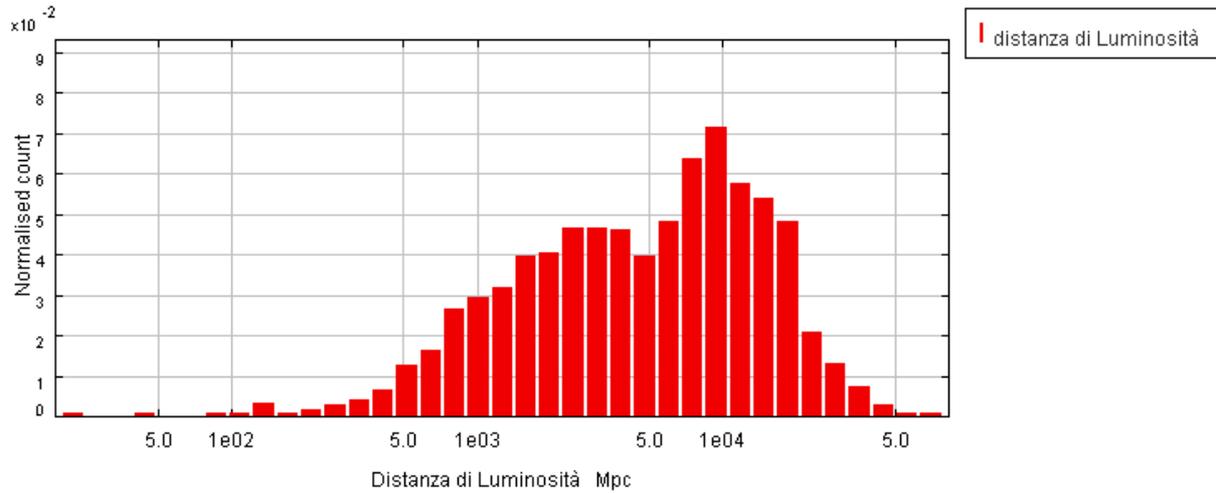


Figura 9 Distanza di Luminosità in Mpc. È stata utilizzata una scala logaritmica per l'asse x.

Nota la distanza di luminosità, dopo essere stata convertita da Mpc a cm, si può calcolare la luminosità dalla formula

$$S_R = \frac{L}{4\pi D_L^2}$$

Dove S_R è il flusso in banda radio della sorgente, L la luminosità e D_L la distanza di luminosità con

$$S_R = S_\nu \nu$$

dove S_ν è la densità di flusso a 1.4 GHz e ν è 1.4 GHz.

Il calcolo è stato eseguito sia per la luminosità FIRST che per quella NVSS.

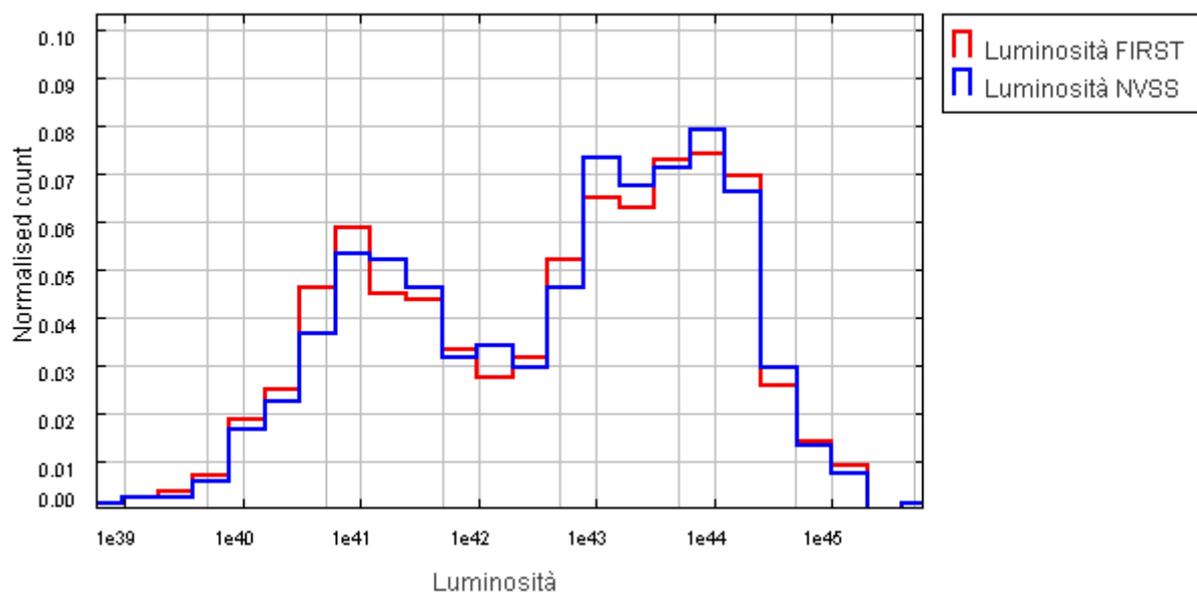


Figura 10 Luminosità FIRST (in rosso) e NVSS (in blu). È stata utilizzata una scala logaritmica per l'asse x.

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	2.1	0.7	0.2	4.6	mJy
$\log_{10}S_N$	2.1	0.6	0.4	4.7	mJy
S_F/S_N	0.9	0.5	0.0	14.7	/
$\log_{10}S_F/S_N$	-0.06	0.15	-1.64	1.17	/
Redshift	1.0	0.8	0.0	6.8	/
$\log_{10}(dL)$	3.7	0.5	1.3	4.81	Mpc
$\log_{10}(dL)$	28.1	0.5	25.8	29.3	cm
$\log_{10} L_{FIRST}$	42.6	1.4	38.9	45.6	erg/s cm ²
$\log_{10} L_{NVSS}$	42.7	1.4	38.9	45.6	erg/s cm ²

Tabella 3 Analisi statistica per tutto il campione con un numero di sorgenti pari a 1207.

Sono state utilizzate solo le sorgenti con distanza di luminosità nota per permettere il calcolo del logaritmo della distanza di luminosità. Infatti per alcune sorgenti, in particolare BL Lac e BCU (Blazar candidates of uncertain type), mancando il redshift non è possibile calcolare la distanza di luminosità e il suo logaritmo.

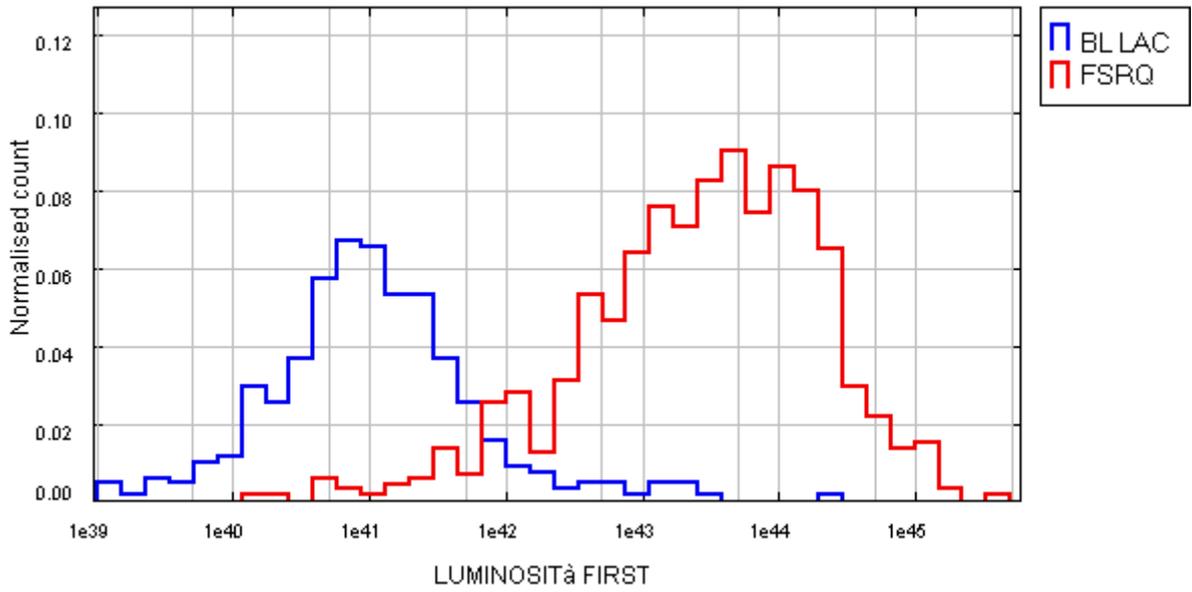


Figura 12 Luminosità FIRST per i BL Lac (in blu) e per i FSRQ (in rosso).

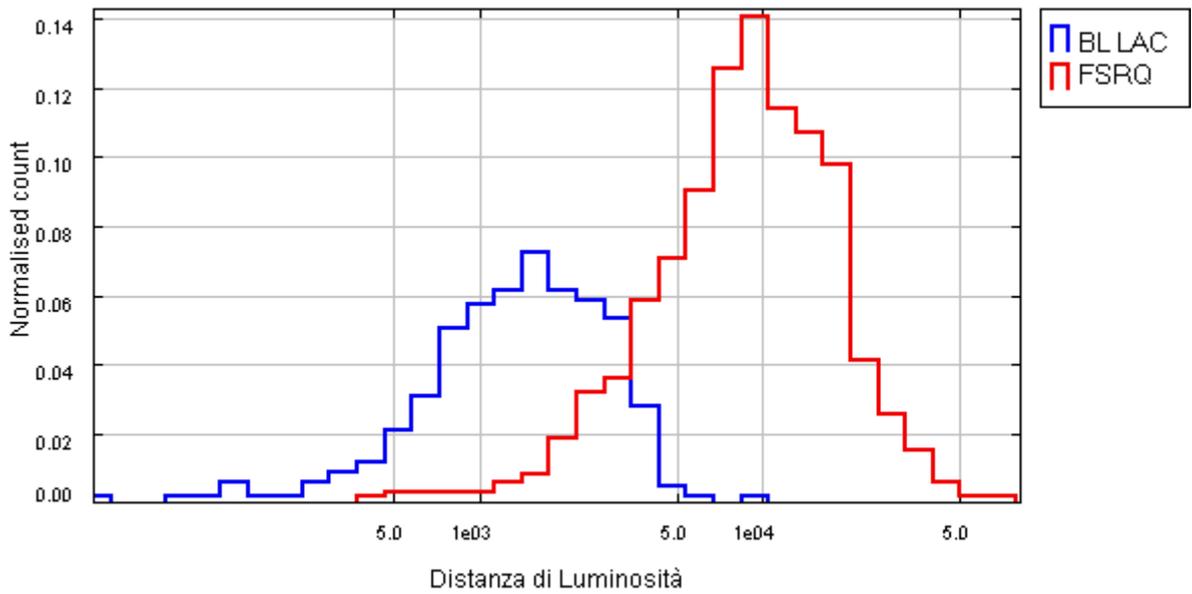


Figura 13 Distanza di Luminosità per i BL Lac (in blu) e per i FSRQ (in rosso).

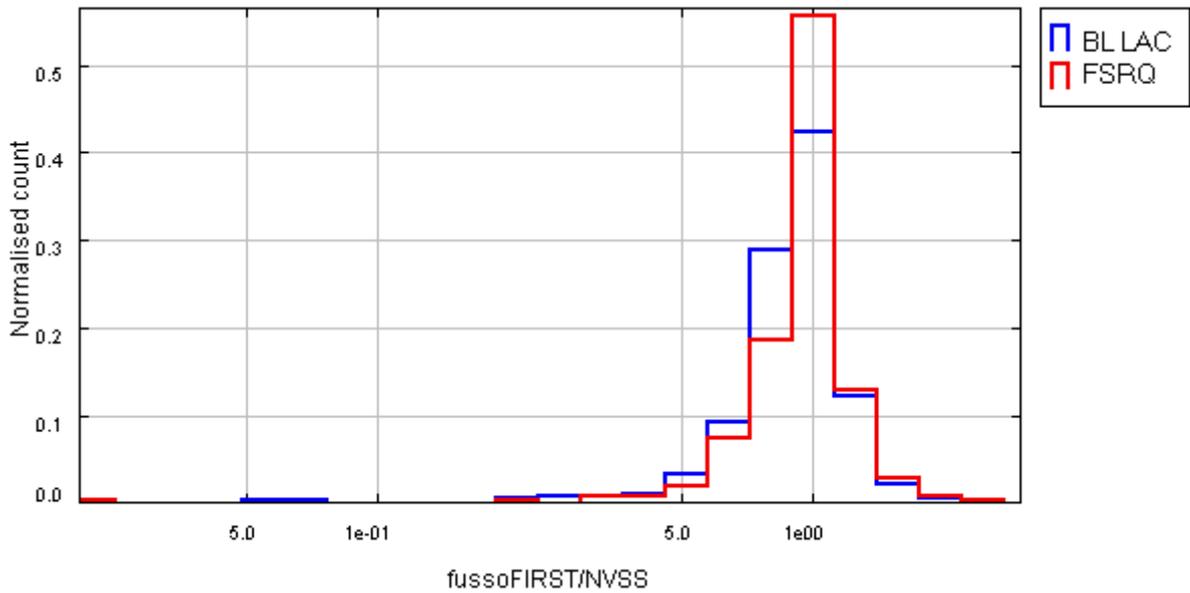


Figura 14 Rapporto tra il flusso FIRST e il flusso NVSS per i BL Lac (in blu) e per i FSRQ (in rosso).

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	1.5	0.6	0.2	3.9	mJy
$\log_{10}S_N$	1.6	0.6	0.4	3.9	mJy
S_F / S_N	0.86	0.22	0.05	1.73	/
$\log_{10}S_F / S_N$	-0.08	0.15	-1.30	0.24	/
Redshift	0.30	0.16	0.01	1.28	/
$\log_{10}(dL)$	3.1	0.3	1.7	4.0	Mpc
$\log_{10}(dL)$	27.6	0.3	26.2	28.5	cm
$\log_{10} L_{\text{FIRST}}$	41.0	0.7	39.1	44.4	erg/s cm ²
$\log_{10} L_{\text{NVSS}}$	41.1	0.7	39.1	44.4	erg/s cm ²

Tabella 4 Analisi statistica per il campione BL Lac con un numero di sorgenti pari a 386.

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	2.3	0.5	0.3	4.6	mJy
$\log_{10}S_N$	2.4	0.5	0.5	4.7	mJy
S_F/S_N	1.0	0.2	0.0	2.7	/
$\log_{10}S_F/S_N$	-0.03	0.11	-1.64	0.43	/
Redshift	1.4	0.8	0.1	6.8	/
$\log_{10}(dL)$	3.9	0.3	2.6	4.8	Mpc
$\log_{10}(dL)$	28.4	0.3	27.1	29.3	cm
$\log_{10} L_{FIRST}$	43.4	0.9	40.1	45.6	erg/s cm ²
$\log_{10} L_{NVSS}$	43.5	0.8	40.2	45.6	erg/s cm ²

Tabella 5 Analisi statistica per il campione Quasar con un numero di sorgenti pari a 758.

6.3. I Blazar gamma

Il passo successivo è stato incrociare i dati ottenuti con il catalogo 3LAC, utilizzando sempre come parametri le coordinate radio e come incertezza 10". Nei grafici è stata sempre utilizzata una scala logaritmica per l'asse x.

Le figure 15, 16, 17 e 18 mostrano che il comportamento dei blazar si mantiene lo stesso anche considerando solo il sottoinsieme ottenuto con l'incrocio con il catalogo 3LAC, sia per le densità di flusso, per la compattezza e per la luminosità si ha sempre una dicotomia fra BL Lac e FSRQ.

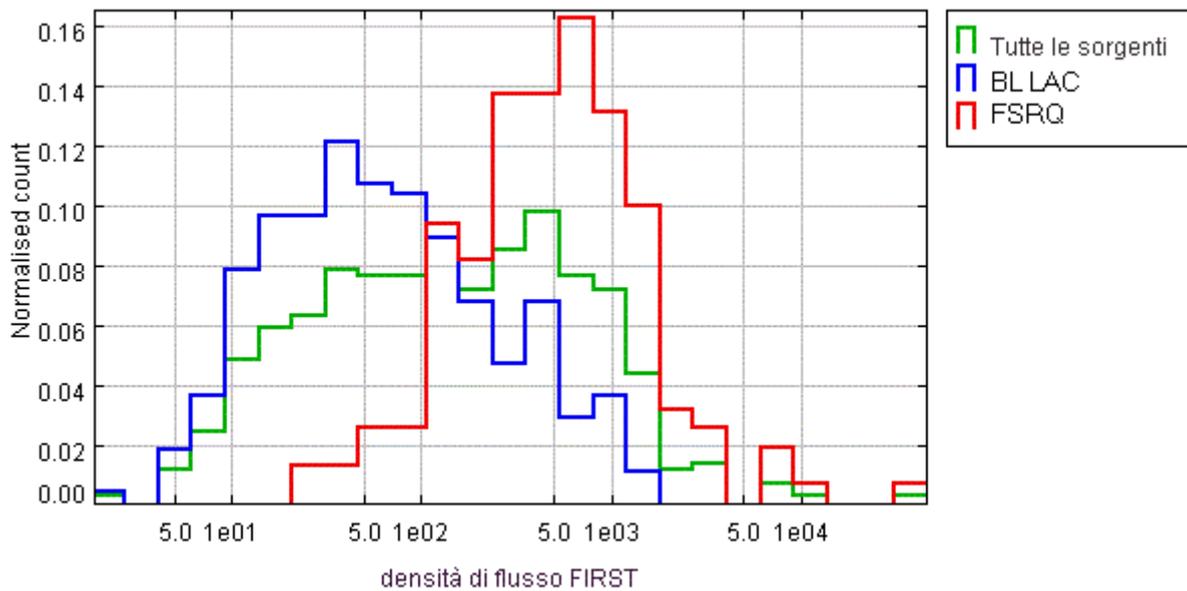


Figura 15 Densità di flusso FIRST per tutte le sorgenti ottenute tramite l'incrocio con il catalogo 3LAC (in verde), soli BL Lac (in blu), soli FSRQ (in rosso).

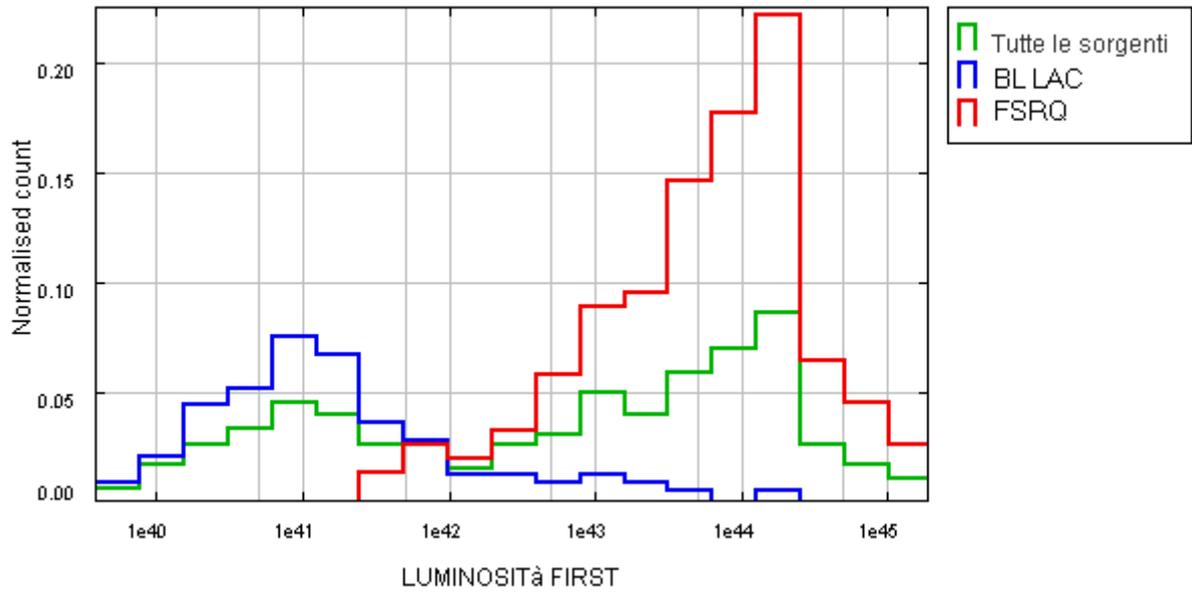


Figura 16 Luminosità FIRST per tutte le sorgenti ottenute tramite l'incrocio con il catalogo 3LAC (in verde), soli BL Lac (in blu), soli FSRQ (in rosso).

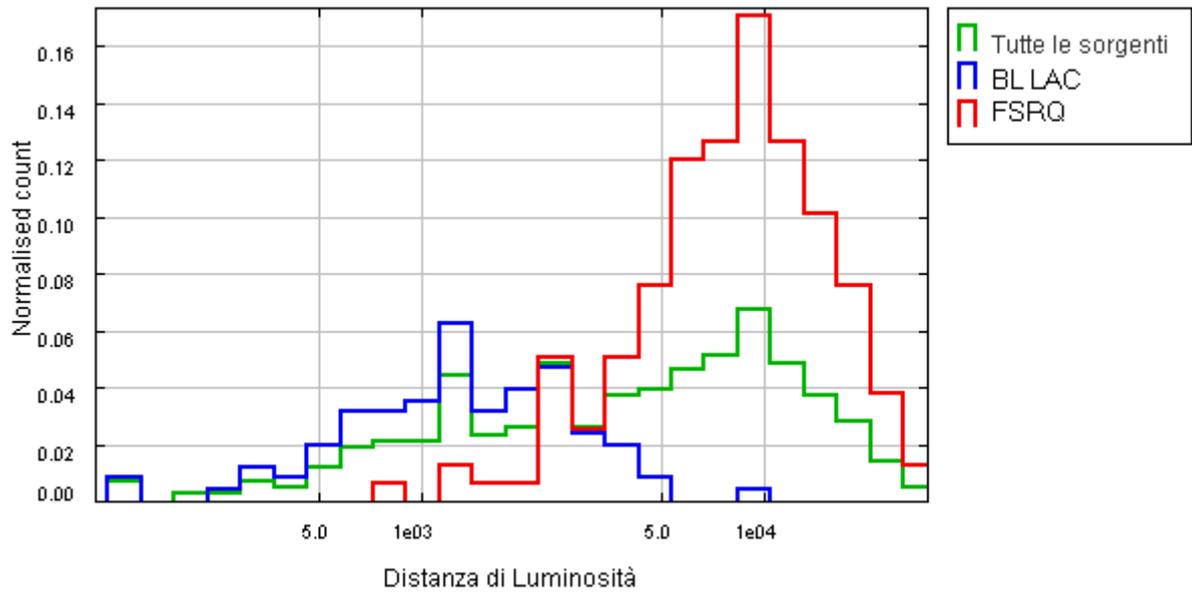


Figura 17 Distanza di luminosità FIRST per tutte le sorgenti ottenute tramite l'incrocio con il catalogo 3LAC (in verde), soli BL Lac (in blu), soli FSRQ (in rosso).

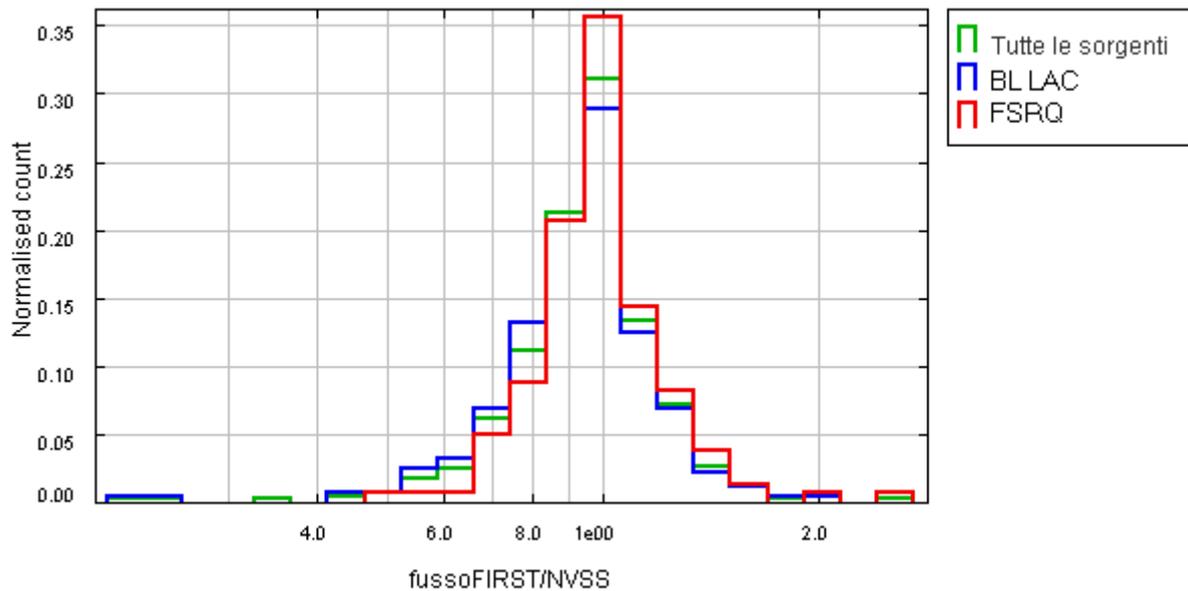


Figura 18 Rapporto tra la densità di flusso FIRST e la densità di flusso NVSS per tutte le sorgenti ottenute tramite l'incrocio con il catalogo 3LAC (in verde), soli BL Lac (in blu), soli FSRQ (in rosso). I grafici risultano in prima approssimazione simmetrici.

Successivamente è stato fatto un grafico per studiare la correlazione tra la densità di flusso radio, nelle ascisse, e la densità di flusso gamma, nelle ordinate, per tutte le sorgenti. Infine è stato ripetuto lo studio statistico delle grandezze considerate distinguendo tre casi: per tutto il campione, per il campione BL Lac, per il campione FSRQ.

Il valore del coefficiente di correlazione è $r=0.68$ per i BL Lac, $r=0.41$ per i FSRQ e $r=0.71$ per tutta la popolazione. I valori indicano una significativa correlazione e questo conferma che, per le sorgenti gamma, ricercare controparti nella banda radio è una strategia promettente.

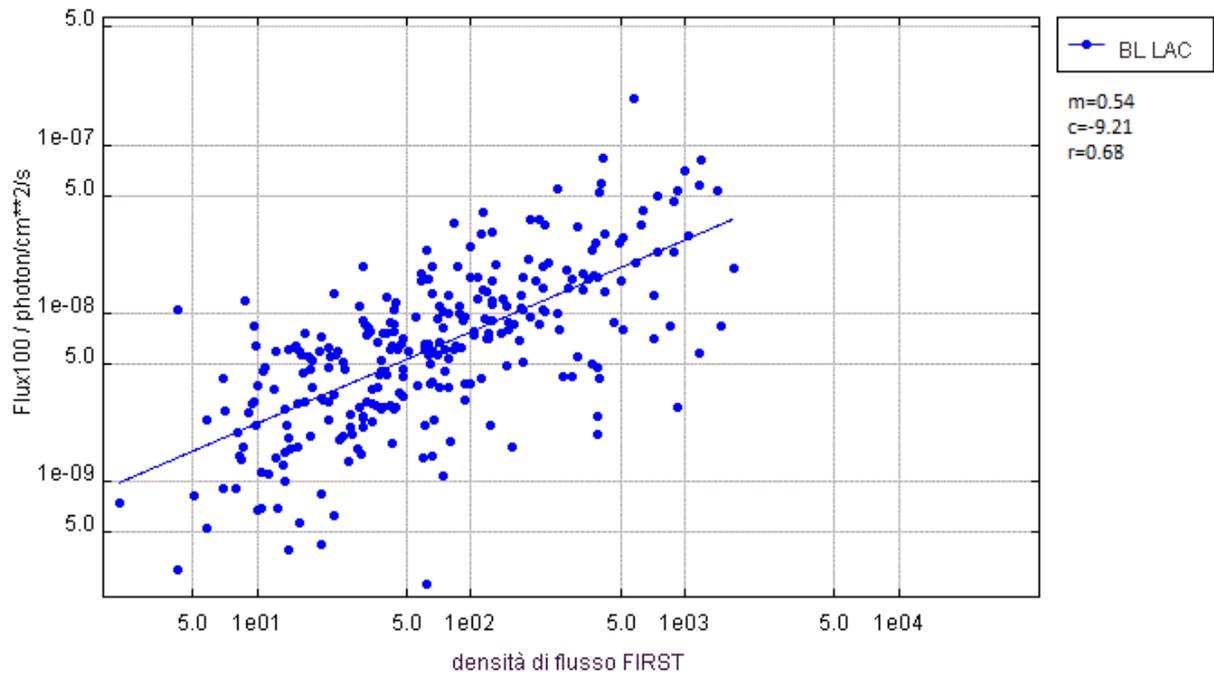


Figura 19 Densità di flusso gamma in funzione della densità di flusso radio FIRST per i soli BL Lac. Nella figura sono presenti i coefficienti della retta.

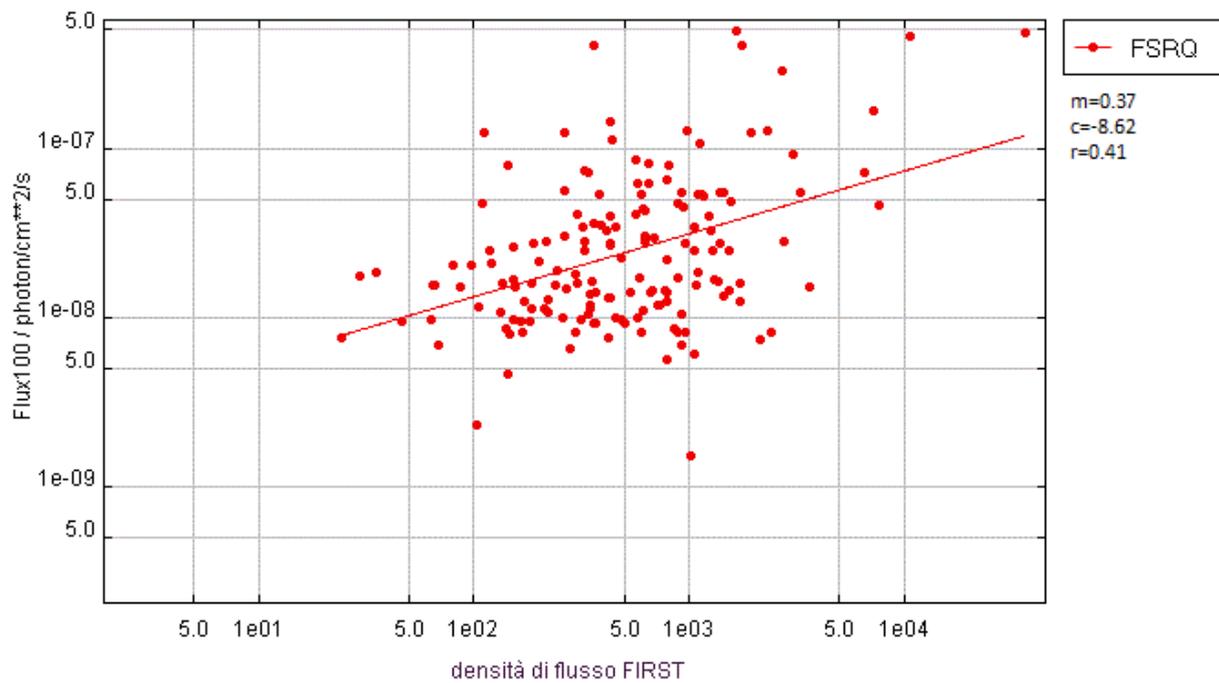


Figura 20 Densità di flusso gamma in funzione della densità di flusso radio FIRST per i soli FSRQ. Nella figura sono presenti i coefficienti della retta.

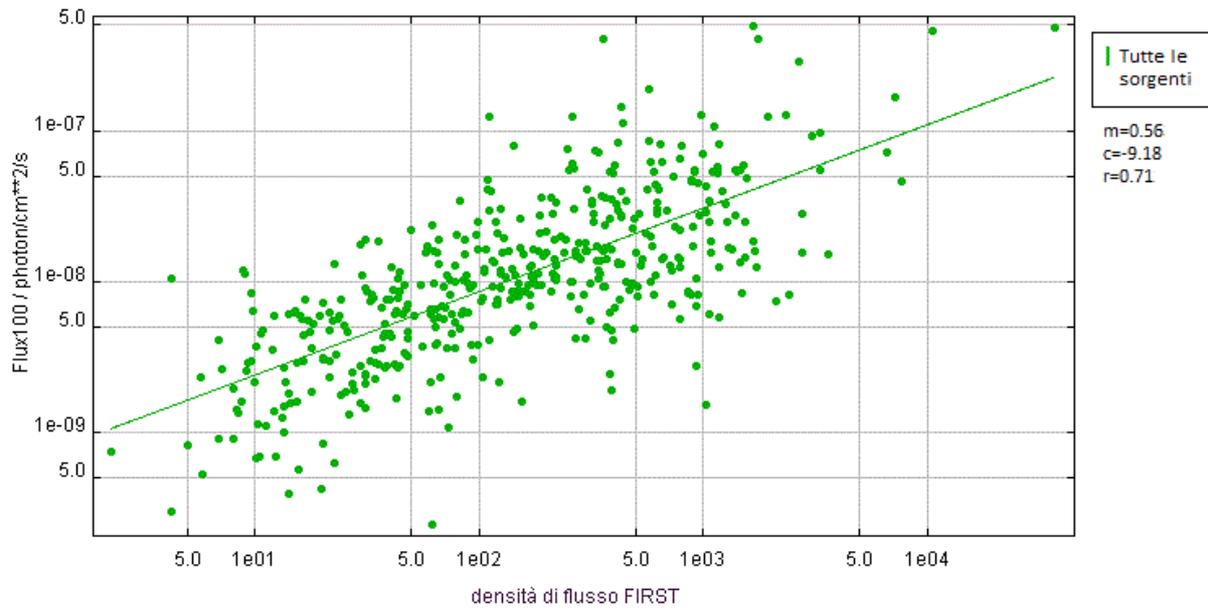


Figura 21 Densità di flusso gamma in funzione della densità di flusso radio FIRST per tutto il campione. Nella figura sono presenti i coefficienti della retta.

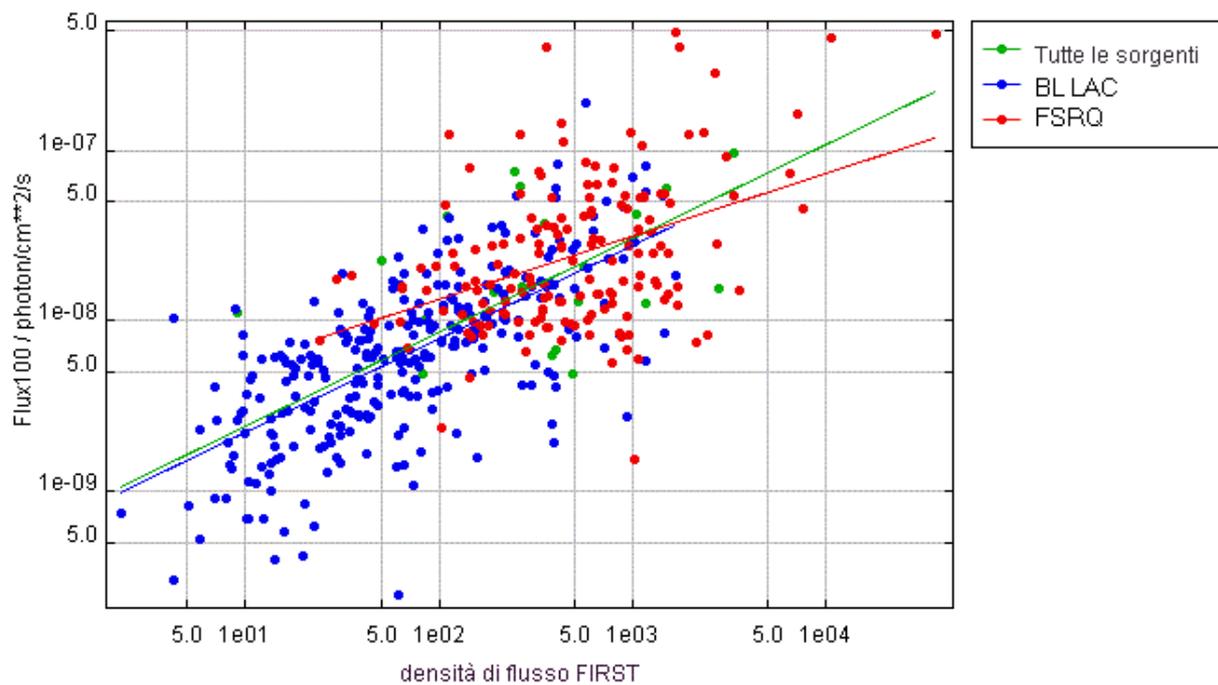


Figura 22 Densità di flusso gamma in funzione della densità di flusso radio FIRST per i Blazar (in blu), per i Quasar (in rosso) e per tutto il campione (in verde). Sono visibili in verde solo le sorgenti appartenenti a tutto il campione che non sono né Quasar né Blazar.

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	2.4	0.7	0.6	4.6	mJy
S_F/S_N	1.0	0.2	0.2	2.7	/
$\log_{10}S_F/S_N$	-0.03	0.11	-0.69	0.43	/
Redshift	0.9	0.7	0.0	3.0	/
$\log_{10}(dL)$	3.6	0.5	2.1	4.4	Mpc
$\log_{10}(dL)$	28.1	0.5	26.6	28.9	cm
$\log_{10} L_{\text{FIRST}}$	42.8	1.4	39.7	45.2	erg/s cm ²
$\log_{10}S_\gamma$	-7.9	0.6	-9.6	-6.3	fotoni/s cm ²

Tabella 6 Analisi statistica per tutto il campione ottenuto con l'incrocio con il 3LAC. Il numero di sorgenti ottenute è pari a 274. Sono state prese solamente le sorgenti con distanza di luminosità nota e sono stati tralasciati i dati NVSS, poiché non necessari.

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	1.8	0.6	0.6	3.2	mJy
S_F/S_N	0.9	0.2	0.2	1.3	/
$\log_{10}S_F/S_N$	-0.07	0.12	-0.69	0.11	/
Redshift	0.30	0.19	0.03	1.28	/
$\log_{10}(dL)$	3.1	0.3	2.1	4.0	Mpc
$\log_{10}(dL)$	27.6	0.3	26.6	28.5	cm
$\log_{10} L_{\text{FIRST}}$	41.2	0.9	39.7	44.4	erg/s cm ²
$\log_{10}S_\gamma$	-8.2	0.5	-9.6	-6.7	fotoni/s cm ²

Tabella 7 Analisi statistica per il campione BL Lac ottenuto con l'incrocio con il 3LAC. Il numero di sorgenti ottenute è pari a 98. Sono state prese solamente le sorgenti con distanza di luminosità nota e sono stati tralasciati i dati NVSS, poiché non necessari.

Nome	Media	SD	Minimo	Massimo	Unità di mis.
$\log_{10}S_F$	2.7	0.5	1.4	4.6	mJy
S_F/S_N	1.0	0.2	0.5	2.7	/
$\log_{10}S_F/S_N$	-0.01	0.09	-0.32	0.43	/
Redshift	1.3	0.6	0.2	3.0	/
$\log_{10}(dL)$	3.9	0.3	2.9	4.4	Mpc
$\log_{10}(dL)$	28.4	0.3	27.4	28.9	cm
$\log_{10} L_{\text{FIRST}}$	43.7	0.8	41.6	45.2	erg/s cm ²
$\log_{10}S_\gamma$	-7.6	0.4	-8.8	-6.3	fotoni/s cm ²

Tabella 8 Analisi statistica per il campione FSRQ ottenuto con l'incrocio con il 3LAC. Il numero di sorgenti ottenute è pari a 159. Sono state prese solamente le sorgenti con distanza di luminosità nota e sono stati tralasciati i dati NVSS, poiché non necessari.

Dal confronto tra le tabelle 6, 7, 8 e le tabelle 3 4 e 5 si può notare come i dati siano leggermente diversi se si prendono in esame le sorgenti incrociate con il 3LAC rispetto alle sole sorgenti radio: ad esempio per i BL Lac si ha che la luminosità FIRST delle sole sorgenti radio è pari a $10^{41.0}$ erg/s cm^2 , mentre dopo l'incrocio con le sorgenti gamma questo valore è pari a $10^{42.8}$ erg/s cm^2 . Quindi dopo l'incrocio si ottiene un campione di BL Lac in media più brillante. Lo stesso, anche se in misura minore, accade per i FSRQ, che hanno una luminosità FIRST prima dell'incrocio pari a $10^{43.4}$ erg/s cm^2 , e dopo pari a $10^{43.7}$ erg/s cm^2 . Dal confronto si può notare che anche le densità di flusso FIRST aumentano leggermente, da $10^{1.5}$ a $10^{1.8}$ mJy per i BL Lac, da $10^{2.3}$ a $10^{2.7}$ mJy per i FSRQ. Lo stesso discorso vale anche per l'intero campione di sorgenti.

7. La ricerca di nuovi Blazar

L'ultima parte del lavoro è uno studio sulle sorgenti non associate basato su una proprietà caratteristica dei gamma-ray blazar, ovvero quella di trovarsi in regioni di cielo con una densità di sorgenti radio maggiore rispetto al resto del cielo. Note queste due densità, si possono confrontare con la densità di sorgenti radio per le non associate. Se questa risulterà comparabile a quella media del cielo, allora chiaramente le sorgenti gamma non associate molto probabilmente non saranno blazar. Se invece la densità dovesse essere comparabile con quelle delle sorgenti identificate come blazar, allora si può affermare che una certa parte di sorgenti non associate sono dei blazar.

Per la ricerca di nuove possibili associazioni sono state considerate prima tutte le sorgenti NVSS-FIRST (in seguito indicate con NF) localizzate in corrispondenza delle sorgenti gamma non associate e, successivamente, sono state considerate le sorgenti NVSS-FIRST localizzate invece in prossimità delle sorgenti gamma identificate come blazar.

Si è anche analizzato il valore del rapporto tra le densità dei flussi FIRST/NVSS.

Il percorso seguito è partito dall'analisi della densità delle sorgenti.

La densità di sorgenti si può trovare tramite la formula

$$\rho = \frac{n_{sorg}}{A_{tot}}$$

dove ρ è la densità delle sorgenti, n_{sorg} è il numero di sorgenti NF presenti e A_{tot} è l'area totale in cui si trovano le sorgenti.

Il calcolo dell'area si basa su un semplice calcolo statistico. Ogni sorgente gamma è localizzata in un determinato ellisse di confidenza, all'interno del quale si può trovare la controparte, oltre ad un certo numero di sorgenti "spurie". Facendo la media dell'Area di ciascun ellisse e moltiplicandola per il numero di sorgenti gamma considerate, si trova, in approssimazione, l'area totale in cui si possono trovare le sorgenti. Il numero di sorgenti da considerare è stato trovato contando il numero di sorgenti gamma che cadono all'interno dell'area della survey NVSS-FIRST.

In primo luogo sono state considerate le sorgenti NVSS-FIRST, ed incrociate con le sorgenti gamma del 3FGL non associate, considerando tutti i possibili risultati e utilizzando la

confidenza del 95% come errore per il catalogo 3FGL e 10" di errore nel caso delle sorgenti NVSS-FIRST. Le sorgenti NVSS-FIRST considerate per l'incrocio sono solo quelle che posizionalmente si sovrappongono all'area delle sorgenti gamma non associate. È stato utilizzato un metodo grafico per trovare l'area sovrapposta delle survey e sono state scartate le sorgenti che si trovavano fuori da quest'area.

Nel caso delle sorgenti NVSS-FIRST che corrispondono a sorgenti gamma non associate, che possiamo indicare sintenticamente con $NF_{\gamma_{un}}$, si ha che:

- ◆ il numero di sorgenti gamma non associate che si sovrappongono all'area della survey NVSS FIRST è 112.
- ◆ L'area media in cui sono contenute le 112 sorgenti gamma è pari a 0.069876 gradi² e l'area totale è pari all'area media moltiplicata per 112, cioè 7.825 gradi².
- ◆ facendo il match tra le sorgenti NVSS-FIRST e le 112 sorgenti gamma non associate, si ha che il numero delle sorgenti NF che posizionalmente corrispondono alle 112 sorgenti gamma è $NF_{\gamma_{un}}=485$.
- ◆ la densità di sorgenti è pari a:

$$\rho_{NF_{\gamma_{un}}} = \frac{n_{NF_{\gamma_{un}}}}{A_{\gamma_{un}}} = \frac{485}{7.825} = 62.0 \text{ sorg/grado}^2$$

In secondo luogo sono state analizzate le sorgenti FIRST-NVSS incrociate con le sorgenti gamma del 3FGL identificate come blazar, considerando tutti i possibili risultati e utilizzando la confidenza del 95% come errore per il catalogo 3FGL e 10" di errore nel caso delle sorgenti NVSS-FIRST. Sono state considerate solamente le sorgenti del 3FGL classificate come BL Lac, BCU e FSRQ. Come per il caso precedente, le sorgenti NVSS-FIRST considerate sono solo quelle che posizionalmente si sovrappongono all'area delle sorgenti gamma identificate come blazar. Per l'area di sovrapposizione è stato usato lo stesso metodo descritto in precedenza.

Nel caso delle sorgenti NVSS-FIRST che corrispondono a sorgenti gamma identificate come blazar, che possiamo indicare sintenticamente con $NF_{\gamma_{as}}$, si ha che:

- ◆ il numero di sorgenti gamma identificate come blazar che si sovrappongono all'area della survey NVSS FIRST è $NF_{\gamma_{as}}=563$.

- ◆ L'area media in cui sono contenute le 563 sorgenti è pari a 0.030024 gradi^2 e l'area totale si trova moltiplicando quest'ultima per 562, è pari cioè a $16.903512 \text{ gradi}^2$.
- ◆ facendo il match tra le sorgenti NVSS-FIRST e le 563 sorgenti gamma identificate come blazar, si ha che il numero delle sorgenti corrispondenti è 1607.
- ◆ la densità di sorgenti è pari a:

$$\rho_{NF\gamma_{as}} = \frac{n_{NF\gamma_{as}}}{A_{\gamma_{as}}} = \frac{1607}{16.904} = 95.1 \text{ sorg/grado}^2$$

Questi dati possono essere paragonati alla densità di tutte le sorgenti radio NVSS-FIRST rispetto all'area dell'intera survey, pari a $36.4 \text{ sorg/grado}^2$. Pertanto concludiamo che sia per le sorgenti gamma identificate come blazar e sia per le sorgenti gamma non associate, la densità trovata è maggiore.

E' stata infine analizzata la densità di flusso FIRST/NVSS nei vari casi:

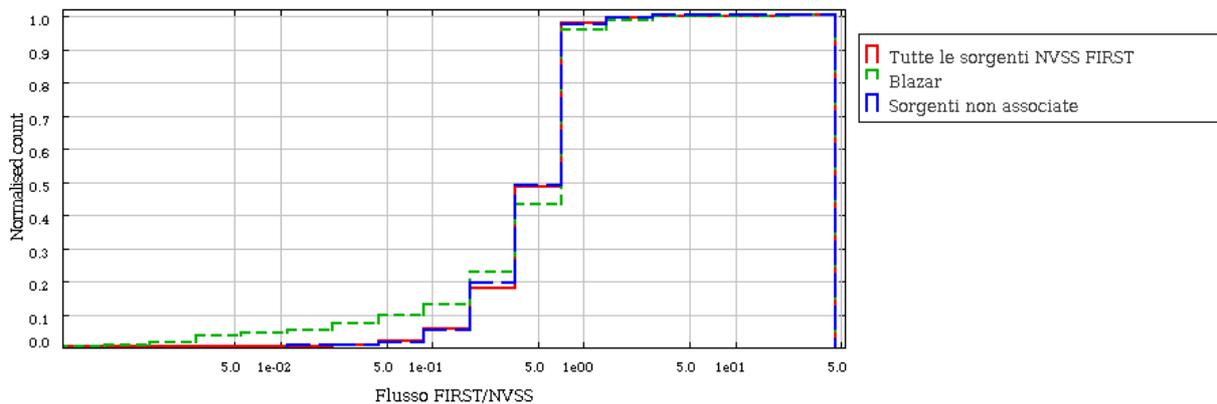


Figura 23 Rapporto densità di flusso FIRST densità di flusso NVSS per le sorgenti Blazar (in verde), per le sorgenti NVSS FIRST (in rosso) e per le sorgenti non associate (in blu).

7.1. Il parametro Blazar

Considerando le sorgenti non associate, è possibile provare ad associarle a sorgenti radio NVSS-FIRST utilizzando il "parametro Blazar" definito come:

$$b = S_F \frac{S_F}{S_N}$$

Il parametro b quindi è dato dal prodotto tra la densità di flusso FIRST e il rapporto tra le densità di flusso FIRST e NVSS.

Se il rapporto tra le densità di flusso è minore di uno, allora questo indica che la sorgente viene risolta meglio dalla survey NVSS e non rappresenta quindi un buon candidato blazar. Se invece questo rapporto è maggiore di uno, allora si tratta di una sorgente variabile ed è quindi un buon candidato blazar.

Quindi, considerando il parametro b , sorgenti con un valore molto grande di questo parametro sono sorgenti brillanti, compatte e variabili e quindi sono dei buoni candidati Blazar.

Per trovare il parametro b sono state considerate le 485 possibili associazioni per le sorgenti gamma non associate trovate precedentemente. Tramite l'analisi del parametro b di queste sorgenti è possibile stabilire quali siano i candidati blazar migliori. Ogni sorgente gamma non associata può avere più di una possibile controparte radio trovata tramite questo incrocio, ognuna con un determinato valore di b . La migliore candidata ad essere un blazar è sicuramente quella con il parametro b maggiore.

Ad esempio per la sorgente 3FGL J0744.3+1715 si trovano i seguenti valori di b :

Associazione numero	b
1	262.76
2	2.95
3	4.814
4	2.84
5	3.89
6	8.38
7	7.93

Tabella 9 Un esempio per la ricerca del miglior candidato blazar basato sulla sorgente 3FGL J0744.3+1715

Come si può vedere dalla tabella 9, tra le sette associazioni la prima è quella con il valore di b di gran lunga maggiore, essendo oltre 30 volte più grande rispetto alle altre, ed è l'unica che viene presa in esame poiché è la migliore candidata blazar.

Quindi, isolando per ogni sorgente con associazione multipla solo quella che ha il parametro b maggiore di tutte le altre, si trovano 96 possibili candidati blazar. Tra questi i migliori

candidati saranno quelli con il parametro b maggiore e, invece, le sorgenti che molto probabilmente non saranno blazar sono quelle che hanno un valore di b molto piccolo.

Nome sorgente	Parametro blazar b
3FGL J1051.0+5332	722.72
3FGL J1648.0+4230	333.54
3FGL J1427.2+1610	265.92
3FGL J0744.3+1715	262.76
3FGL J0330.6+0437	158.33
3FGL J1644.4+2632	147.43
3FGL J1216.6-0557	138.39
3FGL J1309.0+0347	135.39
3FGL J1258.4+2123	130.96
3FGL J1411.4-0724	101.05
3FGL J1059.3+0224	100.81
3FGL J0232.6+0646	88.52
3FGL J1611.9+1404	80.63
3FGL J2043.6+0001	80.43
3FGL J1729.0+6049	77.62
3FGL J0749.5+1320	69.07
3FGL J0830.8+2629	66.02
3FGL J1616.8+5846	64.78
3FGL J0935.2+0903	58.10
3FGL J1301.5+3333	57.59
3FGL J1049.7+1548	57.16
3FGL J1502.2+5553	49.15
3FGL J0733.3+5904	48.75
3FGL J2145.5+1007	47.20
3FGL J1232.3+1701	46.42
3FGL J1205.9+3315	43.97
3FGL J0158.6+0102	43.31
3FGL J1220.3+6055	43.02
3FGL J0216.0+0300	36.86
3FGL J1635.3+4257	31.29
3FGL J1115.0-0701	30.97
3FGL J1200.4+0202	30.70
3FGL J1103.3+5239	30.18
3FGL J1330.4+5641	29.90
3FGL J0952.8+0711	27.90
3FGL J1709.9+4624	27.73
3FGL J1249.5-0546	27.35
3FGL J1151.5+0957	27.22
3FGL J1548.4+1455	26.60
3FGL J0004.2+0843	26.49
3FGL J1541.6+1414	25.70
3FGL J1234.7-0437	25.68
3FGL J1105.7+4427	25.48
3FGL J1052.0+0816	21.82

3FGL J1129.0+3758	20.68
3FGL J1223.2+1215	19.93
3FGL J1553.1+5437	19.79
3FGL J1732.7+5914	19.56
3FGL J1731.9+5428	19.22
3FGL J1329.1-0536	19.17
3FGL J2338.7+0251	19.00
3FGL J0216.4+0507	17.50
3FGL J1618.8+5520	17.14
3FGL J1315.7-0732	15.53
3FGL J1232.8+1332	15.48
3FGL J2209.8-0450	15.02
3FGL J0014.3-0455	14.22
3FGL J1553.3-0322c	14.08
3FGL J1112.1+1034	12.44
3FGL J1411.1+3717	12.31
3FGL J0031.6+0938	12.15
3FGL J1223.3+0818	11.72
3FGL J1228.4-0317	10.60
3FGL J1345.1+1949	10.16
3FGL J0020.9+0323	8.90
3FGL J1506.4-0340	8.88
3FGL J1403.1+1304	7.88
3FGL J1149.1+2815	7.49
3FGL J2110.0+0442	7.48
3FGL J0946.2+5209	7.47
3FGL J2223.3+0103	7.22
3FGL J0240.0-0253	7.02
3FGL J1250.2-0233	6.83
3FGL J0930.7+5133	6.72
3FGL J0258.9+0552	6.64
3FGL J1146.1-0640	6.39
3FGL J1221.5-0632	6.26
3FGL J1231.6+4825	6.13
3FGL J0102.1+0943	6.10
3FGL J1517.0+2637	5.94
3FGL J1304.6+1200	4.97
3FGL J1550.4+6027	3.97
3FGL J1707.8+5626	3.57
3FGL J0749.0+4459	3.51
3FGL J1117.7+0217	3.39
3FGL J1632.8+3838	3.05
3FGL J0203.6+1148	2.81
3FGL J2310.1-0557	2.73
3FGL J1543.5-0244	2.65
3FGL J1050.4+0435	2.28
3FGL J1112.1+0500	1.90
3FGL J0017.1+1445	1.52

3FGL J2247.2-0004	1.20
3FGL J0234.2-0629	0.99
3FGL J0834.6+6101	0.39
3FGL J0242.1-0534	0.18

Tabella 9 Analisi del parametro Blazar b per le 99 sorgenti radio probabili controparti delle 112 sorgenti gamma non associate. La tabella è ordinata in ordine decrescente rispetto a b , nella parte superiore si trovano i migliori candidati blazar, nella parte inferiore i peggiori candidati.

7.2. Le sorgenti non Blazar

L'ultima parte di questo lavoro è stata la ricerca delle sorgenti gamma non considerate precedentemente, ovvero quelle che vengono escluse confrontando le sorgenti gamma non associate con le sorgenti radio NVSS-FIRST. Queste molto probabilmente non hanno nulla a che vedere con i blazar e, quindi, si tratta di oggetti di natura completamente diversa.

Per trovare queste sorgenti è stato fatto un incrocio tra le 112 sorgenti gamma non associate e quelle NVSS-FIRST considerando tutti i possibili risultati e utilizzando la confidenza del 95% come errore per il catalogo 3FGL e 10" di errore nel caso delle sorgenti NVSS-FIRST. Sono state però prese in esame solamente quelle sorgenti che si trovano nel 3FGL ma non nella NVSS-FIRST.

Sono state trovate in questo modo 13 sorgenti. Sono espresse in funzione del logaritmo delle densità di flusso gamma tra 100-300 MeV, 300-1000 MeV e 1000-3000 MeV. I flussi sono espressi in fotoni/s cm².

Nome 3FGL	$\text{Log}_{10}S_{100-300}$	$\text{Log}_{10}S_{300-1000}$	$\text{Log}_{10}S_{1000-3000}$
J0008.3+1456	-8.42	-8.89	-9.43
J0818.0+3237	-9.54	-8.74	-9.70
J0856.4+6429	-8.26	-9.28	-9.82
J0921.6+2339	-8.67	-8.91	-9.46
J0941.0+6151	-7.96	-9.03	-9.60
J1120.6+0713	-10.57	-8.62	-9.07
J1211.8+6413	-8.18	-9.61	-9.79
J1225.9+2953	-8.84	-8.57	-9.06
J1601.9+2306	-8.49	-9.34	-9.13
J1625.1-0021	-8.21	-8.40	-8.50
J1628.1+0254	-9.22	-9.31	-9.34
J2115.2+1215	-8.17	-8.80	-9.72
J2212.5+0703	-8.17	-8.48	-9.00

Tabella 10 Le 13 sorgenti gamma non associate che non corrispondono a Blazar.

8. Conclusioni

Tramite l'analisi dei dati si ha che la densità di tutte le sorgenti NVSS-FIRST è pari a $36.4 \text{ sorg/grado}^2$. Questa rappresenta la densità di tutte le sorgenti, che si può confrontare con la densità di sorgenti NVSS-FIRST che sono identificate come blazar, pari a $95.1 \text{ sorg/grado}^2$. Queste due densità sono molto diverse tra loro, quella delle sorgenti identificate come blazar è quasi tre volte quella di tutte le sorgenti NVSS-FIRST che, supposta uniforme, può essere pensata come la densità media del cielo o comunque di una regione che non contiene un blazar. Questo conferma che le aree di cielo che contengono un blazar hanno una densità più alta. Quindi, considerando le sorgenti non associate e volendo cercare di capire che tipo di sorgenti siano, un indizio importante potrebbe proprio essere la densità di sorgenti. Infatti se questa fosse circa la stessa di tutto il cielo, allora non ci sarebbero indizi per poter affermare che in quella regione di cielo si trovi un blazar; ma se questa densità fosse maggiore e paragonabile a quella delle sorgenti blazar, allora questo suggerirebbe l'idea che anche le sorgenti non associate siano con buona probabilità dei blazar. Quindi, lavorando sull'intera area di sorgenti non associate si può trovare un metodo alternativo per trovare nuovi blazar e fare quindi nuove associazioni. La densità delle sorgenti non associate è pari a $62.0 \text{ sorg/grado}^2$, molto maggiore della densità di tutte le sorgenti NVSS-FIRST. Questo suggerisce che anche le sorgenti non associate siano associabili con buona probabilità a dei blazar.

Si è dimostrato quindi, grazie a questo lavoro, che è possibile trovare un metodo alternativo che si basa, più che sull'identificazione di una singola sorgente, su una considerazione globale. Poiché i dati sperimentali confermano che la densità di sorgenti non associate è molto maggiore di quella media del cielo, si può affermare che numerosi blazar ancora non classificati si celano fra le sorgenti gamma non identificate.

Con il parametro Blazar b , si è cercato di classificare le sorgenti non associate in base alla loro "tendenza blazar": si è trovato che molte di queste sorgenti hanno un valore di b molto grande, ad indicare che potrebbero essere dei buoni candidati blazar, mentre altre hanno un valore piccolo di b , che indicherebbe che invece non sono buoni candidati. Questo conferma che vi è una contaminazione da blazar per le sorgenti non associate, come trovato anche tramite l'analisi della densità di sorgenti.

Infine sono state trovate 13 sorgenti gamma non associate che con grande probabilità non sono blazar. Queste sono tutte quelle sorgenti non associate che non hanno nessuna controparte nella survey NVSS-FIRST e sono del tutto diverse dai blazar. Potrebbero quindi appartenere a classi di oggetti già noti (ad esempio le pulsar) ma potrebbero anche essere qualcosa di completamente sconosciuto.

Un passaggio successivo, che si avvale delle proprietà dei blazar ricavate nel capitolo 6, potrebbe essere un ulteriore approfondimento delle proprietà (ad esempio le proprietà ottiche) delle controparti singole più probabili, basandosi sulla brillantezza e la compattezza tipiche dei blazar, proprietà che invece risultano molto diverse per il resto delle sorgenti NVSS-FIRST.

Bibliografia

Condon, J. J., Cotton, W. D., Greisen, E. et al. 1998 - *The NRAO VLA Sky Survey*. *Astronomical Journal*, 115, 1693.

Becker, R. H., White, R. L., & Helfand, D. J. 1995 - *The FIRST Survey: Faint Images of the Radio Sky at Twenty Centimeters*. *Astrophysical Journal*, 450, 559.

Acero, F., Ackermann, M., Ajello, M. et al. 2015 - *Fermi Large Area Telescope Third Source Catalog*. *Astrophysical Journal*, 218, 2.

Ackermann, M., Ajello, M., Atwood, W.B. et al. 2015 - *The Third Catalog of Active Galactic Nuclei Detected by the Fermi Large Area Telescope*. *Astrophysical Journal*, 810, 14.

Massaro, E., Maselli, A., Leto, C. et al. 2015 - *The 5th Edition of The Roma-BZCAT*. *Astrophysics and Space Science*, 357, 75.

Kimball, A. E., Ivezić, Ž., 2008 - *A Unified Catalog of Radio Objects detected by NVSS, FIRST, WENSS, GB6, AND SDSS*. *Astronomical Journal*, 136, 2.

Giroletti, M., Orienti, M., D'Ammando, F. et al. 2015 - *The connection between radio and high energy emission in black hole powered systems in the SKA era*, arXiv: 1501.03330.

<https://public.nrao.edu/>

<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

Figura 1 https://ned.ipac.caltech.edu/level5/March04/Torres/Torres2_4.html

Figura 2 <https://ned.ipac.caltech.edu/level5/Urry/Urry5.html>

Figura 3 <https://public.nrao.edu/gallery/radio-telescopes/image?id=239>

Figura 4 <http://fermi.sonoma.edu/multimedia/gallery/GLASTsat08Web.jpg>

Figura 5 <http://fermi.gsfc.nasa.gov/science/eteu/catalogs/figure1.jpg>

Ringrazio il Prof. Gabriele Giovannini per la grande disponibilità e per avermi dato l'opportunità di svolgere questo lavoro.

Ringrazio il Dott. Marcello Giroletti che mi ha seguito pazientemente durante tutto il lavoro con grande entusiasmo, sempre pronto a darmi ottimi consigli.

Ringrazio la mia famiglia che mi ha sempre sostenuto e in particolare i miei genitori, che hanno sempre creduto in me e mi hanno sempre incoraggiata.

Ringrazio il mio ragazzo Giovanni che ha saputo aiutarmi nei momenti di difficoltà e che mi ha sostenuto per tutta la durata di questo cammino. Sono sicura che nessuno avrebbe potuto fare meglio di lui e quindi il merito di questo lavoro è in gran parte suo, poiché mi ha permesso di svolgerlo con serenità e tranquillità, sapendo di poter contare sempre su di lui.

Ringrazio mio zio il Prof. Antonio Schieda che, tanti anni fa, mi ha aperto la mente alle meraviglie del mondo della matematica e che mi ha fatto capire l'importanza delle basi matematiche nello studio.