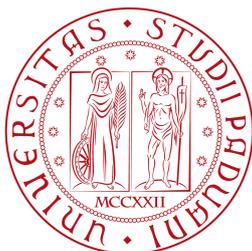


Università degli Studi di Padova

SCUOLA DI SCIENZE  
DIPARTIMENTO DI FISICA ED ASTRONOMIA  
"GALILEO GALILEI"



LAUREA TRIENNALE IN ASTRONOMIA

Caratterizzazione delle Sorgenti Gamma  
dell'Osservatorio Fermi

**Relatore:** Prof. Alberto Franceschini

**Correlatore:** Dott.ssa Simona Paiano

**Laureando:** EDOARDO IANI

A.A. 2013 - 2014



### *Abstract*

Oggetto della seguente tesi triennale in astronomia è lo studio delle caratteristiche fisiche delle sorgenti del cielo gamma e delle ultime missioni scientifiche atte alla loro analisi. Particolare importanza sarà data alla missione Fermi.

Il primo capitolo è dedicato alla presentazione dei processi fisici che danno luogo all'emissione di radiazione gamma e di come questa venga osservata e studiata oggi.

Il secondo capitolo tratta la descrizione della missione spaziale Fermi, delle sue caratteristiche tecniche e dei cataloghi ad essa associati.

Il terzo capitolo presenta le attuali teorie fisiche per la descrizione delle principali sorgenti gamma galattiche ed extragalattiche rilevate dall'osservatorio Fermi.

Nella parte conclusiva della tesi (capitoli 4 e 5) presenteremo il nostro lavoro di ricerca, supervisionato in particolare dalla dottoressa in astronomia Simona Paiano.

A partire da un confronto tra le proprietà fisiche delle diverse sorgenti gamma investigate (capitolo 4), abbiamo ottenuto alcuni diagrammi basati sul rapporto tra le densità di flusso di energia nelle bande dello spettro elettromagnetico X, ottico, radio e gamma. Si è potuto compiere questo studio a partire dai dati tabulati nei cataloghi *Fermi LAT Second Source Catalog* (2FGL), dal *Fermi LAT Second AGN Catalog* (2LAC) e dal *The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars* (2PC).

Il risultato ci ha permesso di ricavare un utile ed efficace metodo grafico per la verifica della validità delle associazioni di sorgenti gamma con le rispettive controparti. Successivamente, tale metodo è stato applicato ad un campione di sorgenti prese in analisi nel lavoro di ricerca della dottoranda Simona Paiano. Nella gran parte dei casi, abbiamo potuto convalidare le associazioni da lei ottenute.



# Indice

<b>1</b>	<b>Astronomia in raggi gamma</b>	<b>1</b>
1.1	Processi fisici di produzione della radiazione gamma . . . . .	1
1.1.1	Raggi cosmici . . . . .	1
1.1.2	Raggi gamma . . . . .	4
1.1.3	Processi di assorbimento dei raggi gamma . . . . .	10
1.2	Strumenti e tecniche osservative . . . . .	10
1.2.1	Telescopi da terra . . . . .	10
1.2.2	Telescopi spaziali . . . . .	12
<b>2</b>	<b>L'osservatorio Fermi</b>	<b>13</b>
2.1	La missione Fermi . . . . .	13
2.2	Caratteristiche tecniche del LAT . . . . .	14
2.3	I cataloghi . . . . .	15
2.3.1	Il Fermi LAT Second Source Catalog (2FGL) . . . . .	16
<b>3</b>	<b>Classi di sorgenti rilevate</b>	<b>19</b>
3.1	Sorgenti galattiche . . . . .	19
3.1.1	Resti di Supernova . . . . .	20
3.1.2	Pulsar . . . . .	22
3.1.3	Microquasars e sistemi binari a raggi X . . . . .	24
3.2	Sorgenti extragalattiche . . . . .	25
3.2.1	AGN . . . . .	26
3.2.2	Gamma-Ray Burst . . . . .	31
3.3	Unidentified Fermi Objects . . . . .	32
<b>4</b>	<b>Proprietà statistiche delle varie classi</b>	<b>35</b>
4.1	Redshift . . . . .	35
4.2	Flusso fotonico . . . . .	36
4.3	Flusso di energia radiante . . . . .	38
4.4	Indice spettrale . . . . .	39
4.5	Indice di variabilità . . . . .	40
4.6	Latitudine galattica . . . . .	43

<b>5</b>	<b>Diagrammi colore-colore</b>	<b>45</b>
5.1	Ottenimento e riduzione dati . . . . .	45
5.1.1	<i>Sorgenti HSP, ISP, LSP e AGU:</i> . . . . .	46
5.1.2	<i>Sorgenti pulsar:</i> . . . . .	48
5.1.3	<i>Sorgenti microQSO:</i> . . . . .	50
5.2	Diagramma del rapporto di densità di flusso di energia. . . . .	51
5.2.1	Diagramma del rapporto $\frac{radio}{X}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ . . . . .	51
5.2.2	Diagramma del rapporto $\frac{ottico}{X}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ , $\frac{radio}{ottico}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ e $\frac{radio}{X}$ vs. $\frac{ottico}{X}$ . . . . .	55
<b>6</b>	<b>Conclusioni</b>	<b>59</b>
	<b>Bibliografia</b>	<b>iii</b>

# Capitolo 1

## Astronomia in raggi gamma

### 1.1 Processi fisici di produzione della radiazione gamma

In questa sezione affrontiamo i processi di fisica nucleare che danno luogo alla formazione dei raggi gamma caratterizzanti lo spettro elettromagnetico per energie superiori a  $0.5 \text{ MeV}$ .

Dal punto di vista astrofisico, importanti emissioni gamma si hanno da parte di sorgenti celesti quali i resti di supernova ad alta energia, sistemi binari (composti da stelle normali o da oggetti compatti quali stelle a neutroni o buchi neri) e nuclei galattici attivi (AGN) che contengono al loro centro buchi neri supermassivi. Tali oggetti si comportano come veri e propri acceleratori naturali di particelle.

Le diverse tipologie di sorgenti, in particolare quelle osservate dal telescopio spaziale Fermi, verranno trattate in maniera più approfondita nei successivi capitoli.

Vediamo ora maggiormente in dettaglio i processi fisici coinvolti nell'emissione di una radiazione così altamente energetica.

#### 1.1.1 Raggi cosmici

Scoperti nel contesto dello studio della “radiazione naturale”, i raggi cosmici<sup>1</sup> sono costituiti principalmente da particelle subatomiche di altissima energia.

Particolarmente importante nello studio delle caratteristiche dei raggi cosmici è l'analisi della loro distribuzione di energia. Lo spettro differenziale,

---

<sup>1</sup>Scoperti nel 1911 indipendentemente dall'italiano Domenico Pacini e dall'austriaco Victor Hess, i raggi cosmici vennero rilevati contestualmente allo studio della radioattività naturale terrestre (la radiazione naturale). Durante tali studi venne scoperta la loro origine extraterrestre. Per ulteriori approfondimenti rimandiamo all'articolo di Alessandro De Angelis, *Gli enigmi dei raggi cosmici*, pubblicato da *Le Scienze* n. 528 (agosto 2012).

descritto da leggi di potenza, è diviso in tre macro regioni dovute al cambio di pendenza (ovvero alla variazione dell'indice spettrale) della stessa power-law, così come si evince da fig. 1.1.

Per quanto detto, possiamo definire l'andamento dello spettro differenziale di energia con la legge di potenza:

$$I(E) \propto E^{-\alpha} \quad (1.1)$$

, dove  $\alpha$  è l'indice spettrale.

I valori assunti da  $\alpha$  in funzione di  $E$  sono:

- $\alpha \simeq 2.7$  per  $E \lesssim 10^{15.5}$  eV;
- $\alpha \simeq 3$  per  $10^{15.5}$  eV  $\lesssim E \lesssim 10^{18}$  eV;
- $\alpha \simeq 2.6$  per  $E \gtrsim 10^{18}$  eV.

Le due regioni in cui avviene il cambio di pendenza della power-law prendono rispettivamente il nome di **ginocchio** (*knee*) e di **caviglia** (*ankle*). Se alle basse energie ( $E \lesssim 10^{15.5}$  eV) i raggi cosmici hanno origine prevalentemente solare (*vento solare*) e galattica, a valori di  $E$  superiori al *ginocchio* la loro natura è extragalattica.

Circa il 99% dei raggi cosmici di alta energia è costituito da protoni (l'88%), nuclei di elio (circa il 10%) e nuclei di elementi pesanti (l'1%). Il restante 1% è dato da elettroni e fotoni, oltre a piccole quantità di antimateria.

È importante sottolineare il fatto che queste particelle non giungono a noi direttamente a causa del loro assorbimento da parte dell'atmosfera terrestre. Infatti, quando i raggi cosmici *primari* incidono sull'atmosfera, questi danno luogo alla formazione di particelle secondarie si propagano fino alla superficie terrestre tramite il fenomeno dei cosiddetti **sciami moltiplicativi**<sup>2</sup>, vedi fig. 1.2.

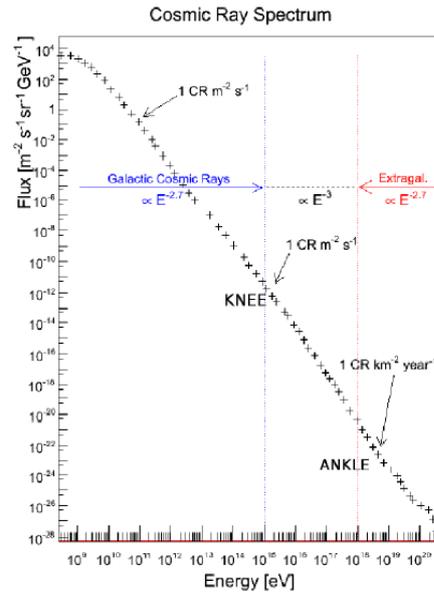


Figura 1.1: Spettro di energia dei raggi cosmici. Si nota la presenza del *ginocchio* e della *caviglia* che determinano la distinzione tra raggi cosmici di natura galattica ed extragalattica.

<sup>2</sup>Gli sciami moltiplicativi, osservati per la prima volta da Bruno Rossi nel 1933, si caratterizzano per un complesso susseguirsi di interazioni a catena, produzioni di particelle, processi di assorbimento e decadimenti spontanei.

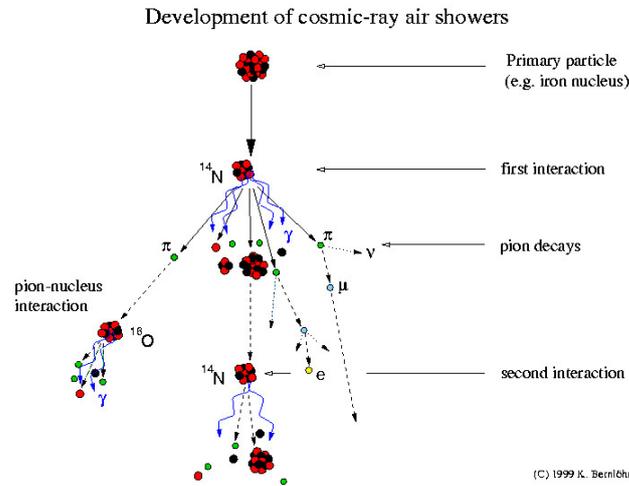


Figura 1.2: Rappresentazione grafica della struttura di uno sciame atmosferico adronico.

La composizione chimica di tali raggi cosmici è nota con un buon grado di accuratezza grazie allo sviluppo ed utilizzo di rivelatori sensibili alla massa. Non è possibile dire altrettanto per quanto concerne la loro origine che è tutt'ora poco chiara. Tuttavia, a tal riguardo, sappiamo che l'unica forza nota nell'universo che può dar luogo all'emissione di tali energie è la forza di gravità. Pertanto, si ritiene che le sorgenti dei raggi cosmici debbano essere legate a giganteschi collassi gravitazionali come ad esempio accade nei resti di supernova e nell'accrescimento di buchi neri supermassicci presenti al centro delle galassie. Questa teoria, che lega i raggi cosmici di altissima energia a collassi gravitazionali, è stata avvalorata dai dati osservativi ottenuti dal rivelatore Osservatorio Pierre Auger.<sup>3</sup>

In generale l'interazione delle particelle cariche, che costituiscono la gran parte dei raggi cosmici, con gli intensi campi magnetici generati dalle sorgenti, deviano tali raggi, rendendo quindi irrintracciabile il loro luogo d'origine. Un'alternativa alla fisica degli sciami e alla costruzione di grandi rivelatori quali l'Osservatorio Pierre Auger è data dallo studio della componente neutra dei raggi cosmici<sup>4</sup> ed in particolare allo studio di fotoni ad altissima energia: i raggi gamma.

<sup>3</sup>Nato dalle menti di J. Cronin ed A. Watson nel 1994 e sito nel cuore della pampa argentina, l'Osservatorio Pierre Auger dal 2004 raccoglie dati relativi alla natura ed origine dei raggi cosmici. Le dimensioni di tale rivelatore, che superano i  $3000 \text{ Km}^2$ , permettono l'ottenimento di informazioni fondamentali basandosi sulla fisica degli sciami. Finora i dati ottenuti mostrano un buon grado di correlazione tra la direzione di provenienza dei raggi cosmici ed i nuclei delle galassie. Un esempio fra tutte la galassia sorgente Centaurus A.

<sup>4</sup>La componente neutra è costituita principalmente da neutroni, neutrini e fotoni. Il nostro interesse si focalizza su quest'ultima componente, seppur minoritaria, non risultando

### 1.1.2 Raggi gamma

Vista la loro natura fotonica, i raggi  $\gamma$  costituiscono una delle piú importanti componenti neutre dei raggi cosmici, non risentendo dell'azione di campi magnetici galattici.

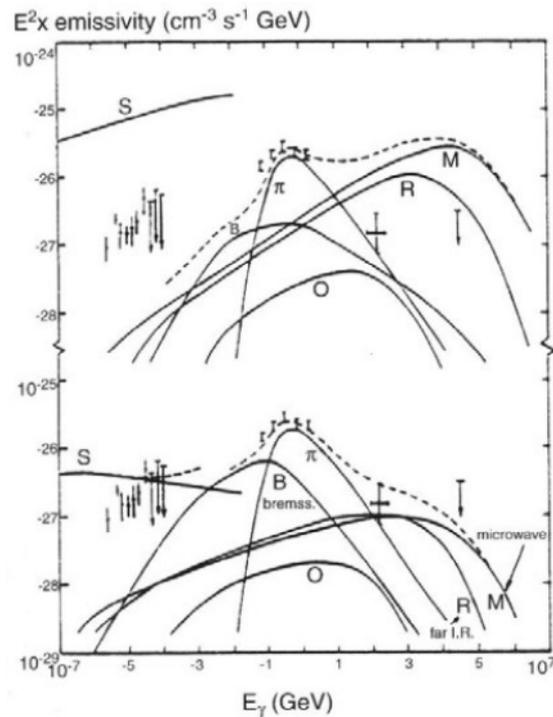


Figura 1.3: Nel grafico è riportata l'emissività prevista per raggi X e gamma da processi quali: interazione di Compton Inverso con la radiazione di fondo delle microonde (M), radiazione del lontano infrarosso (R), luce stellare (O), radiazione di sincrotrone (S), bremsstrahlung non termica (B), il decadimento di pioni neutri prodotti nelle interazioni nucleari dei raggi cosmici ( $\pi$ ). L'emissività totale è riprodotta dalla curva tratteggiata. (Tratto da Protheroe e Wolfendale, 1980)

A seconda del range di valori dell'energia assunti da tale radiazione, i raggi gamma possono essere divisi nelle classi di **Low Energy (LE)- $\gamma$**  (da 0.51 MeV a 10 MeV), **Medium Energy (ME)- $\gamma$**  (da 10 MeV a 30 MeV), **High Energy (HE)- $\gamma$**  (da 30 MeV a 100 GeV), **Very High Energy (VHE)- $\gamma$**  (da 100 GeV a 100 TeV), **Ultra High Energy (UHE)- $\gamma$**  (da 100 TeV a 100 PeV) ed **Extremely High Energy (EHE)- $\gamma$**  (da 100 PeV a 100 EeV).

---

così difficile da detectare (come accade per i neutrini) e non risentendo di decadimento spontaneo come avviene per i neutroni (il cui tempo di vita medio è di circa 15 minuti).

Oggi giorno, tra i meccanismi più accreditati di produzione<sup>5</sup> dei raggi gamma troviamo l'emissione di Sincrotrone, il processo di Bremsstrahlung (ovvero radiazione di frenamento), l'effetto Compton Inverso (IC) e il Sincrotron Self Compton Model (SSC). Ricordiamo, inoltre, il decadimento di pioni e il processo di annichilazione elettrone-positrone.

### Emissione di Sincrotrone

Il processo di emissione di radiazione di sincrotrone si ha quando una particella carica, muovendosi all'interno di un campo magnetico e risentendo della forza di Lorentz, emette radiazione.

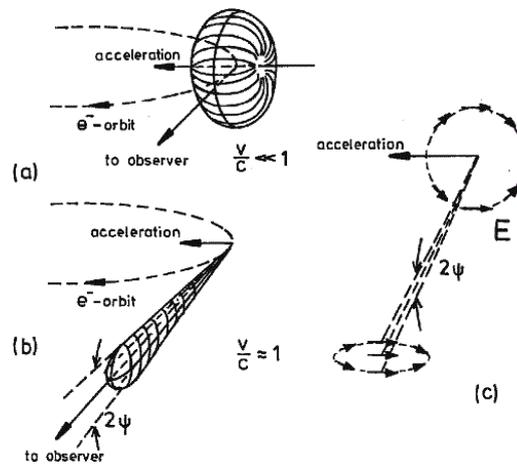


Figura 1.4: Rappresentazione grafica del processo di emissione di radiazione di sincrotrone per un elettrone in presenza di un campo magnetico e della formazione del *cono di luce*.

Tralasciando la trattazione del caso classico, se la nostra particella carica in moto all'interno del campo magnetico  $B$  è un elettrone relativistico di massa  $m$ , carica  $e$  e velocità  $v$ , la frequenza angolare della particella orbitante, che corrisponde alla frequenza della radiazione emessa, è data da

$$\nu = \gamma^2 \nu_L \quad (1.2)$$

, dove

$$\nu_L = \frac{eB}{mc} \quad (1.3)$$

è la formula di Larmor, relazione che descrive la frequenza angolare della particella orbitante nel caso classico. Ricordiamo che  $\gamma$  altro non è che il

<sup>5</sup>Oltre ai processi riportati nel seguito, menzioniamo anche il cosiddetto meccanismo di Fermi I (o del secondo ordine), il meccanismo di Fermi del primo ordine e l'annichilazione di particelle di Materia Oscura.

fattore di Lorentz, definito come

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \quad \beta = \frac{v}{c} \quad (1.4)$$

A differenza del caso classico in cui la radiazione emessa dalla particella in moto viene irraggiata in maniera isotropa, nel caso relativistico l'emissione dei fotoni avviene all'interno di un *cono di luce* di apertura angolare direttamente proporzionale a  $\frac{1}{\gamma}$ . L'elettrone nel suo moto all'interno del campo magnetico trascina con sé il cono di luce facendo sì che l'osservatore possa solamente rilevare dei brevi flash nell'istante in cui il cono interseca la linea di vista dell'osservatore stesso.

Dalla Teoria della Relatività sappiamo inoltre che l'energia dell'elettrone può essere riscritta come:

$$E = \gamma mc^2 \quad (1.5)$$

Pertanto, inserendo la (1.5) in (1.2) otteniamo che

$$\nu = kBE^2 \quad (1.6)$$

, relazione in cui il coefficiente di proporzionalità  $k = 0.06$ .

A seguito dell'emissione di una parte della propria energia sotto forma di radiazione, l'energia totale dell'elettrone relativistico diminuisce nel tempo. Il tasso di perdita di energia si ottiene facilmente dalla relazione:

$$\frac{dE}{dt} = B^2 E^2 \quad (1.7)$$

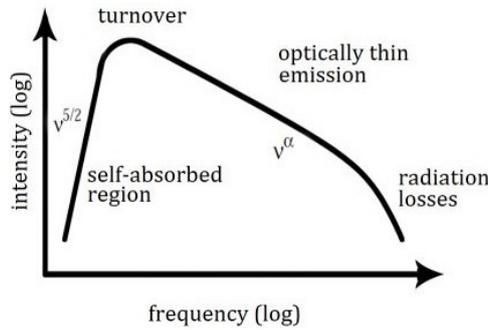


Figura 1.5: Andamento spettrale della radiazione di sincrotrone.

Per quanto riguarda lo spettro di emissione di sincrotrone, l'andamento della componente otticamente sottile segue l'andamento di power-law (vedi fig. 1.5)

$$I(\nu)d\nu \propto \nu^{\frac{(1-s)}{2}} \quad (1.8)$$

, dove  $s$  è l'indice di distribuzione dell'energia degli elettroni.

### Bremsstrahlung

Il fenomeno di emissione di radiazione per frenamento (*Bremsstrahlung*) coinvolge principalmente elettroni liberi in un gas ionizzato.

Interagendo con il campo elettrico generato dai nuclei di elementi pesanti, gli elettroni vengono frenati, cambiando la loro traiettoria ed emettendo radiazione a seguito della perdita di energia cinetica.

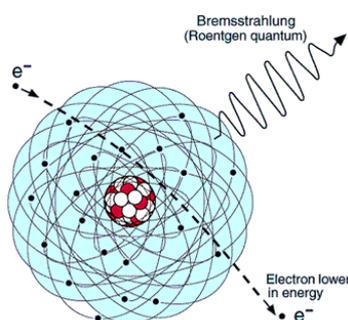


Figura 1.6: Rappresentazione grafica del processo di emissione di radiazione per bremsstrahlung.

Lo spettro di emissione (vedi fig. 1.7) può essere suddiviso in due componenti. Se la prima ha un andamento del tutto analogo al caso di un gas otticamente spesso, la seconda si comporta come un gas otticamente sottile. Infatti, mentre la parte otticamente spessa segue la legge

$$I_\nu = \frac{2kT}{c^2} \quad (1.9)$$

, la componente sottile è descritta dalla relazione:

$$I_\nu = \nu^\alpha \quad \alpha = -0.1 \quad (1.10)$$

Analogamente al cono di luce dell'emissione di sincrotrone, l'irraggiamento per Bremsstrahlung nel caso di elettroni relativistici è fortemente collimato nella direzione del moto, entro un angolo  $\theta \simeq \frac{1}{\gamma}$ .

Avendo a che fare con un gas ionizzato, affinché l'emissione di bremsstrahlung domini l'emissione di ionizzazione è necessario che le particelle cariche coinvolte nel processo abbiano un'energia  $E$  superiore ad un certo valore critico  $E_0$ .<sup>6</sup>

<sup>6</sup>Il valore di  $E_0$  dipende dalla composizione chimica del gas ionizzato.

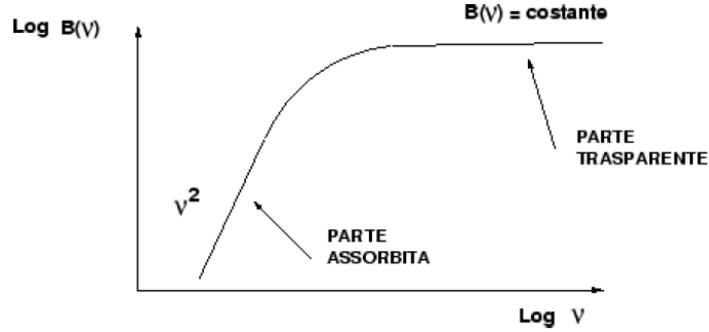


Figura 1.7: Andamento spettrale della radiazione di frenamento (bremsstrahlung).

Pertanto, la perdita di energia di cui risente un elettrone dopo aver percorso una distanza  $x$  all'interno del gas ionizzato è data dalla relazione differenziale<sup>7</sup> :

$$\left(\frac{dE}{dx}\right) = -\frac{E}{X_0} \quad (1.11)$$

che integrata restituisce l'equazione

$$E(x) = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}} \quad (1.12)$$

dove  $X_0$  è la distanza a cui l'energia dell'elettrone si riduce di un fattore  $\frac{1}{e}$ .

A seconda delle lunghezze d'onda a cui tale radiazione può venir emessa, regioni celesti in cui questo processo può aver luogo sono site all'interno di nebulæ (emissione radio) o nel gas caldo di ammasso (emissione X). Se gli elettroni sono abbastanza energetici lo spettro può estendersi fino alle frequenze gamma.

### Compton Inverso

Il fenomeno di Compton Inverso, strettamente legato all'emissione di sincrotrone, ha luogo quando elettroni relativistici interagiscono con fotoni di bassa energia, ed attraverso un processo di upscatter, danno origine all'emissione di raggi X e gamma.

Nel caso in cui l'energia dei fotoni gamma ( $E_\gamma$ ) è inferiore alla massa a riposo degli elettroni, ovvero quando  $E_\gamma < m_e c^2$ , la perdita di energia degli elettroni è data da:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} \sigma_T U_{rad} \beta^2 \gamma^2 \quad (1.13)$$

<sup>7</sup>Detta legge di Bethe-Heitler.

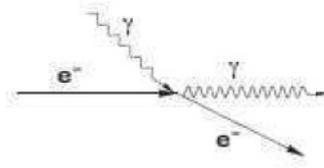


Figura 1.8: Rappresentazione grafica del processo di emissione di radiazione per Compton Inverso.

, dove  $\sigma_T$  è la sezione d'urto di Thompson<sup>8</sup> e  $U_{rad}$  è la densità di energia del campo di radiazione.

Lo spettro della radiazione emessa è continuo e presenta un picco massimo per valori dell'energia  $E \sim 4\gamma^2 E_0$ , dove  $E_0$  rappresenta l'energia dell'elettrone incidente. Tale massimo si ottiene quando l'angolo di incidenza tra elettrone e fotone è nullo.

### Synchrotron Self Compton Model (SSC)

Il processo di Synchrotron Self Compton Model ha luogo quando sia la densità elettronica che l'energia dei fotoni sono talmente elevate da far sì che gli elettroni relativistici emettano radiazione di sincrotrone; questa, interagendo nuovamente con gli elettroni, risente di un fenomeno di upscatter (Compton Inverso) a frequenze maggiori.

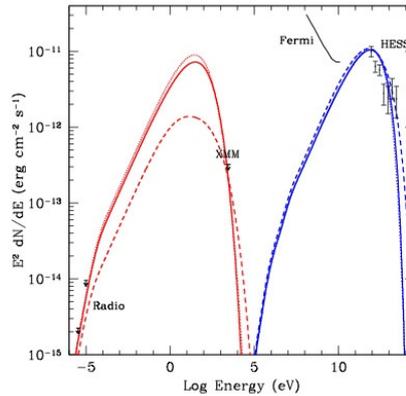


Figura 1.9: Spettri di emissione per Synchrotron Self Compton Model. Da osservare come l'andamento di emissione di radiazione per Compton Inverso abbia pressoché lo stesso profilo dell'emissione di sincrotrone, ma traslato ad energie maggiori.

<sup>8</sup>Nel caso di elettroni relativistici (quando  $\beta \rightarrow 1$  e, di conseguenza,  $\gamma \gg 1$ ) la sezione d'urto di Thompson deve essere sostituita con quella di Klein-Nishima, la cui dipendenza da parametri fisici quali il raggio, la massa dell'elettrone e l'energia fotonica è piuttosto complessa.

A tal riguardo risulta particolarmente significativo lo spettro di tale emissione in quanto caratterizzato dalla presenza di un doppio picco. Il picco spostato a basse frequenze è dovuto al processo di emissione di sincrotrone mentre il massimo a valori dell'energia del  $TeV$  è dovuto all'emissione di Compton Inverso.

### 1.1.3 Processi di assorbimento dei raggi gamma

Come accennato in precedenza, i fotoni  $\gamma$ , dal momento in cui vengono prodotti, possono risentire di diversi fenomeni di assorbimento, non ultimo quello atmosferico che dà luogo alla formazione degli sciame di particelle. Conseguenza di tale fenomeno è una netta diminuzione del flusso osservato.

I processi di assorbimento che hanno principalmente luogo e che coinvolgono la radiazione gamma di alta energia sono la *produzione di coppie da interazione fotone-materia* e la *produzione di coppie dall'interazione fotone-fotone*.<sup>9</sup>

Oltre ai processi suddetti, i VHE- $\gamma$  sono principalmente assorbiti da l'EBL (Extragalactic Background Light) la quale permea in maniera pressoché isotropa l'universo. Questa risulta, pertanto, una componente fondamentale di cui tener conto. Infatti, note le sue caratteristiche, ecco che si può correggere il flusso di fotoni gamma per gli effetti di assorbimento dell'EBL.

## 1.2 Strumenti e tecniche osservative

Così come avviene per le altre bande dello spettro elettromagnetico, anche per i raggi gamma abbiamo osservazioni che possono essere condotte tramite opportuni osservatori a terra così come nello spazio. I parametri che discriminano l'osservazione dei raggi cosmici, attraverso rilevatori a terra o in orbita, sono legati all'energia della radiazione presa in esame ed ai processi di assorbimento di cui essa risente.

### 1.2.1 Telescopi da terra

L'osservazione delle sorgenti gamma da terra è possibile grazie all'utilizzo dei telescopi *ground-based*. Tra questi ricordiamo i rilevatori di particelle secondarie (EAS arrays)<sup>10</sup> ed i rilevatori Cherenkov, ovvero i telescopi a tecnologia IACT (Imaging Atmospheric Cherenkov Technique). Quest'ultima

<sup>9</sup>Per approfondimenti a riguardo rimandiamo a [1]

<sup>10</sup>Formati da vaste superfici colletttrici costituite da materiali scintillatori, gli EAS arrays permettono il rilevamento del fronte di uno sciame generato da un primario nell'alta atmosfera. Di questa categoria di telescopi fa parte l'esperimento Pierre Auger menzionato in precedenza.

particolare tecnica osservativa permette, grazie allo studio della componente fotonica dei raggi cosmici, di riuscire a osservare le sorgenti cosmiche ad altissime energie, nel range di valori tra 50 GeV e 50 TeV.

Tra gli array di telescopi Cherenkov ad oggi operativi nel mondo ricordiamo i progetti H.E.S.S. (Namibia), MAGIC (Canarie) e VERITAS (deserto dell'Arizona).

In aggiunta a quanto detto, è in fase di progettazione un nuovo array di telescopi IACT che prenderà il nome di Cherenkov Telescope Array (CTA), la cui realizzazione è prevista per il 2020.

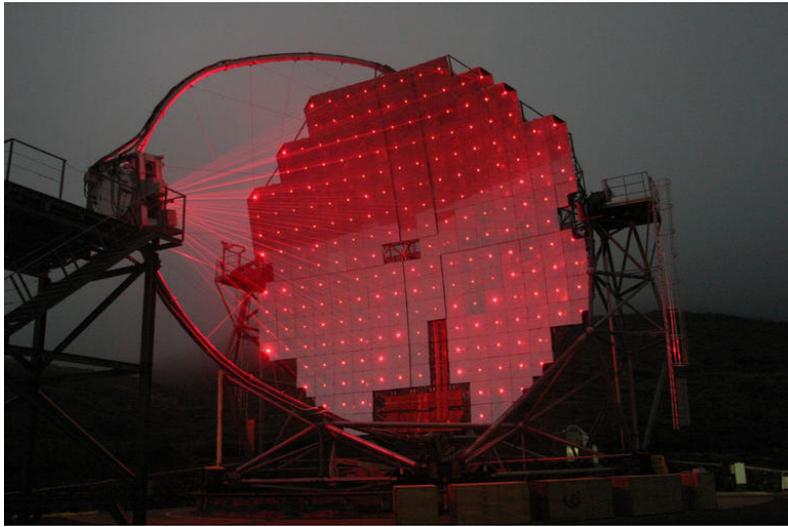


Figura 1.10: Uno dei due telescopi Cherenkov del progetto MAGIC installati a Roque de los Muchachos sull'isola canaria di San Miguel de La Palma.

La tecnica che definisce i telescopi IACT si basa sull'osservazione della luce Cherenkov emessa da coppie  $e^+ - e^-$  appartenenti a sciame elettromagnetici generati dai raggi gamma primari a seguito della loro interazione con l'atmosfera terrestre.

Dal punto di vista costruttivo i ground-based sono costituiti da un collettore di forma parabolica che focalizza la radiazione verso un array di fotomoltiplicatori posto nel piano focale. L'array a sua volta è accoppiato ad elettroniche veloci che amplificano, digitalizzano e registrano l'immagine dello sciame.

Principali oggetti di studio di questi telescopi sono gli sciame atmosferici e il Night Sky Background.<sup>11</sup>

---

<sup>11</sup>L'intensità del cielo notturno, dipendente dalla latitudine galattica, è legata all'inquinamento luminoso, alla Luce Zodiacale, alla luce lunare ed alla presenza di stelle brillanti nel campo di vista del telescopio.

### 1.2.2 Telescopi spaziali

Il 15 novembre 1972 fu una data importante nella storia dell'astronomia gamma. Veniva, infatti, lanciato in orbita il primo osservatorio spaziale della NASA dedicato allo studio del cielo gamma e delle sue sorgenti: SAS-2 (Small Astronomy Satellite-2). La durata di tale missione spaziale fu assai breve; a causa di un guasto all'impianto di alimentazione SAS-2 interruppe il suo operato l'8 giugno del 1973. Tuttavia questo non impedì alla NASA di riuscire ad ottenere la prima cartografia del cielo nella frequenza dei raggi gamma.

Ad oggi numerose sono state le missioni spaziali americane e non che si sono avvicinate nello studio del cosmo visto ai raggi gamma. Si è passati attraverso la tecnologia di satelliti artificiali quali COS-B (9 agosto 1975), il Compton Gamma Ray Observatory (CGRO) dell'aprile del 1991, la missione Swift Gamma Ray Burst Explorer (20 novembre 2004) e quella italiana di AGILE (Astrorivelatore Gamma ad Immagini LEggero) del 23 aprile 2007 fino a giungere all'osservatorio Fermi (11 giugno 2008). Di quest'ultima missione parleremo diffusamente nel capitolo 2.

I telescopi spaziali che osservano i raggi  $\gamma$  fanno utilizzo di una camera tracciante<sup>12</sup> e di un calorimetro ad assorbimento totale. Se la camera tracciante permette di determinare la direzione del fotone gamma primario, il calorimetro riproduce tale fotone stimandone l'energia.

A causa degli elevati costi delle missioni e delle tecnologie spaziali, i satelliti hanno tutti dimensioni piuttosto ridotte e conseguentemente, dato il rapido calo del flusso di fotoni gamma all'aumentare dell'energia, possono rivelare radiazione gamma di energia massima non superiore ai 300 GeV.

---

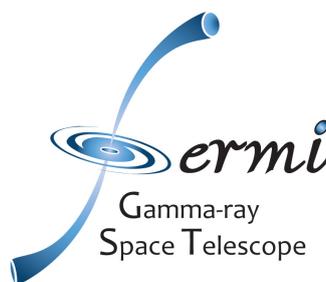
<sup>12</sup>La camera tracciante è costituita da uno strato di materiale detto convertitore nel quale i fotoni incidenti danno luogo alla formazione di coppie  $e^+e^-$ .

## Capitolo 2

# L'osservatorio Fermi

### 2.1 La missione Fermi

11 giugno 2008, ore 18:05 CET<sup>1</sup>. Kennedy Space Center, Cape Canaveral, Florida. Con un vettore Delta II viene lanciato in orbita<sup>2</sup> l'osservatorio GLAST (*Gamma-ray Large Area Space Telescope*), successivamente ribattezzato dalla NASA **Fermi Gamma-ray Large Area Space Telescope**, in onore del fisico italiano Enrico Fermi.



Ha inizio così l'ultima ma non meno significativa fase della missione Fermi: l'osservazione dell'universo alle frequenze gamma.

Nato da una collaborazione fra Stati Uniti, Italia<sup>3</sup>, Giappone, Francia e Svezia, l'esperimento venne approvato nel 2001 e concepito per lo studio della radiazione elettromagnetica emessa da corpi celesti nell'intervallo di energie tra 8 *KeV* e 300 *GeV*.

L'osservatorio Fermi comprende strumenti scientifici quali il LAT (*Large Area Telescope*), il GBM<sup>4</sup> (*Gamma-ray Burst Monitor*) e l'ACD (*Anti-Coincidence Detector*).<sup>5</sup>

---

<sup>1</sup>Central European Time

<sup>2</sup>L'orbita percorsa dall'osservatorio Fermi è circolare e di bassa quota (*low-earth circular orbit*), ad un'altitudine di circa 565 *Km*.

<sup>3</sup>Il contributo italiano è dovuto alla partecipazione dell'ASI, dell'INAF, dell'INFN e di un consorzio di università.

<sup>4</sup>Il Gamma-ray Burst Monitor (Rivelatore di lampi gamma) permette lo studio di fenomeni celesti transienti di energia compresa tra gli 8 *KeV* ed i 40 *MeV*.

<sup>5</sup>L'ACD (Rivelatore anti-coincidenza) permette lo studio di raggi gamma con energie comprese tra 1 *KeV* ed 1 *MeV*. Questo è reso possibile grazie all'utilizzo di una dozzina di rivelatori a ioduro di sodio. Inoltre, la presenza di due rivelatori al germanato di bismuto permettono di estendere il suddetto range di energia fino a 30 *MeV*.

Sebbene la missione si caratterizzi per la presenza di diversi esperimenti, il cuore dello strumento è il Large Area Telescope (LAT).

## 2.2 Caratteristiche tecniche del LAT

Costruito dall'industria italiana<sup>6</sup>, il LAT rappresenta un significativo passo avanti rispetto al predecessore EGRET. L'elevata risoluzione energetica, angolare e temporale così come la grande area efficace dello strumento, sono indici inequivocabili di un miglioramento tecnico notevole rispetto alle missioni precedenti sebbene la risoluzione angolare vada da qualche arcominuto (per i fotoni di alta energia) fino a 3 gradi (a 100 MeV).

Il LAT, sensibile alla radiazione gamma nella banda di energia compresa tra 20 MeV ed oltre i 300 GeV, ha un campo di vista di circa 2.5 sr (poco meno di un quinto di cielo) e completa un'intera scansione del cielo in circa 3 ore. L'efficienza osservativa è piuttosto elevata seppur limitata principalmente dalle interruzioni del flusso dati al momento del passaggio di Fermi attraverso l'Anomalia del Sud Atlantico.

Il principio fisico che permette al *Large Area Telescope* di rilevare la presenza di emissioni gamma è dato dalla produzione di coppie elettrone-positrone al momento dell'interazione di fotoni ad altissima energia con la materia. In particolare, nel LAT le particelle cariche attraversano strati di rilevatori in silicio e tungsteno, dette torri, dando luogo a un processo di ionizzazione che produce piccoli ma misurabili impulsi di carica elettrica. Combinando le informazioni derivanti da diversi strati di rilevatori, si è in grado di ricostruire il cammino seguito dalle particelle e quindi dei fotoni gamma primari. Dopo essere passate attraverso il tracciatore, le particelle vengono convogliate all'interno di un ca-

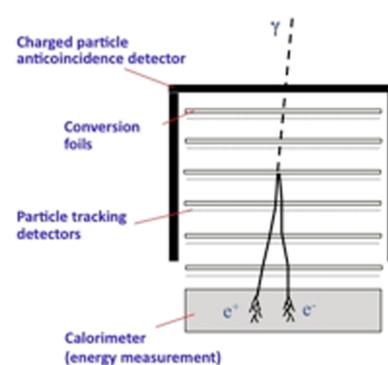
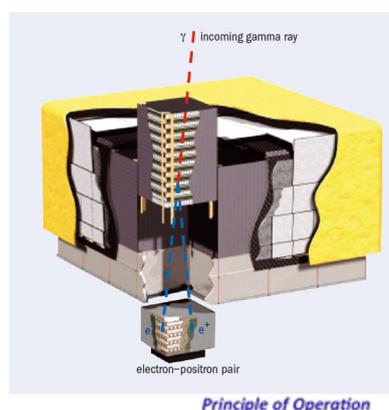


Figura 2.2: Nelle immagini sopra riportate è possibile vedere la struttura dell'esperimento LAT e il processo fisico di produzione di coppie  $e^+ - e^-$  che avvengono all'interno di esso e che permettono la determinazione della direzione ed energia dei fotoni gamma primari.

<sup>6</sup>La collaborazione Italiana ha avuto la responsabilità della costruzione del tracciatore al silicio (il più complesso dei sottosistemi del LAT) e partecipa attivamente allo sfruttamento scientifico dei dati della missione.

lorimetro elettromagnetico, costituito da una pila di cristalli di ioduro di cesio (materiale scintillatore), che permette di misurare l'energia totale delle cariche elettriche. Infine, il tracciatore è circondato da uno schermo di anti-coincidenza (ACD) per la reiezione del fondo cosmico di particelle cariche.

## 2.3 I cataloghi

Scopo primario delle missioni Fermi è l'ottenimento di una sempre più dettagliata e completa cartografia del cielo  $\gamma$ , nel range d'energia determinato dall'esperimento LAT.

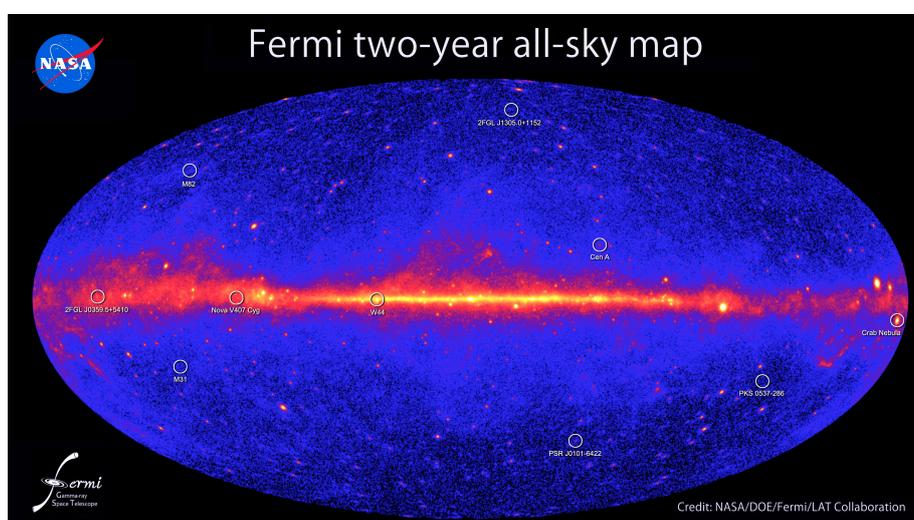


Figura 2.3: Cartografia del cielo gamma ottenuta a partire dai dati del satellite Fermi GLAST relativi al secondo anno di osservazioni e di presa dati. Le relative misure sono riportate nel catalogo 2FGL (*Fermi LAT Second Source Catalog*).

Da un punto di vista pratico, il tutto si traduce nella creazione di cataloghi riportanti le sorgenti celesti rilevate ed i loro parametri fisici fondamentali. Tali dati sono essenziali per il progresso della ricerca scientifica in questo campo e per la conferma delle teorie fisiche finora introdotte per la spiegazione di tali fenomeni emissivi.

A seconda dell'esperimento dell'osservatorio Fermi preso in esame ed in base agli studi compiuti sui dati ottenuti, sono stati introdotti diversi cataloghi. Per il nostro lavoro di ricerca abbiamo avuto a che fare principalmente con i cataloghi 2FGL (*Fermi LAT Second Source Catalog*), 2LAC (*Fermi LAT Second AGN Catalog*) e 2PC (*The Second Fermi Large Area Telescope of Gamma-ray Pulsars*). Tra questi il più importante è indubbiamente il catalogo 2FGL, per numero e tipo di sorgenti rilevate, completezza ed estensione di banda energetica. Per questo motivo nel seguito ne riporteremo brevemente le caratteristiche principali.

### 2.3.1 Il Fermi LAT Second Source Catalog (2FGL)

Il Fermi LAT Second Source Catalog<sup>7</sup> nasce in primo luogo come un catalogo di sorgenti puntiformi<sup>8</sup> (ovvero spazialmente non risolte) osservate dall'esperimento LAT nei suoi primi due anni di attività.<sup>9</sup> Inoltre, sono state tralasciate tutte quelle sorgenti transienti che hanno brillato per un breve periodo se rapportato ai 24 mesi di analisi che caratterizzano il catalogo in oggetto.

Il 2FGL è strutturato in maniera del tutto analoga al precedente catalogo 1FGL. A seguito del rilevamento<sup>10</sup> della sorgente si procede con la sua localizzazione ed una stima della sua significanza. Determinata così la sorgente, ne viene valutato il flusso fotonico in cinque differenti bande (da 100 a 300 MeV; da 300 MeV a 1 GeV; da 1 a 3 GeV; da 3 a 10 GeV; da 10 a 100 GeV) e la curva di luce del flusso integrato.<sup>11</sup>

I flussi nelle diverse bande sono stati ottenuti a partire dall'analisi degli spettri e dei relativi indici spettrali. Vediamo pertanto quali andamenti spettrali sono stati adottati per il fit delle sorgenti nel catalogo 2FGL.

Nel catalogo 1FGL la forma spettrale per tutte le sorgenti  $\gamma$  era data da un andamento a legge di potenza. Sebbene questo fosse fatto per ragioni di semplicità ed omogeneità non riusciva a restituire una buona rappresentazione spettrale delle sorgenti brillanti. Per questo motivo nel 2FGL si è deciso di ricorrere a spettri che deviano dalla power-law, evitando, tuttavia, l'aggiunta di un numero troppo elevato di parametri liberi che avrebbero reso difficile l'ottenimento del fit stesso. Riportiamo di seguito i diversi andamenti spettrali utilizzati per il secondo catalogo LAT di Fermi ed in particolare quelli adottati per sorgenti celesti quali pulsar, blazars e sorgenti estese.

Per le pulsar è stato adottato un andamento a legge di potenza con cutoff

---

<sup>8</sup>Per approfondimenti [3].

<sup>8</sup>Il numero di sorgenti estese incluse nel catalogo 2FGL vede la presenza di sette resti di supernova (SNR), due pulsar wind nebulae (PWN), la Grande (LMC) e la Piccola Nube di Magellano (SMC) e la radiogalassia Centaurus A. Ad eccezione fatta di queste 12 sorgenti e dell'emissione diffusa, tutte le altre sorgenti sono assunte puntiformi.

<sup>9</sup>I dati riportati nel catalogo coprono il periodo che va dal 4 Agosto 2008 (15:43 UTC) al 1 Agosto 2010 (01:17 UTC).

<sup>10</sup>Per il rilevamento di sorgenti puntiformi si è passati attraverso tre step principali: l'identificazione di potenziali sorgenti puntiformi, definite come *seeds*; un'ottimizzazione su tutto il cielo di un modello del cielo  $\gamma$  che tenga conto dell'emissione diffusa, delle sorgenti e dei nuovi *seeds* (operazione necessaria per riuscire a definirne meglio la loro posizione e valutarne la loro significanza); infine, la creazione di una mappa dei residui del Test Statistic (TS).

<sup>11</sup>Strettamente legato al parametro di *variability*, la curva di luce riportata nel catalogo è stata ottenuta, sorgente per sorgente, dividendo i dati in bin dell'estensione temporale di circa un mese ed applicando ad ognuno di questi una procedura di analisi di verosimiglianza.

esponenziale, ovvero una legge descritta dalla relazione:

$$\frac{dN}{dE} = K \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma} e^{-\frac{E-E_0}{E_c}} \quad (2.1)$$

, dove  $K$ ,  $\Gamma$  e  $E_c$  sono i parametri liberi mentre  $E_0$  è un'energia di riferimento che varia liberamente da sorgente a sorgente e che assume come limite inferiore il valore  $E_0 = 1 \text{ GeV}$ .

Differentemente, per i blazar brillanti, l'andamento che rappresenta il miglior fit è dato da una power-law interrotta. Questa scelta tuttavia imporrebbe l'aggiunta di due nuovi parametri liberi e, al contempo, non permetterebbe di dare una buona descrizione dei blazar meno brillanti. Per queste motivazioni si è scelto di adottare una rappresentazione di *LogParabola*, ovvero una relazione del tipo:

$$\frac{dN}{dE} = K \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\alpha - \beta \log(E/E_0)} \quad (2.2)$$

, dove  $K$ <sup>12</sup>,  $\alpha$  (pendenza spettrale a  $E_0$ ) e  $\beta$ <sup>13</sup> (parametro di curvatura) sono i parametri liberi mentre  $E_0$  rappresenta anche in questo caso un'energia di riferimento arbitraria. È tuttavia importante ricordare che per limitare il numero di parametri liberi non tutte le sorgenti non-pulsar sono state fittate con l'andamento di *LogParabola*, ma solo quelle in cui il valore di  $\beta$  era particolarmente significativo.

Infine, per i pochi casi di sorgenti estese, l'andamento spettrale è stato definito caso per caso, avvalendosi delle leggi di power-law a cutoff esponenziale, *LogParola* o altri andamenti a legge di potenza.

Determinate così le relazioni che descrivono l'andamento spettrale, i flussi fotonici sono stati ottenuti fissando sorgente per sorgente l'indice spettrale che meglio fittava i dati nel range di energie preso in considerazione e aggiustando opportunamente la normalizzazione in ogni banda spettrale.

Ad ogni sorgente appartenente al catalogo è associato un nome che assume la generica forma di **2FGL JHHMM.m+DDMM** e dove **HHMM.m** così come **DDMM** rappresentano rispettivamente la coordinata di longitudine e latitudine galattica. Per le sorgenti particolarmente prossime al piano galattico e per quelle vicine ad estese nubi interstellari il nome assume la forma **2FGL JHHMM.m+DDMMc**, dove la **c** segnala che lo studio di tali sorgenti deve essere svolto con molta attenzione.

<sup>12</sup>Nel catalogo il flusso differenziale  $K$ , riportato come `flux_density`, è calcolato all'energia di riferimento  $E_0 = E_p$ .  $E_p$  (`pivot_energy`) è l'energia di pivot, definita come il valore dell'energia a cui l'incertezza relativa del flusso differenziale  $K$  è minima.

<sup>13</sup>In alcuni fit il parametro  $\beta$  raggiunge valori piuttosto elevati determinando spettri particolarmente piccati. Nel caso di spettri per sorgenti quali le millisecond pulsar questo andamento potrebbe essere reale. Tuttavia tale fenomeno ricorre particolarmente in regioni densamente popolate del piano galattico, ovvero regioni in cui la PSF è grande per piccoli valori dell'energia.

Un ultimo aspetto importante da sottolineare, visto il tipo di studio compiuto, è la distinzione operata nel catalogo 2FGL tra sorgenti associate ed identificate. Mentre le associazioni dipendono unicamente da una corrispondenza posizionale tra le sorgenti alla diverse frequenze, l'identificazione richiede anche la misura della variabilità alle altre lunghezze d'onda o la caratterizzazione della sorgente 2FGL in base alla sua estensione angolare.

## Capitolo 3

# Classi di sorgenti rilevate

In questo capitolo mostreremo quali sono e che caratteristiche possiedono le diverse categorie di sorgenti  $\gamma$  fin'ora rilevate dall'osservatorio spaziale Fermi.

Particolare importanza verrà data a tutte quelle classi di sorgenti gamma che hanno influenzato il nostro lavoro di ricerca sperimentale.

Cercheremo, inoltre, di darne una trattazione il più possibile esauriente nei limiti delle conoscenze attuali e del carattere della tesi stessa, rimandando a letture più impegnative e complete i lettori maggiormente interessati.

### 3.1 Sorgenti galattiche

Lo studio delle sorgenti gamma appartenenti alla nostra galassia è fondamentale dato che molti di questi oggetti sono visti come sorgenti estese di cui se ne può dare una descrizione piuttosto dettagliata dal punto di vista morfologico.

Sebbene l'emissione gamma di tali sorgenti non soffra del processo di assorbimento dovuto alla radiazione cosmica di fondo ecco che questa risente, tuttavia, di assorbimento locale dovuto alla presenza di gas e polveri del mezzo interstellare.

A seconda delle dimensioni delle sorgenti (estese o puntiformi) si ricorre a diverse teorie fisiche per descrivere l'accelerazione dei raggi cosmici da parte di tali sorgenti. Se per le sorgenti estese l'accelerazione è dovuta in prima istanza all'ambiente circostante, per gli oggetti compatti e puntiformi l'accelerazione è principalmente diretta conseguenza della presenza di jets e flussi di particelle relativistiche.

Vediamo in seguito alcuni tra i più importanti emettitori di raggi gamma galattici.

### 3.1.1 Resti di Supernova

Il fenomeno di supernova consiste in un processo di esplosione stellare durante il quale la luminosità di una stella può raggiungere fino a  $10^9 - 10^{10} L_{\odot}$ , rimanendo visibile e brillante in cielo per diversi mesi. Tale processo coinvolge stelle estremamente massive con valori in massa generalmente compresi tra le  $12 - 13 M_{\odot}$ .

A seconda del tipo di processo d'esplosione (esplosione termonucleare o collasso gravitazionale del core) e delle caratteristiche spettroscopiche dei resti di supernova ecco che queste possono venir classificate come supernovæ di tipo Ia, di tipo II, di tipo Ib e Ic. Recentemente è stata introdotta un'ulteriore classe, derivante dalle supernove di tipo Ic, i cui elementi prendono il nome di *hypernovæ* e che si ritiene possano essere associate ai gamma-ray bursts (vedi sez. 3.2.3), sebbene studi a tal proposito siano ancora in atto. Per quanto detto risulta quindi evidente che i resti di supernova (SNR, *supernova remnant*) sono strutture formatesi a seguito dell'esplosione di una stella (attraverso un processo di supernova). Si è soliti compiere una distinzione tra i resti di supernova dividendoli nelle classi di resti di supernova *diffusi* e *compatti*.

I *resti di supernova diffusi* non sono altro che gli strati esterni della stella eiettati verso le regioni circostanti con velocità che possono raggiungere i  $30000 \frac{Km}{s}$  (pari all'incirca al 10% della velocità della luce). Gli ejecta danno luogo alla formazione di una nube di gas e polveri in espansione che è costituita da gran parte della materia stellare ed anche dal mezzo interstellare precedentemente sito nella zona di espansione. Questa regione di spazio è attraversata da onde d'urto generate dall'esplosione stessa o dall'interazione tra la nube e il mezzo interstellare. Generalmente tali SNR rimangono visibili come luminose nebulose in espansione (3.1).

Il *resto di supernova compatto*, quando esiste, generalmente si trova al centro di quello diffuso e consiste in un oggetto compatto quale ad esempio una stella di neutroni. Se l'esplosione è asimmetrica gli ejecta vengono espulsi in direzione opposta a quella dell'oggetto compatto il quale può raggiungere valori della velocità superiori a  $200 \frac{Km}{s}$ . In tal caso l'oggetto compatto si

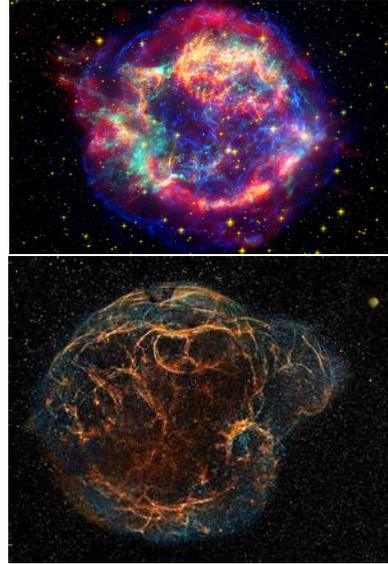


Figura 3.1: *In alto*: Immagine del resto di supernova Cassiopeia A (Cas A) appartenente all'omonima costellazione. *In basso*: Il resto di supernova Simeis 147 (detta Spaghetti Nebula) appartenente alla costellazione del Toro, al confine con l'Auriga.

allontana rapidamente (su tempi scala di centinaia o migliaia di anni) dal resto di supernova diffuso e diventa estremamente difficile riuscire a mettere in relazione i due.

Dal punto di vista dello studio dei raggi cosmici le supernovæ sono ritenute particolarmente importanti per l'accelerazione del fascio di particelle emesso dato che l'energia sprigionata dall'esplosione si propaga sotto forma di onda d'urto nel mezzo circumstellare permettendo così il processo di accelerazione.

Ad oggi si ritiene che lo spettro di tali resti di supernova sia dato dalla sovrapposizione di diversi spettri di sincrotrone e di Compton Inverso che coprono rispettivamente la banda di lunghezza d'onda che va dal radio ai raggi gamma e dai soft- $\gamma$  ai VHE- $\gamma$ . Le emissioni di sincrotrone originano dall'interazione tra gli elettroni relativistici con l'intenso campo magnetico dell'oggetto compatto, mentre la radiazione di Compton Inverso è dovuta allo scattering tra i suddetti elettroni e il campo di radiazione costituito tra l'altro dai fotoni di sincrotrone, la CMB e la radiazione di origine termica.

In parallelo a tali processi di natura leptonica, anche gli adroni apportano il loro contributo all'emissione di raggi gamma nel processo di decadimento dei pioni neutri.

Tra i più importanti SNR ricordiamo SN 1006, SN 1054 (Nebulosa del Granchio), Cas A e SN 1987A. Quest'ultima ha avuto un ruolo determinante in numerosi campi dell'astrofisica e della fisica nucleare tra cui lo studio del comportamento dei neutrini e dei loro *flavours*.<sup>1</sup>

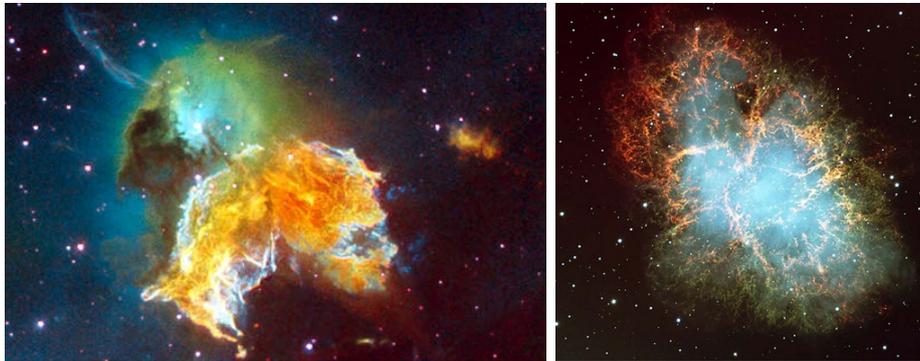


Figura 3.2: *A sinistra:* Immagine del SNR N 63A Menagerie appartenente alla regione di formazione stellare della Grande Nube di Magellano. *A destra:* La ben nota Nebulosa del Granchio, uno dei più celebri SNR.

---

<sup>1</sup>Per approfondire la tematica, consigliamo a tal proposito la lettura del libro **Cacciatori di neutrini** di R. Jayawardhana, edito da Le Scienze.

### 3.1.2 Pulsar

Si definiscono con il termine di pulsar (*pulsating radio source*) tutte quelle sorgenti costituite da stelle di neutroni in rapida rotazione intorno ad un proprio asse. Escludendo i buchi neri, le pulsar costituiscono ad oggi la categoria di oggetti celesti più densi dell'universo avendo una quantità di neutroni 20 volte maggiore rispetto ai protoni, un diametro di circa 10 km e una massa in media di  $1.4 M_{\odot}$ . Così come accade per le nane bianche anche per le pulsar è stato teorizzato un valore critico della massa, detto limite di Oppenheimer-Volkoff ( $\sim 2.5 M_{\odot}$ ), oltre il quale la pressione degenera dei neutroni non è più in grado di sostenere il peso della stella dando così origine alla formazione dei buchi neri.

Il periodo di rotazione delle pulsar può raggiungere valori dell'ordine del millisecondo mentre la potenza di emissione sfiora i  $10^{38} \frac{erg}{s}$  con la presenza di campi magnetici fino a  $10^{12} G$ .

Il processo di formazione di una pulsar ha luogo quando il core di una stella massiva si contrae durante un fenomeno di supernova, collassando in una stella di neutroni. A seguito del collasso la stella di neutroni mantiene buona parte del suo momento angolare, e poiché possiede solo una quantità piccolissima del raggio del progenitore (fatto che comporta una netta riduzione del momento di inerzia), la pulsar si forma ad elevata velocità di rotazione.

Il modello oggi più accreditato per la spiegazione fisica dell'emissione elettromagnetica da parte di tali sorgenti è il cosiddetto modello di *rotatore obliquo*.

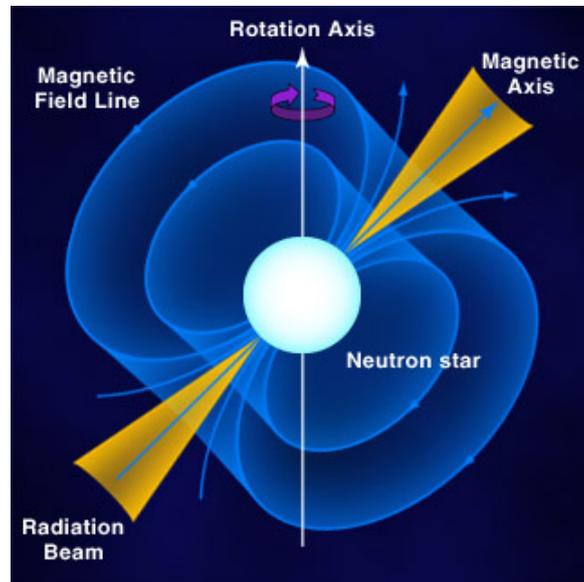


Figura 3.3: Schema rappresentativo della struttura di una pulsar.

Secondo tale modello, l'energia viene emessa sotto forma di fascio di radiazione lungo l'asse magnetico della pulsar, il quale ruota solidalmente con la stella di neutroni. L'asse magnetico della pulsar non necessariamente coincide con l'asse di rotazione; questo disallineamento tra i due assi ha come conseguenza il fatto che il fascio può essere osservato solo una volta per rotazione della stella di neutroni. Il modello presentato riesce pertanto a dare una spiegazione della natura pulsata di questo tipo di sorgenti.

L'emissione del fascio elettromagnetico è dovuta all'energia di rotazione della stella di neutroni. Questa genera un campo elettrico a causa del moto e delle forti variazioni del proprio campo magnetico, dando luogo all'accelerazione di protoni ed elettroni sulla superficie stellare e la conseguente formazione del fascio elettromagnetico in prossimità dei poli del campo magnetico stesso.

Come conseguenza diretta dell'emissione di energia sotto forma di radiazione la velocità di rotazione della pulsar diminuisce nel tempo fino ad arrestarsi (la cosiddetta "death line"). Questo turn-off si ritiene possa aver luogo dopo 10-100 milioni di anni dalla formazione della pulsar stessa.

Per quanto visto, le pulsar sono in grado di dar luogo alla formazione di venti costituiti da particelle relativistiche che interagendo con gli intensi campi magnetici determinano l'emissione di radiazione di sincrotrone. Questa emissione copre lo spettro elettromagnetico dalle frequenze del radio fino ad energie di qualche  $GeV$ .

Si ritiene che l'accelerazione di tali particelle avvenga nella magnetosfera, in prossimità del vento ultra-relativistico di elettroni e positroni (intensa emissione  $TeV$ ) ed infine nella *pulsar wind nebula* dove i raggi cosmici vengono accelerati in ogni direzione e raggiungono energie dell'ordine di  $10^{15} eV$ .

È interessante notare come sebbene lo spettro elettromagnetico delle pulsar possa estendersi fino a energie di qualche  $GeV$ , finora nessuna emissione oltre i  $100 GeV$  sia stata ancora rilevata. A tutt'oggi alla mancanza di questo dato osservativo si sta cercando di dare una spiegazione scientifica.

### 3.1.3 Microquasars e sistemi binari a raggi X

I microquasars (microQSO), così come le binarie a raggi X, sono sistemi costituiti da un oggetto altamente massivo (un buco nero, una gigante rossa o una stella di neutroni) che sottrae materia ad una stella compagna. Questo particolare processo dá luogo alla formazione di un disco di accrescimento intorno all'oggetto massivo che si caratterizza per emissione termica X dovuta alle forze viscosive.

In particolare, la caratteristica che distingue i microQSO dalle altre binarie a raggi X è la presenza di un'emissione non termica di sincrotrone originata da getti relativistici in prossimità dell'oggetto compatto. Questi getti radio si ritiene siano alimentati dalla rotazione del buco nero oppure da forti correnti elettromagnetiche nelle zone più interne del disco di accrescimento stesso.



Figura 3.4: *A sinistra*: Rappresentazione artistica di un microQSO. *A destra*: Schema descrittivo delle componenti fondamentali di un microQSO.

I processi fisici che generalmente vengono chiamati in causa per spiegare l'emissione di raggi gamma sono processi adronici e/o leptonici. In questi ultimi, elettroni relativistici appartenenti al getto o emettono radiazione di sincrotrone oppure sono coinvolti in un processo di Compton Inverso e quindi in un fenomeno di upscatter a energie di banda gamma dei fotoni IR e UV originati dal disco di accrescimento o dalla stella compagna. Nel caso di Compton Inverso il picco di energia può raggiungere valori dell'ordine del GeV o, addirittura, del TeV. Differentemente, nei modelli adronici, la collisione inelastica tra i protoni del getto e quelli del denso vento stellare dá luogo alla formazione di pioni neutri che decadono in raggi gamma e neutrini. È tuttavia importante sottolineare come i due modelli mostrino un tratto comune, ovvero la presenza del getto relativistico, sebbene per il resto descrivano processi completamente differenti.<sup>2</sup>

Dal punto di vista dei nomi, il legame che unisce i microQSO con i quasar è piuttosto evidente. Questo è dovuto al fatto che microQSO e quasar hanno alcune caratteristiche in comune tra cui: una forte e variabile emissione radio

<sup>2</sup>Per approfondire [5]

(getti) e la presenza di un disco di accrescimento che circonda o un buco nero oppure una stella di neutroni. La sostanziale differenza tra le due classi di oggetti celesti dipende dai valori dei parametri di massa, dimensione e tempi scala che caratterizzano le diverse componenti e i fenomeni ad esse associate del sistema.

Riportiamo di seguito un'immagine che permette di ben visualizzare le differenze e le similitudini tra queste due classi di sorgenti celesti.

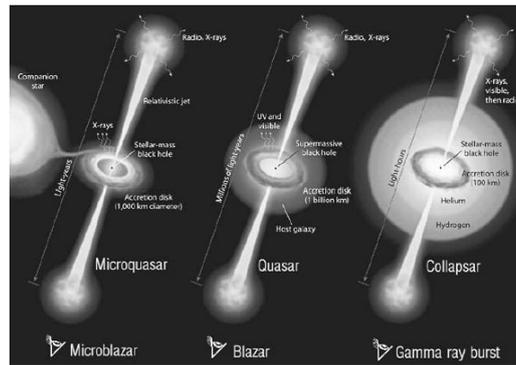


Figura 3.5: Nell'immagine vengono riportate le caratteristiche fondamentali alla base della discriminazione tra microQSO, quasar e gamma-ray burst.

### 3.2 Sorgenti extragalattiche

Con le ultime missioni spaziali per lo studio di sorgenti  $\gamma$ , tra cui non possiamo non menzionare l'osservatorio Fermi, si è riusciti ad aumentare notevolmente il numero di oggetti celesti campioni di studio. È tuttavia importante ricordare che l'universo non è completamente trasparente alla radiazione gamma di energia superiore a  $100 \text{ GeV}$ ; per valori maggiori la radiazione risente di un intenso fenomeno di assorbimento dovuto principalmente alla sezione d'urto non nulla tra i fotoni  $\gamma$  e quelli del background cosmico IR ed UV.

Per determinare lo spettro intrinseco delle sorgenti bisogna pertanto tenere conto dell'EBL (*Extragalactic Background Light*) le cui caratteristiche a meno di limiti superiori ed inferiori non sono ancora del tutto note.

Tra gli emettitori extragalattici i più importanti sono gli AGN ed i Gamma-Ray Burst di cui daremo una breve descrizione nel seguito.

### 3.2.1 AGN

Scoperti negli anni '50 dal fisico sovietico Viktor Ambartsumian, gli AGN (*Active Galactic Nuclei*) costituiscono un classe di sorgenti cosmiche assai composita ospitata all'interno delle cosiddette galassie attive.

Lo studio di tali oggetti celesti per lungo tempo ebbe un ruolo cruciale nello sviluppo della cosmologia osservativa e, pertanto, nella conoscenza dell'universo lontano. Questo è dovuto principalmente all'elevata luminosità di tali sorgenti che sebbene nell'universo locale rappresentino all'incirca il 12% delle galassie normali risultano particolarmente facili da osservare anche a grande distanza.

In base a caratteristiche spettrali, spettroscopiche e di luminosità gli AGN, così come le galassie attive che li ospitano, sono stati divisi in tre categorie: galassie con eccesso di emissione nel lontano infrarosso, divise nelle sottoclassi LIRG (*luminous infra-red galaxies*,  $L > 10^{11} L_{\odot}$ ), ULIRG (*ultra-luminous infra-red galaxies*,  $L > 10^{12} L_{\odot}$ ), HYLIRG (*hyper-luminous infra-red galaxies*,  $L > 10^{13} L_{\odot}$ ), i nuclei attivi radio-quieti (quasar ottici e galassie di Seyfert) a loro volta divisibili nelle sottoclassi di AGN di tipo I e AGN di tipo II, ed infine i nuclei attivi radio-brillanti (radiogalassie e radio quasar).



Figura 3.6: *A sinistra*: Rappresentazione artistica di un AGN. *A destra*: Immagine multi-wavelength della radiogalassia Hercules A. Sono stati messi in evidenza i due getti di plasma osservabili alle lunghezze radio; la loro dimensione è di oltre un milione di anni luce.

La teoria fisica impiegata oggi per la descrizione degli AGN prende il nome di *modello standard*.

Secondo tale modello, l'intensa attività e luminosità degli AGN<sup>3</sup>, così come il flusso di particelle relativistiche provenienti da essi, originano a seguito della caduta di materia all'interno di un buco nero supermassivo (SMBH).<sup>4</sup>

A causa del momento angolare della materia, durante la caduta questa si dispone intorno al buco nero andando a formare una struttura a disco, detta disco di accrescimento. L'azione delle forze viscosi riscalda la materia portandola allo stato di plasma ed alla conseguente formazione di un intenso campo magnetico. Il moto di materia all'interno del campo magnetico

<sup>3</sup>La luminosità degli AGN può raggiungere valori pari a  $10^{42} - 10^{48} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$ .

<sup>4</sup>La massa di questi SMBH può assumere valori compresi tra  $10^6 M_{\odot}$  e le  $10^{10} M_{\odot}$ .

venutosi a creare dà luogo all'emissione di un'ingente quantità di radiazione di sincrotrone e di radiazione termica sotto forma di raggi X.

A distanze  $\lesssim 1 Kpc$  dal disco di accrescimento, si ha la formazione di una nube molecolare di struttura toroidale (*toro molecolare*) costituita da nubi di polveri transitorie che alimentano il disco di accrescimento.

La presenza del toro molecolare e delle regioni definite come *Narrow Line Region* e *Broad Line Region* sono fondamentali per la spiegazione delle differenti caratteristiche spettrali e spettroscopiche delle diverse classi di AGN secondo il *modello unificato*.

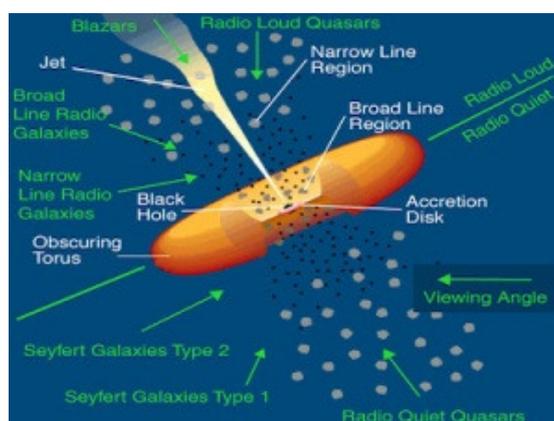


Figura 3.7: Schema della struttura di un AGN.

Un aspetto significativo della struttura degli AGN è la presenza di uno o due getti (jets) di particelle e radiazione che, originatisi nel disco, si propagano perpendicolarmente al piano del toro molecolare. La formazione di tali strutture è ancor oggi oggetto di studio.

Si ritiene che una volta inglobato tutto il gas e le polveri nelle proprie vicinanze il buco nero passi in una fase quiescente facendo divenire la galassia ospite da galassia attiva a galassia normale. Questa teoria ben si accorda con alcuni dati osservativi e considerazioni addotte sulla struttura della nostra galassia e sull'universo locale.

La classificazione precedentemente riportata non è sempre univoca in quanto non basata solamente sulle caratteristiche fisiche delle sorgenti ma fortemente influenzata da differenze storiche legate al periodo della scoperta delle sorgenti stesse.

Secondo il *modello unificato*, la suddetta classificazione non coinvolge oggetti di diversa natura ma semplicemente è una diretta conseguenza della posizione in cielo della sorgente in funzione della linea di vista dell'osservatore. Pertanto, uno stesso oggetto osservato da differenti angolazioni mostra caratteristiche spettroscopiche diverse che conseguentemente portano ad una diversa classificazione.

Le diverse classi di AGN sono discriminate dal fenomeno di assorbimento e di oscuramento delle regioni più interne da parte del toro molecolare e dalla direzione dei getti relativistici, così come mostrato in figura 3.8.

Tra i più importanti AGN che si caratterizzano per emissione energetica in banda X e gamma troviamo le galassie di Seyfert, i quasars ed i blazars.

Nello studio condotto con i dati di Fermi risultano particolarmente importanti per la nostra trattazione i blazars ed in particolare le sottoclassi di BL Lacs e FSRQ (*Flat Spectrum Radio Quasars*).

Come ben visibile da fig. 3.8, un AGN si definisce come Blazar nel caso in cui i jet siano allineati con la linea di vista dell'osservatore. Tali sorgenti risultano essere gli emettitori più variabili dell'universo dato che la loro intensità di flusso può aumentare fino a due ordini di grandezza. Una delle caratteristiche principali dei blazars a tal proposito è data da emissioni radio e X rapidamente variabili e otticamente polarizzate.

Sappiamo che gli AGN emettono radiazione su tutto lo spettro elettromagnetico; in genere si attribuisce l'emissione in banda IR e X al disco di accrescimento, mentre dai getti si originano raggi  $\gamma$  e onde radio.

Per poter spiegare l'emissione fotonica nel range di energie del  $TeV$ , si è usi ricorrere a due modelli differenti: un modello leptonic ed uno adronico. Le caratteristiche di tali modelli non sono dissimili da quanto visto in sez. 3.1.3.

I modelli leptonic si basano sul processo di scattering IC dove gli elettroni relativistici accelerati producono fotoni di alte energie. A seconda della posizione della sorgente di fotoni e del luogo in cui avviene l'accelerazione per Compton Inverso sono state formulate diverse varianti del modello leptonic. Tra queste ricordiamo il *modello SSC*, il *modello external Compton* ed i *modelli non omogenei*. Nei suddetti modelli l'energia massima raggiunta dei raggi  $\gamma$  è di circa  $10 TeV$ .

Nei modelli adronici i protoni vengono accelerati repentinamente fino ad energie di  $10^{10} GeV$  e interagendo con i fotoni del fondo circostante producono pioni i quali a loro volta decadono in raggi  $\gamma$ .

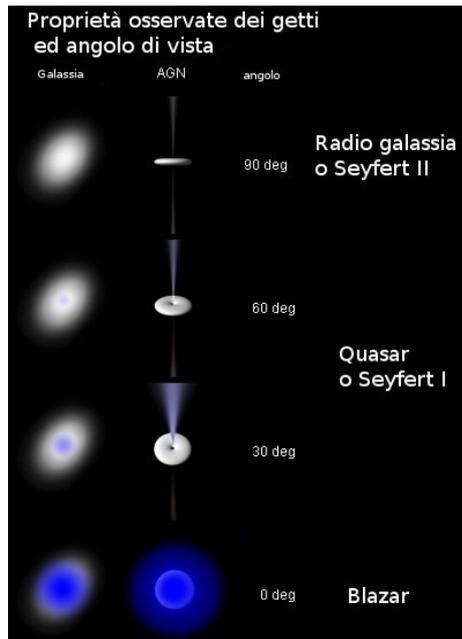


Figura 3.8: Rappresentazione grafica del modello unificato degli AGN.

Ad oggi la discussione sui due modelli è ancora accesa e non sembra aver portato ad una predilezione di uno dei modelli fin qui discussi.

Vediamo ora, maggiormente in dettaglio, le sorgenti BL Lacs e FSRQ.

### BL Lacs

Appartenenti alla categoria delle galassie attive gli oggetti di tipo Bl Lacertæ (definiti anche come Bl Lac) si caratterizzano per la presenza al loro interno di un nucleo galattico attivo (AGN) che presenta rapide e importanti variazioni in flusso e una significativa polarizzazione ottica. Proprio per queste caratteristiche questo tipo di sorgenti celesti vennero considerate inizialmente come delle stelle variabili, nella fattispecie la sorgente prototipo Bl Lacertæ (da cui la categoria prende il nome) studiata per la prima volta nel '68 da J. L. Schmitt.<sup>5</sup>

Lo spettro delle Bl Lac è dominato da un continuo non-termico ad andamento monotono.



Figura 3.9: Nelle figure è riportata la SED (*Spectral Energy Distribution*) della sorgente prototipo Bl Lacertæ (2FGL J2202.8+4216). Il grafico in alto risulta particolarmente importante per la presenza del doppio *bump* (vedi sez. 1.2.2).

<sup>5</sup> John L. Schmitt per primo rivelò la natura del tutto peculiare della sorgente Bl Lacertæ nel 1968 quando la identificò con la controparte radio VRO 42.22.01. Nell'anno successivo altri astronomi ne osservarono la variabilità del flusso radio e la polarizzazione ottica. Nel 1972 Strittmatter propose l'introduzione di una nuova classe di sorgenti, le Bl Lac, aggiungendo altre quattro sorgenti dalle caratteristiche fisiche simili. Ad oggi il numero di BL Lacs rivelate dall'osservatorio Fermi è di 436 sorgenti (secondo il catalogo 2FGL).

Sebbene le BL Lac risultino essere i maggiori emittori nella banda dei raggi gamma, ecco che queste sorgenti celesti risultano essere piuttosto deboli.

Sia la struttura di tali sorgenti su scala del parsec così come le loro proprietà di multifrequenza risultano ancora poco chiare.<sup>6</sup>

Secondo il modello unificato degli AGN radio-quieti, la fenomenologia nucleare osservata delle BL Lacs è interpretata come dovuta agli effetti relativistici dei jet fortemente allineati rispetto alla linea di vista dell'osservatore.

## FSRQ

La classe di AGN denominata FSRQ (*Flat Spectrum Radio Quasar*) è costituita da sorgenti blazars con un andamento dello spettro radio piuttosto piatto.

Riportiamo di seguito come esempio la SED (Spectral Energy Distribution) di due FSRQ.



Figura 3.10: SED delle sorgenti FSRQ CGRaBS J1703-6212 (2FGL J1703.2-6217) e PKS 2155-83 (2FGL J2201.9-8335).

Dalle immagini dello spettro risulta piuttosto evidente l'andamento piatto alle basse energie radio ( $\sim 10^8 - 10^{12} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Hz}}$ ), soprattutto se confrontato con figura 3.9.

## AGU

Gli AGU (*Active Galaxy of Uncertain type*) sono una categoria di sorgenti riportata dal catalogo *Fermi LAT Second AGN Catalog* (2LAC) e costituita

<sup>6</sup>Per ulteriori approfondimenti, si consiglia la lettura dell'articolo *Radio and gamma-ray emission in faint BL Lacs* (2013) di E. Liuzzo, B. Boccardi, M. Giroletti e G. Giovannini.

da galassie attive di cui non è nota la tipologia. Pertanto, ognuna delle sorgenti che costituisce tale categoria potrebbe appartenere alla classe delle Bl Lac oppure ai FSRQ.

Abbiamo voluto riportare questa particolare classe di oggetti celesti non solo in quanto riportata da catalogo ma poiché ampiamente utilizzata nel nostro lavoro di ricerca (vedi cap. 5).

### HSP, ISP ed LSP

La divisione degli AGN nelle classi HSP (*high-synchrotron-peaked*), ISP (*intermediate-synchrotron-peaked*) ed LSP (*low-synchrotron-peaked*) permette una classificazione dei nuclei galattici attivi sulla base dell'andamento della SED (Spectral Energy Distribution). Se le sorgenti LSP hanno un picco che cade a valori della frequenza  $\nu_{max} < 10^{14} \text{ Hz}$ , gli ISP assumono valori  $10^{14} \text{ Hz} < \nu_{max} < 10^{15} \text{ Hz}$  ed infine per gli HSP  $\nu_{max} > 10^{15} \text{ Hz}$ .

Come per il caso precedente, tale divisione è stata riportata in quanto sarà utilizzata diffusamente nel capitolo 5.

### 3.2.2 Gamma-Ray Burst

Un'ulteriore ed importante sorgente di fotoni ad alta energia è costituita dai Gamma-Ray Burst (GRB); così come definiti dal nome si tratta di brevi ed intense esplosioni di raggi  $\gamma$  in cui viene rilasciata una quantità di energia che può assumere valori dell'ordine di  $10^{48} - 10^{53} \frac{\text{erg}}{\text{s}}$ .

La luminosità di tali lampi  $\gamma$  raggiunge in media le  $10^{18} L_{\odot}$  mentre la loro durata può variare da qualche millisecondo fino a diversi minuti.

Tali eventi avvengono con una frequenza media di un'esplosione al giorno; inoltre, i risultati osservativi ottenuti dall'esperimento BATSE (Burst And Transient Experiment) hanno permesso di determinare la distribuzione spaziale dei GRBs che risulta pressoché isotropa. L'esperimento BATSE, ed in generale la missione NASA del Compton Gamma-Ray Observatory di cui BATSE faceva parte, permisero di verificare l'ipotesi sulla natura extragalattica di tali sorgenti gamma, ottenendo come valori del redshift misure comprese tra  $z = 0.0085$  e  $z = 6.7$ .

Scoperti casualmente alla fine degli anni '60 da satelliti militari americani nel contesto della guerra fredda<sup>7</sup>, l'origine dei GRBs è ancora incerta non essendo stata trovata a tutt'oggi una controparte in banda ottica, IR o radio.

<sup>7</sup>Come accennato, la scoperta dei GRBs ebbe luogo quando satelliti militari americani spiavano la possibile violazione del trattato sui test nucleari condotti nell'atmosfera da parte dei sovietici. Questi satelliti erano costituiti tra l'altro da rilevatori di raggi gamma dato che le esplosioni nucleari ne sono importanti sorgenti. Il risultato fu inaspettato: la completa ottemperanza da parte dell'URSS del trattato e il rilevamento di brillanti esplosioni gamma provenienti da regioni esterne al sistema solare, i GRBs.

Tuttavia, in base ai dati ottenuti dalle missioni Swift e Fermi si ritiene credibile che all'origine dei gamma-ray burst vi sia il collasso di materia all'interno di un buco nero.

A seconda della durata dell'esplosione i GRBs sono stati divisi in due classi: quelli di *lunga durata* e quelli di *breve durata*.

Se i primi si ritiene abbiano luogo a seguito del rapido collasso (processo di supernova) di stelle massive rotanti, i secondi sono dovuti al fenomeno di *merging* tra due oggetti compatti.

L'emissione di raggi  $\gamma$  da parte dei GRBs è attualmente spiegata dal cosiddetto **fireball model**. Secondo il suddetto modello l'esplosione non avviene simmetricamente. Questo permette la formazione di un fascio (jet) di energia, una vera e propria fiammata gamma, dove shells di elettroni, protoni e fotoni di differenti velocità collidono tra loro trasformando la loro energia cinetica in raggi gamma. Tale esplosione è seguita da un fenomeno di *afterglow*. L'*afterglow*, scoperto solo negli anni '90 e spiegato dalla formazione di onde d'urto che colpiscono il mezzo circumstellare al sito dell'esplosione, è un segnale piuttosto debole ma di lunga durata rivelabile alle lunghezze d'onda che vanno dall'X al radio.

### 3.3 Unidentified Fermi Objects

Come suggerisce il nome stesso, gli Unidentified Fermi Objects (UFO) non rappresentano una vera e propria classe di oggetti, bensì un'ingente quantità<sup>8</sup> di sorgenti gamma, rilevate dall'osservatorio spaziale Fermi, di cui non è ancora nota la controparte.

Dalla messa in orbita di Fermi, buona parte degli studi svolti in quest'ambito sono dedicati allo studio della natura di tali sorgenti ed alla ricerca delle loro controparti ottiche, X e radio. La difficoltà di ottenere un'associazione per tali sorgenti è dovuta al limite risolutivo del telescopio spaziale stesso, che oscilla tra un valore minimo di pochi arcominuti fino ad un massimo di tre gradi.

Il metodo oggi impiegato per l'ottenimento di un'associazione segue diversi step.<sup>9</sup> Inizialmente si procede con un'associazione posizionale, basata sulla coincidenza spaziale (nei limiti di risoluzione angolare) di sorgenti osservate a differenti lunghezze d'onda. Questa prima classificazione viene a sua volta verificata tramite l'utilizzo di plot diagnostici, costruiti per differenti emettitori gamma (blazar, microQSO, pulsar, etc.), e plot colore-colore, basati sul rapporto tra flussi di diverse bande dello spettro elettromagnetico.

<sup>8</sup>Nel catalogo 2FGL il numero di sorgenti non associate è pari a 576.

<sup>9</sup>Si consiglia a tal proposito la lettura della tesi di dottorato *A multiwavelength study of Unidentified Objects in the Second Fermi Gamma-ray catalogue* di Simona Paliano.

È proprio in questo ultimo contesto che si inserisce il nostro lavoro di ricerca sperimentale di cui si discuterà ampiamente nel capitolo 5. Siamo riusciti, infatti, ad ottenere un interessante metodo di verifica della validità delle associazioni compiute per gli UFO.



## Capitolo 4

# Proprietà statistiche delle varie classi

Nel seguente capitolo affronteremo lo studio delle caratteristiche principali delle sorgenti del cielo gamma andandone a confrontare le diverse proprietà statistiche.

Per compiere tale analisi, abbiamo preso in considerazione le classi di sorgenti BL Lacs, FSRQ, Pulsar ed UFO. Questi ultimi sono stati divisi in due categorie in base ai valori assunti dal parametro di latitudine galattica ( $b$ ). Nello specifico la distinzione è stata fatta col proposito di compiere un primo distinguo tra possibili UFO galattici ed extragalattici. Il valore discriminante scelto al fine di compiere la suddetta divisione è pari a  $b = \pm 20^\circ$ .

I parametri fisici presi in considerazione e tabulati nei cataloghi *Fermi LAT Second Source Catalog* (2FGL), dal *Fermi LAT Second AGN Catalog* (2LAC) e dal *The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars* (2PC) sono: il redshift, il flusso fotonico, il flusso di energia radiante, l'indice spettrale, l'indice di variabilità e la latitudine galattica.

### 4.1 Redshift

Per lo studio statistico dell'andamento del redshift ( $z$ ), parametro astrofisico fondamentale, abbiamo potuto far riferimento ai soli AGN e, nello specifico, alla loro distinzione tra BL Lacs ed FSRQ.

Il grafico che abbiamo ottenuto sulla base dei dati riportati nel catalogo 2LAC rappresenta l'andamento del redshift di 191 BL Lacs e 380 FSRQ.

tipo di sorgente	$n^\circ$ di sorgenti
BL Lacs	191
FSRQ	380

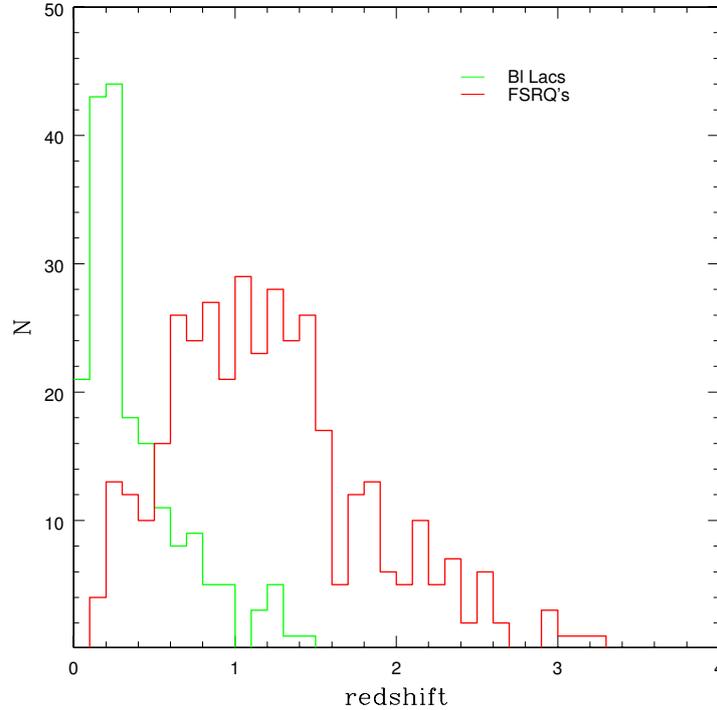


Figura 4.1: Istogramma dell'andamento del redshift per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di  $\Delta z = 0.1$ .

Dall'analisi del grafico ottenuto risulta piuttosto chiara ed evidente la separazione tra i picchi massimi delle due distribuzioni. Per quanto concerne le BL Lacs il massimo si ha per  $z = 0.1$ ; diversamente per gli FSRQ il picco cade a valori del redshift ben maggiori e pari a  $z \simeq 1$ .

È interessante notare come l'ampiezza delle due distribuzioni differisca: nel caso delle BL Lacs la distribuzione risulta maggiormente piccata intorno al valore di  $z = 0.1$  rispetto a quanto accade per gli FSRQ. Questo fatto ci permette di giungere alla consistente conclusione secondo cui, in media, le BL Lacs sono sorgenti ben più prossime a noi osservatori che gli FSRQ.

## 4.2 Flusso fotonico

Il parametro di flusso fotonico ( $F$ ), le cui misure vengono espresse in  $\frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ , è stato ottenuto dal catalogo 2FGL e 2PC. I valori associati a tale misura coprono il range di energie che va da  $1 - 100 \text{ GeV}$ .

Riportiamo per ogni classe di oggetti celesti il numero di sorgenti prese in considerazione.

tipo di sorgente	$n^\circ$ di sorgenti
BL Lacs	437
FSRQ	371
Pulsar	109
UFO $ b  < 20$	394
UFO $ b  > 20$	184

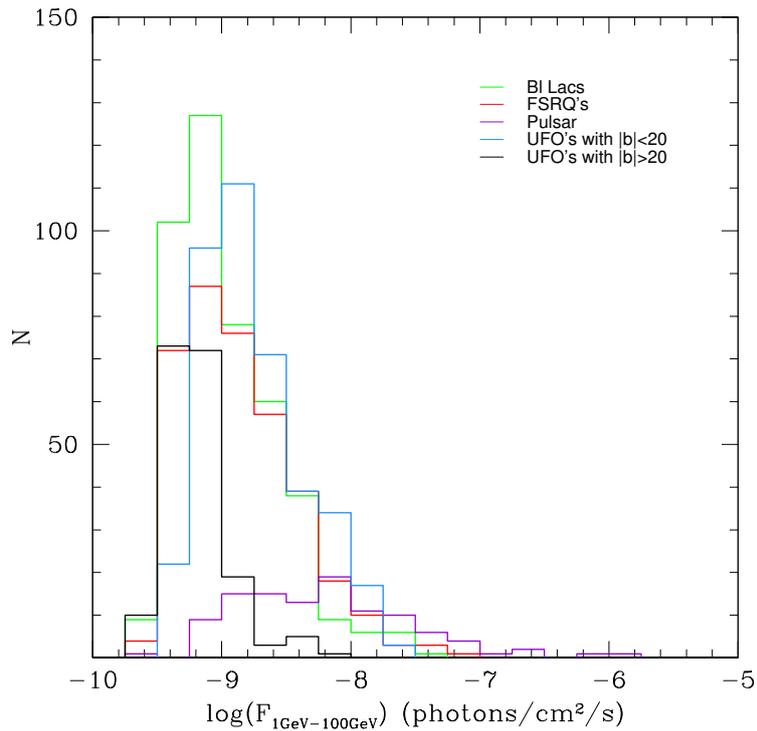


Figura 4.2: Istogramma dell'andamento del flusso fotonico per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di  $\Delta \log(F) = 0.25$ .

Dall'andamento dei diversi istogrammi è possibile osservare una piccola seppur evidente separazione tra i massimi delle diverse distribuzioni. Mentre gli UFO extragalattici ( $|b| > 20^\circ$ ), BL Lacs e FSRQ si attestano principalmente per piccoli valori in flusso, ovvero  $F \leq 10^{-9} \frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ , sorgenti quali gli UFO galattici ( $|b| < 20^\circ$ ) e le pulsar presentano un flusso fotonico maggiore. Nel caso specifico delle pulsar lo spostamento dei valori in cui cade il picco massimo è all'incirca di un fattore 10. Quest'evidenza sembra poter confermare, anche sulla base del grafico del redshift (vedi sez. 4.1), la possibile validità della distinzione della categoria UFO da noi adottata.

### 4.3 Flusso di energia radiante

Il flusso di energia ( $S$ ) misurato nella banda tra  $0.1 - 100 \text{ GeV}$  ed espresso in  $\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$  è stato ottenuto dal catalogo 2FGL e 2PC.

Riportiamo per ogni classe di oggetti celesti il numero di sorgenti prese in considerazione.

tipo di sorgente	$n^\circ$ di sorgenti
BL Lacs	437
FSRQ	371
Pulsar	109
UFO $ b  < 20$	394
UFO $ b  > 20$	184

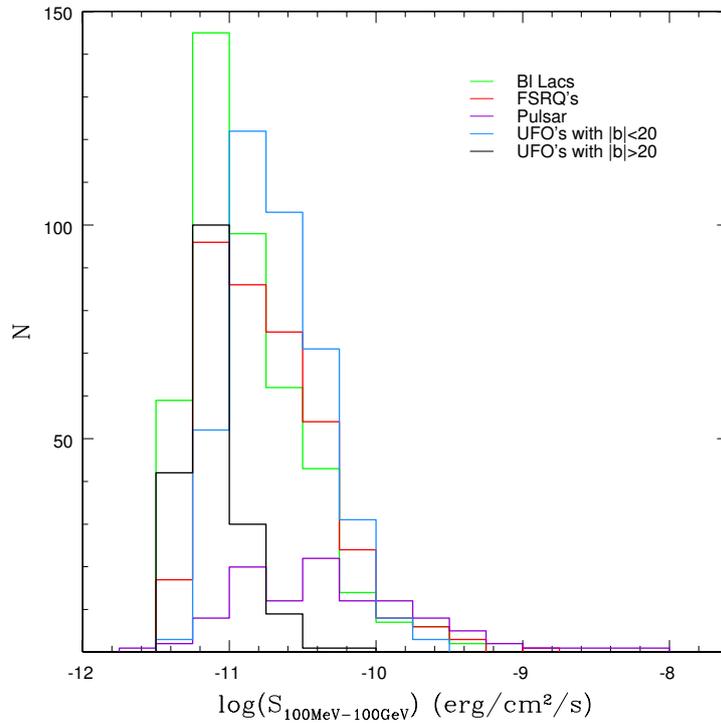


Figura 4.3: Istogramma dell'andamento del flusso di energia per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Anche in questo caso, il passo dell'istogramma è di  $\Delta \log(S) = 0.25$ .

In accordo con il grafico del flusso fotonico (vedi sez. 4.2), anche in questo possiamo osservare una separazione seppur meno netta tra le diverse classi di sorgenti. Il valore di separazione da una parte tra UFO extragalattici, BL Lacs e FSRQ e dall'altra UFO galattici e pulsar, è pari a  $S \leq 10^{-11} \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}$ .

## 4.4 Indice spettrale

L'indice spettrale ( $\alpha$ ), quantità adimensionale, è stato anch'esso ricavato dal catalogo 2FGL e 2PC.

Riportiamo per ogni classe di oggetti celesti il numero di sorgenti prese in considerazione.

tipo di sorgente	$n^\circ$ di sorgenti
BL Lacs	437
FSRQ	371
Pulsar	109
UFO $ b  < 20$	394
UFO $ b  > 20$	184

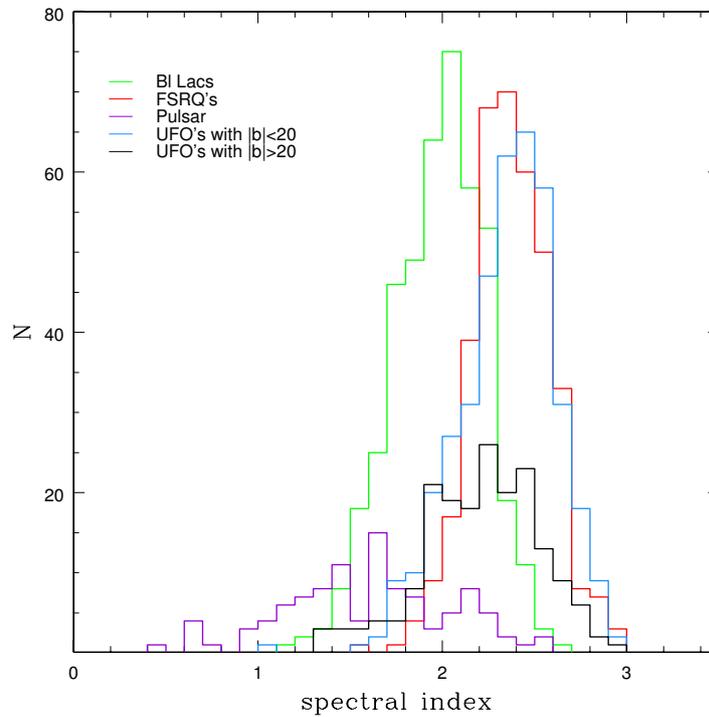


Figura 4.4: Istogramma dell'andamento dell'indice spettrale per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di  $\Delta\alpha = 0.1$ .

Il grafico riportato risulta particolarmente interessante in quanto permette di ottenere una buona divisione tra tutte le diverse classi di sorgenti gamma. Osserviamo, infatti, come i picchi massimi delle differenti distribuzioni cadano a valori di  $\alpha$  dissimili. Per maggior visibilità e comprensione riportiamo una

tabella in cui verrà associata ad ogni tipologia di sorgente il valore medio di  $\alpha$  in cui cade il picco massimo e che definiremo come  $\alpha_{max}$ .

<b>tipo di sorgente</b>	$\alpha_{max}$
pulsar	1.6
BL Lacs	2.0
UFO $ b  > 20$	2.2
FSRQ	2.3
UFO $ b  < 20$	2.4

## 4.5 Indice di variabilità

Il parametro definito come indice di variabilità è stato ottenuto dai cataloghi 2FGL e 2PC ed è definito tramite la comparazione tra il flusso fotonico integrale fittato in 24 bin temporali ed una curva di luce piatta definita sull'intero periodo osservativo del catalogo (all'incirca di due anni, vedi sez. 2.3.1). In particolare un valore di tale quantità che sia superiore a 41.64 indica che la sorgente ha meno dell'1% di probabilità di essere stazionaria.

In prima istanza, per necessità grafico-visive abbiamo dovuto compiere un taglio del grafico per valori dell'indice di variabilità pari a 300. Successivamente, abbiamo voluto riportare per maggior visibilità due ulteriori grafici in cui è stato compiuto un taglio a 100.

<b>tipo di sorgente</b>	$n^\circ$ di sorgenti (taglio a 100)	$n^\circ$ di sorgenti (taglio a 300)
BL Lacs	397	427
FSRQ	225	314
Pulsar	108	108
UFO $ b  < 20$	393	393
UFO $ b  > 20$	181	183

Come si può osservare dai grafici, per tutte le diverse classi di oggetti celesti la maggior parte delle sorgenti assumono valori inferiori al valore limite di 41.64. I picchi delle diverse distribuzioni tuttavia si attestano per valori compresi tra 20 e 30. Dall'andamento generale si discostano leggermente i FSRQs mostrando un andamento piuttosto piatto all'aumentare dell'indice di variabilità. Tuttavia, quanto osservato ci porta all'inevitabile conclusione che la gran parte delle sorgenti gamma osservate è altamente variabile, facendo sì, per citare Alessandro De Angelis,

“...che il cielo [gamma] appaia come una sequenza di luci che si accendono e si spengono con scale di tempi spesso dell'ordine del giorno, a volte di pochi minuti.”<sup>1</sup>

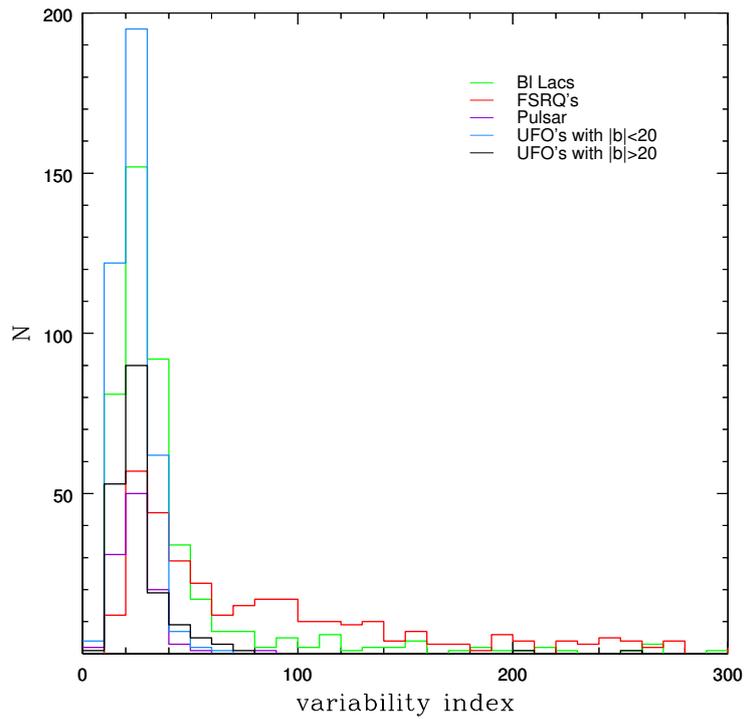
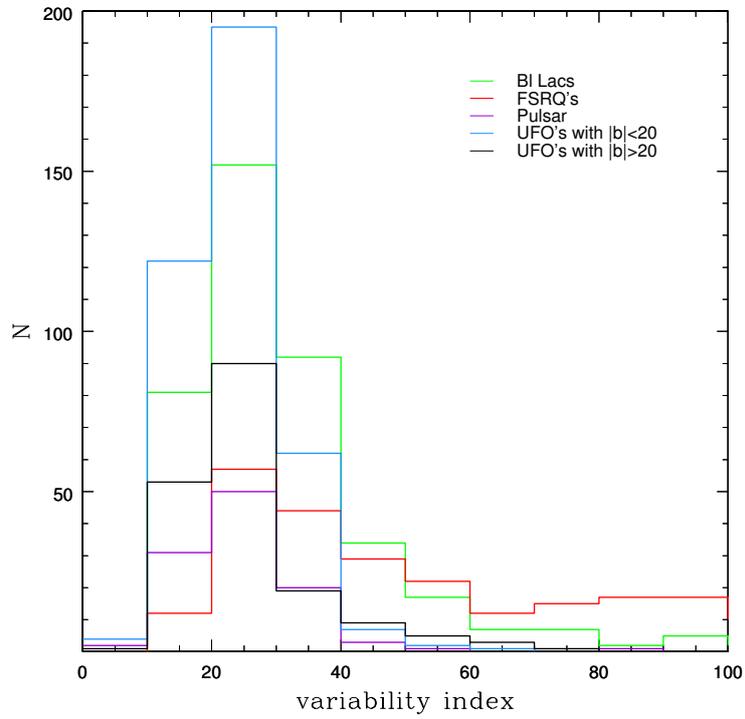


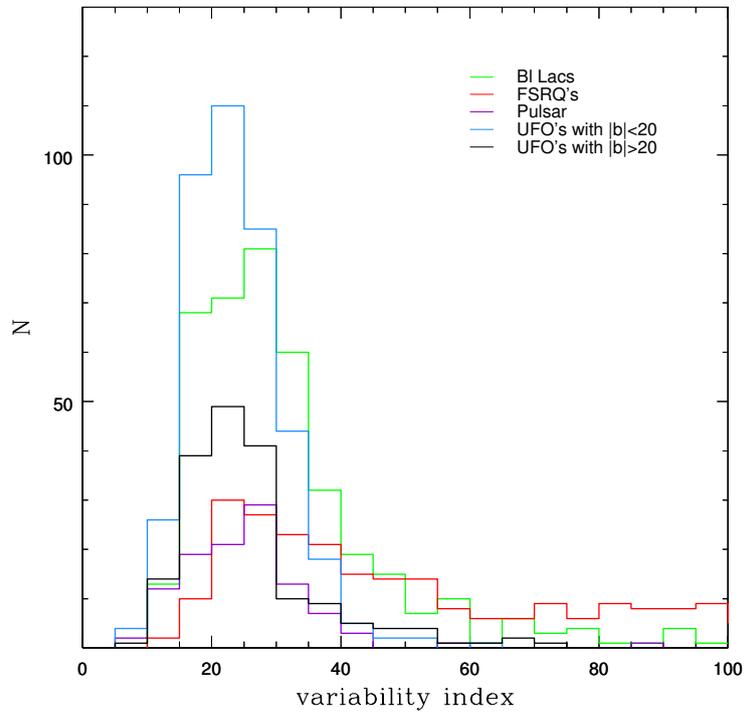
Figura 4.5: Istogramma dell'andamento dell'indice di variabilità tagliato al valore 300 per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di 10.

<sup>1</sup>Tratto dall'articolo Gli enigmi dei raggi cosmici.

CAPITOLO 4. PROPRIETÀ STATISTICHE DELLE VARIE CLASSI 42



Istogramma dell'andamento dell'indice di variabilità tagliato al valore 100 per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di 10.



Istogramma dell'andamento dell'indice di variabilità tagliato al valore 100 per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma è di 5.

## 4.6 Latitudine galattica

Il parametro di latitudine galattica  $b$  è stato ricavato anch'esso dai cataloghi 2FGL e 2PC.

Riportiamo per ogni classe di oggetti celesti il numero di sorgenti prese in considerazione.

tipo di sorgente	$n^\circ$ di sorgenti
BL Lacs	437
FSRQ	371
Pulsar	109
UFO $ b  < 20$	394
UFO $ b  > 20$	184

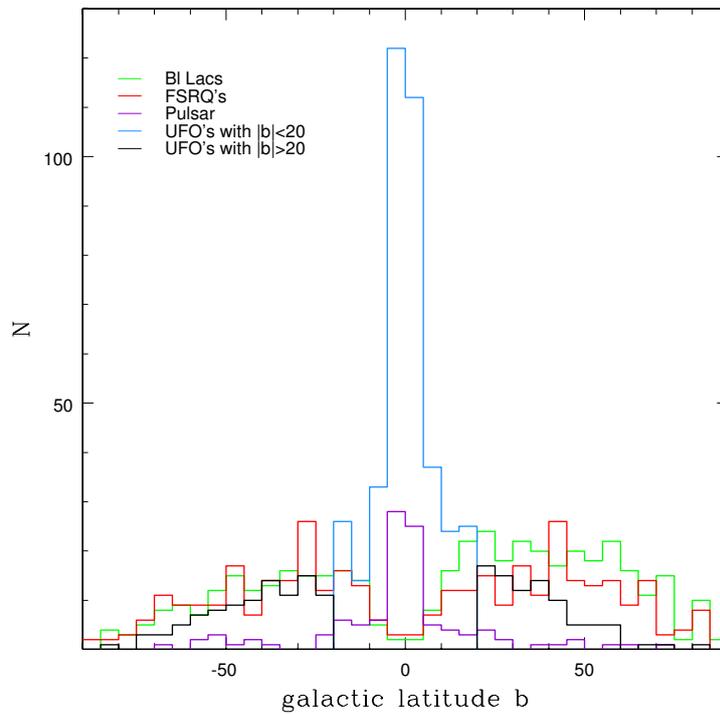


Figura 4.6: Istogramma dell'andamento della latitudine per le diverse classi di sorgenti gamma osservate dal telescopio spaziale Fermi. Il passo dell'istogramma riportato qui di seguito è di  $\Delta b = 5^\circ$ .

È interessante osservare come il numero di sorgenti AGN decrementi al diminuire della latitudine galattica mentre un elevato numero di UFO risulta essere concentrato prevalentemente nella fascia compresa tra valori di  $b$  pari a  $b = \pm 5^\circ$ .

Dal grafico possiamo osservare come le stesse pulsar si addensino fortemente nel piano galattico. Tale considerazione ben si accorda con il tipo di classificazione che abbiamo compiuto nel capitolo precedente per questa classe di oggetti celesti. Risulta evidente che le sorgenti pulsar osservate sono in grande maggioranza galattiche.

## Capitolo 5

# Diagrammi colore-colore

Riportiamo in questo capitolo il risultato scientifico ottenuto, fulcro del nostro lavoro di tesi triennale.

A partire da dati di catalogo abbiamo potuto ricavare, per la maggior parte delle sorgenti gamma appartenenti al secondo catalogo di Fermi, il rapporto delle densità di flusso di energia nelle bande gamma, X, ottico e radio dello spettro elettromagnetico. Questo studio multi-wavelength ci ha permesso di ottenere un risultato particolarmente interessante per quanto concerne la verifica della correttezza delle associazioni di sorgenti gamma con le controparti in banda radio, ottica ed X.

A conclusione di questo capitolo, ne mostreremo alcuni esempi<sup>1</sup> dimostrando come tali associazioni vengano confermate dal diagramma da noi ottenuto.

### 5.1 Ottenimento e riduzione dati

Come già precedentemente sottolineato (si veda il capitolo 4) abbiamo preso in considerazione come sorgenti celesti, oggetto del nostro studio, le seguenti classi di oggetti: BL Lacs, FSRQ, AGU, pulsar e microQSO.

Nello specifico, per quanto riguarda le sorgenti AGN (BL Lacs e FSRQ) abbiamo preferito compiere la suddivisione di quest'ultime nelle classi SED: HSP, ISP ed LSP.<sup>2</sup>

Riportiamo di seguito, per ciascuna classe di oggetti celesti, il catalogo da cui sono state ricavate le informazioni fondamentali e come si è lavorato su di esse.

---

<sup>1</sup>I dati e le rispettive associazioni ci sono state fornite dal lavoro di tesi di dottorato di Simona Paiano [2], vedi tabella 5.1.

<sup>2</sup>Si veda il capitolo 3 sez. 3.2.1.

### 5.1.1 Sorgenti HSP, ISP, LSP e AGU:

I dati sono stati ottenuti principalmente a partire dal catalogo *Fermi LAT Second Source Catalog* (2FGL) e dal *Fermi LAT Second AGN Catalog* (2LAC), reperibili sul sito del Goddard Space Flight Center HEASARC della NASA.<sup>3</sup>

I parametri tabulati da catalogo e presi in considerazione per permettere la determinazione della densità di flusso di energia nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico sono stati il `flux_xray`, `flux_radio` e `Vmag_USNOB1` dal 2LAC e `spectral_index`, `pivot_energy` e `flux_density` dal 2FGL.

#### Definizione dei parametri in banda X e radio

Il dato `flux_xray` presentato in catalogo ed espresso in  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ , è ottenuto dai cataloghi ROSAT All Sky Survey (RASS) (Voges et al. 1999), Swift X-Ray Telescope, White-Giommi-Angelini (White et al. 2000), XMM (XMM-Newton Survey Science Centre 2010) e dal Brera Multi-scale Wavelength (Lazzati et al. 2001).<sup>4</sup>

Il dato `flux_radio` è dato in  $mJy$ . Tali misure provengono principalmente dai cataloghi GB6 (Gregory et al. 1996) e PMN e sono ottenute alla frequenza di  $4.85 GHz$  ( $6 cm$ ).

#### Operazioni di conversione

Ricordando ora che  $1mJy = 10^{-26} \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz}$  e che  $1eV = 2.418 \cdot 10^{14} Hz$  di frequenza fotonica, abbiamo trasformato i dati di catalogo da  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$  e  $mJy$  in unità di  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz}$  calcolando il dato X a  $1KeV$ .<sup>5</sup>

Nello specifico,

$$N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s} \right] = 4.136 \cdot 10^{-18} \cdot N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.1)$$

$$N[mJy] = 10^{-26} \cdot N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.2)$$

ove  $N$  è il dato tabulato in catalogo.

Siamo riusciti a ottenere in tal modo le densità di flusso di energia sia in banda X che radio.

<sup>3</sup>I cataloghi utilizzati nel nostro lavoro di ricerca sono stati reperiti rispettivamente all'indirizzo internet <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/fermilpsc.html> (2FGL) ed <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/W3Browse/all/fermilac.html> (2LAC).

<sup>4</sup>I cataloghi RAS, White-Giommi-Angelini e il Brera Multi-Scale Wavelength hanno un'estensione di banda tra  $0.2 - 2.4 keV$  mentre i cataloghi XMM e Swift sono approssimativamente nella banda tra  $0.5 - 12 keV$ .

<sup>5</sup>Ricordiamo che  $1 KeV$  corrisponde a  $2.418 \cdot 10^{17} Hz$ .

### Definizione dei parametri in banda gamma

Come già anticipato, per quanto riguarda i dati gamma abbiamo preso in considerazione i parametri di `spectral_index`, `pivot_energy` e `flux_density` riportati nel catalogo 2FGL.

Il dato `spectral_index` (che indicheremo d'ora in poi con  $\alpha$ ) non è nient'altro che l'indice spettrale, quantità per definizione adimensionale.

Il `pivot_energy` ( $\epsilon_p$ ), espresso nel catalogo in *MeV*, è l'energia alla quale l'errore sul flusso fotonico differenziale risulta essere minimo, ovvero l'energia per il fit a legge di potenza. Questo dato viene ottenuto dall'analisi di verosimiglianza nell'intervallo di energia tra 0.1 – 100 *GeV*.

La `flux_density` (che indicheremo con  $S$ ) corrisponde al flusso fotonico differenziale calcolata all'energia di pivot e misurata in  $\frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}}$ . Anche questa quantità come il `pivot_energy` è ottenuta dall'analisi di verosimiglianza nell'intervallo di energia tra 0.1 – 100 *GeV*.

### Operazioni di conversione

La relazione impiegata per ottenere la densità di flusso di energia nel gamma risulta pertanto maggiormente complessa e data da:

$$S \left[ \frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}} \right] = 6.626 \cdot 10^{-27+4(1-\alpha)} \cdot \epsilon_p^\alpha \cdot S \left[ \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Hz}} \right] \quad (5.3)$$

dove  $S$  è la `flux_density`,  $\epsilon_p$  il `pivot_energy` e infine  $\alpha$  lo `spectral_index`.

Tale relazione è stata ottenuta a partire dalla definizione di flusso fotonico valutato per  $\epsilon = \epsilon_0$ :

$$\frac{dN}{d\epsilon} = S \cdot \left( \frac{\epsilon}{\epsilon_p} \right)^{-\alpha} \left[ \frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}} \right] \quad (5.4)$$

$$\left. \frac{dN}{d\epsilon} \right|_{\epsilon_0} = S \cdot \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_p} \right)^{-\alpha} \quad (5.5)$$

Moltiplicando ambo i membri per  $\epsilon_0$  (opportunamente espresso in *MeV*) otteniamo:

$$\epsilon_0 \left. \frac{dN}{d\epsilon} \right|_{\epsilon_0} = S \cdot \epsilon_0 \cdot \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_p} \right)^{-\alpha} \left[ \frac{\text{MeV}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}} \right] \quad (5.6)$$

Sappiamo che  $1\text{MeV} = 1.6022 \cdot 10^{-6}\text{erg}$  e che  $1\text{MeV} = 2.4180 \cdot 10^{20}\text{Hz}$  pertanto

$$\epsilon_0 \left. \frac{dN}{d\epsilon} \right|_{\epsilon_0} = 6.626 \cdot 10^{-27} \cdot S \cdot \epsilon_0 \cdot \left( \frac{\epsilon_0}{\epsilon_p} \right)^{-\alpha} \left[ \frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{Hz}} \right] \quad (5.7)$$

relazione che coincide con la (5.3) se sostituiamo nella (5.6) il valore  $\epsilon_0 = 10^4\text{MeV}$ .

### Ottico

Per lo studio nell'ottico abbiamo preso dal catalogo 2LAC i dati USNOB1 della survey ottica USNO riportati alla voce `Vmag_USNOB1`. La scelta di adottare tale survey è conseguenza diretta della sua estensione di campo, coprendo entrambi gli emisferi celesti.<sup>6</sup>

Note pertanto le magnitudini in banda V delle singole sorgenti abbiamo applicato la seguente relazione per ottenere la relativa densità di flusso di energia associata:

$$F_{oss} = 3.81 \cdot 10^{-20-0.4 \cdot m_V} \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.8)$$

dove  $F_{oss}$ ,  $F_0$  ed  $m_V$  sono rispettivamente il flusso osservato, il flusso di magnitudine zero e la magnitudine apparente in banda V riportata in catalogo.

Tale relazione si è potuta ricavare a partire dalla legge di Pogson per le magnitudini secondo cui:

$$m_V = -2.5 \cdot \log \left( \frac{F_{oss}}{F_0} \right) \quad (5.9)$$

Opportunamente invertendo la relazione e tenendo conto del valore di  $F_0$ <sup>7</sup>,

$$F_{oss} = 10^{-0.4 \cdot m_V} \cdot F_0 \quad (5.10)$$

$$F_0 = 3.81 \cdot 10^{-20} \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.11)$$

abbiamo potuto ottenere la (5.8).

#### 5.1.2 Sorgenti pulsar:

Per quanto riguarda le sorgenti pulsar abbiamo fatto riferimento ai dati riportati nel catalogo *The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars* (2PC).

I dati tabulati e presi in considerazione sono stati rispettivamente i valori di `G100`, `S1400` ed `XFlux_NonTherm`.

---

<sup>6</sup>A differenza di USNO, la survey ottica SDSS (Sloan Digital Sky Survey) copre solo l'emisfero boreale. Di conseguenza il numero di sorgenti rilevate è ampiamente ridotto. È tuttavia necessario sottolineare come, a discapito della sua maggior estensione di campo, i risultati di USNO sono ritenuti meno precisi ed affidabili di quelli della SDSS.

<sup>7</sup>Il flusso di magnitudine zero in banda V ( $F_0$ ) riportato fa riferimento al sistema fotometrico UBV Johnson-Morgan secondo cui in banda V la lunghezza d'onda media è di 5500 Å ed  $F_0 = 3.81 \cdot 10^{-20} \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz}$ .

### Definizione dei parametri in banda X, radio e gamma

Il parametro **G100**, espresso in  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ , descrive il miglior fit del flusso di energia tra  $0.1 - 100 GeV$ .

Il dato **S1400**, misurato in  $mJy$  rappresenta la densità di flusso radio a  $1400 MHz$ .<sup>8</sup>

L'**XFlux\_NonTherm**, calcolato in  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$ , definisce il flusso di energia in banda X ( $0.3 - 10 keV$ ) di origine non termica, corretto per l'assorbimento galattico. Lo spettro è descritto da una power law tenendo conto del fenomeno di estinzione galattica, a cui si aggiunge un modello di corpo nero quando necessario.<sup>9</sup>

### Operazioni di conversione

Ottenuti pertanto i suddetti dati, abbiamo applicato per i valori X e radio rispettivamente le relazioni (5.1) e (5.2), ottenendo così le rispettive densità di flusso di energia.

Per la misura gamma siamo dovuti ricorrere alla seguente formula che ci ha permesso di calcolare la densità di flusso di energia a  $10 GeV$  a partire dal parametro **G100**:

$$N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s} \right] = 4.136 \cdot 10^{-25} \cdot N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.12)$$

dove  $N$  è il dato tabulato in catalogo.

### Ottico

Per la componente ottica abbiamo preso sempre dal catalogo 2PC il parametro **Corr\_OptFlux** che, espresso in  $\frac{erg}{cm^2 \cdot s}$  rappresenta il flusso di energia nella banda ottica V opportunamente corretto per estinzione galattica. Per tale correzione del flusso è stato tenuto conto, ove necessario, del fenomeno di reddening interstellare. Il flusso stesso è stato poi scalato in banda V<sup>10</sup>.

Per ottenere la densità di flusso di energia abbiamo preso pertanto il parametro **Corr\_OptFlux** e lo abbiamo diviso per la frequenza di picco  $\nu = 5.4508 \cdot 10^{14} Hz$ .

La relazione che ci ha permesso l'ottenimento del dato di densità di flusso di energia è:

$$N \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s} \right] = \frac{N}{5.4508 \cdot 10^{14}} \left[ \frac{erg}{cm^2 \cdot s \cdot Hz} \right] \quad (5.13)$$

<sup>8</sup>In alcuni casi (documentati nel catalogo) questo valore è stato estrapolato da misure a differenti frequenze.

<sup>9</sup>Le sorgenti PSRs J0633+1746 e J0659+1414 rappresentano delle eccezioni in quanto per lo spettro è stato usato un modello a doppio corpo nero con legge di potenza.

<sup>10</sup>La lunghezza d'onda di picco è  $\lambda = 5500 \text{ \AA}$  con larghezza di banda pari a  $\Delta\lambda = 890 \text{ \AA}$ .

dove  $N$  è il dato tabulato in catalogo.

### 5.1.3 Sorgenti microQSO:

Il lavoro compiuto sulle sole quattro sorgenti microQSO riportate nel 2FGL risulta tuttavia maggiormente complesso. Si è rivelato fondamentale a tal proposito l'utilizzo non solo dei dati riportati nel catalogo di Fermi ma anche del programma *SED Builder* dell'ASDC <sup>11</sup> che ci ha permesso di ottenere le misure di densità di flusso di energia in banda X e radio, essendo nota l'associazione delle singole sorgenti con le loro rispettive controparti.

Dei quattro microQSO riportati nel catalogo 2FGL solo tre hanno la corrispettiva controparte associata nel *SED Builder*. Conseguentemente il nostro campione di microQSO si è ridotto a sole tre sorgenti.

Riportiamo in seguito una breve tabella delle associazioni note.

nome nel catalogo 2FGL	associazione
2FGL J0240.5+6113	LS I+61 303
2FGL J1826.3-1450	LS 5039
2FGL J2032.1+4049	Cyg X-3

I dati  $\gamma$  sono stati ottenuti dal catalogo 2FGL in maniera analoga a quanto visto in sez. 5.1.1, utilizzando a tal scopo l'equazione (5.3).

Per i dati radio abbiamo potuto utilizzare per tutte e tre le sorgenti le misure del flusso di energia riportato da NVSS alla frequenza fotonica di  $1.4 \text{ GHz}$ . Non siamo stati altresì fortunati per i valori di flusso di energia elettromagnetica nella banda X. Infatti, se per le sorgenti LS I+61 303 e LS 5039 abbiamo preso in considerazione il valor medio tra i dati ad  $1 \text{ KeV}$  del catalogo 1SWXRT, per la sorgente Cyg X-3 siamo dovuti ricorrere alla misura della media dei valori riportati nel catalogo WGACAT (sempre ad  $1 \text{ KeV}$ ).

Per lo studio della componente ottica USNOB1, tramite l'utilizzo del programma *SED Builder*, il nostro campione di microQSO si è ridotto ai due soli elementi LS I+61 303 e LS 5039 di cui abbiamo calcolato il valor medio della magnitudine riportata nel suddetto catalogo alla frequenza fotonica di  $4.6880 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .

Per non perdere la sorgente Cyg X-3 nei plot ottici, siamo ricorsi al dato SDSS10 alla frequenza fotonica di  $6.2890 \cdot 10^{14} \text{ Hz}$ .<sup>12</sup>

Analogamente a quanto visto finora, nel caso dei dati radio, X e ottici si è ottenuta la misura della densità di flusso di energia dividendo il flusso di energia (tabulato in catalogo) per la corrispettiva frequenza fotonica di riferimento.

<sup>11</sup>Il programma *SED Builder* dell'ASDC è reperibile all'indirizzo internet <http://tools.asdc.asi.it/SED/>.

<sup>12</sup>Anche il dato ottico di Cyg X-3 è stato ottenuto utilizzando il programma *SED Builder*.

## 5.2 Diagramma del rapporto di densità di flusso di energia.

Ottenuti pertanto i dati applicando i metodi sopra esposti ed avvalendoci del programma *SuperMongo*, abbiamo creato diversi diagrammi del rapporto tra le densità di flusso di energia delle varie bande per le diverse sorgenti.

Alcuni di questi diagrammi sono risultati particolarmente interessanti e ne presenteremo le caratteristiche salienti nel seguito.

### 5.2.1 Diagramma del rapporto $\frac{radio}{X}$ vs. $\frac{gamma}{X}$

Nel seguente diagramma abbiamo riportato in un piano logaritmico i valori del rapporto  $\frac{gamma}{X}$  in ascissa e  $\frac{radio}{X}$  in ordinata.

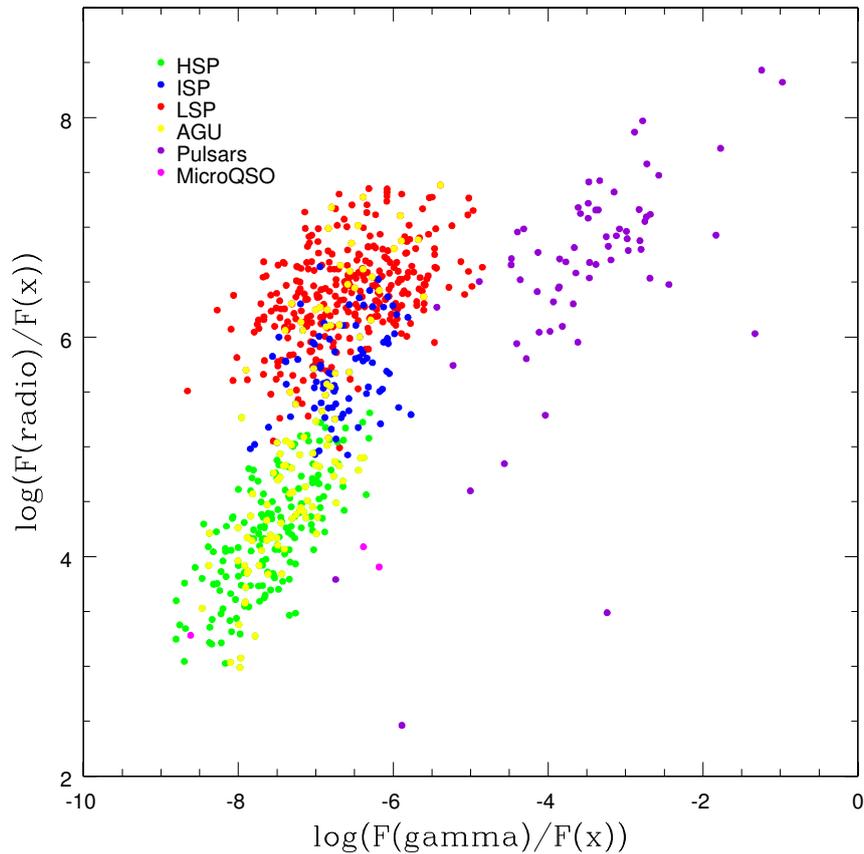


Figura 5.1: Diagramma colore-colore dei rapporti tra le densità di flusso di energia nella banda radio, X e gamma per le sorgenti HSP (dati in verde), ISP (dati in blu), LSP (dati in rosso), AGU (dati in giallo), pulsar (dati in viola) e microQSO (dati in magenta).

È interessante osservare come lungo le ascisse vi sia una separazione piuttosto netta tra pulsar e blazar. Infatti, se le pulsar si attestano a valori più elevati del rapporto  $\frac{\textit{gamma}}{X}$  e presentano una dispersione di oltre cinque ordini di grandezza, gli AGN si addensano a valori del rapporto tra gamma ed X compresi tra  $-9$  e  $-5$ .

La distinzione tra le diverse classi SED dei blazar si ha lungo l'asse delle ordinate. Le sorgenti LSP presentano un rapporto  $\frac{\textit{radio}}{X}$  ben maggiore se confrontato con la classe intermedia degli ISP e quella degli HSP. Questo dato ci permette di concludere che le sorgenti LSP hanno una maggior luminosità?? in banda radio rispetto all'X e il calcolo di tale rapporto può essere un primo distinguo piuttosto efficace per la verifica di appartenenza della sorgente in esame ad una delle diverse classi SED.

La classe dei microQSO costituisce un caso particolarmente complesso data la penuria di sorgenti note. Infatti, non riuscendoli a dividere nettamente dalle altre classi ed in particolare dagli HSP<sup>13</sup> abbiamo cercato di ottenere un risultato più soddisfacente impiegando il dato ottico. Il risultato verrà riportato in sez. 5.2.2.

### Test dati

Come accennato nell'abstract di questo elaborato, sotto la supervisione della dottoressa Simona Paiano, abbiamo voluto comprovare la validità di alcune associazioni di sorgenti gamma riportate nel lavoro di tesi ‘‘A multiwavelength study of Unidentified Objects in the Second Fermi Gamma-ray catalogue’’ ([2]). Il test è stato eseguito per mezzo del diagramma da noi ottenuto e su un campione di dieci sorgenti scelte casualmente tra le numerose proposte. Si è tuttavia cercato di includere il più possibile le diverse categorie di sorgenti, tralasciando quelle di cui non fosse noto il flusso di energia in almeno una banda tra il radio e l'X.

Sebbene il campione di dieci sorgenti sia stato scelto casualmente, non si può non rilevare la disposizione degli UFO verso valori del rapporto  $\frac{\textit{gamma}}{X}$  più elevati all'interno delle distribuzioni relative alle diverse categorie di oggetti celesti. Questo trova una spiegazione nel fatto che gli UFO sono selezionati nella banda gamma dal telescopio Fermi e quindi presentano flussi gamma piuttosto elevati. Di conseguenza per tali sorgenti il rapporto tra il dato gamma e quello X assumerà valori maggiori.

---

<sup>13</sup>Il dato magenta che si sovrappone alla distribuzione degli HSP (dati verdi) rappresenta la sorgente Cyg X-3.

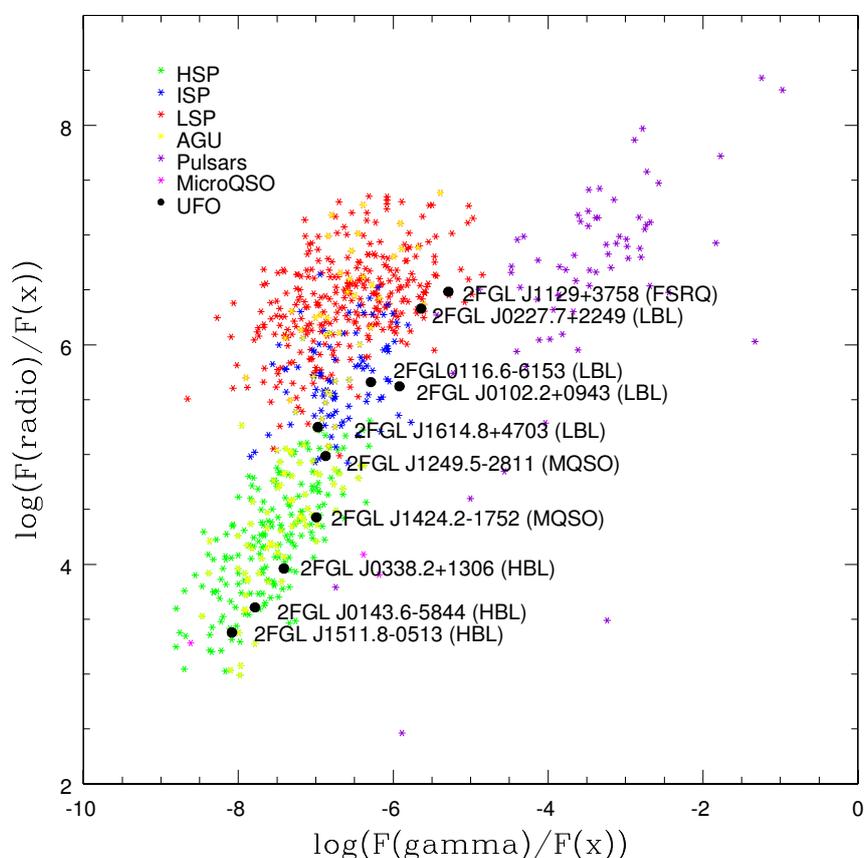


Figura 5.2: Il diagramma colore-colore presentato mostra in un piano logaritmico, avente in ascissa il rapporto  $\frac{\text{gamma}}{X}$  e in ordinata il rapporto  $\frac{\text{radio}}{X}$ , la distribuzione di dieci sorgenti UFO appartenenti al catalogo 2FGL e di cui è stata proposta un'associazione nell'elaborato "A multiwavelength study of Unidentified Objects in the Second Fermi Gamma-ray catalogue" della dottoressa Simona Paiano.

Per quanto è possibile ricavare da fig. 5.2, si è potuta verificare, con un ottimo grado di precisione, la validità delle associazioni riportate nella tesi di dottorato di Simona Paiano. Gli unici dati che lasciano perplessi sono quelli relativi alle sorgenti . Infatti, sebbene siano sorgenti associate a microQSO, la loro distribuzione sembra collocarli nella regione del diagramma dominata dai blazar, e nello specifico dalle classi SED HSP ed ISP. La problematica della determinazione dei microQSO sembra persistere anche in questo caso.

Riportiamo nella pagina successiva i dati forniti dal lavoro a cui abbiamo fatto riferimento ([2]), dati sui quali abbiamo compiuto le necessarie misure per l'ottenimento dei valori del rapporto  $\frac{\text{gamma}}{X}$  e  $\frac{\text{radio}}{X}$ .

Tabella 5.1: Tabella dei dati radio, X e gamma delle sorgenti UFO di cui è stata verificata la validità dell'associazione con la rispettiva controparte. I dati sono stati presi dalla tesi di dottorato ‘A multiwavelength study of Unidentified Objects in the Second Fermi Gamma-ray catalogue’ della dottoressa Simona Paiano.

nome	densità di flusso $\left[\frac{\text{fotoni}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{MeV}}\right]$	energy pivot [MeV]	indice spettrale	$X^a$ $\left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right]$	R $\left[\frac{\text{erg}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}}\right]$	associazione
2FGL J0102.2+0943	$1.4862 \cdot 10^{-13}$	1939.23	2.06800	$6.6460 \cdot 10^{-14}$	$1.6098 \cdot 10^{-16}$	LBL
2FGL J0116.6-6153	$1.3454 \cdot 10^{-14}$	5341.37	1.63349	$1.5010 \cdot 10^{-13}$	$2.2677 \cdot 10^{-16}$	LBL
2FGL J0143.6-5844	$1.5140 \cdot 10^{-13}$	2871.88	1.74167	$1.6868 \cdot 10^{-11}$	$2.3857 \cdot 10^{-16}$	HBL
2FGL J0227.7+2249	$1.8464 \cdot 10^{-13}$	2003.90	1.99512	$5.2210 \cdot 10^{-14}$	$6.4636 \cdot 10^{-16}$	LBL
2FGL J0338.2+1306	$1.5910 \cdot 10^{-14}$	7383.65	1.53542	$4.1319 \cdot 10^{-12}$	$2.1963 \cdot 10^{-16}$	HBL
2FGL J1129.0+3758	$1.3040 \cdot 10^{-12}$	987.51	2.25765	$2.1800 \cdot 10^{-14}$	$3.8430 \cdot 10^{-16}$	FSRQ
2FGL J1249.5-2811	$7.1575 \cdot 10^{-14}$	2727.07	1.96002	$6.7000 \cdot 10^{-13}$	$3.7676 \cdot 10^{-16}$	MicroQSO
2FGL J1424.2-1752	$1.1128 \cdot 10^{-13}$	2549.93	1.97372	$1.1827 \cdot 10^{-12}$	$1.8354 \cdot 10^{-16}$	MicroQSO
2FGL J1511.8-0513	$2.9161 \cdot 10^{-13}$	2094.14	2.21708	$1.7663 \cdot 10^{-11}$	$2.4560 \cdot 10^{-16}$	HBL
2FGL J1614.8+4703	$8.3242 \cdot 10^{-13}$	808.63	2.45125	$2.6344 \cdot 10^{-13}$	$2.7120 \cdot 10^{-16}$	LBL

<sup>a</sup>I dati sono calcolati alla frequenza di  $1.4 \cdot 10^9$  Hz ad eccezione delle sorgenti 2FGL J0116.6-6153 e 2FGL J0143.6-5844. In questi casi i flussi sono misurati rispettivamente a  $0.8 \cdot 10^9$  Hz e  $0.843 \cdot 10^9$  Hz

### 5.2.2 Diagramma del rapporto $\frac{\text{ottico}}{X}$ vs. $\frac{\text{gamma}}{X}$ , $\frac{\text{radio}}{\text{ottico}}$ vs. $\frac{\text{gamma}}{X}$ e $\frac{\text{radio}}{X}$ vs. $\frac{\text{ottico}}{X}$

Di seguito riportiamo tre diversi diagramma colore-colore nei quali è stato impiegato il dato ottico. L'utilizzo di tale dato ha ridotto notevolmente il numero di sorgenti riportate, così come è possibile evincere dagli stessi diagrammi.<sup>14</sup>

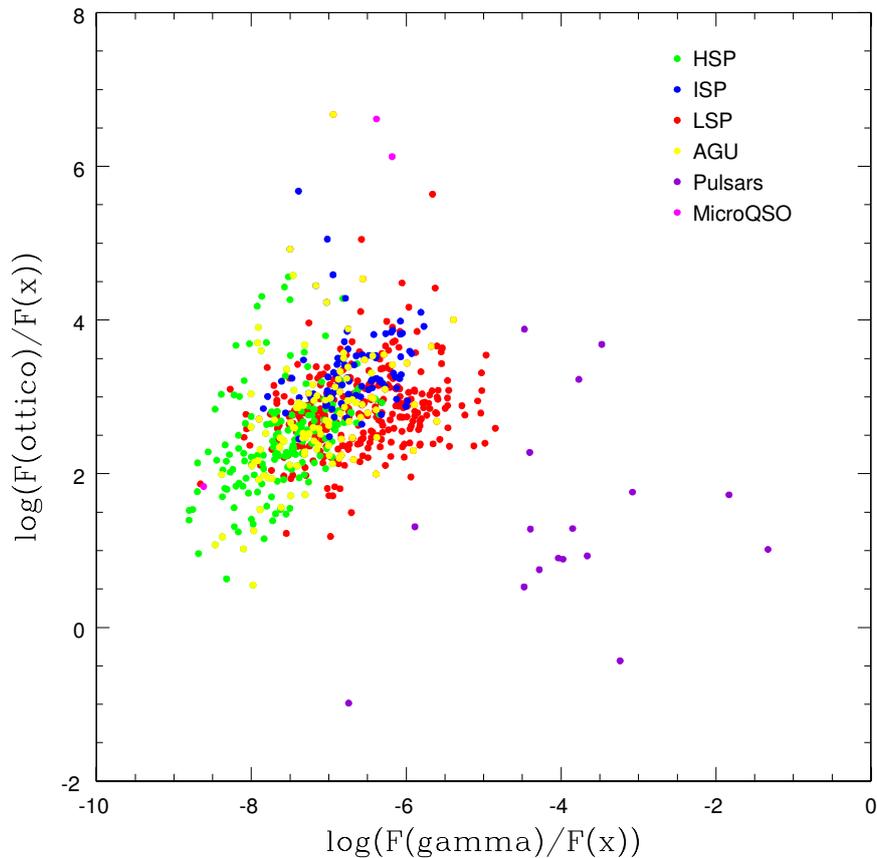


Figura 5.3: Diagramma colore-colore dei rapporti tra le densità di flusso di energia nella banda ottico, X e gamma per le sorgenti HSP (dati in verde), ISP (dati in blu), LSP (dati in rosso), AGU (dati in giallo), pulsar (dati in viola) e microQSO (dati in magenta).

In figura 5.3 e 5.4 possiamo osservare come una distinzione tra pulsar e blazar sia ancora presente e dovuta essenzialmente al rapporto dei dati gamma ed X.<sup>15</sup>

<sup>14</sup>A tal riguardo il numero di sorgenti pulsar è risultato notevolmente ridotto, passando da 67 a 17 sorgenti.

<sup>15</sup>Tale fattore discriminante era stato precedentemente impiegato nel diagramma colore-colore di fig. 5.1.

Il rapporto  $\frac{\text{ottico}}{X}$  (fig. 5.3) non sembra particolarmente significativo per compiere una netta distinzione tra le diverse classi di sorgenti ed in particolare tra gli AGN ed i microQSO. Tuttavia non possiamo non rilevare la tendenza delle pulsar ad avere un rapporto tra il dato ottico ed X piuttosto basso (mediamente pari ad 10) se confrontato con i blazar (valor medio prossimo a  $10^3$ ) ed i microQSO. Questi ultimi, in particolare le sorgenti LS I+61 303 e LS 5039, hanno un flusso ottico estremamente intenso rispetto al corrispondente dato X. Conseguentemente, come valor medio di tale rapporto abbiamo ottenuto un fattore pari a  $10^7$ .

Il rapporto  $\frac{\text{radio}}{\text{ottico}}$  (fig. 5.4) permette una maggior separazione delle sorgenti ma non così decisiva da permettere di definire il diagramma come risultato decisivo. Anche in questo caso la separazione dei microQSO non è netta, Cyg X-3 si dispone ancora una volta nella regione di distribuzione degli HSP.

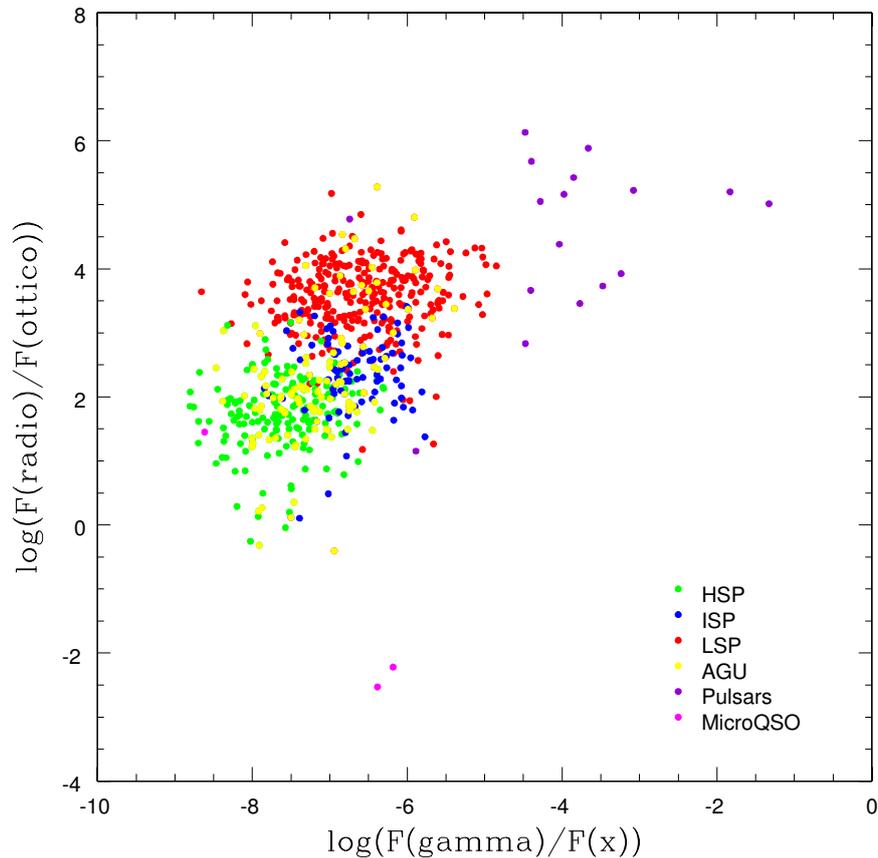


Figura 5.4: Diagramma colore-colore dei rapporti tra le densità di flusso di energia nella banda radio, ottico, X e gamma per le sorgenti HSP (dati in verde), ISP (dati in blu), LSP (dati in rosso), AGU (dati in giallo), pulsar (dati in viola) e microQSO (dati in magenta).

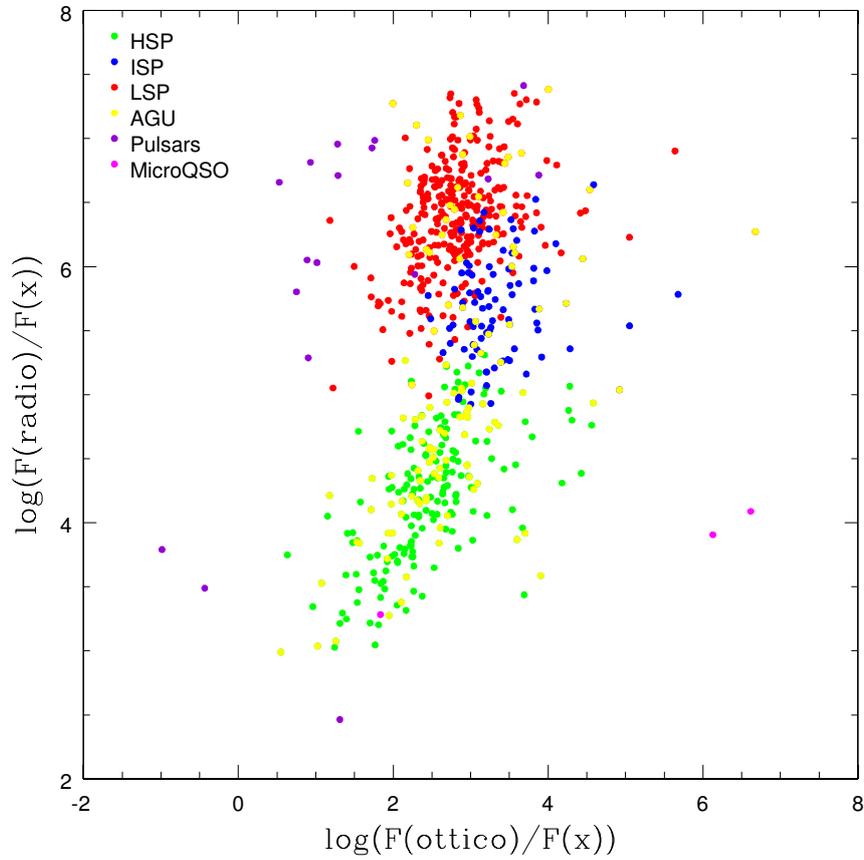


Figura 5.5: Diagramma colore-colore dei rapporti tra le densità di flusso di energia nella banda radio, ottico ed X per le sorgenti HSP (dati in verde), ISP (dati in blu), LSP (dati in rosso), AGU (dati in giallo), pulsar (dati in viola) e microQSO (dati in magenta).

Infine, il diagramma colore-colore di figura 5.5 mostra la separazione tra sorgenti blazar nelle diverse classi SED così come presente in fig. 5.1 (questo è dovuto all'asse del rapporto  $\frac{\text{radio}}{X}$ ). Tuttavia, anche in quest'ultimo caso il dato ottico non ci permette un chiaro distinguo tra i diversi oggetti celesti riportati. Possiamo ricavare una tendenza delle pulsar a disporsi per piccoli valori del rapporto ottico ed X (tra  $10^{-2}$  e  $10^2$ ) e uno spostamento verso il valore  $10^7$  nel caso dei microQSO e di alcuni blazar.



## Capitolo 6

# Conclusioni

Il nostro lavoro di ricerca ha prodotto il risultato sperato: l'ottenimento di un diagramma colore-colore utile alla verifica della validità delle associazioni di sorgenti gamma UFO con le rispettive controparti ottiche, radio ed X. Nello specifico il risultato perseguito permette di discriminare, sulla base del rapporto tra densità di flusso di energia nelle diverse bande dello spettro elettromagnetico, la classe di oggetti celesti a cui appartiene la sorgente oggetto di studio.

Dei vari diagrammi riportati nel presente elaborato, indubbiamente il più significativo, ovvero il grafico che permette la maggior distinzione tra le diverse classi di sorgenti, prevede il calcolo del rapporto di densità di flusso di energia  $\frac{\textit{gamma}}{X}$  e  $\frac{\textit{radio}}{X}$  (vedi sez. 5.2.1).

Non possiamo nascondere tuttavia che tra tutte le sorgenti gamma presentate, i microQSO mostrano una distribuzione poco chiara; riteniamo che questo dato di fatto sia principalmente dovuto alla penuria di tale classe di oggetti appartenenti al catalogo *Fermi LAT Second Source Catalog* (2FGL). Infatti, la mancanza di un numero adeguato di dati non ci permette di definire con precisione la regione dei diagrammi interessata dalla distribuzione dei microQSO.

Pertanto, riteniamo che il lavoro presentato abbia un'indubbia ed importante applicazione pratica nel panorama odierno dello studio dell'astronomia in luce Cherenkov. Riconosciamo tuttavia la necessità di un ulteriore approfondimento a riguardo per una più precisa ed accurata rappresentazione dei diagrammi presentati. A tal riguardo pensiamo possa essere decisivo compiere un tale studio su un campione di sorgenti più ampio, come si ritiene possa accadere a seguito della pubblicazione del futuro catalogo Fermi (3FGL).



# Elenco delle figure

1.1	Spettro di energia dei raggi cosmici . . . . .	2
1.2	Struttura di uno sciame atmosferico . . . . .	3
1.3	Andamento spettrale dei diversi processi fisici che contribuiscono all'emissione X e gamma . . . . .	4
1.4	Processo di emissione di radiazione di sincrotrone . . . . .	5
1.5	Spettro di Sincrotrone . . . . .	6
1.6	Processo di Bremsstrahlung . . . . .	7
1.7	Spettro di Bremsstrahlung . . . . .	8
1.8	Processo di Compton Inverso . . . . .	9
1.9	Spettro di emissione di Synchrotron Self Compton Model . . . . .	9
1.10	Telescopio Cherenkov del progetto MAGIC . . . . .	11
2.1	Logo ufficiale della missione spaziale Fermi GLAST. . . . .	13
2.2	Struttura dell'esperimento LAT . . . . .	14
2.3	Cartografia del cielo gamma ottenuta dai dati del 2FGL . . . . .	15
3.1	Immagini del resto di supernova Cas A e Simeis 147 . . . . .	20
3.2	Immagini del resto di supernova N 63A Menagerie e della Crab Nebula . . . . .	21
3.3	Descrizione di una pulsar . . . . .	22
3.4	MicroQSO e loro descrizione grafica . . . . .	24
3.5	Confronto delle caratteristiche tra microQSO e quasar . . . . .	25
3.6	Immagini di AGN . . . . .	26
3.7	Rappresentazione grafica del modello unificato degli AGN . . . . .	27
3.8	Struttura di un AGN . . . . .	28
3.9	SED della sorgente Bl Lacertæ . . . . .	29
3.10	SED delle sorgenti FSRQ CGRaBS J1703-6212 e PKS 2155-83 . . . . .	30
4.1	Istogramma del redshift . . . . .	36
4.2	Istogramma del flusso fotonico . . . . .	37
4.3	Istogramma del flusso di energia . . . . .	38
4.4	Istogramma dell'indice spettrale . . . . .	39
4.5	Istogramma dell'indice di variabilità . . . . .	41
4.6	Istogramma della latitudine . . . . .	43

5.1	Diagramma colore-colore $\frac{radio}{X}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ . . . . .	51
5.2	Diagramma colore-colore di verifica della validità di associazioni UFO . . . . .	53
5.3	Diagramma colore-colore $\frac{ottico}{X}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ . . . . .	55
5.4	Diagramma colore-colore $\frac{radio}{ottico}$ vs. $\frac{gamma}{X}$ . . . . .	56
5.5	Diagramma colore-colore $\frac{radio}{ottico}$ vs. $\frac{ottico}{X}$ . . . . .	57

# Bibliografia

- [1] S. Paiano (2010); *Ricerche di Materia Oscura con il Telescopio MAGIC*; Università degli Studi di Padova.
- [2] S. Paiano (2014); *A multiwavelength study of Unidentified Objects in the Second Fermi Gamma-ray catalogue*; Università degli Studi di Padova.
- [3] P. L. Nolan, A. A. Abdo et al. (Febbraio 2012); *Fermi Large Area Telescope Second Source Catalog*; *The Astrophysical Journal*.
- [4] A. A. Abdo, M. Ajello et al. (Ottobre 2013); *The Second Fermi Large Area Telescope Catalog of Gamma-ray Pulsars*; *The Astrophysical Journal*.
- [5] A. Bodaghee, J. A. Tomsick, K. Pottschmidt, J. Rodriguez e G. G. Pooley (Settembre 2013); *Gamma-ray observations of the microquasars Cygnus X-1, Cygnus X-3, GRS 1915+105 and GX 339-4 with the Fermi Large Area Telescope*; *The Astrophysical Journal*.
- [6] E. Liuzzo, B. Boccardi, M. Giroletti, G. Giovannini (Giugno 2013); *Radio and gamma-ray emission in faint BL Lacs*; *Proceedings of Science*.
- [7] Xu-Liang Fan, Jin-Ming Bai, Hong-Tao Liu, Liang Chen e Neng-Hui Liao (Maggio 2012); *The connection between Radio and  $\gamma$ -Ray Emission in Fermi/LAT Blazars*; *Research in Astronomy and Astrophysics*.
- [8] S. J. Williams, D. R. Gies, R. A. Matson, Y. Touhami, E. D. Grundstrom, W. Huang e M. V. McSwain (Novembre 2010); *The Be star HD 215227: a candidate gamma-ray binary*; *The Astrophysical Journal*.
- [9] A. De Angelis (2012); *Gli enigmi dei raggi cosmici*; Articolo pubblicato da *Le Scienze* (n. 528).
- [10] R. Jayawardhana (2014); *Cacciatori di neutrini*; Codice Edizioni (pubblicato da *Le Scienze*).