

Indice

Introduzione	1
1 Il terzo catalogo EGRET (3EG) e le sorgenti gamma già identificate	4
1.1 Cenni sull'emissione alle alte energie	4
1.2 Le missioni spaziali gamma	6
1.2.1 Il Compton Gamma Ray Observatory	7
1.3 Il cielo visto da EGRET: Il catalogo 3EG	10
1.4 Le sorgenti EGRET identificate	14
1.4.1 Blazar	14
1.4.2 La radiogalassia Centaurus A	19
1.4.3 Pulsar	20
2 Le sorgenti gamma non identificate	25
2.1 Suddivisione delle sorgenti gamma non identificate	25
2.1.1 Sorgenti non identificate sul piano galattico ($ b < 5^\circ$) . .	27
2.1.2 Sorgenti non identificate a latitudini $5^\circ < b < 30^\circ$. . .	29
2.1.3 Sorgenti non identificate ad alte latitudini ($ b > 30^\circ$) . .	31
3 L'importanza della banda X per l'identificazione e il satellite BeppoSAX	34
3.1 L'approccio multibanda per l'identificazione	34
3.2 La missione BeppoSAX	36
3.3 La strumentazione scientifica	38
3.3.1 I telescopi	39
3.3.2 Il LECS	40
3.3.3 Il MECS	41
3.4 Il PDS	43
3.5 Analisi spettrale	46
3.5.1 Analisi dati MECS	46

3.5.2	Analisi dati PDS	48
3.5.3	Procedimento di analisi spettrale	49
4	Il campione di sorgenti EGRET non identificate	51
4.1	Determinazione del campione	51
4.2	Proprietà del campione di sorgenti gamma non identificate . . .	53
4.2.1	Periodi di osservazione VP	55
4.2.2	Criteri di variabilità per le sorgenti EGRET	56
4.3	Copertura X del box di errore gamma	59
4.4	Criterio di classificazione del campione di sorgenti EGRET non identificate	59
5	La sorgente gamma 3EG J2027+3429	61
5.1	Caratteristiche della sorgente gamma	61
5.2	Ricerca della controparte X nella scatola di errore gamma	63
5.3	Osservazione BeppoSAX della sorgente WGA J2025.1+3342 . . .	66
5.4	Caratteristiche globali della sorgente	68
5.5	Conclusioni	72
6	Sorgenti EGRET non identificate ad alta latitudine	73
6.1	3EG J1234-1318	73
6.1.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	74
6.1.2	Osservazione BeppoSAX del BL Lac 1RXS J123511.1- 140332	76
6.1.3	Caratteristiche globali della sorgente	78
6.2	3EG J1212+2304	80
6.2.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	82
6.2.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente BL Lac 1RXS J121158.1+224236	83
6.2.3	Caratteristiche globali della sorgente	85
6.3	3EG J1621+8203	88
6.3.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	88
6.3.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente NGC 6251	92
6.3.3	Caratteristiche globali della sorgente	93
7	Sorgenti EGRET non identificate a bassa latitudine	96
7.1	3EG J0542+2610	96
7.1.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	96

7.1.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente A0535+26	98
7.1.3	Caratteristiche globali della sorgente	100
7.2	3EG J1837-0423	103
7.2.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	105
7.2.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente GRO J1838-04	106
7.2.3	Caratteristiche globali della sorgente	106
7.3	3EG J1837-0606	109
7.3.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	109
7.3.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente 3EG J1837-0606	112
7.3.3	Caratteristiche globali della sorgente	116
7.4	3EG J1824-1514	119
7.4.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	119
7.4.2	Osservazione BeppoSAX della sorgente RX J1826.2-1450	121
7.4.3	Caratteristiche globali della sorgente	123
7.5	3EG J1800-2338	124
7.5.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	124
7.5.2	Osservazione BeppoSAX	126
7.5.3	Caratteristiche globali della sorgente	127
7.6	3EG J1410-6147	128
7.6.1	Ricerca della controparte X nella scatola di errore	128
7.6.2	Osservazione BeppoSAX	130
7.6.3	Caratteristiche globali della sorgente	132
7.7	Casi particolari: 3EG J1652-0223 e 3EG J1757-0711	134
7.7.1	3EG J1652-0223	134
7.7.2	3EG J1757-0711	136
	Conclusioni	138
	Appendice	144
	Ringraziamenti	145
	Bibliografia	147

Introduzione

Le sorgenti gamma non identificate sono “vecchie“ quanto l’astronomia gamma stessa, nel senso che fin dal lancio del primo satellite (SAS-2, 1972) in grado di discriminare oggetti puntiformi rispetto all’emissione di fondo diffusa, sorgenti non identificate sono apparse nel cielo. Con questa definizione ci si riferisce a sorgenti per le quali non è nota la controparte a frequenze minori e quindi il tipo di oggetto celeste responsabile dell’emissione gamma osservata.

Delle 271 sorgenti gamma ($E > 100$ MeV) puntiformi listate nel catalogo 3EG (Hartmann et al. 1999), circa un terzo (103 sorgenti) sono state identificate. Si tratta di 93 AGN della classe blazar, 7 pulsar e tre casi unici relativi alla radiogalassia Centaurus A, alla Grande Nube di Magellano ed un brillamento solare. Le restanti 168 sorgenti del catalogo invece non sono identificate. Tale “status“ è dovuto essenzialmente alla “scarsa“ risoluzione angolare del telescopio gamma EGRET. Infatti i contorni di confidenza al 95% delle sorgenti gamma (cioè la regione entro la quale si ha il 95% di probabilità di trovare la sorgente responsabile dell’emissione osservata) hanno tipicamente un raggio compreso tra 0.5° e 1° . In un’area così estesa (dell’ordine del diametro lunare ed oltre) le possibili controparti ad alte lunghezze d’onda sono numerosissime, specie alle basse latitudini galattiche, ciò preclude ogni possibile identificazione basata sulla correlazione posizionale con i vari oggetti celesti. Inoltre l’assenza di righe nello spettro gamma a causa di una non adeguata risoluzione spettrale elimina ogni possibilità di misurazione diretta del redshift o della composizione chimica della sorgente. In molti casi poi la statistica dei fotoni a disposizione non è adeguata per permettere ricerche conclusive di periodicità dell’emissione e anche la variabilità delle sorgenti è difficile da determinare a meno che non si manifestino evidenti comportamenti di “flaring“.

Tenuto conto di tutte queste limitazioni, il migliore ed unico approccio sulla base dei dati oggi a disposizione per tentare l’identificazione è quello multibanda, ossia lo studio a più frequenze della scatola di errore gamma. La banda X riveste un’importanza fondamentale nell’approccio multifrequenza

in quanto tutte le sorgenti EGRET già identificate sono anche sorgenti X. Ad esempio, l'emissione X è una caratteristica comune a tutti gli AGN della classe dei blazar, i quali presentano nella banda 2-10 keV forte variabilità e valori del flusso tipicamente di $F_X = 10^{-12} \div 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Anche le pulsar possono essere nella banda X tra 2 e 10 keV deboli ($\sim 10^{-13} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$) o brillanti ($\sim 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ come nel caso della pulsar Crab). Analogamente è ragionevole ritenere che anche altre eventuali tipologie di oggetti responsabili di emissione gamma possano essere caratterizzate da emissione X.

Questo lavoro di tesi nasce proprio dall'idea di studiare nella banda X le scatole di errore di sorgenti EGRET non identificate, provando a fornire un possibile contributo al lavoro di identificazione delle loro controparti a frequenze minori. A tal scopo sono state utilizzate osservazioni BeppoSAX i cui campi LECS/MECS si sovrappongono parzialmente o totalmente (in seguito a puntamenti mirati o in maniera casuale) a scatole di errore di sorgenti EGRET non identificate.

Il lavoro è organizzato in 7 capitoli.

capitolo 1: dopo una breve introduzione inerente l'astronomia gamma, fa riferimento al catalogo 3EG di sorgenti gamma puntiformi e alle uniche due tipologie di oggetti celesti fino ad oggi conosciute essere emittitori gamma, cioè blazar e pulsar.

capitolo 2: vengono delineate le caratteristiche delle sorgenti gamma non identificate e suddivise a seconda della loro posizione rispetto al piano della Galassia.

capitolo 3: descrizione delle caratteristiche del satellite X BeppoSAX e dei suoi strumenti, facendo riferimento in particolar modo a quelli adoperati, in questo lavoro di tesi, per effettuare l'analisi spettrale delle sorgenti X.

capitolo 4: elaborazione del nostro campione di sorgenti gamma non identificate da studiare con osservazioni BeppoSAX. Sono inoltre fornite tutte le caratteristiche inerenti a tali sorgenti.

capitolo 5: sono esposti i risultati del nostro studio relativo alla sorgente del campione 3EG J2027+3429, da noi identificata con una blazar posizionata

dietro il piano galattico. (risultato già accettato per una pubblicazione su A&A)

capitolo 6: è affrontato lo studio delle sorgenti gamma non identificate del campione localizzate ad alta latitudine galattica ($|b| > 30^\circ$).

capitolo 7: sono forniti i risultati del nostro studio riguardo alle sorgenti gamma non identificate del campione localizzate a bassa latitudine galattica ($|b| < 5^\circ$).

Capitolo 1

Il terzo catalogo EGRET (3EG) e le sorgenti gamma già identificate

1.1 Cenni sull'emissione alle alte energie

L'astronomia per secoli è stata caratterizzata esclusivamente da osservazioni nella banda ottica ed è solo nel secolo scorso che lo studio del cielo si è allargato a tutte le frequenze dello spettro elettromagnetico. La regione dei raggi gamma è stata l'ultima banda elettromagnetica ad essere esplorata. Questa conquista è stata resa possibile dall'avvento in tempi relativamente "recenti" di tecnologie non solo in grado di portare in orbita rivelatori di fotoni γ allo scopo di superare l'opacità dell'atmosfera terrestre, ma anche capaci di rendere possibile la progettazione e la costruzione di dispositivi atti a distinguere con grandissima efficienza i fotoni emessi dalle sorgenti rispetto a quelli generati dall'interazione tra le particelle cariche presenti nella magnetosfera e i rivelatori. Quest'ultimi fotoni possono generare un rumore di fondo così alto da nascondere completamente l'emissione delle sorgenti osservate.

L'allargamento della ricerca astronomica a tutta la banda elettromagnetica ha fornito una grandissima quantità di informazioni, mostrando un aspetto dell'universo violento e rapidamente variabile che ha profondamente rivoluzionato l'astronomia moderna e più in generale l'idea stessa che avevamo di un universo quasi immutabile così come ci è apparso per secoli in ottico. Questo discorso vale in particolar modo per l'astronomia gamma che ci fornisce la possibilità di investigare alcuni dei fenomeni celesti più energetici in quanto i suoi fotoni trasportano come minimo un'energia pari a 10.000 volte quella di un fotone della luce visibile. Questa energia è normalmente misurata in

electron-volt (eV), un tipico fotone ottico possiede circa 2-3 eV di energia, mentre lo spettro gamma comincia ad energie intorno ai 50.000 eV (50 keV) e si estende fino ai TeV (10^{12} eV) ed oltre. I fotoni gamma hanno un elevato potere di penetrazione nella materia, questo significa che provengono dalle regioni più interne della sorgente osservata dove risiedono le fonti di energia primaria e hanno luogo i processi per la produzione della radiazione. Tuttavia uno svantaggio risiede nel fatto che i fotoni gamma sono in genere pochi, nel senso che persino le sorgenti più brillanti emettono solo pochi fotoni a queste energie, se confrontati con quelli emessi in altre bande elettromagnetiche.

In natura i fotoni gamma possono essere creati in diversi modi.

Se la temperatura è abbastanza elevata, dell'ordine di 100 milioni di gradi, possono essere prodotti, in modo analogo ai raggi X, dei fotoni gamma "termici". Tuttavia tale condizione di elevata temperatura può essere raggiunta solo in alcuni casi molto particolari come eventi esplosivi del tipo supernova o in presenza di forti interazioni gravitazionali, del tipo buco nero o stella di neutroni che accrescono materia da una stella compagna.

I fotoni gamma sono prodotti anche e soprattutto da processi non termici, questo significa che essi sono il risultato di interazioni fondamentali tra particelle elementari o tra quest'ultime ed altri fotoni. I processi fondamentali che producono raggi gamma sono:

- **radiazione di sincrotrone**; emessa da particelle cariche relativistiche che spiraleggiano intorno alle linee di forza di un campo magnetico. Per campi molto intensi tale radiazione prodotta cade nella banda gamma.
- **effetto Compton Inverso**; un elettrone energetico interagisce con un fotone trasferendo parte della sua energia al fotone stesso.
- **radiazione di bremsstrahlung**; emessa quando una particella carica viene frenata dal campo elettrico di un nucleo.
- **annichilazione**; particelle ed antiparticelle eventualmente presenti nella stessa regione di spazio si distruggono a vicenda producendo due fotoni gamma con energia complessiva uguale all'energia totale delle due

particelle.

- **collisioni tra protoni**; possono produrre fotoni gamma in seguito al decadimento di mesoni π^0 generati dalla collisione.

I processi non termici di produzione dei fotoni gamma sono la chiave per la loro rivelazione strumentale, in quanto contrariamente a quelli ottici o ai raggi X, i fotoni gamma non possono essere focalizzati da uno specchio tradizionale dato che interagiscono debolmente con la materia. Sono proprio le interazioni dei raggi gamma all'interno degli appositi rivelatori che permettono di misurare il tempo di arrivo e l'energia dei fotoni stessi. È per questo motivo che la strumentazione gamma si basa su tecniche di rivelazione sviluppate nel campo della fisica delle alte energie.

1.2 Le missioni spaziali gamma

I primi tentativi di rivelare fotoni gamma ($E > 10$ MeV) di origine cosmica furono effettuati negli anni sessanta con strumenti montati su pallone, tuttavia il vero sviluppo di questa branca dell'astronomia si ebbe solo con l'uso di strumenti a bordo di satelliti artificiali, in quanto quest'ultimi garantivano durante la loro vita operativa tempi di osservazione abbastanza lunghi da poter raccogliere un numero adeguato di fotoni. Le missioni spaziali più importanti sono state essenzialmente tre.

La prima è stata il satellite SAS-2 lanciato nel 1972 per conto della NASA, capace di rivelare la direzione dei fotoni con energia maggiore di 35 MeV. Pur operando per soli otto mesi circa, questo primo satellite per l'astronomia gamma fu in grado di evidenziare l'emissione diffusa del piano galattico e di individuare due sorgenti discrete, le pulsar Crab e Vela.

Nel 1975 fu lanciato il satellite COS-B (Scarsi et al. 1977) dell'Agenzia Spaziale Europea (ESA), operante nella banda energetica tra 50 MeV e 5 GeV. Grazie alla sua lunga vita operativa (7 anni) fu possibile produrre una mappa dettagliata della Galassia mostrante l'emissione del disco, nonché creare il primo catalogo di sorgenti gamma discrete comprendente più di 20 oggetti, tra i quali la prima sorgente gamma extragalattica, ovvero la quasar 3C 273.

Ma la vera rivoluzione in questa scienza "giovane" nata con l'esplorazione

spaziale è avvenuta con il lancio, nel 1991, del satellite Compton Gamma Ray Observatory (CGRO).

1.2.1 Il Compton Gamma Ray Observatory

È ad Arthur Holly Compton, il fisico americano premio Nobel, che il Gamma Ray Observatory deve il suo nome. Il CGRO nacque dalla collaborazione tra Stati Uniti, Repubblica Federale Tedesca, Paesi Bassi e Regno Unito. Con il lancio STS 37, nell'Aprile del 1991, lo Space Shuttle Atlantis pose il satellite su un'orbita circolare a circa 450 Km di altezza, con un'inclinazione di 28.5° . L'altezza orbitale della missione costituì un compromesso tra la necessità di evitare le zone di radiazione che generano il rumore di fondo dello strumento e il tempo di vita in orbita desiderato. IL CGRO era dotato di un sistema a propulsione per mantenere l'altezza orbitale e per consentirgli un rientro comandato nell'atmosfera alla fine della missione, cosa avvenuta nel Giugno del 2000. La piattaforma del CGRO poteva essere puntata in ogni direzione con una precisione di $\pm 0.5^\circ$ e l'assetto poteva essere misurato entro $\pm 2'$. La marcatura temporale degli eventi è stata possibile entro 0.1 ms. I quattro strumenti a bordo erano combinati in modo da completarsi a vicenda nel tracciare la mappa del cielo gamma, investigando la distribuzione di energia delle singole sorgenti ed osservando i fenomeni variabili nel tempo. Essi coprivano un intervallo energetico dai 20 keV ai 30 GeV. La sensibilità delle osservazioni su queste sei decadi di energia è risultata migliorata, rispetto agli esperimenti precedenti, tipicamente di un ordine di grandezza. Le dimensioni degli strumenti (con un'area utile di raccolta piuttosto grande), i vantaggi di una missione lunga e le tecniche di anticoincidenza (le quali evitano che i raggi cosmici si confondano con i segnali gamma), hanno consentito di fornire contributi significativi all'astrofisica delle alte energie. Gli strumenti, in ordine crescente di bande di energia ricoperte, erano : BATSE, OSSE, COMPTEL, EGRET. I dati utilizzati in questo lavoro di tesi sono quelli forniti dallo strumento EGRET, di cui forniamo di seguito una breve descrizione.

Lo strumento EGRET

EGRET (Energetic Gamma Ray Experiment Telescope) è l'esperimento che ha operato alle più alte energie, tra 20 MeV e 30 GeV, a bordo del CGRO. Si trattava di uno strumento ad immagine, con un ampio campo di vista e basso rumore di fondo. I fotoni celesti erano rivelati attraverso il processo della creazione di coppie elettrone-positrone e misurati in una camera a scintillazione

digitale. I componenti tipici di un telescopio a camera di scintillazione per l'astronomia alle alte energie sono:

- Un sistema di anticoincidenza per discriminare rispetto alle particelle cariche primarie della radiazione cosmica.
- Una camera a scintillazione che renda rivelabili i fotoni incidenti e determini le traiettorie delle coppie secondarie elettrone-positrone.
- Un telescopio che riveli la presenza di particelle cariche, individuandone la direzione del moto e che avvii la registrazione delle traiettorie nella camera a scintillazione.
- Un dispositivo per misurare l'energia. Nel caso dello strumento EGRET si trattava di uno spettrometro di ioduro di sodio chiamato TASC (Total Absorption Spectrometer Crystal).

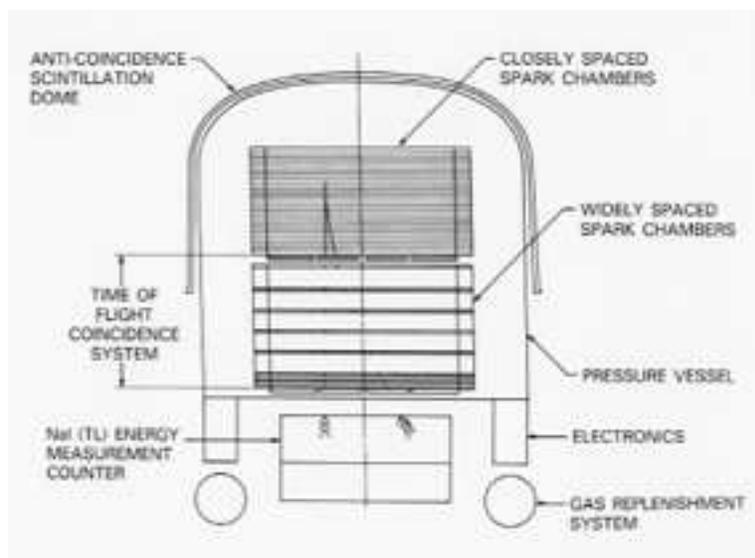


Figura 1.1: Schema dello strumento EGRET

Questi componenti del telescopio erano sostenuti da una piattaforma circolare, che trasportava anche l'equipaggiamento elettronico necessario ed un sistema di approvvigionamento di gas per rifornire la camera a scintillazione (vedi figura 1.1). Il sistema di anticoincidenza era uno scintillatore a forma di cupola, montato sulla chiusura superiore della camera a scintillazione. I raggi gamma cosmici entravano nello strumento ed interagivano con del materiale assorbente. A queste energie la produzione di coppie è il processo dominante. La conversione dei fotoni di alta energia in coppie elettrone-positrone avveniva

nella parte superiore della camera a scintillazione. Quando la coppia viaggiava attraverso la camera piena di gas (composto da neon, argon, etano), si creavano delle scintille sui fili elettrici che la attraversavano incrociandosi. Sotto la camera di conversione un rivelatore a scintillazione registrava il passaggio delle particelle cariche. Il segnale proveniente da questo telescopio, insieme all'assenza della rivelazione nel sistema di anticoincidenza, generava il comando per applicare l'alto voltaggio alla camera a scintillazione e quindi registrare un evento. La camera a scintillazione fotografava, in modo digitale, la traccia lasciata dalla coppia che attraversava lo strumento. Queste tracce, decodificate, riconducevano alla direzione di incidenza del fotone cosmico, permettendo ad EGRET di raffigurare il cielo. Quando la coppia usciva dalla camera a scintillazione, veniva assorbita da un spettrometro (TASC) in grado di determinare l'energia dei fotoni fino a varie decine di GeV, stimare l'energia totale della coppia e, da questa, quella del fotone incidente. I parametri che caratterizzavano EGRET erano:

1. Risoluzione energetica approssimativamente pari al 20%, nella parte centrale dell'intervallo di energia (~ 100 MeV-alcuni GeV).
2. Area totale del rivelatore approssimativamente pari a 6400 cm^2 ed area effettiva di circa 1500 cm^2 nell'intervallo 200-1000 MeV, che diminuiva ad energie minori o maggiori.
3. Sensibilità alle sorgenti puntiformi, in ottime condizioni lontano dal piano galattico, di circa 6×10^{-8} fotoni $\text{cm}^2 \text{ s}^{-1}$, a $E > 100$ MeV per un'esposizione di due settimane. Essa variava con lo spettro e la posizione della sorgente e col tempo di osservazione.
4. Capacità di localizzare la posizione di una sorgente che, a seconda dell'intensità, variava da 4 a 93 arcmin.
5. Campo di vista, approssimativamente di forma gaussiana con FWHM (Full Width Half Maximum) di circa 40° .
6. Precisione sulla rilevazione dei tempi di 0.1 ms.

I risultati della calibrazione dello strumento, prima e dopo il lancio, sono riportati da Thompson et al. (1993).

Durante i quasi dieci anni di osservazione, EGRET ha rilevato circa due milioni di fotoni gamma che rappresentano a tutt'oggi, in attesa dei risultati di future missioni spaziali (AGILE e GLAST), la maggior fonte di informazione sull'emissione del cielo in questa banda.

1.3 Il cielo visto da EGRET: Il catalogo 3EG

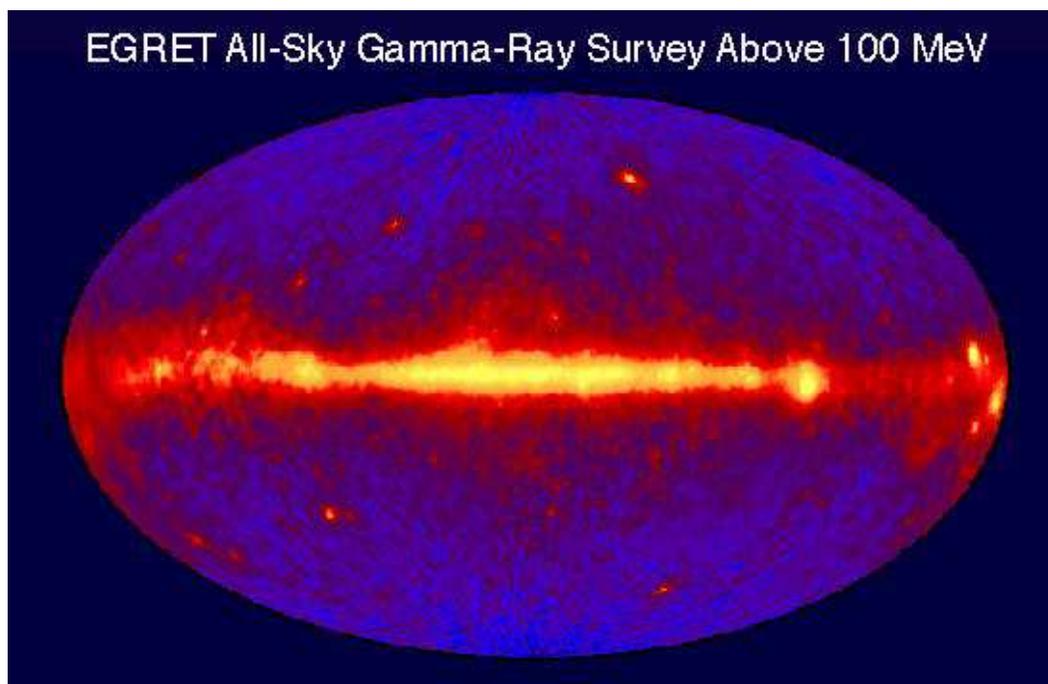


Figura 1.2: Il cielo in coordinate galattiche visto da EGRET sopra i 100 MeV

L'immagine del cielo nella banda gamma, come visto da EGRET sopra i 100 MeV, è mostrata in figura 1.2. Come si può ben notare il massimo dell'emissione è costituita da un fondo di radiazione diffusa, si possono distinguere di tale fondo due componenti: una galattica sovrapposta al piano della Galassia ed una isotropa probabilmente di origine extragalattica. La componente galattica si ritiene sia generata principalmente dall'interazione dei raggi cosmici con il gas del mezzo interstellare (Dar & Shaviv 1995), mentre l'origine della componente isotropa del fondo gamma non è ancora del tutto chiara; la convinzione prevalente è che sia dovuta ad una componente galattica proveniente dall'alone più il contributo di sorgenti puntiformi extragalattiche (verosimilmente galassie) ancora non risolte (Chiang & Mukherjee 1998). Oltre all'emissione diffusa, EGRET è stato in grado di rivelare, attraverso l'osservazione di tutto il cielo mediante esposizioni ripetute compiute dal 22 Aprile 1991 al 3 Ottobre 1995, circa 400 possibili sorgenti gamma puntiformi dalle quali si è estratto un catalogo la cui definitiva stesura è rappresentata dalla terza versione o Third EGRET Catalog 3EG (Hartman et al. 1999) che lista 271 sorgenti. L'analisi dei dati che ha portato alla stesura di tale catalogo è stata effettuata utilizzando particolari tecniche statistiche a causa

del basso numero di fotoni gamma rilevati e della larghezza della PSF (Point Spread Function).¹ Il metodo della massima verosimiglianza (Mattox et al. 1996) è stato usato per stimare le densità di flusso e le posizioni delle sorgenti puntiformi oltre che i parametri del modello di background. Il test statistico del rapporto di verosimiglianza è stato invece utilizzato per determinare la significatività delle sorgenti discrete. Il rapporto di verosimiglianza TS è definito come (Mattox et al. 1996)

$$TS = -2[\ln(L_1) - \ln(L_2)]$$

dove L_1 è la probabilità associata ai dati nel caso di una ipotesi nulla mentre L_2 è la probabilità per gli stessi dati nel caso di una ipotesi alternativa. Per i dati EGRET l'ipotesi nulla adottata è quella che nessuna sorgente puntiforme esiste nella posizione presa in considerazione, mentre l'ipotesi alternativa è il caso contrario, ossia che la sorgente è presente. Mattox et al. (1996) mostrano come la significatività delle sorgenti puntiformi è uguale a $\sqrt{TS}\sigma$. Ogni eccesso rispetto al modello di diffusione con almeno una detezione con $\sqrt{TS} \geq 5$ per $|b| < 10^\circ$ e $\sqrt{TS} \geq 4$ per $|b| > 10^\circ$ è stata inclusa nel catalogo poiché possedeva un ragionevole grado di confidenza. Per ogni sorgente candidata è stata poi costruita una serie di mappe per l'osservazione (singola o sommata) con il valore più grande di \sqrt{TS} ; per tali mappe sono stati usati i seguenti intervalli energetici: $E > 100$ MeV, $100 \text{ MeV} < E < 300$ MeV, $300 \text{ MeV} < E < 1000$ MeV, $E > 1000$ MeV. Poiché la PSF di EGRET è più stretta ad energie maggiori, gli intervalli di energia superiori forniscono informazioni migliori sulla posizione della sorgente a patto però che una statistica adeguata sia disponibile a tali energie. Per rappresentare la posizione della sorgente è stata scelta la mappa, in una delle bande energetiche, in grado di produrre la scatola di errore più piccola. All'interno poi di ogni mappa statistica la posizione della sorgente è stata determinata seguendo il criterio in base al quale quella con il valore maggiore di \sqrt{TS} è la posizione più probabile per la sorgente. In molti casi si può trovare un intervallo di posizioni con circa lo stesso livello di confidenza. Spesso la posizione che ha il valore maggiore di \sqrt{TS} non è al centro della mappa statistica e pertanto in questo caso la scelta operata nel catalogo è stata quella di considerare come migliore posizione quella rappresentata dal centroide della regione racchiusa all'interno del contorno di confidenza al 95%. I contorni di confidenza al 50%, 68%, 95%, 99% indicano la probabilità statistica di

¹La Point Spread Function o PSF è una funzione che descrive la distribuzione di luce sul piano focale, generata da uno strumento per una sorgente puntiforme.

trovare la sorgente all'interno di quel contorno, quest'ultimi però sono calcolati tramite le mappe di verosimiglianza e riflettono solo l'errore statistico nella determinazione della posizione della sorgente. Gli errori sistematici possono a volte rendere queste stime troppo ottimistiche. I contorni di confidenza al 95% sono stati scelti come rappresentativi per le sorgenti del catalogo 3EG, il raggio di tali contorni è il raggio angolare del cono circolare che contiene lo stesso angolo solido del contorno al 95%, presupposto essere di forma circolare (Hartman et al. 1999). Tuttavia non sempre le sorgenti EGRET presentano dei contorni al 95% di tale forma, spesso ne assumono una sostanzialmente ellittica. Ecco perchè Mattox e colleghi (2001) hanno calcolato i fit ellittici dei contorni di confidenza al 95% di tutte le sorgenti listate nel catalogo 3EG, determinando quindi i valori (in arcmin) del semiasse maggiore (a) e minore (b) dell'ellisse. Un aspetto interessante è che se consideriamo i raggi (o in maniera analoga i semiassi) dei livelli di confidenza al 95% delle sorgenti catalogate noteremo che spaziano da qualche arcmin a più di 1° . Le sorgenti gamma rivelate da EGRET non sono pertanto localizzate con buona precisione, a causa della PSF dello strumento. Ciò può avere conseguenze non trascurabili per quel che riguarda l'identificazione ad altre lunghezze d'onda, in quanto per quest'ultime la precisione di localizzazione è notevolmente migliore e ciò può determinare un "affollamento" di controparti ad altre frequenze nel box di errore γ , rendendo problematica l'individuazione dell'oggetto celeste responsabile dell'emissione.

Il catalogo 3EG lista 271 sorgenti gamma puntiformi, la loro distribuzione nel cielo in coordinate galattiche è mostrata in figura 1.3. I vari simboli corrispondono ai differenti tipi di sorgenti, come indicato nella legenda, mentre le loro dimensioni sono proporzionali al flusso misurato. Dalla legenda si può notare che le controparti delle sorgenti gamma puntiformi del catalogo 3EG fino ad oggi identificate sono essenzialmete di due tipi, e cioè AGN della classe dei blazar (sono in tutto 93) e pulsar (6), con tre casi unici relativi ad un brillamento solare, alla grande nube di Magellano ed alla radiogalassia Centaurus A. Quindi, contrariamente a quanto si possa pensare, solo per una frazione minoritaria di sorgenti appartenenti al catalogo 3EG (102) è stata identificata la controparte a frequenze minori, per la stragrande maggioranza di esse (169) invece non si conosce ancora quale sia l'oggetto celeste all'origine dell'emissione osservata. Si parla in questo caso di sorgenti EGRET non identificate (Unidentified EGRET Sources o UES). La distribuzione nel cielo in coordinate galattiche di tutte le sorgenti EGRET può essere suddivisa in due tipologie:

Third EGRET Catalog

$E > 100$ MeV

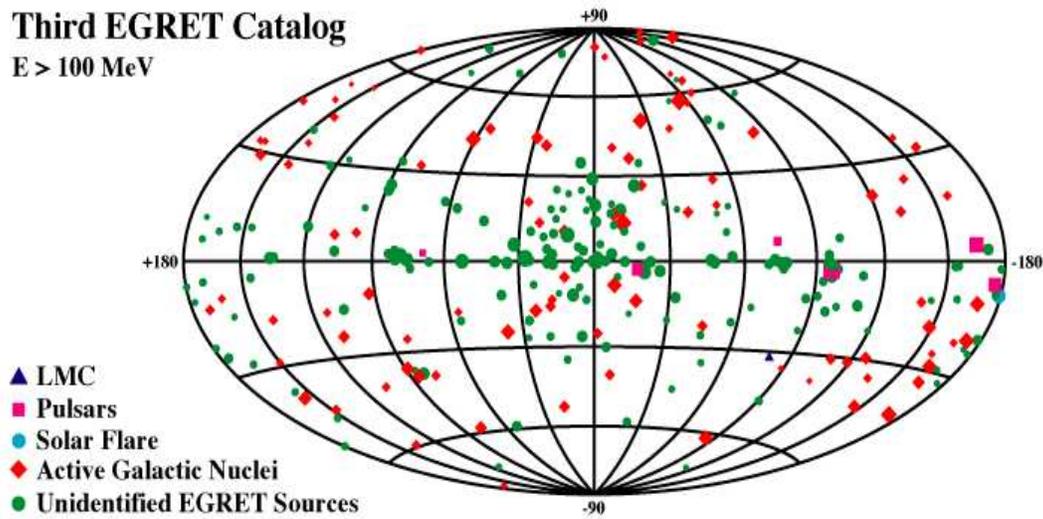


Figura 1.3: distribuzione nel cielo in coordinate galattiche delle sorgenti puntiformi listate nel Third EGRET Catalog

- **Sorgenti a bassa latitudine ($|b| < 10^\circ$):** si tratta di 80 sorgenti delle quali solo 6 sono state identificate con pulsar, una con un brillamento solare (intenso abbastanza da essere rivelato nelle mappe come sorgente) mentre le restanti 73 sono UES (Hartman et al. 1999).
- **Sorgenti a latitudini galattiche più alte ($|b| > 10^\circ$):** sono 191 sorgenti delle quali 93 sono state identificate con AGN della classe dei blazar, 2 rispettivamente con la radiogalassia Centaurus A e la Grande nube di Magellano mentre le restanti 96 sono anch'esse UES (Hartman et al. 1999).

Il motivo di un tale squilibrio numerico tra le sorgenti EGRET identificate a $|b| > 10^\circ$ rispetto a quelle con $|b| < 10^\circ$ è da imputare al fatto che gli AGN non risentono particolarmente del fondo gamma diffuso poiché situati ad alte latitudini galattiche dove esso risulta relativamente debole ed uniforme e le detezioni quindi sono dominate dalla statistica dei fotoni; inoltre ad alte latitudini le scatole di errore delle sorgenti non sono molto “affollate”. Tutto ciò, unito al fatto che le blazar mostrano variabilità gamma correlata a quella radio ed ottica, permette una loro più facile identificazione rispetto alle sorgenti che si trovano a basse latitudini dove gli errori sistematici sono molto importanti a causa del fondo e dove la densità degli oggetti celesti è maggiore.

1.4 Le sorgenti EGRET identificate

1.4.1 Blazar

La quasi totalità delle sorgenti EGRET identificate ad altre lunghezze d'onda sono extragalattiche ed appartengono alla classe dei Nuclei Galattici Attivi (Active Galactic Nuclei: AGN) ed in particolar modo ad una categoria di AGN conosciuta con il nome di blazar. Per comprendere a pieno la portata di una tale scoperta basti pensare che al momento del lancio del CGRO nel 1991 la sola sorgente gamma extragalattica conosciuta era la quasar 3C 273.

Gli AGN sono galassie caratterizzate da un'intensa emissione proveniente dal loro nucleo, sede di una eccezionale attività energetica. Considerando la spiccata variabilità dell'emissione generata nel nucleo e applicando il principio di causalità, si stima che le dimensioni della regione da cui proviene la radiazione siano comprese tra 10^{13} e 10^{16} cm. L'alta luminosità prodotta (dalle onde radio ai raggi gamma si arriva fino a 10^{48} erg s $^{-1}$) in una regione di spazio così piccola rispetto alle dimensioni dell'intera galassia (circa 10^{23} cm) implica che il processo di produzione dell'energia debba essere straordinariamente efficiente. Si ritiene che responsabile dell'emissione sia un buco nero supermassiccio ($M_{BN} \simeq 10^{7\div 9} M_{\odot}$) ospitato nel centro della galassia; il meccanismo di produzione di energia sarebbe quindi costituito dall'estrazione dell'energia di legame associata alla materia immersa nel potenziale gravitazionale generato dal buco nero supermassiccio. All'interno della generica categoria degli AGN si distinguono differenti tipologie; sebbene ognuna di queste sottoclassi presenti proprietà molto diverse tra loro si è propensi a ritenere corretto lo schema di unificazione in base al quale le diverse caratteristiche osservate sono unicamente dovute all'orientazione dell'AGN rispetto alla linea di vista dell'osservatore e alla presenza o meno di getti radio.

Tra le varie sottoclassi degli AGN spicca quella delle blazar. Questo termine fu proposto per la prima volta nel 1978 da Ed Spiegel per raggruppare in una unica categoria le due tipologie di oggetti conosciute con il nome di BL Lac e Quasar a spettro radio piatto (Flat Spectrum Radio Quasars: FSRQ) che pur manifestando differenze erano state indicate dalla teoria unificata come la sottoclasse di AGN con getto relativistico orientato verso l'osservatore.

Le sorgenti di tipo BL Lac sono spesso associate a galassie ellittiche a basso redshift, sono sempre X emittenti e radiosorgenti e presentano un alto grado di polarizzazione sia ottica che radio; la variabilità è notevole anche su tempi

scala inferiori al giorno. Infine caratteristica peculiare è la quasi totale assenza in banda ottica di righe di emissione. L'ipotesi che si ritiene più probabile, per spiegare lo spettro ottico, è quella relativa all'esistenza di un continuo così forte da mascherare le righe, ciò potrebbe essere dovuto ad effetti relativistici, infatti sono stati osservati moti superluminali associati a tali sorgenti.

Le quasar invece sono oggetti ad alto redshift e, nell'ipotesi che quest'ultimo sia di natura cosmologica, si trova che la loro luminosità ottica è estremamente elevata: se integrata su tutta la banda si ottengono valori tra 10^{44} e 10^{46} erg s⁻¹. Di solito si parla di quasar particolarmente brillanti in radio o Quasar Radio Loud se $P_{5GHz} > 5 \times 10^{24}$ Watt Hz⁻¹ (dove P_{5GHz} è la potenza alla frequenza di 5 GHz). Questi oggetti sono associati sia a galassie ellittiche che spirali ed hanno righe di emissione larghe ed intense. In particolar modo le quasar a spettro radio piatto mostrano sovente un nucleo variabile, una considerevole polarizzazione nell'ottico e un'alta incidenza di moti superluminali.

Caratteristica importante di tutte le blazar è la tipica forma della loro distribuzione di energia spettrale (Spectral Energy Distribution o SED) su larga banda dal radio ai raggi gamma. Come si può vedere dalla figura 1.4

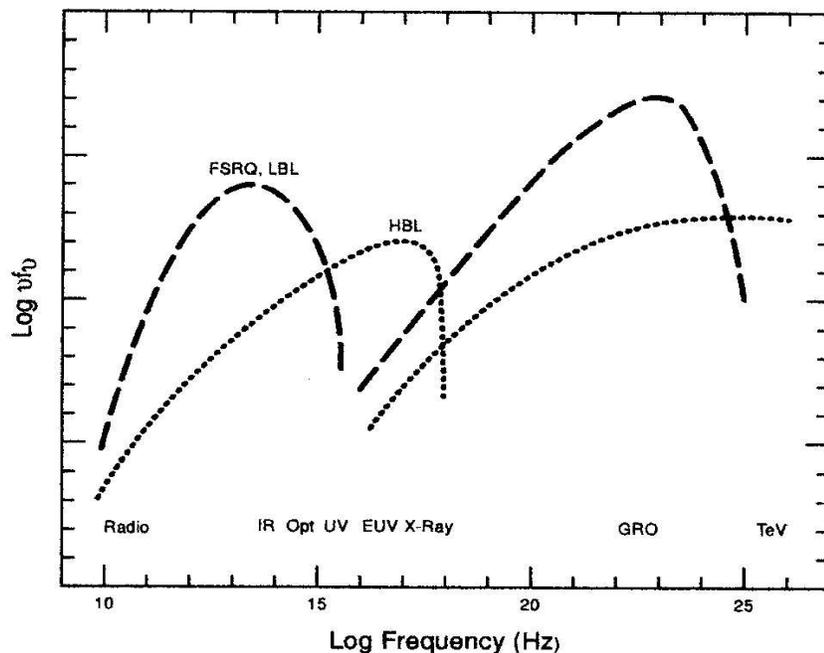


Figura 1.4: Caratteristica SED a doppio picco delle blazar

in una rappresentazione $\text{Log}\nu - \text{Log}\nu F_\nu$, la SED è caratterizzata da due picchi: il primo picco è prodotto dal processo di sincrotrone mentre il secondo è generato dal meccanismo di Compton Inverso fra gli elettroni relativistici del getto e fotoni di più bassa energia. L'origine di questi “fotoni seme“ non è ancora sicura. Il modello dell'External Compton (EC; Ghisellini & Madau 1996; Sikora, Begelman & Rees 1994; Dermer, Schlickseier & Mastichiadis 1992) suggerisce che siano di origine esterna al getto e provengano da materiale diffuso che lo circonda o da un disco di accrescimento, mentre il modello Synchrotron Self Compton (SSC; Maraschi, Ghisellini & Celotti 1992) ne individua l'origine all'interno del getto, più precisamente fotoni prodotti dal sincrotrone. Non è esclusa la possibilità di una origine dei fotoni “seme“ contemporaneamente interna ed esterna al getto (Ghisellini et al. 1998). I due picchi possono collocarsi in bande diverse dello spettro elettromagnetico determinando due differenti tipologie di blazar. Se il picco della componente sincrotrone si colloca nella regione infrarossa-ottica (IR-O) mentre quello dovuto al Compton Inverso nella banda MeV-GeV si parla di Red Blazar: appartengono a questa tipologia le FSRQ e i LBL (Low energy peaked BL Lac). Se invece il primo picco si colloca a frequenze più alte e cioè nella banda ultravioletta-X (UV-X) mentre il secondo in quella GeV-TeV si parla di Blue Blazar, comprendenti gli HBL (High Energy Peaked BL Lac). Nella figura 1.4 si può notare come gli oggetti che piccano a frequenze minori (FSRQ, LBL) sono tendenzialmente più luminosi rispetto agli HBL, i cui picchi sono spostati a frequenze maggiori. C'è da precisare tuttavia che, con l'avvento di survey spettrali multicolore e più profonde (Laurent-Muehleisen et al. 1998; Perlman et al. 1998), ha preso piede sempre più l'idea che la distribuzione del picco sincrotrone sia continua e non bimodale, come quella appena descritta. In tal caso ci sarebbe una sorta di continuità da una classe all'altra, con tutte le fasi intermedie presenti. FSRQs, LBLs e HBLs tenderebbero a disporsi su una sequenza spettrale continua, caratterizzati da una luminosità (delle righe di emissione e bolometrica) via via decrescente, e dalla frequenza del picco sincrotrone invece via via crescente (Fossati et al. 1998; Sambruna et al. 1996). Ciò ha portato ad ipotizzare pertanto l'esistenza di blazar, non ancora scoperti, il cui picco sincrotrone potrebbe raggiungere la banda γ (UHBL). Le 93 blazars del catalogo 3EG sono state classificate in due tipologie (Hartman et al. 1999):

1. AGN con identificazione ad alta affidabilità (high confidence) indicate nel catalogo con la lettera A: sono in tutto 66 per la maggior parte (46)

Quasar a spettro radio piatto (FSRQ) mentre i restanti sono BL Lac;

2. AGN con identificazione a bassa affidabilità (lower confidence) indicate con la lettera a: sono in tutto 27. La loro identificazione è considerata meno sicura perché la loro controparte ottica (in genere una radiosorgente) si trova poco al di fuori del contorno di confidenza al 95% oppure presenta un flusso radio più basso se paragonato a quello delle sorgenti identificate con sicurezza. Tali flussi radio riportati in letteratura si riferiscono tuttavia ad osservazioni effettuate anche decine di anni fa; poichè le blazar sono altamente variabili nella banda radio non è detto quindi che siano necessariamente simultanei e ben correlati con quelli effettivi della sorgente durante il periodo di osservazione di EGRET;

Una cosa abbastanza sorprendente è che EGRET non ha rivelato alcune delle blazar più note. Una plausibile spiegazione risiede nella loro spiccata variabilità. Per molte delle sorgenti EGRET la rivelazione è stata possibile solo quando esse avevano un flare o un massimo di emissione gamma. Può essere successo quindi che gli oggetti che non sono stati rivelati non fossero particolarmente brillanti durante il periodo in cui EGRET li osservava, periodo che tipicamente è stato di due o tre settimane.

Caratteristiche comuni alle sorgenti rivelate da EGRET ed identificate come AGN della classe blazar sono:

- Variabilità nella banda gamma su tempi scala da giorni a mesi. I tempi scala minori implicano, assumendo un'emissione isotropa, dimensioni della regione emittente dell'ordine del raggio di Schwarzschild di un buco nero di $10^{10} M_{\odot}$.
- In molte sorgenti il flusso gamma è dominante rispetto a quello in bande di energia inferiori.
- La luminosità gamma è compresa nell'intervallo $10^{45} \div 10^{49} \text{ erg s}^{-1}$, con valori che tipicamente cadono tra 3×10^{47} e $3 \times 10^{48} \text{ erg s}^{-1}$.
- Tutte le sorgenti presentano emissione X non termica moderatamente brillante ($F_x \simeq 10^{-12} \div 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ nella banda $2 \div 10 \text{ KeV}$) con uno spettro a legge di potenza. Sono tutte sorgenti radio compatte brillanti

con valori del flusso a 5 GHz² tipicamente compresi tra 1÷10 Jy (il valore più basso registrato per il flusso radio a 5 GHz di una Blazar EGRET è $\simeq 0.3$ Jy). La maggior parte delle sorgenti hanno uno spettro radio piatto, cioè nel caso di un andamento a legge di potenza per il flusso del tipo $S(\nu) \propto \nu^{-\alpha_r}$ si hanno valori per l'indice spettrale energetico³ pari a $\alpha_r < 0.5$.

- I redshift z misurati per le sorgenti sono distribuiti su un ampio intervallo di valori, da $z=0.03$ a $z=2.28$.
- Gli spettri delle sorgenti, nell'intervallo di energia ricoperto da EGRET (30 MeV÷30 GeV), sono generalmente ben rappresentati da leggi di potenza del tipo $F(E)=K(E/E_0)^{\Gamma_\gamma}$. Il valore medio degli indici spettrali in fotoni di tutte le blazar rilevate da EGRET è 2.15 ± 0.04 (Chiang & Mukerjee 1998).

La figura 1.5 mostra la distribuzione nel cielo in coordinate galattiche delle 66 blazar ad alta affidabilità rivelate da EGRET. Si può benissimo notare come la maggior parte di tali sorgenti siano localizzate ad alte latitudini, a partire da circa $|b| > 10^\circ$.

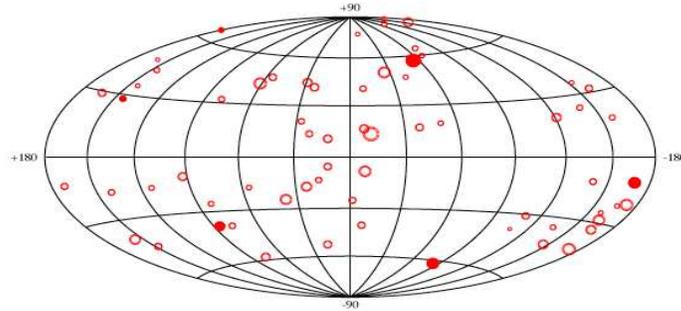


Figura 1.5: Distribuzione nel cielo in coordinate galattiche delle blazar ad alta affidabilità listate nel Third EGRET Catalog

²La frequenza radio di osservazione a 5 GHz è considerata la più importante per lo studio degli AGN, in quanto permette di osservare e studiare la zona compatta centrale, ossia il core o nucleo.

³L'indice spettrale energetico α e l'indice spettrale fotonico Γ sono legati tra di loro dalla relazione $\alpha = \Gamma - 1$

1.4.2 La radiogalassia Centaurus A

Le due uniche sorgenti extragalattiche diverse dalle blazar che EGRET ha rilevato sono la Grande Nube di Magellano (LMC) e la radiogalassia Centaurus A (Cen A), quest'ultima individuata come controparte della sorgente 3EG J1324-4314.

Centaurus A (NGC 5128) è la più vicina radiogalassia conosciuta ($z=0.0018$, ~ 3.5 Mpc), è classificata come radiosorgente del tipo FR I (Fanaroff-Riley del tipo I, Fanaroff & Ryley 1974) dato che possiede una morfologia radio con un nucleo compatto e due lobi estesi ed è caratterizzata da una luminosità piuttosto bassa ($\sim 10^{40}$ erg s $^{-1}$). Osservata in banda X mostra la presenza di un getto ben collimato nella direzione di uno dei due giganti lobi radio. Una particolarità importante di Cen A è che l'angolo compreso tra la linea di vista dell'osservatore e la direzione dei getti è piuttosto grande ($\sim 70^\circ$, Bailey et al. 1986), contrariamente alle blazar (BL Lac e FSRQ) per le quali invece l'angolo è molto piccolo. Tuttavia dato che molti BL Lac mostrano proprietà generali simili a quelle delle radiogalassie del tipo FR I (Urry & Padovani 1995), si ritiene che in realtà le FR I possano essere BL Lac i cui getti sono "male allineati" con la linea di vista dell'osservatore, cioè non formano con essa angoli piccoli ma al contrario piuttosto grandi. In quanto sorgente 3EG J1324-4314, Cen A presenta una luminosità gamma di 3×10^{43} erg s $^{-1}$, più bassa di diversi ordini di grandezza rispetto a quella delle blazar-EGRET (tipicamente compresa tra 10^{45} e 10^{49} erg s $^{-1}$). Anche il suo indice spettrale fotonico, pari a $\Gamma_\gamma=2.58\pm 0.26$, è diverso da quello medio per le blazar-EGRET, $\Gamma_\gamma=2.15\pm 0.04$ (Chiang & Mukerjee 1998).

Pur essendo unica nel suo genere, fino ad ora, l'individuazione di Cen A come sorgente gamma è vista con estremo interesse in quanto potrebbe aprire la strada all'allettante possibilità che altre sorgenti EGRET non identificate possano essere radiogalassie. In effetti recenti studi hanno individuato nella radiogalassia NGC 6251 (che condivide con Cen A molte proprietà) il migliore e più probabile candidato per la sorgente gamma non identificata 3EG J1621+8203 (Mukherjee et al. 2002). Il fatto che ulteriori studi, utilizzando dati più precisi di future missioni, possano riuscire a confermare e dimostrare quest'ultima associazione è di fondamentale importanza. Infatti, una volta appurato che le radiogalassie possano essere considerate emettitori gamma (sia pure deboli), dato che la densità spaziale delle radiogalassie del tipo FR I (come Cen A e NGC 6251) è molto più grande di quella delle blazar, ci

potrebbero essere molte altre sorgenti EGRET non identificate associabili con esse.

1.4.3 Pulsar

Le pulsar sono le uniche sorgenti galattiche riconosciute essere gamma emittenti con una certa sicurezza. Si tratta di oggetti rotanti estremamente compatti (raggio dell'ordine della decina di Km) con valori della densità e del campo magnetico che possono arrivare rispettivamente fino a 10^{15} g cm⁻³ e 10^{12} gauss.

Attraverso due fasci collimati diretti lungo l'asse magnetico e ruotanti in modo solidale alla stella, emettono una caratteristica radiazione pulsata radio con periodo uguale a quello di rotazione della stella, da cui il nome pulsar (acronimo di Pulsating Radio Source). Poichè l'asse di rotazione della stella e quello del campo magnetico non sono allineati la pulsar funziona come un faro; inoltre dato che la radiazione è emessa a spese dell'energia di rotazione, con il passare del tempo la pulsar rallenta aumentando il suo periodo. La stragrande maggioranza delle pulsar oggi note vengono scoperte tramite osservazioni radio, non sono molte quelle viste in tutte le altre bande elettromagnetiche (gamma, X, ottico). Dopo le prime osservazioni, da parte dei satelliti SAS-2 e COS-B, di raggi gamma di alta energia dalle pulsar Crab e Vela, calcoli basati su modelli di emissione gamma nelle pulsar isolate (che emettono radiazione a spese della loro energia di rotazione) indicarono che emissione di alta energia poteva essere osservata da altri oggetti. Infatti il satellite CGRO ha portato a 7 il numero delle pulsar gamma conosciute; 6 di queste sono state rivelate dallo strumento EGRET ($E > 100$ MeV) mentre la settima è stata rivelata a circa 1 MeV dagli altre tre strumenti a bordo del CGRO. Tutte presentano emissione gamma pulsata (con periodo uguale a quello osservato nel radio anche se con un offset di fase tra 0.2 e 0.5) caratterizzata da due picchi indicativi del fatto che l'emissione probabilmente avviene lungo due coni. La ricerca di segnale gamma pulsato da parte di stelle di neutroni si avvale di dati radio simultanei (nel singolare caso di Geminga, essendo radio-quiet, di dati X simultanei) indispensabili per poter effettuare un accumulo dei fotoni γ in fase con il periodo di pulsazione radio. La scoperta di periodicità nel loro tempo di arrivo è l'unica evidenza certa che permette di associarli ad una pulsar, anche se in genere a causa della bassa statistica a disposizione non sempre tale scoperta è possibile e facile da fare. Questo spiega perchè il numero di pulsar gamma

fino ad oggi identificate è basso.

Si pensa che l'emissione γ delle pulsar sia generata da particelle cariche accelerate ad energie relativistiche dai campi elettrici prodotti dalla rapida rotazione della stella di neutroni magnetizzata. Sono stati elaborati diversi modelli per spiegare come questo possa avvenire: i più celebri sono i cosiddetti "polar cap model" (Harding & Daugherty 1993; Dermer & Sturmer 1994) e "outer gap model" (Cheng, Ho & Ruderman 1986) che differiscono sostanzialmente per la regione in cui si genererebbero i fotoni gamma emessi. Nel Polar Cap model tale zona è vicina alla regione magnetica polare della stella e i fotoni vengono prodotti attraverso emissione di sincrotrone e radiazione di curvatura. Nell'Outer Gap model la produzione avviene per sincrotrone e Compton inverso in una regione esterna della magnetosfera della pulsar, lontana dai poli magnetici, che va dalla superficie a carica nulla fino al cilindro di luce, lungo il contorno tra la linea aperta e chiusa del campo magnetico (vedi figura 1.6).

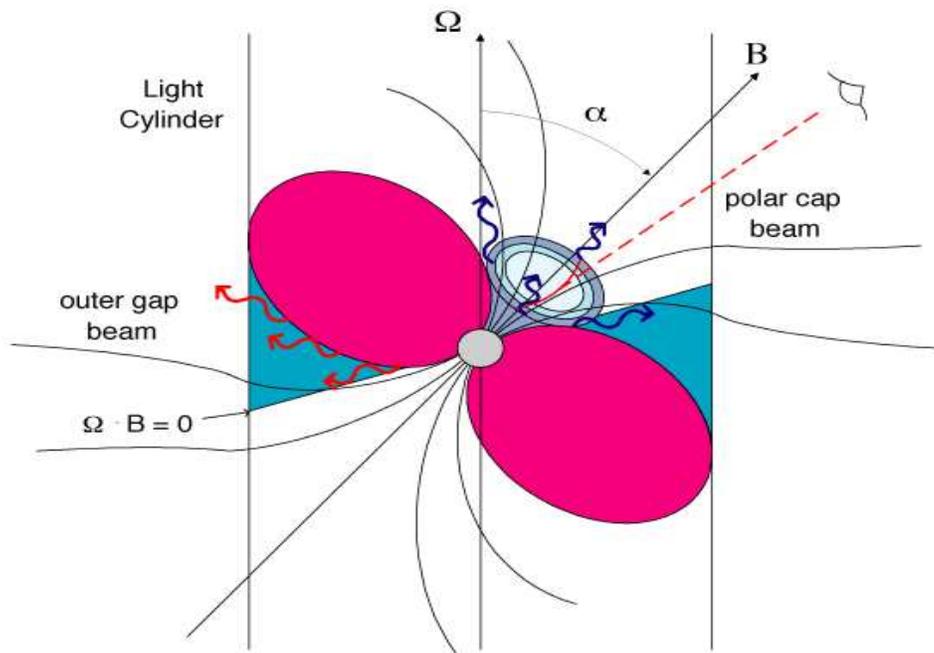


Figura 1.6: modelli di emissione gamma nelle pulsar, Outer Gap model e Polar Cap model

La luminosità gamma di una pulsar è espressa dalla relazione (Torres et al. 2001)

$$L_\gamma = \eta_\gamma \dot{E} = 4\pi f_\gamma \zeta F_\gamma D^2$$

dove η_γ è l'efficienza di trasformazione dell'energia rotazionale in radiazione gamma, \dot{E} è il rate di perdita di energia rotazionale, ζ è un fattore ≥ 1 il quale tiene conto del fatto che la linea di vista può tagliare il cono di emissione a qualsiasi distanza dal suo asse, F_γ è il flusso gamma osservato e D è la distanza. Assumendo il modello classico di pulsar emittente in due coni il cui asse è l'asse magnetico, l'angolo solido intercettato dal fascio di emissione è pari quindi a $4\pi f_\gamma$ ed è compreso tra la dimensione angolare della cappa polare della stella di neutroni e 4π . Questo angolo è uno dei parametri fondamentali sia per la descrizione dei modelli di emissione che per lo studio statistico di possibili associazioni di sorgenti gamma con stelle di neutroni. In generale però esso non può essere determinato e viene assunto uguale a 1 sr ($f_\gamma = 1/\pi$). Un'ulteriore approssimazione è quella di porre $\zeta = 1$ in modo che $L_\gamma = F_\gamma D^2$. Di solito il rapporto \dot{E}/D^2 viene considerato come un indicatore dell'osservabilità gamma di una pulsar, cioè tanto più alto è tale rapporto tanto più la pulsar ha le potenzialità per emettere nel gamma. Infatti se si considera una lista delle pulsar radio ordinate secondo il loro valore di \dot{E}/D^2 si può vedere che i primi posti sono occupati proprio da 5 delle pulsar gamma conosciute, solo la pulsar PSR B1055-52 è un po' più indietro nella lista (D'Amico et al. 2001)

La tabella 1.1 elenca le sei pulsar gamma rivelate da EGRET ($E > 100$ MeV) con i loro parametri osservativi: periodo P , flusso gamma osservato F_γ , indice spettrale fotonico Γ_γ , derivata temporale del periodo o rate di rallentamento \dot{P} .

La tabella 1.2 invece lista i parametri dedotti da quelli osservativi: rate di perdita di energia rotazionale \dot{E} , campo magnetico B , distanza D , età, efficienza conversione energia rotazionale in luminosità gamma η_γ , luminosità gamma L_γ . La settima pulsar, PSR B1509-58, è stata rivelata a circa 1 MeV dagli altri tre strumenti a bordo del CGRO e quindi non rientra in queste tabelle.

Due peculiarità importanti delle sorgenti EGRET identificate con pulsar sono:

- emissione pulsata ma stazionaria, cioè le pulsar gamma presentano emissione non variabile.
- spettro descrivibile in termini di legge di potenza del tipo

Tabella 1.1: parametri osservativi delle pulsar gamma EGRET

PULSAR	P (ms)	F_γ (erg cm ⁻² s ⁻¹)	Γ_γ	\dot{P} (10 ⁻¹⁵ s s ⁻¹)
Crab	33.4	1 10 ⁻⁹	2.15	421
Geminga	237.1	3.7 10 ⁻⁹	1.5	11
Vela	89.3	7.1 10 ⁻⁹	1.7	125
PSR B1055-52	197.1	4.2 10 ⁻¹⁰	1.18	5.83
PSR B1706-44	102.4	8.3 10 ⁻¹⁰	1.72	93
PSR B1951+32	39.5	2.4 10 ⁻¹⁰	1.74	5.85

Tabella 1.2: parametri delle pulsar gamma EGRET ricavati dalle osservazioni

PULSAR	B (10 ¹² G)	\dot{E} (erg s ⁻¹)	L_γ (erg s ⁻¹)	η	D (Kpc)	Età (anni)
Crab	3.7	4.5 × 10 ³⁸	3.9 × 10 ³⁴	0.009%	2	1.3 × 10 ³
Geminga	1.6	3.3 × 10 ³⁴	2.2 × 10 ³³	6.8%	0.25	3.4 × 10 ⁵
Vela	3.3	6.9 × 10 ³⁶	1.7 × 10 ³⁴	0.24%	0.5	1.1 × 10 ⁴
PSR B1055-52	1.1	3.0 × 10 ³⁴	9.3 × 10 ³³	31%	1.5	5.3 × 10 ⁵
PSR B1706-44	3.1	3.4 × 10 ³⁶	2.6 × 10 ³⁴	0.77%	1.8	1.7 × 10 ⁴
PSR B1951+32	0.48	3.7 × 10 ³⁶	1.4 × 10 ³⁴	0.4%	2.5	1.1 × 10 ⁵

$F(E)=K(E/E_\circ)^{\Gamma_\gamma}$ come per le blazar EGRET, ma contrariamente a quest'ultime il loro spettro è più "duro": infatti il loro indice spettrale fotonico assume valori inferiori a 2 con la sola eccezione della pulsar Crab che è la più giovane del campione ($\Gamma_\gamma=2.15$).

Altra caratteristica importante è che per tre pulsar lo spettro mostra chiaramente una caduta o cutoff spettrale ad energie di pochi GeV; questo cutoff è peraltro previsto dai due modelli di emissione gamma anche se ad energie diverse. Per altre due sorgenti ci sono indicazioni di un tale comportamento tra 4 e 10 GeV. Solo la pulsar Crab non mostra tale caratteristica spettrale fino al TeV. Un simile taglio nello spettro si presume possa essere dovuto ad una attenuazione del campo magnetico della stella di neutroni; questa ipotesi è sostenuta dal fatto che la pulsar con il campo magnetico più forte (ovvero la Crab) non presenta il cutoff mentre Geminga, che possiede un campo magnetico più debole, presenta un taglio spettrale molto ben marcato.

Tra le sei pulsar gamma fino ad oggi conosciute una citazione particolare merita Geminga in quanto, contrariamente alle altre cinque, fu scoperta prima come forte sorgente gamma dai satelliti SAS-2 e COS-B e solo successivamente

identificata in X ed ottico. Dal punto di vista radio è considerata una pulsar non emittente (radioquiet) poichè il suo flusso è in assoluto il più piccolo tra tutte le pulsar oggi conosciute (circa 1400 in numero). Il caso di Geminga è di solito portato come esempio tipico dell'ipotesi in base alla quale una frazione rilevante di pulsar non siano rivelabili dai radio telescopi o per il loro basso flusso intrinseco o perchè il fascio di emissione non intercetta la linea di vista dell'osservatore.

In conclusione, per quanto le poche pulsar gamma oggi conosciute presentino alcune caratteristiche comuni, le diversità osservate suggeriscono che possano esserci tipi diversi di pulsar emittenti nel gamma.

Capitolo 2

Le sorgenti gamma non identificate

2.1 Suddivisione delle sorgenti gamma non identificate

Delle 271 sorgenti listate nel catalogo 3EG, che rappresenta a tutt'oggi lo stato dell'arte dell'astronomia gamma in attesa dei risultati di nuove missioni, circa i due terzi (169 sorgenti) non sono identificate. Si ritiene che una parte di queste in futuro possano essere ricondotte all'interno delle classi già note di sorgenti (blazar e pulsar) mentre le restanti potrebbero essere associate ad altri e nuovi tipi di emettitori gamma. Lo "status" di sorgenti non identificate è dovuto essenzialmente a due motivi:

1. La "scarsa" risoluzione angolare del telescopio gamma EGRET. Infatti i contorni di confidenza al 95% delle sorgenti tipicamente hanno un raggio compreso tra 0.5° e 1° . In un'area così estesa (dell'ordine del diametro lunare ed oltre) le possibili controparti ad altre lunghezze d'onda sono numerose, specie alle basse latitudini galattiche.
2. Il fondo diffuso di radiazione gamma, che soprattutto sul piano galattico introduce errori sistematici importanti.

Possiamo suddividere le sorgenti gamma "unidentified" a seconda della loro posizione rispetto al piano galattico: distingueremo quindi sorgenti a bassa latitudine o sul piano della galassia quelle con $|b| < 5^\circ$, sorgenti a latitudini intermedie quelle con $5^\circ < |b| < 30^\circ$ ed infine sorgenti ad alta latitudine quelle con $|b| > 30^\circ$. Per quanto tale suddivisione possa sembrare piuttosto arbitraria, in realtà può essere rappresentativa di differenti e distinte classi

di sorgenti. Infatti se si escludono dall'analisi quelle sorgenti del catalogo 3EG non identificate che mostrano una spiccata variabilità tipica degli AGN, allo scopo di selezionare un campione omogeneo di oggetti dal flusso costante e appartenenti alla nostra Galassia, si ottengono 120 sorgenti gamma che possono essere divise in due sottoinsiemi (Gehrels et al. 2000). Il primo è costituito dalle sorgenti più brillanti che si collocano quasi esattamente sul piano del disco a meno di 5° di latitudine; l'altro è costituito da sorgenti più deboli che presentano una distribuzione spaziale più dispersa essendo presenti fino a 20° - 25° di latitudine per poi calare di numero a maggiori distanze dal disco. L'idea che si tratti di popolazioni diverse anche per le proprietà intrinseche e non solo per le posizioni che occupano in cielo viene rafforzata dal confronto tra le distribuzioni dei flussi. Nella popolazione di media latitudine, le cui sorgenti hanno un flusso $F_\gamma < 2.4 \times 10^{-7}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E > 100$ MeV, si osservano luminosità ben differenziate e distribuite mentre le sorgenti sul disco, il cui flusso è $F_\gamma > 2.4 \times 10^{-7}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E > 100$ MeV, sembrano più omogenee in termini di intensità. A tal proposito può aiutare la figura 2.1, la quale evidenzia le due popolazioni distinte. I pallini scuri sono le sorgenti "meno luminose" di media latitudine, mentre le sorgenti "più luminose" che si addensano sul piano galattico sono rappresentate dai cerchietti vuoti.

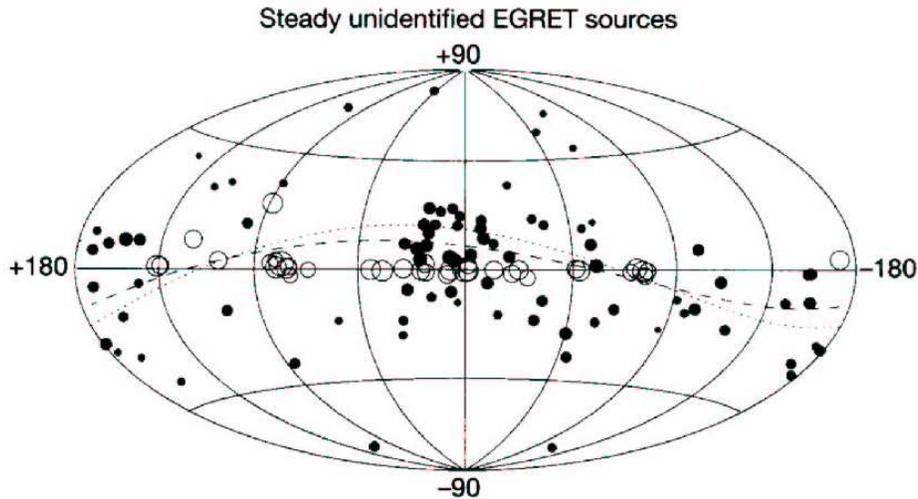


Figura 2.1: distribuzione nel cielo in coordinate galattiche delle 120 sorgenti EGRET unidentified non variabili. Risulta piuttosto evidente la distribuzione lungo il piano delle sorgenti più luminose (pallini vuoti), mentre quelle meno luminose (pallini pieni) sono distribuite essenzialmente a medie latitudini

Gehrels e colleghi (2000) hanno inoltre dimostrato che il valore medio dell'indice spettrale fotonico Γ_γ e la forma della funzione logN-logS (dove S è il flusso delle sorgenti e N il numero di sorgenti con flusso maggiore di S) sono chiaramente differenti per le due popolazioni.

Tutti gli indizi che abbiamo evidenziato suggeriscono quindi due diverse e distinte classi di oggetti gamma, ciò può essere molto utile nel delineare le caratteristiche delle loro potenziali controparti ed aiutare il difficile lavoro di identificazione. Analizzeremo ora le proprietà di ciascuno dei tre gruppi a latitudini differenti.

2.1.1 Sorgenti non identificate sul piano galattico ($|b| < 5^\circ$)

Si tratta di una popolazione di 56 sorgenti in tutto, caratterizzate da uno spettro piuttosto "duro" con valore medio dell'indice spettrale fotonico pari a $\Gamma_\gamma=2.18\pm 0.04$; la maggior parte delle 56 sorgenti (44 in numero) non mostra variabilità (Tompkins W. 1999). Se consideriamo queste 44 sorgenti e le confrontiamo con quelle non variabili a medie latitudini noteremo, come abbiamo già accennato nel paragrafo precedente, che oltre ad essere più luminose hanno anche una forma della distribuzione logN-logS più piatta ed un indice spettrale fotonico più duro. Le caratteristiche di non variabilità e spettro piuttosto "hard" che contraddistinguono tali sorgenti gamma sul piano galattico indicano la possibilità che appartengono ad una popolazione di pulsar. In effetti è una convinzione piuttosto diffusa quella in base alla quale la stragrande maggioranza delle sorgenti non identificate a $|b| < 5^\circ$ siano pulsar e quindi di origine galattica. Per quanto le stelle di neutroni siano considerate responsabili della quasi totalità di sorgenti gamma sul piano della Galassia, fino ad oggi ricerche radio atte ad individuare pulsar all'interno delle scatole di errore di molte sorgenti non hanno portato ai risultati sperati. Solo in pochi casi sono state trovate coincidenze posizionali con pulsar radio potenziali emettitrici gamma (Torres et al. 2001); non c'è tuttavia nessuna evidenza certa di periodicità nel tempo di arrivo dei fotoni gamma, cosa che permetterebbe una associazione certa con la pulsar. È pur vero però che tale "firma temporale" è piuttosto difficile identificarla con i dati EGRET a disposizione, affetti come sono da una limitata sensibilità soprattutto a basse latitudini; si spera così nei risultati di missioni spaziali future (AGILE e GLAST) che hanno migliore sensibilità e risoluzione temporale tali da poter aumentare il numero di pulsar gamma conosciute. Un aspetto da non

sottovalutare è anche quello di non considerare l'identificazione con pulsar radio l'unica soluzione possibile all'enigma delle sorgenti unidentified non variabili a bassa latitudine. A tal proposito il caso di Geminga offre una alternativa interessante in quanto caratterizzata da emissione gamma ed X e da una debole se non nulla emissione radio. Sebbene l'energetica di Geminga ($L_\gamma = 2.2 \times 10^{33}$ erg sec⁻¹) non è adeguata per giustificare le sorgenti EGRET "brillanti" a bassa latitudine, mentre lo è per quelle a medie latitudini, come vedremo in seguito, l'idea che pulsar radio-quiet (e quindi non scoperte nelle survey radio) possano essere le controparti di sorgenti non identificate a $|b| < 5^\circ$ è accattivante e da tenere in doverosa considerazione.

Per quel che riguarda invece le 12 sorgenti gamma variabili a $|b| < 5^\circ$, l'idea prevalente è che una parte di esse possa essere di origine extragalattica, verosimilmente blazar viste attraverso il piano della Galassia. Non è escluso che un certo contributo possano anche fornirlo oggetti galattici in grado di produrre emissione gamma variabile, come ad esempio microquasar (Bernadó et al. 2002).

Oltre alle pulsar e alle blazar, fino ad oggi le uniche sorgenti certe identificate come gamma emittenti, altri oggetti galattici sono stati presi in considerazione in quanto dal punto di vista teorico hanno le potenzialità per essere sorgenti di alta energia. A tal proposito sono stati effettuati numerosi studi di correlazione posizionale tra questi oggetti e sorgenti gamma non identificate a bassa latitudine. Il lavoro più recente in questo campo (Romero et al. 1999) lista:

- 26 sorgenti coincidenti con associazioni OB considerate traccianti di pulsar;
- 22 sorgenti coincidenti con resti di supernova (SNR); ci sono diversi processi che teoricamente possono essere rilevanti nella produzione di fotoni gamma da parte di SNR (decadimento di π° prodotti in collisioni adroniche, Compton inverso tra elettroni relativistici e fotoni di bassa energia, bremsstrahlung relativistica di e^\pm con materia circostante la SNR).
- 10 sorgenti coincidenti con stelle del tipo Of o Wolf Rayet (WR); si tratta di stelle estremamente massicce, caratterizzate da potenti venti, potenzialmente in grado di generare fotoni gamma tramite decadimento di π° , Compton inverso tra elettroni accelerati da onde di shocks e fotoni

Per tali oggetti galattici, al momento considerati solo come “esoteriche“ possibilità, non si esclude comunque la speranza in futuro di individuarne l'emissione gamma con l'uso di strumenti dotati di migliore sensibilità, risoluzione angolare e spettrale.

In virtù di quanto detto, proponiamo il seguente schema riassuntivo per le sorgenti non identificate a latitudini $|b| < 5^\circ$:

- Sono in tutto 56, per la massima parte non variabili (44). Le sorgenti non variabili dovrebbero essere di origine galattica, per la stragrande maggioranza pulsar. Le poche sorgenti variabili invece potrebbero essere blazar viste attraverso il piano della Galassia. È indicativo a tal proposito il recente lavoro di Halpern et al. (2001) i quali hanno identificato la sorgente a bassa latitudine 3EG J2016+3657 con una blazar. Non è esclusa tuttavia la possibilità che altri oggetti celesti di natura galattica, in alternativa alle blazar, possano essere responsabili di emissione gamma variabile. Ad esempio Paredes et al. (2000) hanno individuato una microquasar quale migliore candidato responsabile dell'emissione gamma di 3EG J1824-1514, localizzata sul piano della Galassia. Altri oggetti galattici considerati in letteratura, come ad esempio Buchi Neri isolati tipo Kerr-Newman (Punsly 1998a,b) o Buchi Neri che accrescono materia da un mezzo circostante (Dermer 1997), potrebbero ipoteticamente emettere radiazione gamma variabile. Al momento però si tratta di ipotesi “speculative“, attraenti ma non verificabili.

2.1.2 Sorgenti non identificate a latitudini $5^\circ < |b| < 30^\circ$

Si tratta di una popolazione di 68 sorgenti per buona parte non variabili (le variabili sono solo 7) con un valore medio dell'indice spettrale fotonico pari a $\Gamma_\gamma = 2.49 \pm 0.04$. Come già specificato nel paragrafo precedente, ci sono buone ragioni per ritenere che le sorgenti non variabili a $5^\circ < |b| < 30^\circ$ costituiscano una popolazione distinta e differente rispetto alle sorgenti non variabili a $|b| < 5^\circ$. A tal proposito Gehrels e colleghi (2000) riprendendo un suggerimento avanzato in precedenti lavori (Grenier et al. 1997, 2000) ipotizzano che possa trattarsi di oggetti relativamente vicini al Sole. Infatti confrontando le loro

posizioni con la proiezione sulla volta celeste della fascia di Gould hanno trovato un sostanziale accordo. Può aiutare a tal proposito la figura 2.1; la linea punteggiata mostra il centro della fascia di Gould mentre quella tratteggiata rappresenta il best fit della distribuzione in cielo delle sorgenti deboli non variabili. Le due linee come si può vedere sono chiaramente molto vicine e simili. Se davvero appartengono alla fascia di Gould, e dunque sono vicine, le sorgenti deboli risultano cento volte intrinsecamente meno luminose di quelle che popolano il disco della Galassia.

La fascia di Gould, scoperta dall'omonimo astronomo nel 1870, è un sistema appiattito di stelle relativamente vicine al Sole, a una distanza di circa $100 \div 400$ pc. Si tratta di una specie di disco del diametro di circa 2000 anni luce inclinato di $\sim 20^\circ$ sul piano galattico. In tale fascia sono prevalenti le stelle calde e giganti del tipo O e B, vi abbondano le regioni di formazione stellare, gli ammassi aperti e vasti complessi di nubi molecolari; in un ambiente di questo tipo potrebbero senz'altro trovare posto le deboli sorgenti EGRET di media latitudine. Si ipotizza che l'emissione gamma scaturisce da nubi di polveri e gas investite dai raggi cosmici, oppure dai super-venti dispersi dalle stelle massiccie, oppure ancora dall'interazione delle particelle cariche accelerate nei SNR con la materia circostante. Un'ipotesi interessante è quella di Grenier&Perrot (2001) i quali suggeriscono che le sorgenti gamma della fascia di Gould potrebbero essere giovani pulsar formatesi in esplosioni di supernova di stelle massiccie. Tuttavia le caratteristiche di spettro piuttosto "soft" e la luminosità media $\sim 6 \times 10^{30}$ erg s⁻¹ delle sorgenti gamma non identificate a latitudini intermedie non sono tipiche delle pulsar gamma rivelate fin'ora da EGRET: queste hanno luminosità di $10^{32} \div 10^{34}$ erg s⁻¹, si trovano a distanza di $0.5 \div 4$ Kpc e hanno indici spettrali pari a $1.5 \div 2.0$. Un'interessante soluzione a questa discordanza è stata suggerita da Harding&Zhang (2001) per i quali le sorgenti gamma della fascia di Gould potrebbero essere pulsar la cui emissione è vista a grandi angoli dal loro asse magnetico in modo tale da mancare il "beam" gamma più brillante e duro e rilevare solo l'emissione "off-beam". Tale emissione off-beam secondo il loro modello, ottenuto a partire da quello di Polar Cap, ha le caratteristiche giuste (indice spettrale e luminosità) per spiegare le sorgenti gamma della fascia di Gould. Inoltre poiché ci si aspetta che l'emissione radio sia originata all'interno di circa 10 raggi stellari dalla superficie della stella di neutroni, è probabile che il beam radio non sia intercettato dall'osservatore rendendo quindi queste sorgenti radio-quiet. Non deve sorprendere quindi la mancanza di controparti radio del tipo pulsar; d'altronde questo è anche

il comportamento di Geminga, una pulsar tra le più vicine al sole (infatti appartiene alla fascia di Gould, insieme alla pulsar Vela) che rilascia la quasi totalità della sua energia nei raggi gamma ed X e quasi nulla nel radio.

In virtù di quanto detto, proponiamo il seguente schema riassuntivo per le sorgenti non identificate a latitudini $5^\circ < |b| < 30^\circ$:

- Sono in tutto 68 di cui 61 non variabili e solo 7 variabili. Le sorgenti non variabili dovrebbero essere di origine galattica, associate a pulsar (anche radio-quiet) appartenenti alla fascia di Gould. Le poche sorgenti variabili potrebbero essere blazar non ancora rivelate in alternativa oggetti galattici del tipo microquasar. Un'altra interessante possibilità, sia per i casi variabili che non, potrebbe essere rappresentata dalla categoria di AGN delle radiogalassie. Citiamo a tal proposito il caso della sorgente gamma 3EG J1324-4314, a $b=19^\circ$, identificata con la radiogalassia Centaurus A.

2.1.3 Sorgenti non identificate ad alte latitudini ($|b| > 30^\circ$)

Si tratta di una popolazione meno numerosa rispetto alle due precedenti, costituita da 45 sorgenti gran parte delle quali hanno una distribuzione isotropa e 30 delle quali sono variabili. Il valore medio del loro indice spettrale fotonico, pari a $\Gamma_\gamma=2.49\pm 0.34$, è compatibile con quello delle 66 blazar ad alta affidabilità del catalogo 3EG ($\Gamma_\gamma=2.36\pm 0.36$), all'interno delle incertezze. mentre è in media più ripido rispetto a quello delle sorgenti a $|b| < 30^\circ$ che si ritiene appartengano alla nostra Galassia. Tutti questi indizi favoriscono l'ipotesi di una origine extragalattica per tali sorgenti e probabilmente si tratta di blazar non ancora identificate a frequenze più basse. C'è tuttavia una incongruenza che contribuisce ad ingarbugliare il quadro: infatti all'interno della scatola di errore di molte di queste sorgenti di alta latitudine non appare, nonostante il numero limitato di oggetti, nessun forte oggetto radio compatto come dovrebbe essere nell'ipotesi di un'origine blazar. In mancanza di dati più precisi ciò ha spinto a ipotizzare o ricercare nuovi e particolari tipi di emettitori gamma sia variabili che non variabili (ad esempio ammassi di galassie e microquasar) determinando una situazione simile a quella delle sorgenti non identificate a $|b| < 30^\circ$.

Recenti lavori (Torres et al. 2003) hanno evidenziato un contrasto tra i valori dei flussi delle blazar ad alta affidabilità nel catalogo 3EG (in tutto

66) che per la maggior parte sono superiori a 10^{-7} fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e i valori dei flussi delle sorgenti non identificate a $|b| > 30^\circ$ che invece per massima parte sono inferiori a 10^{-7} fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Tale differenza si riflette anche nel diagramma $\log N$ - $\log F$ il quale mostra come le blazar ad alta affidabilità hanno una distribuzione vicina a ciò che ci si aspetta per una popolazione isotropa ed uniforme ($F^{-1.5}$) mentre le sorgenti non identificate a $|b| > 30^\circ$ ne presentano una più ripida (vedi figura 2.2) È da tener conto tuttavia che

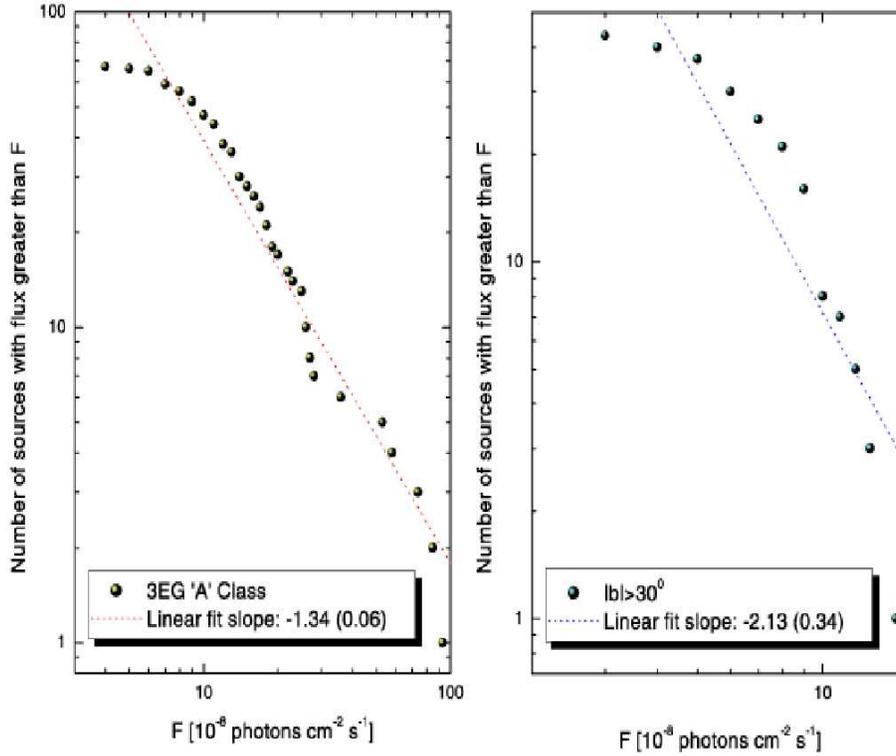


Figura 2.2: Confronto $\log N$ - $\log F$ tra gli AGN ad alta affidabilità del catalogo 3EG e le sorgenti EGRET non identificate a $|b| > 30^\circ$, il valore della pendenza del fit con relativo errore tra parentesi è indicato in ambo i casi

l'analisi dei risultati per il campione di sorgenti gamma non identificate deve essere considerata con cautela, in quanto il numero di sorgenti considerato è più piccolo e gli errori sono più grandi rispetto al campione di blazar ad alta affidabilità. La differenza notata nella $\log N$ - $\log F$ può implicare le due seguenti possibilità:

- abbiamo a che fare con due differenti tipologie o popolazioni di oggetti, AGN e una nuova classe di sorgenti di alone;

- i due campioni sono formati dallo stesso tipo di sorgente (AGN) con differenti valori del flusso gamma; tale differenza potrebbe essere dovuta al fatto che le sorgenti più deboli sono più lontane rispetto a quelle con la detezione più energetica.

È interessante aggiungere che se si considera la $\log N$ - $\log F$ per i due campioni combinati insieme il risultato sembra suggerire che le sorgenti gamma non identificate sono formate da molti AGN “deboli“ i quali allo stesso tempo presentano bassa (al punto tale da essere sotto la soglia delle corrispondenti survey) emissione radio.

Sulla base di questi indizi Torres e colleghi (Torres et al. 2003) hanno avanzato l'ipotesi che una parte delle sorgenti gamma non identificate a $|b| > 30^\circ$ (sia variabili che non variabili) può essere il risultato di un'amplificazione da microlente gravitazionale di deboli AGN di fondo ad alto redshift altrimenti non detettabili. Nel loro modello, gli autori sottolineano come il fenomeno di microlente sia in grado di amplificare l'emissione gamma e “deprimere“ quella radio determinando l'assenza di forti controparti a tale frequenza.

Come si può ben intuire, quindi, anche per le sorgenti gamma non identificate ad alte latitudini vale il discorso fatto per quelle a basse ed intermedie e cioè che il quadro generale è piuttosto complesso, con la possibilità che al di là delle sicure identificazioni con blazar ci siano più tipologie di oggetti responsabili di emissione gamma.

In virtù di quanto detto, proponiamo il seguente schema riassuntivo per le sorgenti non identificate a latitudini $|b| > 30^\circ$:

- Sono in tutto 45, 30 variabili mentre solo 15 non lo sono. Data la loro distribuzione isotropa e l'elevata latitudine potrebbero essere di natura extragalattica, verosimilmente blazar nel caso di sorgenti variabili. Anche in questo caso, come per le sorgenti a $5^\circ < |b| < 30^\circ$, un possibile contributo (sia per le EGRET variabili che non) potrebbe essere fornito dalle radiogalassie.

Capitolo 3

L'importanza della banda X per l'identificazione e il satellite

BeppoSAX

3.1 L'approccio multibanda per l'identificazione

Come abbiamo potuto sottolineare nel capitolo precedente, l'identificazione delle sorgenti UES è una sfida difficile ed impegnativa. I motivi di tale difficoltà sono molteplici. In primis la grande scatola di errore delle sorgenti preclude ogni loro possibile identificazione basata sulla correlazione posizionale con altri oggetti. L'assenza di righe nello spettro gamma, a causa di una non adeguata risoluzione spettrale, elimina ogni possibilità di misurazione diretta del redshift o della composizione chimica della sorgente. In molti casi poi la statistica dei fotoni a disposizione non è adeguata per permettere conclusive ricerche di periodicità dell'emissione e anche la variabilità delle sorgenti è difficile da determinare a meno che non si manifestino evidenti comportamenti di "flaring". Tenuto conto di tutte queste limitazioni, il migliore ed unico approccio sulla base dei dati oggi a disposizione per tentare l'identificazione è quello multibanda, ossia lo studio a più frequenze della scatola di errore gamma.

È importante evidenziare che l'energia richiesta per la produzione di fotoni gamma implica sorgenti molto potenti, ciò permette di escludere quasi certamente oggetti come stelle ordinarie e galassie normali. Lo studio multifrequenza della scatola di errore ci consente di ottenere diverse informazioni sugli oggetti che vi sono presenti; tali informazioni possono poi essere confrontate con quelle relative alla sorgente gamma (spettro, flusso, variabilità). Tutti gli indizi raccolti sono poi paragonati alle proprietà caratterizzanti le due uniche tipologie di sorgenti gamma fino ad oggi note

e cioè blazar (le cui caratteristiche sono variabilità, SED con due picchi, forte emissione radio con spettro piatto) e pulsar (non variabilità, periodicità nell'emissione, alto rapporto F_γ/F_{radio} e spesso anche F_γ/F_X , singolo e chiaro picco nella SED nella banda X duri-gamma molli). Analogie più o meno stringenti riscontrate nel confronto possono permettere una scrematura degli oggetti presenti nella scatola di errore, fino all'individuazione del "miglior candidato" responsabile dell'emissione. Viceversa i casi in cui non si riscontra nessuna similitudine sono quelli che meglio si prestano come possibili identificazioni con nuove classi o tipologie di sorgenti gamma.

La banda X riveste un'importanza fondamentale nell'approccio multifrequenza per lo studio delle UES in quanto tutte le sorgenti EGRET già identificate sono anche sorgenti X. Ad esempio, l'emissione X è una caratteristica comune a tutti gli AGN della classe blazar, i quali sono anche variabili nella banda X. Anche le pulsar emettono nella banda X, l'emissione è non termica e non variabile con la componente magnetosferica fortemente pulsata. Potrebbero esserci anche componenti addizionali di emissione X termica provenienti dalla superficie della pulsar o da un resto di supernova circostante. Analogamente è ragionevole ritenere che anche altre eventuali tipologie di oggetti responsabili di emissione gamma possano essere caratterizzate da emissione X.

Questo lavoro di tesi nasce proprio dall'idea di sfruttare l'emissione X per studiare le sorgenti EGRET non identificate, con lo scopo di contribuire all'identificazione delle loro controparti a frequenze minori. Fino ad ora, sono pochi gli studi che hanno adottato un approccio investigativo di questo tipo. Ad esempio, Roberts et al. (2001) hanno effettuato studi X delle scatole di errore, coperte parzialmente o totalmente, di un campione di sorgenti EGRET brillanti (con fotoni a $E > 1$ GeV) non identificate. Hanno sfruttato a tal proposito la buona sensibilità fino a 10 keV e il grande campo di vista (44 arcmin) dello strumento GIS a bordo del satellite giapponese ASCA. Precedentemente, Punsly (1999) ha utilizzato il catalogo RGB (ROSAT All-Sky Survey-Green Bank), contenente sorgenti radio con forte emissione X rivelata da ROSAT. Utilizzando una strategia investigativa analoga, la nostra idea è stata quella di usufruire dei dati di archivio del satellite per l'astronomia X BeppoSAX con lo scopo di studiare le scatole di errore delle sorgenti EGRET non identificate. Come vedremo nei paragrafi seguenti, l'ampia copertura spettrale di BeppoSAX (0.1-200 keV) può costituire la chiave vincente per l'individuazione del "miglior candidato" nella scatola di errore gamma. Questo perché può garantire la detezione di emissione non solo alle basse energie (2-

10 keV) ma anche alle alte (fino a 200 keV), con quest'ultime che possono costituire la coda a bassa energia dell'emissione gamma delle sorgenti EGRET.

3.2 La missione BeppoSAX

Lo studio delle caratteristiche spettrali e temporali delle sorgenti celesti su un ampio intervallo di energie è di primaria importanza per la comprensione dei meccanismi di emissione che determinano le proprietà delle sorgenti. Ciò ha giustificato negli ultimi anni lo sforzo organizzativo atto alla osservazione simultanea degli oggetti celesti su più bande di energia e con più satelliti. Da questo punto di vista un contributo "rivoluzionario" è stato fornito dal satellite Italo-Olandese per l'astronomia X, BeppoSAX. Grazie alla sua ampia copertura spettrale (0.1-200 keV) ed alle prestazioni dei suoi strumenti, BeppoSAX ha consentito per la prima volta di osservare contemporaneamente tutte quelle caratteristiche X delle sorgenti che in passato sono state osservate da missioni diverse.

Il satellite SAX (Satellite per Astronomia X) ribattezzato *BeppoSAX* in onore dell'astrofisico Giuseppe Occhialini, è stato un progetto dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI), con la partecipazione dell'Agenzia Olandese per i Programmi Aerospaziali (NIVR). Il satellite è stato lanciato il 30 aprile 1996 dalla base di Cape Canaveral da un razzo vettore Atlas G-Centaur, ed ha smesso di essere operativo nell'Aprile 2002, dopo 6 anni di attività. È rientrato in atmosfera il 29 Aprile 2003. L'orbita del satellite era ellittica, veniva percorsa in 97 minuti, posta a 600 km di altezza ed inclinata di 3.9° rispetto all'equatore. Questa scelta ha presentato i seguenti vantaggi:

- bassa modulazione della componente del fondo dovuta alle particelle cariche intrappolate dal campo magnetico terrestre;
- bassa modulazione della *cut-off rigidity*, misura della capacità del campo magnetico di schermare i raggi cosmici, con conseguente riduzione della variazione della componente del fondo prodotta dalle particelle cariche di origine cosmica (raggi cosmici, vento solare);
- riduzione del tempo di attraversamento della SAGA (*South Atlantic Geomagnetic Anomaly*), che si verifica ad una latitudine variabile durante il giorno da +4° a -4° a causa della rotazione terrestre. Durante l'attraversamento della SAGA il satellite veniva investito da uno sciame di particelle cariche in grado di saturare la risposta degli strumenti

che, quindi, durante questo passaggio, venivano spenti onde evitare loro possibili danneggiamenti.

L'efficienza di osservazione, definita come la frazione di tempo in cui un oggetto celeste è osservabile dagli strumenti lungo l'intera orbita, dipende dalla posizione della sorgente, e quindi dalla possibilità che la stessa venga eclissata dalla Terra (che ha un diametro di $\sim 130^\circ$ a 600 Km). Inoltre dipende dal tempo impiegato nell'attraversamento della SAGA e dall'angolazione rispetto al Sole. Grazie all'orbita, l'efficienza di osservazione di *BeppoSAX* risultava molto buona.

L'intervallo energetico previsto per l'osservazione delle sorgenti é molto ampio: 0.1-700 keV. La missione ha dato un grosso contributo allo studio di sorgenti galattiche (sistemi binari, oggetti compatti, resti di supernova) ed extragalattiche (AGN, ammassi di galassie, *Gamma Ray Burst* e fondo cosmico).

Il controllo della missione a terra era gestito dal GSS (*Ground Support System*) composto dai seguenti centri:

- GS (*Ground Station*), situata a Malindi in Kenia. Il periodo di contatto del satellite con Malindi era di circa 11 minuti per orbita, durante i quali venivano trasmessi i dati (fino a 450 kbits) immagazzinati nella memoria di bordo del satellite in ogni periodo orbitale. Successivamente i dati da Malindi venivano trasferiti all' OCC, al SOC e al SDC (descritti di seguito), situati a Roma presso la Nuova Telespazio;
- OCC (*Operational Control Center*) centro di controllo operativo del satellite;
- SOC (*Scientific Operation Center*) centro di controllo del funzionamento del satellite e della relativa strumentazione. Al SOC venivano raccolti i dati ricevuti dalla GS, orbita per orbita, e veniva effettuata un'analisi preliminare in tempo reale (“*quick – look*”);
- SDC (*Scientific Data Center*) centro che gestiva le proposte di osservazione e l'archiviazione dei FOT (*Final Observing Tape*) in cui sono contenuti i dati pronti per l'analisi scientifica. Questo centro é tutt'ora attivo quale archivio di tutti i dati raccolti durante la missione ed è stato utilizzato per raccogliere i dati adoperati in questa tesi.

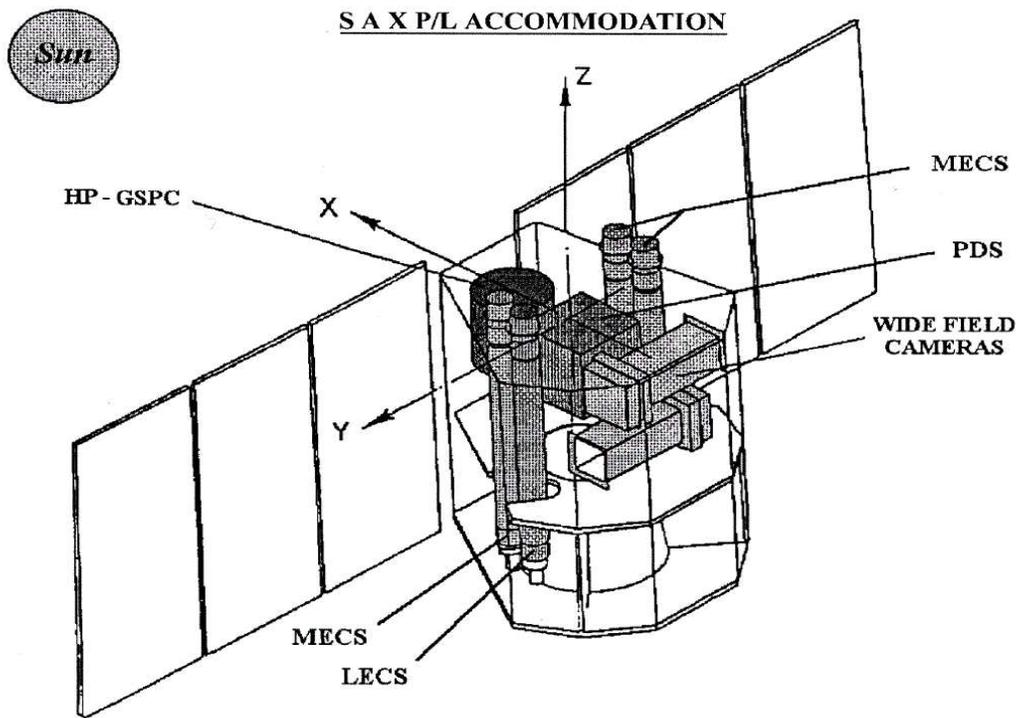


Figura 3.1: Il satellite *BeppoSAX*

3.3 La strumentazione scientifica

Gli strumenti installati su *BeppoSAX* (Boella et al. 1997a), fig. 3.1, si dividevano in due gruppi principali:

- I *Narrow Field Instruments* (NFI): co-allineati lungo l'asse Z del satellite, puntavano nella stessa zona di cielo con campi di vista differenti (Tab. 3.1), e comprendevano:
 - Il LECS (*Low Energy Concentrator Spectrometer*) (Parmar et al., 1997) sensibile nell'intervallo energetico 0.1-10 keV;
 - Il MECS (*Medium Energy Concentrator Spectrometer*) (Boella et al., 1997b), costituito da tre unità (MECS1, MECS2, MECS3), operativo nella banda 1.8-10 keV;
 - L' HPGSPC (*High Pressure Gass Scintillation Proportional Counter*) (Manzo et al., 1997) che ricopriva l'intervallo 4-120 keV;
 - Il PDS (*Phoswich Detector Sistem*) (Frontera et al., 1997) che operava nella banda 15-300 keV.
- Le WFC (*Wide Field Cameras*) (Jager et al., 1997): due contatori

Tab 3.1: Caratteristiche principali degli strumenti di *BeppoSAX*.

Strumento	Banda di energia (keV)	Campo di vista (gradi FWHM)	Risoluzione angolare (arcmin)	Area efficace (cm ²)	Risoluzione energetica (% FWHM)
LECS	0.1-10	0.5	3.5@0.25 keV	22@0.25 keV	$8 \times (E/6)^{-0.5}$
MECS	1.3-10	0.5	1.2@6 keV	150@6 keV	$8 \times (E/6)^{-0.5}$
HPGSPC	4-120	1.1	collimato	240@30 keV	$4 \times (E/60)^{-0.5}$
PDS	15-300	1.3	collimato	600@80 keV	$15 \times (E/60)^{-0.5}$
WFC	2-30	20×20	5	140@10 keV	$18 \times (E/6)^{-0.5}$
GRBM	40-700	aperto	-	500@300 keV	$30 \times (E/100)^{-0.5}$

proporzionali a maschera codificata, disposti perpendicolarmente alla direzione di puntamento dei NFI e puntati in direzioni diametralmente opposte tra di loro. Ad esempio, nel momento in cui i NFI puntavano a sorgenti ad alta latitudine, le WFC puntavano verso il piano galattico. Ciascuna WFC aveva un campo di vista di $20^\circ \times 20^\circ$ (FWHM) con 5' di risoluzione nella banda 2-30 keV. Le WFC sono state impiegate per monitorare regioni selezionate di cielo, nello studio della variabilità di sorgenti con flussi superiori al mCrab (ossia dell'ordine di 10^{-10} erg cm^{-2} s^{-1}) su tempi scala lunghi e nella rivelazione di fenomeni X transienti.

Infine i quattro pannelli laterali del PDS nella banda 40-700 keV sono stati utilizzati per la rivelazione e lo studio dei *Gamma Ray Burst* (GRB).

Le principali caratteristiche degli strumenti di *BeppoSAX* sono riportati in tabella 3.1.

Infine un'altra proprietà importante di *BeppoSAX* da sottolineare è la sovrapposizione dei range energetici caratteristici degli strumenti (fig. 3.2) che ha permesso per la prima volta di misurare lo spettro X delle sorgenti celesti su una banda sufficientemente larga tale da misurare varie componenti spettrali contemporaneamente, oltre a migliorare l'intercalibrazione tra gli strumenti.

Di seguito vengono descritte le caratteristiche principali degli strumenti NFI di *BeppoSAX*, ossia LECS, MECS e PDS. Solo gli ultimi due strumenti sono stati adoperati in questo lavoro di tesi per effettuare l'analisi spettrale delle sorgenti X. Dello strumento LECS sono state adoperate esclusivamente le immagini.

3.3.1 I telescopi

Il sistema concentratore consisteva in quattro insiemi di specchi concentrici con lunghezza focale di 185 cm nei cui piani focali erano posizionati i contatori proporzionali GSPC (*Gas Scintillation Proportional Counter*), il cui gas di

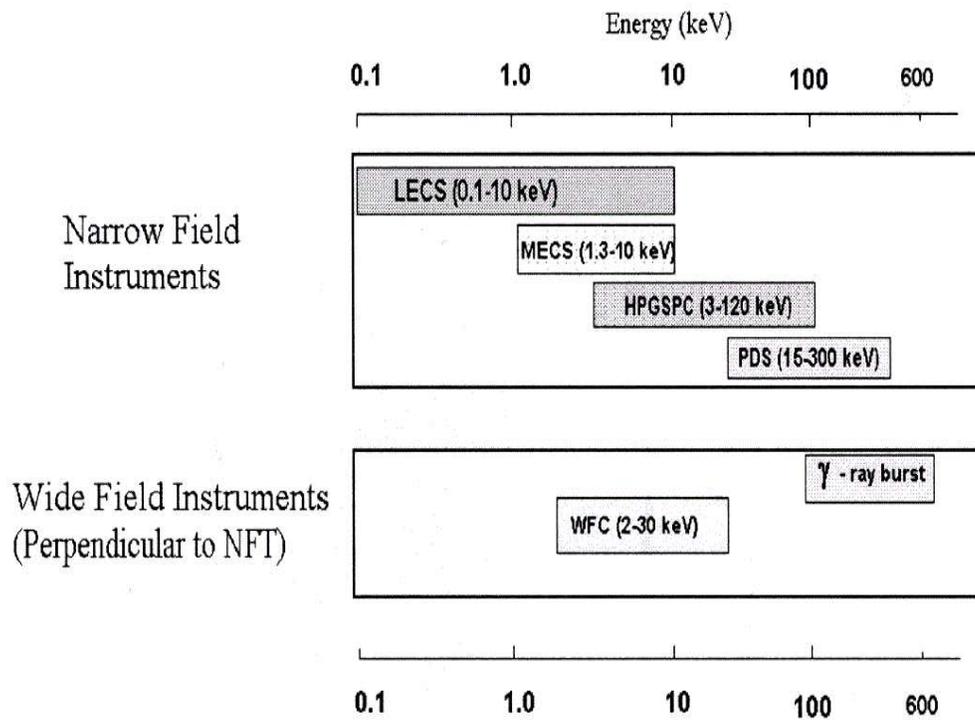


Figura 3.2: Intervalli energetici caratteristici degli strumenti di *BeppoSAX*

riempimento, costituito da xenon a circa 1 atm, aveva caratteristiche differenti a seconda del range di energia in cui venivano utilizzati. Ogni specchio (*Mirror Unit*, MU) era composto da 30 specchi co-assiali e co-focali la cui superficie riflettente era ricoperta da un sottile strato (1000\AA) di oro. L'area degli specchi era di 123.9 cm^2 , il diametro variava tra 68 e 162 mm e ciascuno era caratterizzato da una geometria doppio conica per approssimare la configurazione *Wolter I*. Queste caratteristiche permettevano di sfruttare il principio della incidenza radente per la riflessione dei raggi X.

3.3.2 Il LECS

Il funzionamento del LECS era analogo a quello di un convenzionale GSPC: la radiazione X, assorbita nel rivelatore, produceva una nuvola di elettroni che venivano accelerati sotto l'azione di un campo elettrico e che, interagendo con il gas, inducevano gli atomi di xenon ad emettere radiazione per scintillazione. La radiazione veniva rivelata mediante un fotomoltiplicatore (PM) collocato vicino al rivelatore. La quantità di radiazione emessa era proporzionale all'energia della radiazione incidente e, a differenza di quanto si verifica per un GSPC convenzionale, nel LECS dipendeva anche dalla profondità raggiunta

dalla radiazione di scintillazione (*Burst Length*, BL): un fotone assorbito in profondità nella finestra di ingresso generava una BL maggiore di quella prodotta da un fotone assorbito vicino alla finestra di uscita.

L'intervallo energetico del LECS, 0.1-10 keV, non è quello che effettivamente è stato utilizzato, poiché dopo il lancio si sono presentati problemi di calibrazione nella corrispondenza tra l'energia del fotone incidente ed il canale elettronico dello strumento per energie al di sopra di 4.5 keV; per questo motivo i dati del LECS vengono utilizzati solo nella banda 0.1-4.5 keV.

Il rendimento dello strumento era strettamente connesso all'area efficace: alle basse energie la risposta strumentale era limitata dalle interferenze della camera a gas, dalle finestre di protezione del rivelatore ed in generale dalla presenza di strutture che potevano oscurare fino al 20% della radiazione incidente (l'oscuramento dipendeva prevalentemente dalla posizione delle strutture stesse, dall'energia dei raggi X incidenti e dalla loro direzione di incidenza). Alle alte energie invece prevalevano le perdite di riflettività del concentratore.

L'area efficace nel caso di puntamento fuori asse (per esempio a 20') era di circa il 40% di quella con puntamenti in asse.

La risoluzione energetica del LECS, definita dal rapporto $\Delta E/E$, dove ΔE è la FWHM (*Full Width at Half Maximum*) di una riga di energia E rivelata dallo strumento stesso, era:

$$\frac{\Delta E}{E} = 8.84 \times \left(\frac{E}{6 \text{ keV}}\right)^{-0.5} \quad (\%FWHM) \quad (3.1)$$

La risoluzione spaziale è rappresentata dalla seguente relazione:

$$\Delta\theta = 2.1 \times \left(\frac{E}{6 \text{ keV}}\right)^{-0.5} \quad \text{arcmin} \quad (3.2)$$

Il suo intervallo di validità diminuisce all'aumentare dell'energia in modo che, mentre a 6 keV la relazione è valida entro i primi 8 arcmin centrali del FOV (*Field of View*), a 0.28 keV la sua validità è estesa all'intero FOV.

Il fondo caratteristico del LECS era prevalentemente costituito da una componente indotta dalle particelle incidenti, dai raggi cosmici (dominanti ad energie maggiori di 1 keV), dal fondo X cosmico e da radiazione X solare diffusa dall'atmosfera terrestre lungo la linea di vista dello strumento.

3.3.3 II MECS

Il MECS (Boella et al. 1997b) era composto da tre unità identiche (MECS1, MECS2, MECS3), ciascuna costituita da un MU e dal corrispondente contatore

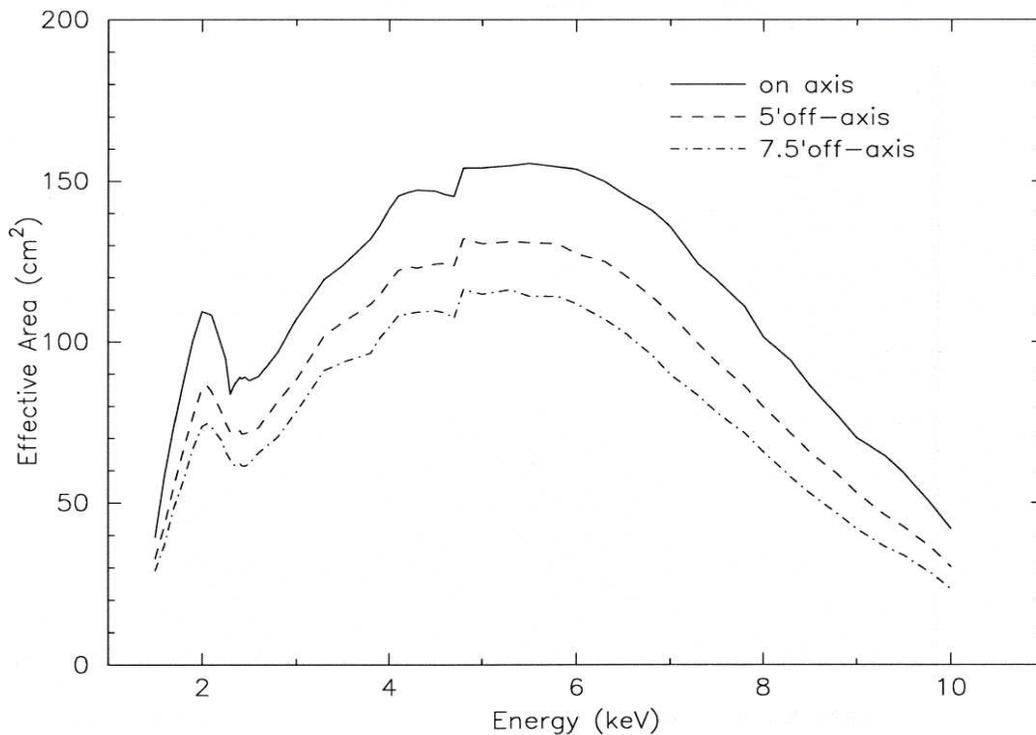


Figura 3.3: Andamento dell'area efficace del MECS in funzione dell'energia.

proporzionale *Medium Energy* GSPC (MEGSPC) operativo alle medie energie. Il GSPC utilizzato per il MECS, a differenza di quanto visto per il LECS, era caratterizzato da una cella suddivisa in una regione di assorbimento ed una regione di scintillazione: gli elettroni prodotti in seguito all'assorbimento della radiazione X incidente venivano accelerati da un campo elettrico uniforme e raggiungevano la zona di scintillazione dove, sotto l'azione di un elevato campo elettrico, interagivano con gli atomi di xenon che emettevano radiazione ultravioletta (UV) rivelata attraverso il PM. L'ampiezza del segnale UV era proporzionale all'energia della radiazione incidente e la sua durata (BL) veniva utilizzata per discriminare gli eventi "buoni" da quelli "spuri".

L'area efficace totale del MECS (fig. 3.3) si ottiene dall'area efficace del MU a cui vengono apportate correzioni che tengono conto delle caratteristiche strumentali.

La risoluzione angolare (tab. 3.1) dipendeva strettamente dall'energia: alle basse energie era limitata da fattori strumentali, mentre alle alte energie era influenzata dalla PSF (*Point Spread Function*)⁽¹⁾. La risoluzione in energia

¹Si ottiene dalla convoluzione di due componenti: la PSF del sistema ottico (descritta da un modello di King) e la PSF del rivelatore (rappresentata da una funzione gaussiana). La PSF del LECS al di sotto di 1 keV é strettamente legata all'energia, mentre al di sopra di 2 keV ha lo

era definita dall'espressione:

$$\frac{\Delta E}{E} = 8.0 \times \left(\frac{E}{6 \text{ keV}}\right)^{-0.5} \quad (\%FWHM) \quad (3.3)$$

La risoluzione spaziale dipendeva dalla risposta del rivelatore lungo tutta la finestra di osservazione e dalla risposta del sistema ottico legata alla PSF degli specchi. Può essere approssimata dalla relazione:

$$\Delta\theta = 0.7 \times \left(\frac{E}{6 \text{ keV}}\right)^{-0.5} \quad \text{arcmin} \quad (3.4)$$

Al fondo del MECS contribuivano sia una componente di origine strumentale, sia l'emissione X diffusa di natura extragalattica. La componente galattica, dominante alle basse energie, poteva essere trascurata grazie alla trasparenza della finestra di berillio (inferiore al 5% al di sotto di 0.1 keV).

In seguito ad un guasto al sistema di alimentazione l'unità MECS1, dal 6 maggio 1997, non è stata più in funzione; tutte le osservazioni posteriori sono state effettuate con le rimanenti due unità.

3.4 Il PDS

Il PDS era composto da quattro scintillatori inorganici indipendenti di NaI(Tl)/CsL(Na) che, otticamente accoppiati, costituivano il cosiddetto *PHOSWICH* (PHW), acronimo di *PHOSphor sandWICH* (Frontera et al.1997). Ciascuno di questi quattro rivelatori era costituito da due cristalli di NaI(Tl), dello spessore di 3 mm, che funzionavano come rivelatori della radiazione X, e due di CsI(Na), dello spessore di 50 mm, che fungevano da schermi attivi. La parte superiore dello strumento era costituita da due collimatori a tubo, di sezione esagonale, che limitavano il FOV del PDS a $1.3^\circ \times 1.3^\circ$ (FWHM) e riducevano l'area geometrica di raccolta del 20%, fino ad un valore pari a 795 cm^2 .

La luce emessa per scintillazione raggiungeva, attraverso guide di luce al quarzo, i fotomoltiplicatori, dove veniva convertita in segnale elettrico. Gli eventi prodotti dai fotoni o da particelle cariche rivelati in ogni contatore potevano essere divisi in tre classi:

- eventi che depositavano energia solo nel cristallo di NaI, considerati “buoni”;

stesso andamento di quella del MECS che è caratterizzata da una simmetria radiale e da una non variabilità entro un angolo fuori asse di ~ 4 arcmin

- eventi che depositavano energia solo nel cristallo di CsI, considerati “non buoni”;
- eventi che depositavano energia in entrambi i cristalli, considerati “non buoni”.

Le differenti costanti di decadimento proprie della luce di scintillazione prodotta nel NaI ($\sim 0.25 \mu\text{sec}$) e nel CsI ($\sim 7 \mu\text{sec}$) e la conseguente analisi del segnale attraverso il PSA (*Pulse Shape Analyzer*) permettevano di discriminare gli eventi delle tre classi descritte precedentemente (fig. 3.4).

L'area efficace del rivelatore dipendeva, alle basse energie, dalla trasparenza della finestra e, alle alte energie, dallo spessore del NaI(Tl) e dallo spettro dei fotoni incidenti (fig.3.5).

La risoluzione in energia dello strumento veniva determinata mediante la formula:

$$\frac{\Delta E}{E} = 0.15 \times \left(\frac{E}{6 \text{ keV}}\right)^{-0.5} \quad (\%FWHM) \quad (3.5)$$

Nel caso dell'unità di rivelazione a NaI(Tl) si aveva una risoluzione energetica del 15% a 60 keV.

Il fondo del PDS era principalmente dovuto alle seguenti componenti: fondo cosmico X diffuso e fondo locale. Il fondo locale era dovuto a fotoni e particelle cariche prodotti dall'interazione delle strutture del satellite sia con le particelle intrappolate nel campo geomagnetico, sia con i raggi cosmici primari.

Per poter ridurre il livello del fondo, lo strumento era stato dotato di una serie di sistemi il cui funzionamento é illustrato di seguito:

- sistema di schermi di anticoincidenza (AC). Gli schermi erano costituiti da scintillatori a CsI(Na) (schermi laterali) e a (BC-434) (schermo inferiore) il cui scopo era di rigettare gli eventi spuri, cioè gli eventi dovuti a fotoni e particelle cariche che avevano interagito con gli strumenti ed il satellite;
- sistema di due collimatori indipendenti, uno per ciascun paio di PHW, di sezione esagonale e posti tra lo schermo di anticoincidenza ed il rivelatore. La loro funzione consisteva nel monitorare continuamente il fondo ed il (fondo + sorgente) in maniera ciclica. Ogni collimatore poteva essere ruotato, indipendentemente dall'altro, avanti o indietro rispetto alla posizione di puntamento diretta lungo l'asse del rivelatore, per un massimo di $\pm 210'$ ($\pm 3.5^\circ$) in cinque passi progressivi ($\pm 30'$, $\pm 60'$, $\pm 90'$, $\pm 150'$, $\pm 210'$) con un periodo di 50 secondi, in modo tale

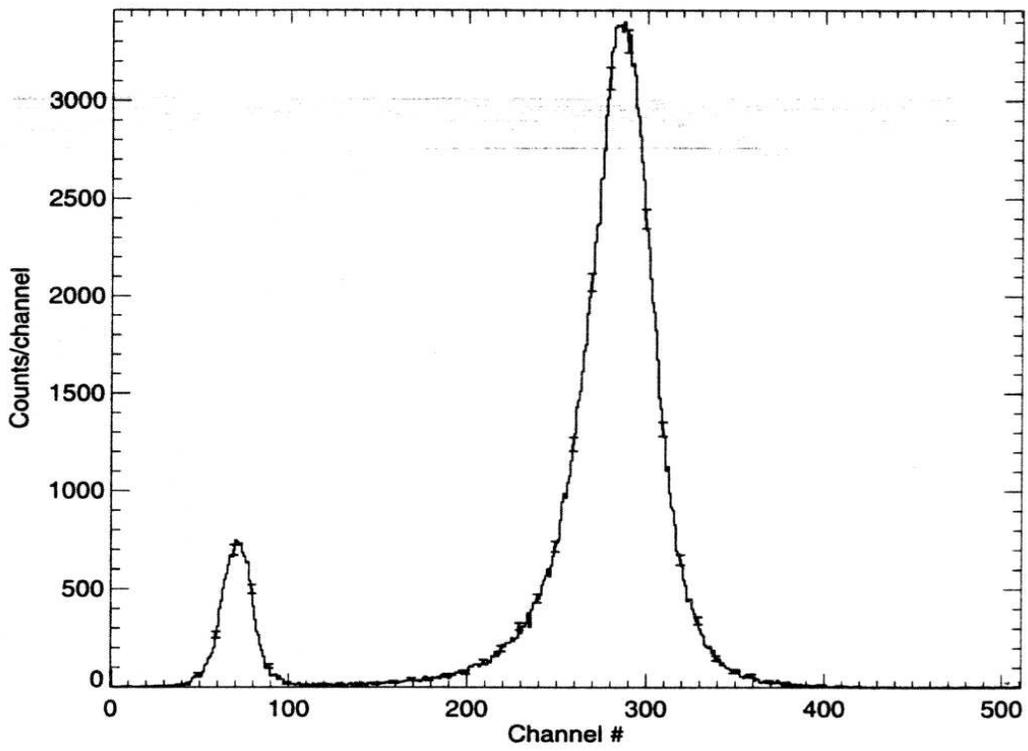


Figura 3.4: Risposta strumentale del PDS.

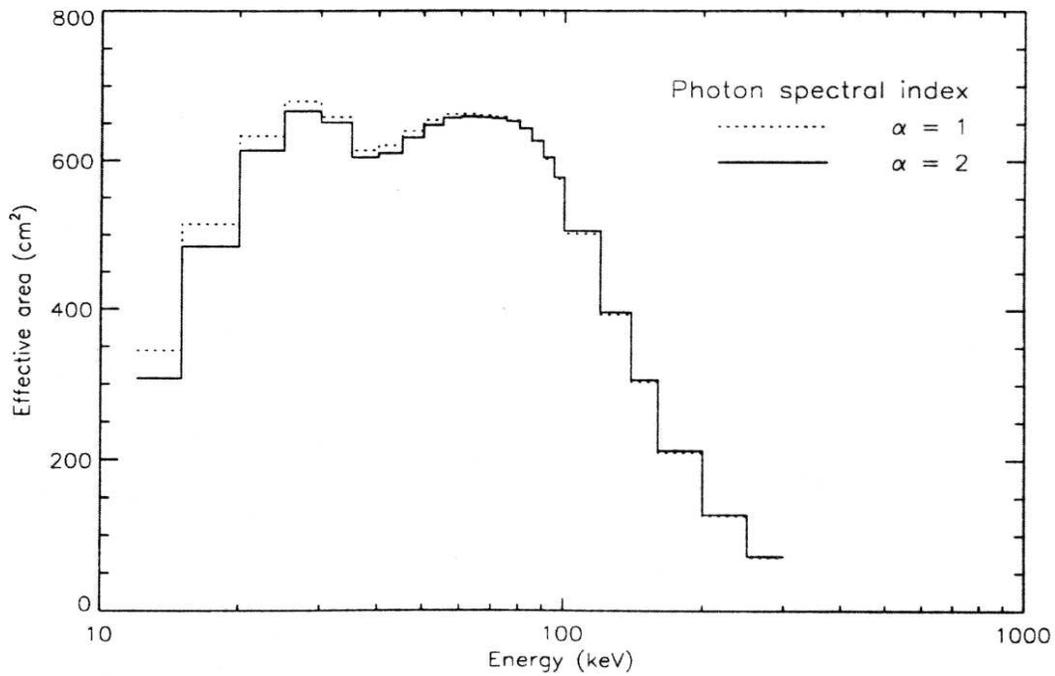


Figura 3.5: Andamento dell'area efficace del PDS in funzione dell'energia.

che, mentre uno dei due puntava la sorgente, il secondo puntava una regione di cielo non contaminata da sorgenti che permetteva di misurare il fondo. Ad ogni ciclo i collimatori venivano scambiati: quello che nel ciclo precedente puntava la sorgente, nel successivo puntava la regione di cielo vuoto e viceversa. Questo procedimento permetteva di campionare alternativamente i fondi in regioni diametralmente opposte rispetto alla sorgente. Il ciclo standard di puntamento era: “ON SOURCE” / +210’ “OFF SOURCE / “ON SOURCE” / -210’ “OFF SOURCE” (Frontera et al. 1997). Nel caso in cui una delle regioni di cielo in cui veniva misurato il fondo risultasse contaminata dalla presenza di sorgenti estranee, era possibile agire sull’angolo di rotazione dei collimatori selezionando un’orientazione tale che potesse escludere la contaminazione.

Gli schermi laterali del PDS venivano anche impiegati, come GRBM (*Gamma Ray Burst Monitor*), per la rivelazione dei GRB nell’intervallo energetico 40-700 keV.

3.5 Analisi spettrale

Solo gli strumenti MECS e PDS sono stati adoperati in questo lavoro di tesi per effettuare l’analisi spettrale delle sorgenti X. Dello strumento LECS sono state adoperate esclusivamente le immagini.

3.5.1 Analisi dati MECS

La riduzione dei dati é stata effettuata utilizzando il software SAXDAS (<http://www.asdc.asi.it/software> e il Cookbook di Fiore, Guainazzi & Grandi 1998).

Il procedimento eseguito é quello descritto nel “*BeppoSAX CookBook*” (Fiore, Guainazzi e Grandi 1998) e puó essere schematizzato come segue:

A) Il *file* degli eventi (*.evt*) viene analizzato mediante il pacchetto software *XSELECT* nel seguente modo:

- Dall’immagine del campo di puntamento della sorgente, si seleziona una regione circolare, centrata sulla sorgente stessa, il cui raggio dipende dalla PSF dello strumento, dalla intensitá della sorgente e dal fondo. Per il MECS si consiglia un raggio di 4 arcmin nel caso di sorgenti di media o forte brillantezza, e di 2-3 arcmin per quelle piú deboli.

- una volta selezionata la regione che interessa per l'analisi, si estrae il *file (.pha)* contenente lo spettro della sorgente.

B) Per ottenere lo spettro netto (*file (.grp)*) é necessario associare al *file* spettrale (*.pha*), mediante il pacchetto software *FTOOLS*, una serie di *file* le cui caratteristiche e modalità di applicazione sono descritte di seguito:

1. Si deve prima di tutto sottrarre lo spettro del fondo che può essere ricavato in due modi differenti:
 - 1a) si estrae da un *file* di eventi, disponibile in rete, ottenuto accumulando differenti esposizioni a campo vuoto (*"blank field"*), uno spettro di fondo da una regione con le stesse dimensioni di quella utilizzata per ricavare lo spettro della sorgente. Questo fondo è definito *standard*.
 - 1b) si genera un fondo locale estraendo uno spettro, in maniera analoga a quanto fatto per la sorgente, in una regione, all'interno del campo di vista dell'osservazione in esame, lontana dalle sorgenti di calibrazione e priva di emissioni in modo da evitare contaminazioni.

Nel caso delle sorgenti analizzate in questo lavoro, si é adottato il criterio 1a) per quelle in asse (la quasi totalità delle sorgenti X che abbiamo studiato) ed il criterio 1b) per quelle fuori asse (solo pochissimi casi).

2. In questa fase vengono associate allo spettro, le matrici di risposta composte da due *file*: un ARF (*Ancillary Response File*) di risposta ausiliaria ed un RMF (*Redistribution Matrix File*). Il *file (.rmf)* contiene la matrice di redistribuzione (logica e bidimensionale) che indica la probabilità che ad un fotone in ingresso venga associato un dato canale di energia in uscita. Il *file (.arf)* é una matrice logica che contiene l'area efficace totale dello strumento in funzione dell'energia e che dipende dal raggio di estrazione selezionato.
3. Allo scopo di valutare la bontá dell'adattamento del modello ai dati, applicando la statistica del χ^2 , é necessario che ogni canale abbia almeno un numero di conteggi superiore a 25-30. Per questo motivo si effettua un *rebinning* dei dati in modo da raggruppare i conteggi di piú canali in un unico *bin*. La canalizzazione lineare (larghezza dei canali elettronici costante con l'energia) e la risoluzione strumentale

$\propto E^{-0.5}$, caratteristici dei NFI, fanno sì che gli eventi di alta energia, campionati più frequentemente, contribuiscano maggiormente al χ^2 rispetto a quelli di bassa energia. Per correggere questo effetto, si raggruppano i dati con un fattore non costante con l'energia attraverso l'utilizzo di *file (.grouping)*, appositamente creati e messi a disposizione da SDC, che tengono conto dell'andamento della risoluzione spettrale con l'energia.

3.5.2 Analisi dati PDS

Anche l'analisi dei dati PDS è stata fatta usando il pacchetto software SAXDAS. Per produrre eventi linearizzati ed equalizzati sono state utilizzate procedure di riduzione standard. In particolare, vengono selezionate le finestre temporali corrispondenti ai dati utili per l'analisi:

- si generano le serie temporali in cui sono contenute le informazioni relative alla variazione lungo l'orbita del puntamento e delle effemeridi del satellite, dell'angolo solare, dell'occultazione della sorgente da parte della Terra e della rigidità di *cut-off* del campo magnetico terrestre;
- si eliminano sia gli intervalli temporali corrispondenti all'attraversamento della SAGA ed ai minuti successivi (infatti la strumentazione, dopo l'accensione, non ha ancora raggiunto il funzionamento a regime) sia quelli successivi alla variazione di puntamento del satellite;
- si generano le curve di luce relative a ciascuna unità di rivelazione allo scopo di identificare eventi definiti *spike*, cioè quei segnali spuri prodotti dall'interazione di raggi cosmici di elevato numero atomico con il rivelatore, che, aparendo in maniera casuale in qualsiasi fase del ciclo di rotazione dei collimatori, possono alterare significativamente l'analisi delle sorgenti.

Particolare attenzione è stata data allo scarto del background, dovuto alle particelle di alta energia, che limitano fortemente lo studio alle alte energie di sorgenti extragalattiche deboli quali gli AGN. Per il PDS, gli eventi dovuti a particelle del background sono scartati attraverso l'analisi del Tempo di Salita del Segnale. Al momento due strategie differenti sono possibili in SAXDAS per eliminare il background:

- Soglia del tempo di salita fissata;

- Soglie del tempo di salita variabili come funzione del canale di eventi PHA e della temperatura dei potoswiches.

La strategia utilizzata solitamente é la prima, e la matrice di risposta del PDS é stata calibrata usando i dati ridotti in questo modo. Il valore medio ottenuto su tutta la banda (13-300 keV) del background é in questo caso di circa 34 conteggi al secondo.

Se viene applicato il secondo metodo il valore del background scende del 30-50%. Questa strategia riduce il tasso di conteggi di una sorgente del tipo Crab di circa il 7%; per cui il migliore rapporto segnale/rumore si ha per le sorgenti deboli. Questo metodo é stato sviluppato e calibrato dal *team PDS* all'IASF (Bologna) usando i dati della Crab, e non introduce errori sistematici per sorgenti con spettro di tipo Crab (legge di potenza con indice spettrale in energia $\alpha=1.1$). Questo metodo é comunque raccomandato solo per sorgenti deboli, ad esempio sorgenti per le quali l'incertezza sulla pendenza del *best-fit* é piú alta di 0.1 (corrispondente ad un tasso di conteggi piú piccolo di 0.5 conteggi s^{-1}). Per sorgenti con una migliore statistica, e forma spettrale intrinseca molto diversa dalla Crab, l'uso di tale metodo potrebbe introdurre un errore sistematico nello spettro.

Le sorgenti studiate in questa tesi sono state analizzate usando il metodo del tempo di salita variabile. La sottrazione del background negli spettri del PDS é stata fatta tramite la semplice sottrazione del segnale *off-source* da quello *on-source*. Le incertezze sistematiche di questo metodo sono minori di circa 0.03 conteggi s^{-1} per l'intera banda energetica del PDS.

I fit spettrali sono fatti utilizzando le matrici pubbliche del novembre 1998. I canali PI (*Pulse Invariant*) sono rebinnati campionando la risoluzione strumentale con lo stesso numero di canali a tutte le energie in modo tale da avere almeno 20 conteggi per ogni bin. Questo garantisce l'uso del metodo statistico del χ^2 per determinare i parametri del *best-fit*, dal momento che la distribuzione in ogni canale puó essere considerata gaussiana.

3.5.3 Procedimento di analisi spettrale

In questo lavoro di tesi si sono analizzati i dati MECS e PDS, tutti contemporaneamente, in modo da poter ricoprire una banda che va da 2 keV a 100-200 keV. Per incrementare il rapporto segnale/rumore, gli eventi del MECS 2 e MECS 3 sono stati sommati dopo averli equalizzati rispetto alla scala di energia dell'unitá MECS1.

Il fattore di normalizzazione tra gli strumenti MECS e PDS, ottenuto dai

test di intercalibrazione scegliendo il MECS come strumento di riferimento, è riportato nel Cookbook (Fiore, Guainazzi & Grandi,1998):

- fattore di normalizzazione PDS/MECS compreso tra 0.70 e 0.95.

Nell'analisi spettrale effettuata, questo valore di normalizzazione è stato lasciato libero di variare nel range riportato, prima però il valore della costante MECS/PDS è stato lasciato libero per capire se l'emissione di alta energia era attribuibile o meno alla sorgente vista dal MECS.

Le finestre di sensibilità degli strumenti NFI sono state ridotte per eliminare possibili code di segnale: per il MECS è stata scelta la banda 2-10 keV e per il PDS la banda 20-100 keV.

A questo punto viene utilizzato il pacchetto software XSPEC 11.0.1 (*X-ray SPECTral-fitting program*) (Arnaud 1996) che consente l'analisi accurata dello spettro (*file (.grp)*) adattando i dati con vari modelli fisici teorici e valutando la loro validità con l'utilizzo del test del χ^2 .

Per tutte le osservazioni BeppoSAX analizzate in questa tesi è stata effettuata la stessa procedura di analisi spettrale. I dati a disposizione sono stati analizzati con un modello di legge di potenza ed è stato sempre considerato l'assorbimento Galattico lungo la linea di vista della sorgente. Gli errori sui parametri spettrali sono dati al 90% di confidenza con un solo parametro di libertà.

Capitolo 4

Il campione di sorgenti EGRET non identificate

4.1 Determinazione del campione

Per poter selezionare il campione di sorgenti EGRET non identificate, da studiare nella banda X con osservazioni del satellite BeppoSAX, abbiamo considerato il lavoro di Mattox e colleghi (Mattox et al. 2001, d'ora in poi M01). Abbiamo fatto riferimento a questo lavoro perchè, come già sottolineato nel primo capitolo, è il più preciso. Infatti il catalogo 3EG (Hartman et al. 1999, d'ora in poi H99) fornisce il valore del raggio relativo al contorno di confidenza al 95% della sorgente. Tuttavia non sempre tale contorno ha forma circolare, al contrario spesso assume forma sostanzialmente ellittica. M01 hanno calcolato i fit ellittici dei contorni di confidenza al 95% delle scatole di errore di tutte le sorgenti listate nel catalogo 3EG, determinando quindi i valori (in arcmin) del semiasse maggiore (a) e minore (b) dell'ellisse. Inoltre hanno calcolato le coordinate relative alla posizione centrale dell'ellisse, rappresentativa anche della posizione della sorgente gamma. La differenza tra le coordinate delle sorgenti EGRET listate in H99 e in M01 è molto piccola e le localizzazioni in M01 sono le più precise.

Le coordinate di tutte le sorgenti gamma non identificate listate in M01 sono state correlate con l'intero archivio NFI di BeppoSAX, alla ricerca di quelle osservazioni X il cui campo MECS/LECS osservato non distasse più di 60 arcmin dalla posizione della sorgente EGRET. Una volta individuate le coppie EGRET-BeppoSAX soddisfacenti tale condizione, il passo successivo è stato quello di verificare se i contorni della sorgente gamma si sovrapponevano totalmente o parzialmente ai campi X. Le mappe con tali sovrapposizioni sono state determinate utilizzando il file degli eventi (*file (.evt)*) relativo al campo MECS e la mappa (*file (.fits)*) relativa alla sorgente EGRET (Mattox

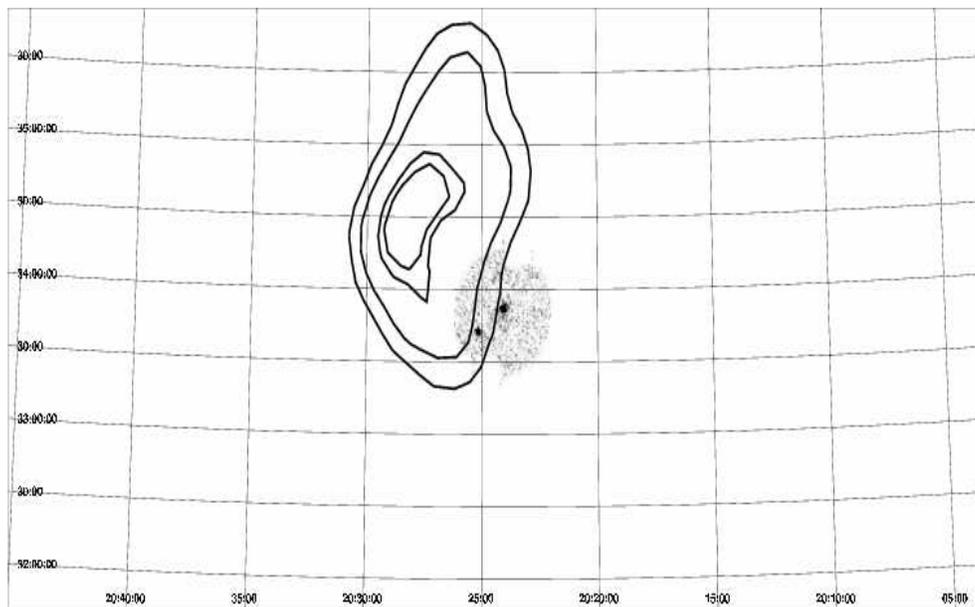


Figura 4.1: Esempio di campo MECS (2-10 keV) BeppoSAX, relativo alla sorgente GS 2023+338, sovrapposto ai contorni di confidenza della sorgente EGRET 3EG J2027+3429, al 50%, 68%, 95% e 99%, andando rispettivamente dall'interno verso l'esterno.

et al. 1996). Con l'ausilio del pacchetto software DS9 (SAO/HEAD RD Group) applicato ai due file, abbiamo poi costruito le mappe, delle quali mostriamo in figura 4.1 un esempio. Sebbene i contorni al 95% sono quelli considerati rappresentativi delle sorgenti EGRET (questo giustifica perchè solo i valori del raggio o dei semiassi relativi a tali contorni sono listati sia in H99 che M01), per la sovrapposizione noi abbiamo considerato tutti i contorni di confidenza delle sorgenti EGRET, fino al 99%. Questo perchè, in alcuni casi, le controparti di sorgenti gamma già identificate sono state individuate tra i contorni al 95% e 99%. Il lavoro appena descritto di correlazione prima e di sovrapposizione poi, ha portato alla determinazione di un campione di 10 sorgenti EGRET non identificate le cui scatole di errore si sovrappongono parzialmente o totalmente ai campi MECS di BeppoSAX. A questo campione sono state aggiunte successivamente altre due sorgenti EGRET, non individuate inizialmente con la nostra ricerca, in quanto il solo strumento utilizzato da BeppoSAX per osservarle è stato il PDS, pertanto non sono disponibili immagini LECS e MECS. Come già detto, contrariamente a quest'ultimi strumenti, il PDS non è in grado di fornire immagini del campo di vista osservato (il cui raggio è poco più di 1°), perciò qualsiasi sorgente presente nel campo può essere responsabile dell'emissione rivelata. Tutte le 12 sorgenti EGRET sono listate in tabella 4.1, con le loro coordinate equatoriali

e galattiche, con i valori (in arcmin) dei semiassi maggiori (a) e minori (b) del contorno di confidenza ellittico al 95% come riportato in M01 e con il valore del raggio del contorno di confidenza circolare al 95%, come riportato in H99. La tabella 4.2 invece lista le corrispettive sorgenti puntate da BeppoSAX (target), con le loro coordinate equatoriali, la tipologia di sorgente di puntamento, il numero di osservazioni compiute e se c'è stata o meno detezione con lo strumento PDS ad alte energie.

È importante sottolineare, come vedremo dettagliatamente in seguito, che in quattro casi (sorgenti numero 6, 9, 11 e 12) lo scopo dell'osservazione BeppoSAX era lo studio di sorgenti EGRET non identificate. Per le sorgenti numero 6 e 9 la copertura della scatola di errore gamma da parte del campo MECS BeppoSAX è totale, mentre quelle numero 11 e 12 sono state osservate solo con lo strumento PDS e pertanto non sono disponibili immagini MECS. In cinque casi (sorgenti numero 1, 4, 5, 7, 8, 10) la copertura è invece parziale, dato che il target dell'osservazione BeppoSAX era di altro interesse, solo per casualità il campo X osservato è risultato essere sovrapposto alla scatola di errore gamma. Infine, anche nei due casi restanti (sorgenti numero 2 e 3) la copertura trovata è risultata parziale ma non casuale. Contrariamente ai sei casi precedenti questa volta i puntamenti per entrambi le osservazioni BeppoSAX sono state due sorgenti BL Lac presenti all'interno della scatola di errore delle due sorgenti EGRET non identificate, e quindi considerate plausibili responsabili dell'emissione gamma.

4.2 Proprietà del campione di sorgenti gamma non identificate

In tabella 4.3 sono elencate le proprietà di ciascuna delle sorgenti EGRET non identificate del nostro campione, specificandone: il flusso gamma F a energie $E > 100$ MeV in unità di 10^{-8} fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ con incertezza statistica ΔF calcolata ad 1σ , l'indice spettrale in fotoni Γ con incertezza statistica $\Delta\Gamma$ calcolata ad 1σ , la significatività statistica \sqrt{TS} della detezione (a $E > 100$ MeV), il periodo di osservazione VP e i valori dei tre indici di variabilità I, V, τ (vedi paragrafi seguenti).

Tabella 4.1: Proprietà del campione di sorgenti gamma non identificate

Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	l degrees	b degrees	semiassa (a) arcmin	semiassa (b) arcmin	raggio R arcmin	
1	3EG J2027+3429	20 26 57.6	+34 33 00	74.02	- 2.19	61.3	34.3	46.2
2	3EG J1234- 1318	12 33 33.6	- 13 20 24	296.3	+49.3	47.7	43.7	45.6
3	3EG J1212+2304	12 12 50.4	+23 06 00	236.1	+80.3	55.6	50.1	50.8
4	3EG J1621+8203	16 25 26.4	+82 11 48	115.4	+31.7	58.3	44.6	51.0
5	3EG J0542+2610	05 41 24.0	+26 09 00	181.8	- 2.26	70.0	63.0	42.0
6	3EG J1837- 0423	18 37 45.5	- 04 24 00	27.46	+1.02	36.7	25.7	31.2
7	3EG J1824- 1514	18 24 33.5	- 15 12 36	16.38	- 1.10	34.2	29.3	31.2
8	3EG J1800- 2338	18 00 33.5	- 23 39 36	6.250	- 0.20	21.6	17.3	19.2
9	3EG J1837- 0606	18 37 02.3	- 06 09 36	25.10	+0.38	13.8	9.10	11.4
10	3EG J1410- 6147	14 11 07.2	- 61 46 12	312.21	- 0.34	22.1	19.6	21.6
11	3EG J1652-0223	16 51 16.8	- 02 30 36	15.78	25.05	60.3	48.9	43.8
12	3EG J1757-0711	17 58 04.8	- 07 19 48	20.21	8.47	41.3	39.2	41

Tabella 4.2: Osservazioni BeppoSAX

target BeppoSAX	RA (J2000)	DEC (J2000)	classificazione target	numero oss.	detezione PDS	
1	GS2023+338	20 24 03.7	+33 52 04.0	Candidato Buco Nero	2	SI (4σ)
2	RXSJ123511.1-14	12 35 11.0	- 14 03 32.0	BL Lac	3	NO
3	RXSJ121158+2242	12 11 58.0	+22 42 36.0	BL Lac	3	NO
4	NGC6251	16 32 31.9	+82 32 16.0	Radiogalassia	1	SI (4.5σ)
5	A0535+26	05 38 54.4	+26 18 56.9	Sistame binario Be/X	3	NO
6	GROJ1838-0415	18 36 31.6	- 04 47 09.0	Sorgente UES	2	NO
		18 37 43.0	- 04 18 06.9			NO
7	RXJ1826.2-1450	18 26 15.0	- 14 50 53.9	Microquasar	1	SI (4.5σ)
8	SAXJ1758-23465	17 58 03.4	- 23 46 32.0	Survey	2	NO
9	GEV1837-0610	18 37 30.0	- 06 09 51.9	Sorgente UES	2	SI (12σ)
10	GALPLANESUR2	14 06 43.0	- 61 55 18.9	Survey	1	NO
11	3EG J1652-0223	16 52 00.0	- 02 23 59.9	Sorgente UES	1	SI (3σ)
12	3EG J1757-0711	17 57 55.2	- 07 12 00.0	Sorgente UES	1	SI (1σ)

Nota: In entrambe le tabelle (4.1 e 4.2) le sorgenti sono numerate in modo tale che ogni numero uguale identifica una coppia di sorgenti EGRET/SAX target, per le quali si ha sovrapposizione box errore gamma/campo MECS.

Tabella 4.3: proprietà del campione di sorgenti EGRET non identificate

	sorgente EGRET	F	ΔF	Γ	$\Delta\Gamma$	\sqrt{TS}	VP	I	V	τ	τ_L	τ_U
1	3EG J2027+3429	25.9	4.70	2.28	0.15	5.8	P1234	3.30	1.19	0.00	0.00	0.28
2	3EG J1234- 1318	21.6	5.3	2.09	0.24	5.2	Virgo2	2.03	0.2	0.42	0.12	0.81
3	3EG J1212+2304	50.8	16.6	2.76	0.60	4.4	204.0	5.65		78.8	0.00	9999
4	3EG J1621+8203	11.0	3.00	2.29	0.49	4.1	P1	0.34		0.00	0.00	0.29
5	3EG J0542+2610	19.1	4.0	2.67	0.22	5.1	P12	3.10		0.70	0.34	1.40
6	3EG J1837- 0423	310.4	63.7	2.71	0.44	5.8	423.0	5.40		12.01	2.17	9999
7	3EG J1824- 1514	35.2	6.50	2.19	0.18	5.6	P1234	3.00		0.00	0.00	0.51
8	3EG J1800- 2338	61.3	6.70	2.10	0.10	9.6	P1234	1.60	0.05	0.03	0.00	0.32
9	3EG J1837- 0606	49.6	7.90	1.82	0.14	6.5	P1234	2.40		0.24	0.00	0.49
10	3EG J1410-6147	64.2	8.0	2.12	0.14	7.8	P1234	1.20	0.25	0.33	0.16	0.55
11	3EG J1652-0223	16.6	3.7	2.53	0.24	5.1	P1234	2.13		0.00	0.00	0.62
12	3EG J1757-0711	20.3	4.0	2.51	0.20	5.5	P1234	2.0		0.52	0.00	0.99

4.2.1 Periodi di osservazione VP

Per esigenze di gestione, la missione CGRO è stata divisa in 4 cicli corrispondenti ad altrettanti cicli di proposte. Il ciclo 1 copre l'intervallo che va da Aprile 1991 a Novembre 1992, il ciclo 2 da Novembre 1992 a Settembre 1993, il ciclo 3 da Agosto 1993 a Ottobre 1994 ed infine il ciclo 4 da Ottobre 1994 a Ottobre 1995. I periodi di osservazione VP (Viewing Periods), definiti come l'intervallo di tempo con puntamento fisso del satellite, vanno tipicamente da qualche giorno fino a tre settimane circa e sono rappresentati da numeri via via crescenti, come in H99. Ogni sorgente 3EG può essere stata osservata per più VP in ciascuno dei quattro cicli, e per ogni VP è caratterizzata da un certo valore del flusso F e della significatività statistica \sqrt{TS} . Abbiamo scelto come rappresentativi delle sorgenti del nostro campione i VP durante i quali è stata registrata la più alta significatività statistica. Il VP=Virgo2 (3EG J1234-1318) va dal 22 Dicembre 1992 al 12 Gennaio 1993 ed è dato dalla somma dei tre VP numero 204, 205 e 206. Il VP=204.0 (3EG J1212+2304) è rappresentativo del periodo di osservazione 22÷29 Dicembre 1999, mentre quello 423.0 (3EG J1837-0423) del periodo 20÷30 Giugno 1995. Il VP=P1 (3EG J1621+8203) si riferisce al periodo Aprile 1991÷Novembre 1992, somma di tutti i VP compresi nel ciclo 1. Analogamente il VP=P12 (3EG J0542+2610), somma di tutti i VP compresi nel ciclo 1 e 2, va da Aprile 1991 a Settembre 1993. Per le restanti sorgenti, invece, P1234 si riferisce al periodo di osservazione 22 Aprile 1991÷27 Settembre 1995, ottenuto attraverso la somma di tutti i VP compresi nei quattro cicli, dal numero 1 al numero 4.

4.2.2 Criteri di variabilità per le sorgenti EGRET

Per poter investigare sull'origine delle sorgenti gamma non identificate, la misura della loro variabilità è di fondamentale importanza, poiché le uniche due tipologie di oggetti celesti che con certezza sappiamo essere gamma emittenti, cioè blazar e pulsar, sono rispettivamente variabili e non variabili. Per oggetti di altra natura, potenziali sorgenti di emissione γ , le cose non sono così chiare. Per esempio nel caso di resti di supernova in interazione con nubi molecolari (Esposito et al. 1996, Combi et al. 1998, 2001), l'emissione dovrebbe essere secondo i modelli non variabile. Alternativamente se l'emissione è prodotta, per esempio, da buchi neri isolati e magnetizzati (Punsly et al. 2000), da microquasar (Paredes et al. 2000) o da potenti venti stellari di giovani stelle massicce (Benaglia et al. 2001), ci si dovrebbe aspettare una spiccata variabilità nel flusso gamma.

Fino ad oggi in letteratura sono stati introdotti tre indici per stimare la variabilità delle sorgenti EGRET.

Il primo, denominato V , è stato introdotto da McLaughlin et al. (1996). Per quantificare la variabilità del flusso di una sorgente, se ne determina il χ^2 , calcolato con la formula

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^{N_{vp}} \left[\frac{F(i) - \bar{F}}{\sigma(i)} \right]^2 \quad (4.1)$$

dove N_{vp} è il numero di VP durante i quali la sorgente è stata osservata, $F(i)$ è il flusso relativo al VP= i con relativa deviazione $\sigma(i)$ ed \bar{F} è il flusso medio pesato. Per determinare se il valore del χ^2 ottenuto per una sorgente ne suggerisce la variabilità del flusso, si calcola la probabilità Q di ottenere un tale χ^2 nel caso in cui la sorgente non fosse variabile. Tale probabilità Q è data dalla formula (Press et al. 1992)

$$Q = 1 - P \left(\frac{N_{vp} - 1}{2}, \frac{\chi^2}{2} \right) \quad (4.2)$$

dove $P(a,x)$, con $a \geq 0$, è la funzione gamma incompleta. L'indice di variabilità V è definito a questo punto come $V = -\log Q$. Il criterio seguito da McLaughlin et al. (1996) è stato quello di classificare le sorgenti variabili se $V \geq 1$, non variabili se $V \leq 0.5$ ed incerte se $0.5 \leq V \leq 1$. L'analisi di McLaughlin tuttavia si riferisce alle sorgenti del catalogo 2EG, precedente a quello definitivo 3EG, per cui interessa un numero più piccolo di oggetti (128) rispetto a quelli (271) listati nel catalogo 3EG.

Il secondo indice di variabilità, denominato τ , è stato introdotto da Tompkins

(1999). È definito come

$$\tau = \frac{\sigma}{\mu}$$

dove σ è la deviazione standard del flusso e μ il suo valore medio. Il risultato finale dell'analisi di Tompkins attribuisce ad ogni sorgente EGRET del catalogo 3EG tre valori per l'indice: un valore medio τ , un valore massimo τ_U (upper limit) ed un valore minimo τ_L (lower limit) con una barra d'errore del 68%. Tompkins con la sua analisi ha trovato che le pulsar hanno un valore medio di τ pari a 0.1 con un $\tau_U=0.27$, mentre gli AGN presentano un valore medio pari a $\tau=0.9$. Il criterio seguito da Tompkins (1999) è stato, pertanto, quello di classificare una sorgente variabile se $\tau_L > 0.6$, non variabile se $\tau_U < 0.6$ ed incerta o dubbia se non soddisfa nessuno dei due criteri precedenti. È importante precisare che Tompkins, per la sua analisi di variabilità delle sorgenti, ha considerato non solo tutte quelle pubblicate nel catalogo 3EG, ma anche dati e informazioni non pubblicate. Infatti sono state prese in considerazione anche 145 sorgenti detettate marginalmente ma non pubblicate nel catalogo finale, e tutte le detezioni entro 25° dalla sorgente di interesse. Infine il terzo indice di variabilità, denominato I, è stato usato per l'analisi di variabilità delle blazar (Romero et al. 1994) e applicato alle sorgenti 3EG da Zhang et al. (2000) e Torres et al. (2001). L'indice I stabilisce quanto una sorgente è variabile rispetto alla popolazione delle pulsar. Contrariamente all'indice τ definito precedentemente, per la determinazione di I sono state considerate solo le sorgenti pubblicate nel catalogo 3EG. L'indice I è definito nella seguente maniera. Innanzitutto è stato calcolato per ogni sorgente il valore medio pesato del flusso, dato dalla formula:

$$\bar{F} = \left[\sum_{i=1}^{N_{vp}} \frac{F(i)}{\epsilon(i)^2} \right] \times \left[\sum_{i=1}^{N_{vp}} \frac{1}{\epsilon(i)^2} \right]^{-1} \quad (4.3)$$

dove N_{vp} è il numero di VP relativi alla sorgente, $F(i)$ è il flusso corrispondente al VP= i con relativo errore $\epsilon(i)$. Tale \bar{F} è stato usato per calcolare l'indice di fluttazione μ_s delle sorgenti

$$\mu_s = 100 \times \sigma_{sd} \times \bar{F}^{-1} \quad (4.4)$$

dove σ_{sd} è la deviazione standard del flusso misurato. L'indice di fluttazione μ è stato calcolato anche per le pulsar gamma conosciute e catalogate nel 3EG ed il valore medio trovato è $\mu_p = 26.9$. A questo punto l'indice di variabilità I viene definito come

$$I = \frac{\mu_s}{\mu_p} = \frac{\mu_s}{26.9} \quad (4.5)$$

Risulta evidente che le pulsar gamma hanno $I = 1$, con deviazione standard trovata pari a $\sigma = 0.5$. Nel caso in cui si decide che il valore di I delle sorgenti EGRET debba essere $3\sigma=3\times 0.5$ volte superiore a quello delle pulsar, la condizione per la variabilità sarà $I>2.5$, per la non variabilità $I<1.5$, i casi incerti saranno quelli con $1.5<I<2.5$.

Considerando i valori dei tre tipi di indici di variabilità delle nostre sorgenti (tabella 4.3), riportiamo in tabella 4.4 il comportamento variabile (SI), non variabile (NO) o incerto (DUBBIO) per ciascuna di esse nei tre casi differenti.

Risulta evidente come la sorgente numero 6 è sicuramente variabile mentre

Tabella 4.4: Variabilità del campione di sorgenti EGRET non identificate

	sorgente EGRET	I	V	τ
1	3EG J2027+3429	SI	SI	NO
2	3EG J1234-1318	DUBBIO	NO	DUBBIO
3	3EG J1212+2304	SI		DUBBIO
4	3EG J1621+8203	NO		NO
5	3EG J0542+2610	SI		DUBBIO
6	3EG J1837-0423	SI		SI
7	3EG J1824-1514	SI		NO
8	3EG J1800-2338	NO	NO	NO
9	3EG J1837-0606	DUBBIO		NO
10	3EG J1410-6147	NO	NO	NO
11	3EG J1652-0223	DUBBIO		NO
12	3EG J1757-0711	DUBBIO		DUBBIO

quelle numero 4, 8 e 10 sono sicuramente non variabili, data la piena concordanza di tutti gli indici. Per le restanti sorgenti invece i tre indici non sono concordanti. Tuttavia, possiamo ritenere variabili anche le sorgenti numero 1 (due indici su tre indicano variabilità) e la numero 5 perchè considerata tale in letteratura (Romero et al. 2001). Invece le sorgenti numero 9 e 11 le consideriamo non variabile, dando maggior peso all'indice in grado di indicare un conclusivo "status" di non variabilità per la sorgente, a differenza dell'altro indice che invece non riesce a discriminare tra i due casi variabile/non variabile. Seguendo lo stesso ragionamento considereremo variabile la sorgente numero 3. La sorgente numero 2, come suggeriscono due indici su tre, può effettivamente essere considerata un caso dubbio, in maniera analoga quella numero 12. Infine la sorgente numero 7 è l'unico caso in cui riscontriamo due indici opposti in contrasto tra loro (SI/NO), perciò è difficilmente inquadrabile in una analisi di variabilità.

4.3 Copertura X del box di errore gamma

I campi MECS di BeppoSAX, che abbiamo trovato essere sovrapposti parzialmente o totalmente alle scatole di errore di sorgenti gamma non identificate, sono stati da noi utilizzati per effettuare studi spettrali sulle sorgenti X presenti. La presenza di altre eventuali sorgenti X nella porzione di scatola di errore non coperta dal campo MECS di BeppoSAX è stata garantita facendo ricorso ad alcune delle banche dati e cataloghi X disponibili presso il servizio HEASARC (High Energy Astrophysics Science Archive Research Center) della NASA. Dalla lista dei cataloghi e dei database X a disposizione, generati dalle varie missioni spaziali, abbiamo scelto quelli indicati in Appendice A. Per ognuna delle sorgenti X (sia del campo MECS che di archivio) trovate nella scatola di errore gamma abbiamo poi effettuato una ricerca nella banda radio, infrarossa ed ottica allo scopo di trovare eventuali controparti a queste frequenze. I cataloghi utilizzati sono indicati anch'essi in Appendice A. Infine tutte le informazioni ricavate alle diverse lunghezze d'onda per le varie sorgenti presenti nella scatola di errore gamma sono state usate, congiuntamente alle proprietà della sorgente gamma non identificata, per identificare il “miglior candidato” responsabile dell'emissione.

4.4 Criterio di classificazione del campione di sorgenti EGRET non identificate

Abbiamo suddiviso le sorgenti EGRET non identificate del nostro campione usando come parametro discriminante la loro localizzazione rispetto al piano galattico. Si tratta di una classificazione piuttosto semplice, giustificata comunque dal fatto che, fino ad oggi, tutte le sorgenti EGRET identificate ad alta latitudine galattica sono blazar e quindi di origine extragalattica, mentre le poche identificate sul piano della Galassia sono pulsar e quindi di origine galattica.

Non sono state considerate in questa classificazione le due sorgenti EGRET osservate da BeppoSAX con il solo strumento PDS (n. 11 e n. 12 in tabella 4.1, 4.2 e 4.3), data la loro peculiarità. Lo studio ad esse relativo è esposto nel paragrafo conclusivo dell'ultimo capitolo (paragrafo 7.7)

La classificazione da noi operata è stata la seguente:

- Probabile origine extragalattica: 3EG J1234-1318, 3EG J1212+2304,

3EG J1621+8203. Si tratta di tre sorgenti tutte ad alta latitudine galattica con rispettivamente $b=49.3^\circ$, $b=80.34^\circ$, $b=31.67^\circ$. Tale caratteristica suggerisce una origine extragalattica verosimilmente del tipo AGN (blazar o radiogalassia). Solo una di queste tre sorgenti, 3EG J1212+2304, è sicuramente variabile.

- Probabile origine galattica: 3EG J1837-0423, 3EG J1824-1514, 3EG J1800-2338, 3EG J1837-0606, 3EG J0542+2610, 3EG J1410-6147. Sono tutte sorgenti a bassa latitudine, sul piano della Galassia, con rispettivamente $b=1.02^\circ$, $b=-1.1^\circ$, $b=-0.2^\circ$, $b=0.38^\circ$, $b=-2.26^\circ$, $b=-0.34^\circ$. È probabile quindi un'origine galattica con la possibilità di nuove tipologie di sorgenti responsabili dell'emissione gamma, diverse da pulsar isolate. Due sorgenti di questo gruppo, 3EG J1837-0423 e 3EG J0542+2610, sono variabili.
- Caso particolare: 3EG J2027+3429. Si tratta di una sorgente variabile localizzata a bassa latitudine ($b=-2^\circ$), gli indizi da noi raccolti sono piuttosto stringenti per un'origine extragalattica, ossia una blazar dietro il piano della Galassia.

Nei prossimi capitoli analizzeremo ciascun gruppo, sorgente per sorgente, a cominciare dal caso particolare di 3EG J2027+3429.

Capitolo 5

La sorgente gamma 3EG J2027+3429

I risultati dello studio relativo a questa sorgente sono stati da noi presentati in un lavoro attualmente in fase di pubblicazione (Astronomy and Astrophysics, 2003)

5.1 Caratteristiche della sorgente gamma

3EG J2027+3429 è stata rivelata da EGRET durante diversi VP, la significatività statistica più alta della sorgente ($\sqrt{TS}=5.8$) è stata registrata nel VP=P1234 (dal 22 Aprile 1991 al 27 Settembre 1995). Il suo flusso medio ad energie $E > 100$ MeV durante questo periodo è pari a $F_{P1234} = (25.9 \pm 4.7) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Lo spettro da 30 MeV a 30 GeV è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma = 2.28 \pm 0.15$, valore simile a quello medio delle blazar gamma identificate ($\Gamma_\gamma = 2.15 \pm 0.04$, Chiang & Mukerjee 1998). La sorgente è localizzata sul piano galattico a bassa latitudine ($b = -2^\circ$) ed ha una scatola di errore piuttosto grande. In figura 5.1 mostriamo il campo MECS (2-10 keV) di osservazione BeppoSAX, con puntamento alla sorgente GS 2023+338, sovrapposto ai contorni di confidenza EGRET al 50%, 68%, 95%, 99% andando rispettivamente dall'interno verso l'esterno. Se consideriamo i tre indici di variabilità relativi a 3EG J2027+3429, due indici su tre (quelli I e V) hanno valori tali da indicare variabilità, come già evidenziato nel capitolo precedente in tabella 4.3. La nostra scelta è stata pertanto quella di considerare la sorgente variabile. Come ulteriore verifica, abbiamo ricostruito la curva di luce di 3EG J2027+3429 utilizzando tutte le misure dei flussi, registrati da Maggio 1991 fino a Luglio 1994, come riportati in H99. Dalla curva di luce mostrata in figura 5.2, risulta piuttosto evidente la variabilità. Tale "status" è molto importante, in quanto esclude la possibilità di una origine

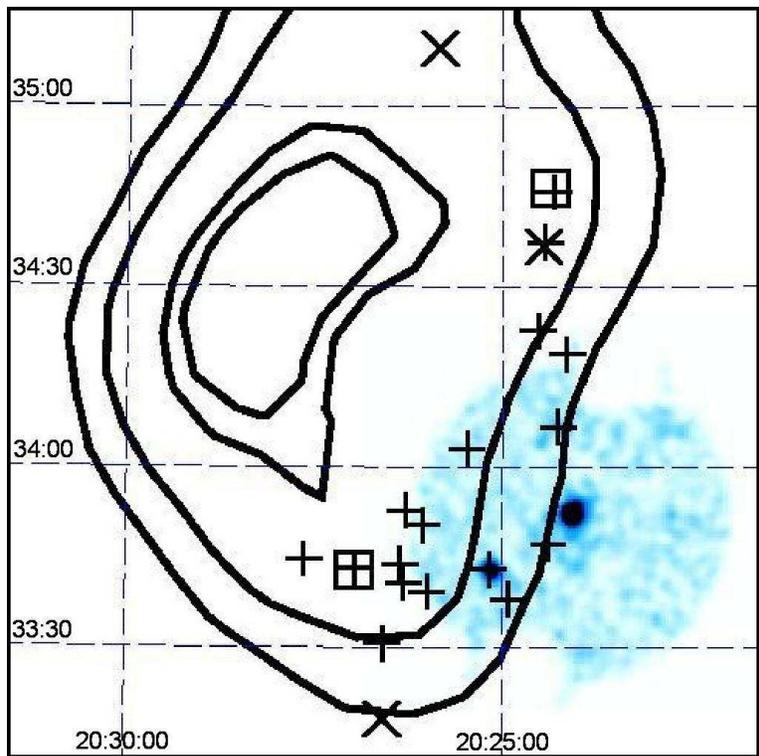


Figura 5.1: Campo osservativo MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza EGRET al 50%, 68%, 95%, 99%. Sono indicate tutte la sorgenti X presenti nel box di errore e listate in tabella 5.1: i quadrati sono le sorgenti Rosat brillanti (Bright), le x sono le sorgenti Rosat deboli (Faint) e le croci sono le sorgenti Rosat WGA.

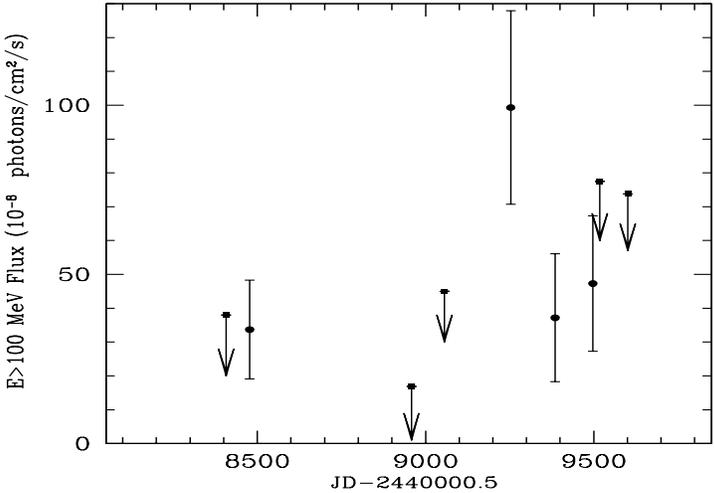


Figura 5.2: Curva di luce di 3EG J2027+3429 da Maggio 1991 a Luglio 1994

del tipo pulsar e quindi indirizza l'identificazione verso un'origine extragalattica, verosimilmente una blazar dietro il piano della Galassia. L'alternativa potrebbe essere un'origine galattica ma con nuove tipologie di sorgenti.

5.2 Ricerca della controparte X nella scatola di errore gamma

Il satellite BeppoSAX ha effettuato due osservazioni, in data 24 Settembre 1996 e 23 Dicembre 2000, con puntamento la sorgente candidata buco nero GS2023+338, conosciuta anche con il nome V404 Cygni. Nella prima osservazione sono disponibili solo i dati del MECS, mentre della seconda si hanno a disposizione i dati del LECS, MECS e PDS. In figura 5.3 mostriamo i campi LECS e MECS relativi a quest'ultima osservazione. Si nota subito

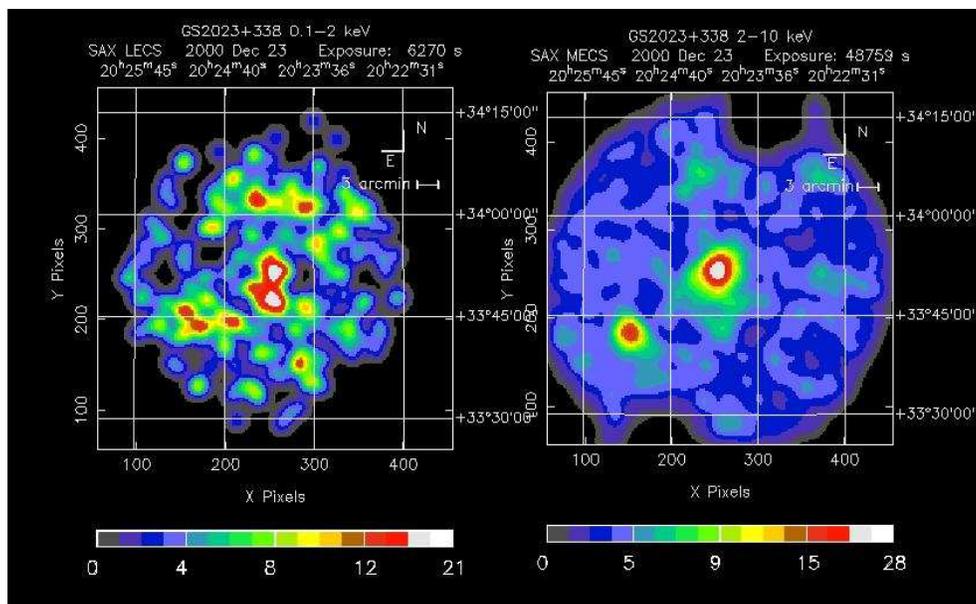


Figura 5.3: Campi BeppoSAX osservati: sulla sinistra il campo LECS, sulla destra quello MECS.

come nel campo MECS sono dettate due sorgenti. Quella in asse, al centro, è il puntamento SAX (il candidato buco nero GS2023+338), l'altra invece è localizzata a circa 25 arcmin di distanza ed è una sorgente di campo. Sovrapponendo il campo MECS ai contorni di confidenza della sorgente EGRET, come mostrato in figura 5.1, si può ben vedere come la sorgente al centro del campo (il candidato buco nero) si trova giusto all'esterno del contorno di confidenza al 99%, cosa che lo esclude dall'essere la controparte

X della EGRET. L'altra sorgente del MECS invece è visibilmente localizzata all'interno del contorno al 99% ed ha coordinate equatoriali (J2000) RA = 20h 25m 0.7s, Dec = +33° 42' 52" (l'incertezza associata alla posizione è 1 arcmin, 90% di livello di confidenza). Tale sorgente è visibile in entrambe le osservazioni MECS, mentre è marginalmente rivelata nella sola immagine disponibile del LECS (come si può vedere in figura 5.3). Ciò suggerisce uno spettro X duro, con la sorgente appena visibile alle basse energie (LECS, 0.1-2 keV) a causa di un elevato assorbimento, data la sua localizzazione sul piano galattico. A più alte energie (MECS, 2-10 keV), risentendo meno dell'assorbimento, la sorgente è invece ben visibile. Per indagare la parte di scatola di errore gamma non coperta dall'osservazione BeppoSAX, abbiamo utilizzato dati X di archivio (HEASARC). Abbiamo trovato che c'è stata una osservazione ROSAT puntata al candidato buco nero GS 2023+338, nel cui campo di vista sono state detettate 17 sorgenti riportate nel catalogo WGA (White, Giommi, Angelini 1994). La ricerca di sorgenti appartenenti ai due cataloghi RASS-BSC (Rosat All Sky Survey Bright Source Catalogue) e RASS-FSC (Rosat All Sky Survey Faint Source Catalogue) ha invece localizzato 5 oggetti, 3 dei quali sono anche sorgenti WGA. In definitiva ci sono in tutto 19 sorgenti X all'interno della scatola di errore gamma, riportate in figura 5.1 e listate in tabella 5.1 con le loro coordinate, la loro distanza dalle coordinate della sorgente 3EG, la loro tipologia, la loro eventuale controparte radio e il loro conteggio in fotoni al secondo. Per le sorgenti ROSAT Bright e Faint, il conteggio si riferisce a fotoni con energia compresa nella banda da 0.1 a 2.4 keV, mentre per le sorgenti ROSAT WGA la banda di energia va da 0.24 a 2 keV. Molte delle 19 sorgenti Rosat non sono identificate nei database Simbad e NED, fatta eccezione per 6 oggetti i quali sono associati a stelle normali; si tratta delle sorgenti numero 4, 9, 15, 19, 20. Solo una sorgente Rosat, precisamente la numero 13 in tabella, denominata WGA J2025.1+3342, è stata rivelata ad energie superiori a 2 keV e quindi detettata dal MECS. Coincide infatti con la sorgente X del campo, che è all'interno del box di errore gamma. Il conteggio dei fotoni Rosat per la sorgente WGA n.13 fornisce una stima del flusso di $\sim 10^{-13}$ erg cm⁻² s⁻¹ nella banda 0.05-2 keV; tale misura è compatibile con la detezione marginale di BeppoSAX a basse energie, dato il piccolo tempo di esposizione dello strumento LECS.

Da una "correlazione incrociata" delle 19 sorgenti Rosat con tutti i cataloghi radio disponibili (HEASARC) è risultato che solo due sorgenti sono radio emittenti: WGA n.11 (che è anche la sorgente RXS n.22) e WGA n.13, con un

Tabella 5.1: Sorgenti ROSAT presenti nella scatola di errore gamma

Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia	Controparte radio	
1	1WGA J2024.4+3437	20 24 25.90	+34 37 29.0	0.0135	31.542	-	No
2	1WGA J2024.5+3422	20 24 31.32	+34 22 44.0	0.0060	31.854	-	No
3	1WGA J2024.3+3445	20 24 18.90	+34 45 48.0	0.0275	35.057	-	No
4	1WGA J2025.4+3403	20 25 28.40	+34 03 06.0	0.0017	35.119	-	No
5	1WGA J2024.1+3418	20 24 08.20	+34 18 50.0	0.0024	37.692	-	No
6	1WGA J2026.2+3352	20 26 17.30	+33 52 52.0	0.0022	40.982	-	No
7	1WGA J2024.2+3406	20 24 15.90	+34 06 40.0	0.0046	42.523	-	No
8	1WGA J2026.0+3350	20 26 03.60	+33 50 24.0	0.0032	44.041	-	No
9	1WGA J2027.6+3344	20 27 38.00	+33 44 41.0	0.0080	49.036	-	No
10	1WGA J2026.3+3343	20 26 21.20	+33 43 54.0	0.0056	49.676	-	No
11	1WGA J2026.9+3343	20 26 57.50	+33 43 08.0	0.0918	49.873	-	SI
12	1WGA J2026.3+3340	20 26 19.00	+33 40 50.0	0.0066	52.775	-	No
13	1WGA J2025.1+3342	20 25 10.50	+33 43 00.0	0.0070	54.691	-	SI
14	1WGA J2025.9+3339	20 25 59.60	+33 39 14.0	0.0089	55.088	-	No
15	1WGA J2024.3+3347	20 24 23.50	+33 47 16.0	0.0009	55.741	-	No
16	1WGA J2024.9+3338	20 24 55.00	+33 38 05.0	0.0016	60.495	-	No
17	1WGA J2026.5+3330	20 26 35.00	+33 30 39.0	0.0098	62.526	-	No
18	1RXS J202427.2+343641 ^(a)	20 24 27.19	+34 36 41.0	0.0215	31.177	F	No
19	1RXS J202550.8+350938	20 25 50.80	+35 09 38.5	0.0144	39.120	F	No
20	1RXS J202635.2+331758	20 26 35.20	+33 17 58.5	0.0168	75.169	F	No
21	1RXS J202422.2+344631 ^(b)	20 24 22.20	+34 46 31.5	0.0500	34.699	B	No
22	1RXS J202658.5+334253 ^(c)	20 26 58.50	+33 42 53.0	0.0600	50.117	B	SI

Note: ^(a) = anche sorgente WGA: 1WGA J2024.4+3437 (sorgente n. 1 in tabella), ^(b) = anche sorgente WGA: 1WGA J2025.4+3445 (n. 3 in tabella), ^(c) = anche sorgente WGA: 1WGA J2026.9+3343 (n. 11 in tabella).

flusso radio a 20 cm di 5 mJy e 1268 mJy rispettivamente. Il primo oggetto (WGA n.11) è notevolmente meno brillante nel radio rispetto al secondo (WGA n.13) e quindi è improbabile che sia la controparte di una sorgente gamma. Tutte le altre sorgenti radio trovate all'interno della scatola di errore EGRET (HEASARC) sono troppo deboli per poter essere responsabili dell'emissione gamma (i loro flussi a 1.5 GHz e 5 GHz sono tutti inferiori a 200 mJy). In definitiva WGA J2025.1+3342 è non solo la sorgente X "dura" più forte nella scatola di errore EGRET, ma è anche la sorgente radio in assoluto più brillante. Nell'ottico, questa sorgente è stata recentemente osservata da Sowards-Emmerd et al. (2003) i quali hanno ottenuto il primo spettro e misurato un redshift $z=0.22$. Lo spettro mostra righe di emissione della serie di Balmer, tali da permettere la classificazione ottica della sorgente come quasar.

5.3 Osservazione BeppoSAX della sorgente WGA J2025.1+3342

La sorgente GS2023+338 è stata osservata da BeppoSAX in due puntamenti distanziati di circa quattro anni. I tempi effettivi di esposizione per lo strumento MECS sono stati, per la prima e per la seconda osservazione, rispettivamente di 21 e 48 ks (kilosecondi), mentre per l'altro strumento PDS i tempi sono stati di 10 e 21 ks. Il tempo di esposizione dell'unica osservazione LECS (la seconda) è pari a 6 ks. I fit spettrali dei dati a disposizione sono stati effettuati prendendo in considerazione una componente di assorbimento galattica, che nella direzione della sorgente è di $7.7 \times 10^{21} \text{ cm}^{-2}$ (ottenuta da dati radio a 21 cm e calcolata tramite XSPEC). Gli errori calcolati corrispondono ad un livello di confidenza del 90% con un parametro significativo (così per tutte le analisi spettrali BeppoSAX nel resto della tesi). La sorgente WGA J2025.1+3342 è ben rivelata, nell'intervallo energetico 2-10 keV, in entrambe le osservazioni MECS ad un livello di detezione rispettivamente di 13σ e 9σ , mentre è appena visibile nella sola immagine disponibile del LECS. Alle alte energie, nel regime del PDS, una detezione a 4σ è stata misurata solo nella seconda osservazione relativa all'anno 2000.

Come abbiamo detto nel paragrafo 3.4, lo strumento PDS, avente un campo di vista di 1.3° , non ha la capacità di fornire immagini e pertanto qualsiasi oggetto all'interno di questo campo può essere responsabile dell'emissione ad alta energia. A prima vista sarebbe naturale attribuire l'emissione rivelata

dal PDS al candidato buco nero e per controllare la veridicità di una tale supposizione abbiamo effettuato un'analisi spettrale combinando insieme i dati MECS di GS2023+338 con quelli ad alta energia del PDS. Questa sorgente si trovava in uno stato quiescente durante il tempo di osservazione BeppoSAX e il suo spettro X è ben rappresentato da una legge di potenza ($\Gamma_X \sim 1.9$) assorbita da una densità di colonna pari a quella galattica (Campana et al. 2001). Il fit di questo modello con i dati combinati MECS/PDS fornisce un valore di 15_{-18}^{+11} per la costante di cross calibrazione tra i due strumenti; questo valore è ben all'esterno dell'intervallo nominale (0.75-0.95) riportato da Fiore, Guainazzi & Grandi (1998). Inoltre il flusso estrapolato nella banda di energia del PDS (20-100 keV), dalla legge di potenza osservata tra 2-10 keV, è pari a 6.1×10^{-13} erg cm⁻² s⁻¹, che risulta inferiore al flusso misurato dal PDS. Entrambi questi risultati indicano fortemente che l'emissione rivelata dal PDS non è dovuta al candidato buco nero GS2023+338, o se lo è risulta essere fortemente contaminata dalla presenza di un'altra sorgente X nel campo di vista del PDS. Abbiamo allora cercato, attraverso i database HEASARC, possibili sorgenti ad alta energia localizzate all'interno del campo del PDS ma fuori dal campo MECS, e non è stato trovato nessun oggetto che potesse essere considerato responsabile dell'emissione di raggi X "duri".

Alla luce di tutti questi risultati abbiamo assunto che l'emissione ad alta energia, o una buona parte di essa, proviene dall'altra sorgente X presente nel campo del MECS, già identificata come sorgente X da Rosat con la sigla WGA J2025.1+3342. Sono stati allora fittati contemporaneamente i dati MECS di questa sorgente e quelli del PDS. Lo spettro tra 2-10 keV relativo alla prima osservazione è rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_X = 1.41_{-0.41}^{+0.45}$ (tenuto conto dell'assorbimento galattico) e fornisce un flusso non assorbito tra 2-10 keV di $\sim 3 \times 10^{-12}$ erg cm⁻² s⁻¹ ed una luminosità corrispondente (assumendo il redshift riportato da Sowards-Emmerd et al. (2003) ed assumendo $H_0 = 50$ e $q_0 = 0$) di $\sim 7 \times 10^{44}$ erg s⁻¹. Abbiamo poi considerato la seconda osservazione (quella con il PDS) e controllato la costante di cross calibrazione MECS/PDS, la quale è risultata essere 1.5 ± 1 e quindi compatibile all'interno degli errori con il range nominale aspettato (0.75-0.95). Nella successiva analisi abbiamo imposto alla costante di variare tra 0.75-0.95. Lo spettro a banda larga (1-100 keV) della sorgente per la seconda osservazione è ben rappresentato da una legge di potenza dura con indice fotonico $\Gamma_X = 0.63_{-0.25}^{+0.21}$; inoltre esiste l'evidenza marginale di una riga intorno a 5 keV visibile nei residui del rapporto dati/modello (vedi figura 5.4).

Quando nel sistema di riferimento della sorgente ($z=0.22$) aggiungiamo una riga gaussiana al modello a legge di potenza, il fit migliora leggermente. La riga è richiesta ad un livello di confidenza del 72% usando il F-test, è centrata a ~ 6 keV ed ha una larghezza equivalente di $EW=780^{+621}_{-580}$ eV. In figura 5.4 mostriamo il fit dello spettro a larga banda relativo alla seconda osservazione BeppoSAX. I flussi corretti per l'assorbimento galattico sono 7.4×10^{-13} erg

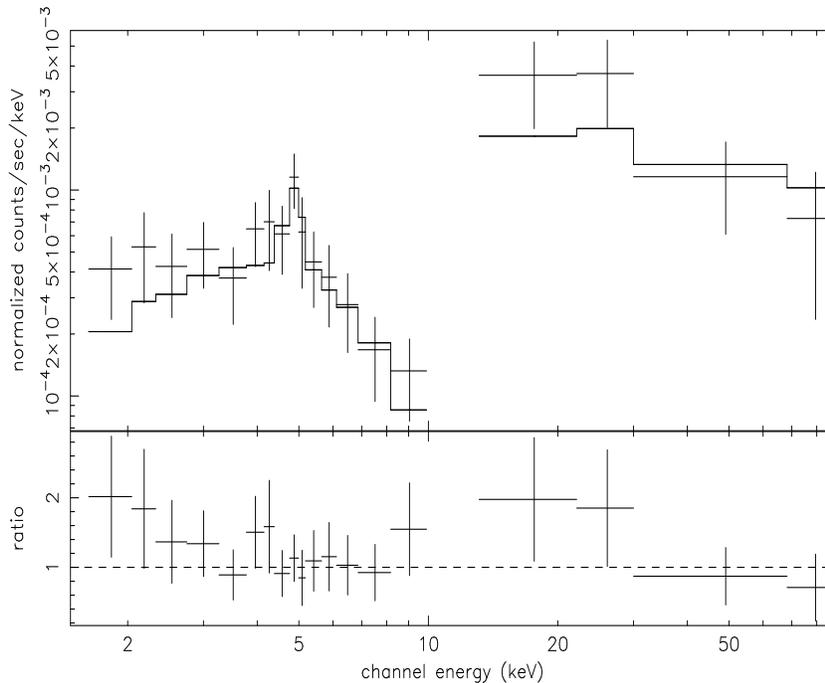


Figura 5.4: Fit spettrale BeppoSax a banda larga (1-100 keV) di WGA J2025.1+3342, relativo alla seconda osservazione

$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ e $1.6 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ per gli intervalli energetici 2-10 e 20-100 keV rispettivamente. Le corrispondenti luminosità sono 1.4×10^{44} e $3.1 \times 10^{45} \text{ erg s}^{-1}$. In conclusione possiamo affermare che la sorgente è altamente luminosa in X e varia sia in intensità che in forma spettrale a queste energie.

5.4 Caratteristiche globali della sorgente

In questo paragrafo analizzeremo le caratteristiche spettrali a banda larga della sorgente WGA J2025.1+3342, da noi proposta come la controparte X di 3EG J2027+3429, e mostreremo che tale sorgente EGRET è una blazar dietro il piano della galassia.

Innanzitutto la sorgente gamma 3EG J2027+3429 è variabile, in accordo con l'ipotesi blazar e in contrasto con un'origine pulsar; inoltre il suo indice

spettroale fotonico pari a $\Gamma_\gamma=2.28\pm 0.15$ è compatibile con quello medio di tutte le blazar gamma fino ad ora identificate e significativamente diverso dall'indice spettroale delle pulsar, pari a $\Gamma_\gamma < 2$.

La controparte da noi proposta è una forte sorgente radio rivelata da 0.33 a 10 GHz come riportato in tabella 5.2. Dai flussi radio listati abbiamo calcolato un indice energetico, per l'andamento a legge di potenza, pari a $\alpha_r=-0.3$. Tale valore di α_r conferma la natura di sorgente a spettro radio piatto come già indicato in NED, dove è riportato un valore per α_r pari a -0.2. Dato che le FSRQ hanno un $\alpha\leq 0.5$ (con $F(\nu) \propto \nu^{-\alpha}$) possiamo dire che la sorgente è ovviamente di questo tipo. Inoltre utilizzando il metodo elaborato da Mattox et al. (1997, 2001) abbiamo calcolato la probabilità di associazione di tale blazar con 3EG J2027+3429, risultata pari al 55%. Sebbene tale valore non sia grande abbastanza da considerare l'associazione altamente probabile (Mattox et al. 1997 richiedono almeno il 70%), esso risulta sufficientemente sicuro, specialmente se si considerano tutte le evidenze osservative da noi raccolte.

Alle frequenze ottiche la sorgente è troppo debole e quindi non è riportata nel catalogo USNO A2.0 (Urban et al. 1997). Comunque dati spettrali nell'intervallo 5000-10000 Angstrom sono forniti da Sowards-Emmerd et al. (2003) e possono essere usati per circoscrivere le proprietà ottiche della sorgente.

Abbiamo anche cercato la controparte della sorgente in cataloghi infrarossi. Ci sono diversi oggetti 2MASS all'interno della scatola di errore ROSAT ma nessuno di questi è associabile all'oggetto radio, come mostrato in figura 5.5. Considerando i flussi più bassi rivelati nella regione di figura 5.5 come nostra soglia di sensibilità, abbiamo calcolato i limiti superiori di emissione (upper limit) per le bande J, H, K rispettivamente. Inoltre, come riportato in figura 5.5, all'interno della scatola di errore X Rosat ci sono anche una sorgente infrarossa MSX (Midcourse Space Experiment) ed una IRAS, ma la loro incertezza posizionale esclude coincidenze con l'oggetto radio. Abbiamo a questo punto usato i flussi infrarossi più bassi rivelati in una regione di circa un grado attorno alla nostra sorgente come limite di sensibilità per dedurre i limiti superiori all'emissione infrarossa nella regione 12-100 μm . Tutti questi upper limit infrarossi sono riportati in tabella 5.3.

Sebbene non ottenuti simultaneamente, tutti i dati disponibili alle varie lunghezze d'onda sono stati plottati in figura 5.6 per riprodurre la distribuzione di energia spettrale (SED) di 3EG J2027+3429; i limiti superiori infrarossi indicati sono relativi ai dati IRAS, mentre quelli 2MASS e MSX non sono

Tabella 5.2: sorgenti radio associate con 1WGA J2025.1+334

Sorgente radio	RA (J2000)	Dec J(2000)	Flusso mJy	distanza arcmin	Catalogo radio
1 NVSS J202510+334300	20 25 10.80	+33 43 00.00	1268 (20 cm)	0.07	NVSS
2 2023+3333	20 25 09.85	+33 43 22.60	2104 (6 cm)	0.40	6cm RC
3 WN 2023.2+3333	20 25 10.85	+33 43 01.40	982 (92 cm)	0.07	WNSS
4 TXS 2023+335	20 25 10.84	+33 43 00.93	1121 (82 cm)	0.07	TXS
5 J2025+3343	20 25 10.94	+33 43 00.21	2728 (3.5cm)	0.07	CLASS

Tabella 5.3: Limiti superiori infrarossi misurati

	lunghezza d'onda (μm)	Upper Limits ($\text{erg cm}^{-2} \text{s}^{-1}$)
1	IRAS 12	5.06×10^{-11}
2	IRAS 25	1.57×10^{-11}
3	IRAS 60	2.92×10^{-11}
4	IRAS 100	1.50×10^{-10}
5	MSX 8	2.99×10^{-11}
6	2MASS (J) 1.25	7.19×10^{-13}
7	2MASS (K) 2.2	5.11×10^{-13}
8	2MASS (H) 1.65	9.46×10^{-13}

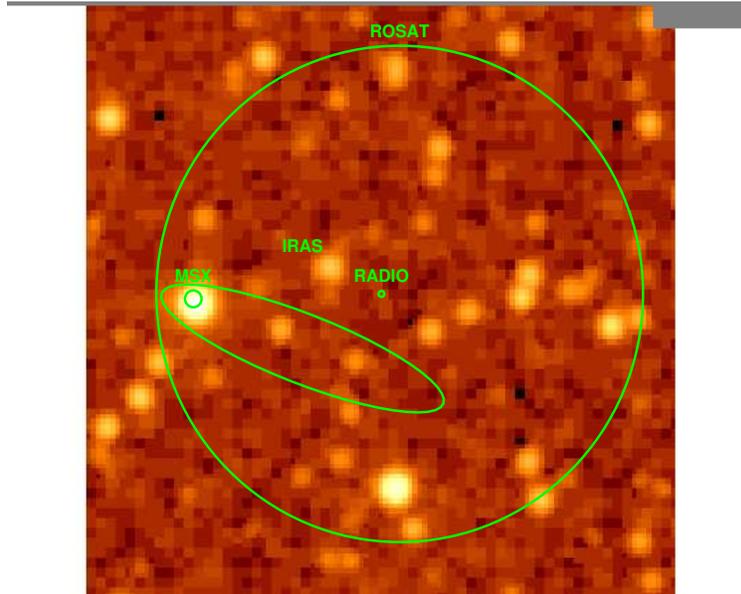


Figura 5.5: È riportato in figura il campo infrarosso 2MASS (banda J) sovrapposto alla scatola di errore della sorgente ROSAT WGA J2025.1+3342. Sono indicate le scatole di errore degli altri oggetti presenti all'interno del box di errore ROSAT, in particolare la sorgente radio controparte di quella ROSAT e le due sorgenti infrarosse MSX e IRAS.

riportati poichè troppo vicini ai dati ottici. Nello scenario ampiamente accettato delle blazar (vedi paragrafo 1.4.1), una popolazione di elettroni altamente energetici in un getto relativistico è responsabile dell'emissione dal

radio/FIR fino al UV-X “molli” tramite sincrotrone, mentre alle frequenze più alte l’emissione è dovuta a Compton inverso di fotoni “seme” presenti nel getto (modello synchrotron self-compton), nel mezzo circostante (modello Compton external) o in entrambi (Ghisellini et al. 1998). Conseguentemente, la SED delle blazar è caratterizzata da due picchi dovuti alle due componenti sincrotrone e Compton. Questo quadro è chiaramente compatibile con la SED da noi ricostruita per la sorgente 3EG J2027+3429 e mostrata in figura 5.6. Il primo picco è localizzato nella regione compresa tra la banda millimetrica e il lontano infrarosso mentre il secondo è nella banda gamma “soft”. Si noti inoltre che la radiazione X-gamma domina l’emissione totale. La sorgente da noi considerata ha pertanto le caratteristiche per essere classificata come una red Blazar o una LBL (Low frequency peaked) Blazar. Le caratteristiche spettrali riscontrate (picco della componente sincrotrone a basse energie ed emissione gamma “soft” predominante) sono tipiche di sorgenti a spettro radio piatto (FSQR), quindi pienamente compatibili con la classificazione ottica e le caratteristiche radio dell’oggetto proposto come controparte di 3EG J2027+3429.

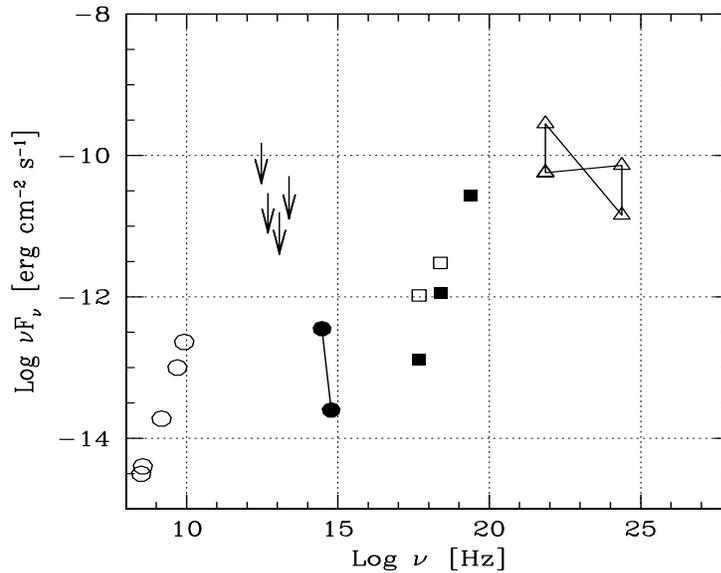


Figura 5.6: Distribuzione di energia spettrale (SED) della sorgente 3EG J2027+3429. I cerchietti vuoti si riferiscono ai dati radio, quelli pieni a dati ottici, i quadratini sono le nostre misure BeppoSAX (i quadratini pieni sono relativi alla seconda osservazione, quelli vuoti alla prima), i triangoli si riferiscono ai dati EGRET. Le frecce indicano i limiti superiori infrarossi IRAS a $12\mu\text{m}$, $25\mu\text{m}$, $60\mu\text{m}$, $100\mu\text{m}$.

5.5 Conclusioni

In conclusione, dall'analisi dei dati di archivio infrarossi, radio, ottici, gamma e dalla nostra analisi spettroscopica X, affermiamo che la sorgente EGRET 3EG J2027+3429 è una blazar. Lo spettro X dell'oggetto in questione, da pochi keV fino a 100 keV, è piatto ($\Gamma_X=0.6-1.5$) e altamente variabile sia in forma che in intensità. La sua SED conferma la natura di blazar ed è compatibile con la classificazione di FSRQ.

Tale identificazione è interessante poichè la sorgente è sul piano galattico ed è la seconda trovata nella regione di Cigno. Infatti recentemente Halpern et al. (2001) hanno identificato la sorgente radio tipo blazar G74.87+1.22 come la controparte di 3EG J2016+3657 localizzata anch'essa sul piano galattico nella regione Cigno. La probabilità di trovare due-tre blazar EGRET entro 3° dal piano galattico può essere stimata dal numero (66) di blazar ad alta affidabilità catalogate nel 3EG (Hartman et al. 1999). Si ottiene così un numero di due blazar entro $-2.4^\circ < b < +2.4^\circ$. Quindi, non dovremmo essere molto sorpresi di averne trovata un'altra, sebbene è piuttosto strano che entrambe si trovino nella regione di Cigno.

Capitolo 6

Sorgenti EGRET non identificate ad alta latitudine

In questo capitolo ci occuperemo delle sorgenti EGRET del nostro campione, localizzate ad alta latitudine galattica. Le sorgenti in questione sono 3EG J1234-1318, 3EG J1212+2304 e 3EG J1621+8203.

6.1 3EG J1234-1318

3EG J1234-1318 è stata rivelata da EGRET con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=5.2$) nel periodo di osservazione che va dal 22 Dicembre 1992 al 12 Gennaio 1993 (VP=Virgo2, dato dalla somma dei tre VP numero 204, 205 e 206). Il suo flusso medio è pari a $F=(21.6\pm 5.3) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, a $E > 100$ MeV. Lo spettro tra 30 MeV e 30 GeV è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma = 2.09 \pm 0.24$. La sorgente è localizzata ad alta latitudine galattica ($b=49.3^\circ$) ed il raggio del contorno di confidenza al 95% della sua scatola di errore è pari a 45.6 arcmin. Per quel che riguarda il comportamento variabile o non variabile di 3EG J1234-1318, ci troviamo di fronte ad una situazione dubbia e non definibile, dato che i valori dei due indici I e τ rientrano nel caso di incertezza, mentre quello di V indica non variabilità. 3EG J1234-1318 presenta la particolarità di essere una sorgente gamma GeV, pertanto è conosciuta anche con il nome GEV J1231-1357. Lamb e Macomb (1997), considerando tutte le sorgenti rivelate dallo strumento EGRET a $E > 100$ MeV (sia identificate che non), hanno selezionato quelle con fotoni a $E > 1$ GeV e creato un catalogo di 57 sorgenti gamma altamente energetiche denominate con la sigla GEV. Di tali sorgenti 30 non sono identificate mentre le restanti 27 lo sono (21 sono blazar, 5 pulsar e 1 è la grande nube di Magellano). Diversi sono i vantaggi che comporta la scelta di considerare

sorgenti GEV. Innanzitutto il fondo gamma diffuso del piano galattico è più basso ad alte energie ed è pertanto possibile che una popolazione di sorgenti gamma galattiche, relativamente “dura“ e nascosta a $E > 100$ MeV dal fondo, diventi visibile ad energie maggiori. Inoltre la dipendenza della PSF dall’energia è tale che ad 1 GeV la risoluzione angolare dello strumento EGRET è circa 3.4 volte migliore di quella a $E > 100$ MeV (Thompson et al. 1993). Ciò migliora la scatola di errore per la sorgente GEV, rendendola più piccola rispetto a quella relativa alla stessa sorgente catalogata come 3EG a energie inferiori ($E > 100$ MeV). Il flusso di 3EG J1234-1318 a $E > 1$ GeV è pari a $(1.7 \pm 0.5) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

In figura 6.1 mostriamo i contorni di confidenza di 3EG J1234-1318, sovrapposti al campo MECS di BeppoSAX. Sono inoltre indicate tutte le sorgenti X presenti nella scatola di errore.

6.1.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto tre osservazioni della sorgente BL Lac 1RXS J123511.1-140332, già conosciuta essere presente all’interno della scatola di errore di 3EG J1234-1318. In effetti, come si può ben vedere in figura 6.1, il BL Lac è localizzato tra i contorni di confidenza al 95% e 99%. Scopo dell’osservazione X è stato quello di provare a sfruttare la buona qualità degli spettri di BeppoSAX su ampia banda (con l’eventuale inclusione di detezione del PDS) per dimostrare l’associazione del BL Lac con 3EG J1234-1318.

Per indagare la parte di box d’errore gamma non coperta dall’osservazione BeppoSAX, abbiamo usato dati X di archivio (HEASARC). Tutte le sorgenti trovate sono listate in tabella 6.1, con le loro coordinate, il conteggio di fotoni (nella banda 0.1-2.4 keV), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Bright B, Rosat Faint F). La ricerca effettuata ha individuato un totale di 10 sorgenti X, 8 delle quali sono Rosat del tipo F mentre le restanti 2 sono Rosat B. La sorgente X più forte (Rosat B n.2) è stata identificata con una stella di tipo spettrale G1/G2V (Schwope et al. 2000) e quindi può essere esclusa dall’essere responsabile dell’emissione gamma osservata, mentre l’altra Rosat B (n.1) 1RXS J123511.1-140332 è invece il BL Lac. Un’indagine multifrequenza del box di errore X (HEASARC) delle sorgenti Rosat F n.3, n.4, n.7, n.8, n.9, n.10 suggerisce che si potrebbe trattare di stelle, dato che l’unico oggetto ivi presente è appartenente proprio a questa tipologia. Tali sorgenti quindi possono essere escluse.

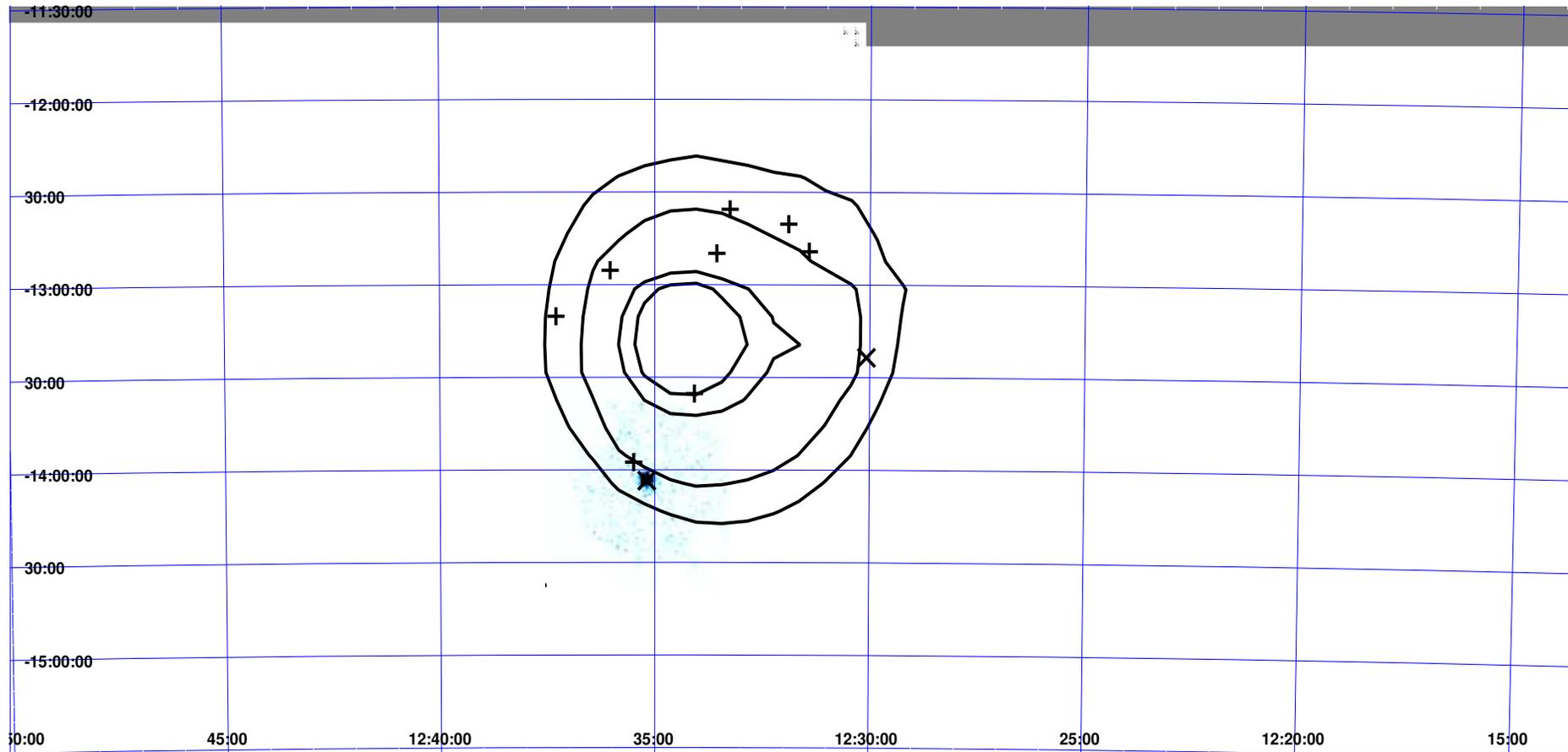


Figura 6.1: Campo MECS (2-10 keV) di BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1234-1318. Sono indicate inoltre tutte le sorgenti X presenti: le x sono le sorgenti ROSAT brillanti (Bright), le croci sono le ROSAT deboli (Faint).

Tabella 6.1: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J123511.1-140332	12 35 11.1	-14 03 32.0	0.1000	49.207	B
2	1RXS J123004.7-132334	12 30 04.7	-13 23 34.0	0.6200	50.909	B
3	1RXS J123404.6-133519	12 34 04.6	-13 35 19.0	0.0227	16.713	F
4	1RXS J123333.5-124952	12 33 33.5	-12 49 52.0	0.0350	30.533	F
5	1RXS J123602.1-125522	12 36 02.1	-12 55 22.0	0.0214	43.974	F
6	1RXS J123124.8-124916	12 31 24.8	-12 49 16.5	0.0450	44.187	F
7	1RXS J123315.2-123536	12 33 15.2	-12 35 36.5	0.0293	45.016	F
8	1RXS J123529.4-135732	12 35 29.4	-13 57 32.5	0.0324	46.593	F
9	1RXS J123153.5-124022	12 31 53.5	-12 40 22.5	0.0413	46.867	F
10	1RXS J123717.8-131014	12 37 17.8	-13 10 14.0	0.0348	55.495	F

Il BL Lac 1RXS J123511.1-140332 é la sola sorgente Rosat a possedere una controparte radio, infatti nel suo box di errore X è presente una radiosorgente il cui flusso a 20 cm è tuttavia estremamente basso (4 mJy), contrariamente a quanto osservato generalmente per le blazar. Infine le sorgenti Rosat Faint n.5 e n.6 sono non identificate e non hanno controparte radio.

Alla luce di queste considerazioni, il migliore candidato responsabile dell'emissione gamma sembrerebbe essere il BL Lac. Riassumendo, si tratta infatti della sorgente X più forte presente nel box di errore EGRET (una volta esclusa la Rosat B n.2 che è una stella), ed è l'unica fra tutte le sorgenti X presenti a possedere una controparte radio anche se molto debole, cosa piuttosto insolita per una blazar.

6.1.2 Osservazione BeppoSAX del BL Lac 1RXS J123511.1-140332

Il BL Lac 1RXS J123511.1-140332, il cui redshift è pari a $z=0.406$, è stato osservato da BeppoSAX in tre puntamenti il 27 Giugno 1999, 10 Luglio 1999 e 16 Luglio 1999. In nessuna di queste osservazioni vi è stata detezione da parte dello strumento PDS, mentre la sorgente è ben rilevata sia con il LECS che con il MECS in tutti e tre i puntamenti. La significatività registrata tra 2-10 keV (MECS) è di rispettivamente 16σ , 9σ e 14σ , mentre tra 0.1-2 keV (LECS) è di rispettivamente 9σ , 6σ e 8σ . I tempi di esposizione sono stati per il LECS e per il MECS rispettivamente di 5.388 ks, 2.416 ks, 6.390 ks e di 14.273 ks, 4.497 ks, 13.486 ks. In figura 6.2 mostriamo i campi MECS e LECS relativi all'osservazione del 16 Luglio 1999. Risulta evidente come l'unica sorgente, ben presente al centro di entrambi i campi, è il BL Lac.

Giommi et al. (2002) hanno presentato un catalogo di spettri X e di SED

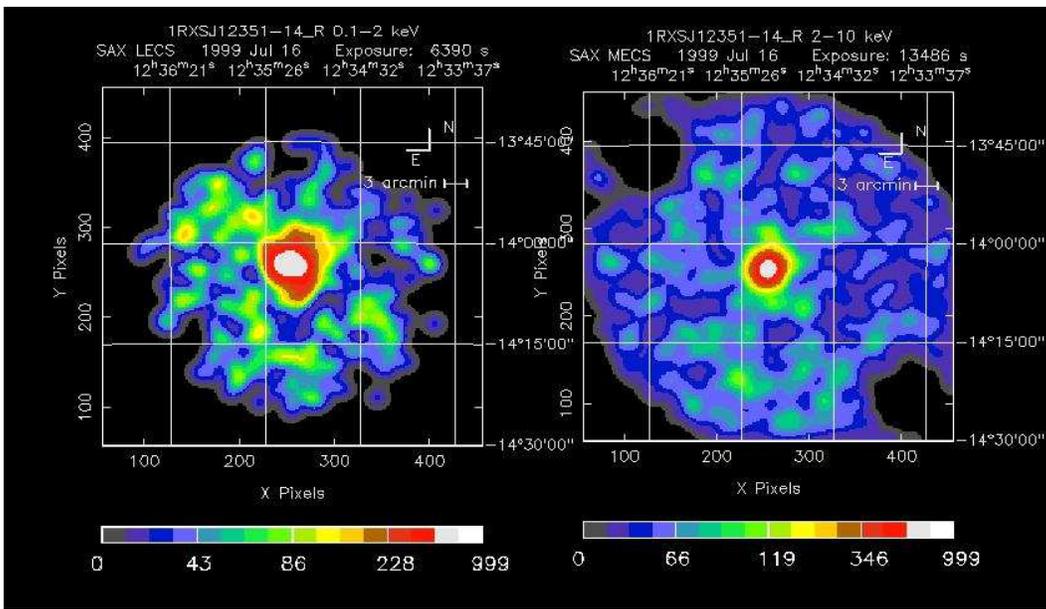


Figura 6.2: Campo LECS (sulla sinistra) e campo MECS (sulla destra) relativi all'osservazione BeppoSAX del 16 Luglio 1999 di 1RXS J123511.1-140332

relativi a 84 blazar osservate con BeppoSAX, tra le quali figura anche il BL Lac in questione. L'analisi spettrale di questa sorgente è stata effettuata combinando i dati LECS (0.3-2 keV) e MECS (2-10 keV). Il modello spettrale usato con il pacchetto software XSPEC 11.0 è stato quello di parabola logaritmica

$$dN/dE = K e^{-\sigma(E)N_H} E^{(-\gamma+\beta \text{Log}(E))}$$

dove γ è l'indice fotonico spettrale a 1 keV, mentre β è il coefficiente del termine quadratico della parabola logaritmica

$$\text{Log}(dN/dE) = \text{Log}(K) - \gamma \text{Log}(E) + \beta (\text{Log}(E))^2$$

ed è proporzionale al cambiamento della pendenza in una decade di energia. Rispetto ad altri modelli, questo ha il vantaggio di rappresentare bene la curvatura spettrale che spesso è stata vista negli spettri a banda larga delle blazar con soli tre parametri. La quantità N_H , relativa al termine di assorbimento a bassa energia $e^{-\sigma(E)N_H}$, è stata fissata al valore galattico stimato dalle misure a 21 cm di Dickey e Lockman (1990). I risultati dell'analisi spettrale forniscono, per l'osservazione relativa al 27 Giugno 1999, i valori $\gamma=1.6\pm 0.7$ e $\beta=-0.8\pm 0.7$, con un $\chi^2/\text{d.o.f.}=0.63$ (d.o.f. sta per gradi di libertà) ed un flusso nella banda 2-10 keV pari a $1.9 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Per l'osservazione del 16 Luglio 1999 si ha invece $\gamma=2.8\pm 0.5$ e $\beta=-0.4\pm 0.5$, con un $\chi^2/\text{d.o.f.}=0.40$ ed un flusso nella banda 2-10 keV pari a $1.6 \times 10^{-12} \text{ erg}$

$\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Mostriamo in figura 6.3 la SED del BL Lac, da noi ricostruita usando i dati MECS (2-10 keV) e i dati fotometrici non simultanei di archivio (HEASARC), alle frequenze radio e ottiche. Abbiamo considerato anche i dati gamma EGRET, allo scopo di vedere come si dispongono nella SED. Come si può ben

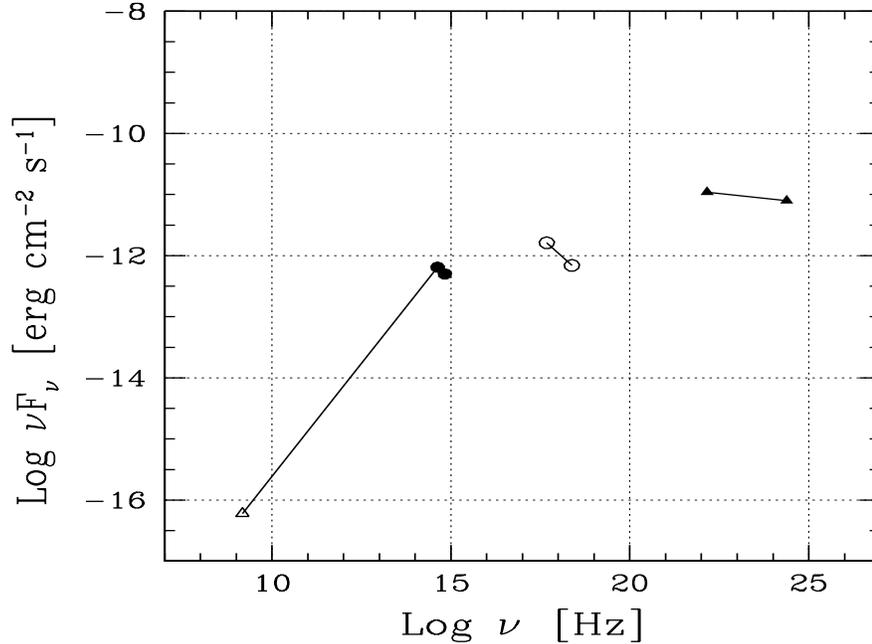


Figura 6.3: Distribuzione di energia spettrale del BL Lac 1RXS J123511.1-140332. I pallini vuoti si riferiscono alle misure MECS BeppoSAX, quelli pieni invece a dati ottici USNO di archivio. I triangoli pieni si riferiscono ai dati EGRET mentre quelli vuoti a misure radio, entrambe di archivio

vedere dalla figura, ci sono evidenze del primo picco (quello sincrotrone) nella banda UV-X. Si deve trattare quindi di un BL Lac del tipo HBL (High energy peaked), con il secondo picco (quello Compton) localizzato conseguentemente nella banda GeV-TeV. Ciò tuttavia non è in accordo con la nostra SED alle alte energie in quanto i dati gamma non sembrano disporsi in modo tale da riprodurre il picco Compton.

6.1.3 Caratteristiche globali della sorgente

In questo paragrafo utilizzeremo tutti gli indizi raccolti per escludere o confermare l'associazione del BL Lac con 3EG J1234-1318.

Innanzitutto alcune caratteristiche della sorgente EGRET in questione, come

l'alta latitudine galattica ($b=49.3^\circ$) e lo spettro a legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.09\pm 0.2$, suggeriscono un'origine extragalattica. Tuttavia, altri indizi raccolti contrastano fortemente con un'ipotesi di questo tipo. In primis il comportamento variabile/non variabile della sorgente EGRET non è definibile, inoltre il BL Lac non è una forte radiosorgente compatta, dato che il suo flusso radio a 20 cm è di soli 4 mJy. Entrambi questi aspetti fanno venir meno le due caratteristiche più importanti (variabilità e forte emissione radio) dell'associazione blazar-EGRET. Il fatto che un BL Lac, presente nella scatola di errore di una sorgente EGRET non identificata, non sia responsabile dell'emissione gamma può risultare piuttosto strano, soprattutto considerando che si tratta della sorgente X in assoluto più forte fra tutte quelle presenti nel box di errore e l'unica a possedere una controparte radio. Una soluzione a questa situazione piuttosto strana, con alcuni indizi a favore del BL Lac e altri invece contrari, potrebbe essere che il BL Lac in questione sia piuttosto "atipico" rispetto alle "classiche" blazar-EGRET. Condividerebbe con quest'ultime alcune caratteristiche (emissione X, spettro gamma, alta latitudine galattica), mentre per altre se ne differenzia e discosta (flusso radio e variabilità).

Il fatto che il BL Lac sia una radiosorgente modesta, ci ha spinto ad indagare sulla presenza di sorgenti radio ben più forti all'interno della scatola di errore gamma. Mattox et al. (2001) hanno individuato, tra i contorni EGRET di confidenza al 95% e 99%, la sorgente radio compatta del tipo blazar denominata PMN J1231-1236. I suoi flussi sono 211 mJy e 276 mJy rispettivamente a 6 cm (5 GHz) e 20 cm e pertanto si tratta dell'oggetto radio più forte. Mattox et al. (2001) tuttavia stimano la probabilità di una sua associazione con la EGRET come estremamente bassa. In effetti i flussi radio di PMN J1231-1236 non sono elevati quanto quelli delle sorgenti radio compatte del tipo blazar-gamma fino ad oggi individuate (tipicamente ≥ 1 Jy). Inoltre da una ricerca con HEASARC non risulta associata nessuna sorgente X a PMN J1231-1236, come ci si dovrebbe aspettare nel caso di una blazar gamma. L'origine extragalattica del tipo AGN per la sorgente 3EG J1234-1318 è quindi piena di incongruenze, con alcuni indizi a favore ed altri contro.

Come abbiamo già detto precedentemente, la sorgente EGRET in questione è anche una sorgente GeV. È riportata nel catalogo di Lamb e Macomb (1997) con coordinate galattiche $b=295.5^\circ$ $l=48.63^\circ$, il raggio per il contorno di confidenza al 95% è pari a 29.2 arcmin. Tale valore è inferiore (di circa 15 arcmin) rispetto a quello del raggio della stessa sorgente catalogata come

3EG. Nella scatola di errore della sorgente GEV, più piccola di quella della 3EG, il BL Lac non è contenuto (come anche la radiosorgente PMN J1231-1236) pertanto è improbabile possano essere responsabili dell'emissione gamma osservata.

Una volta appurate le difficoltà dell'identificazione di 3EG J1234-1318 con le due uniche categorie di oggetti celesti fino ad ora conosciute essere gamma emittenti (blazar e pulsar), è lecito chiedersi di quale altro tipo può essere la sua controparte. Quello che oggi si può fare, in attesa dei risultati di future missioni (GLAST e AGILE), è ipotizzare scenari alternativi. Citiamo a tal proposito il lavoro di Kawasaki e Totani (2002), i quali propongono l'interazione tra coppie di ammassi di galassie come un potenziale meccanismo di emissione gamma, all'origine di sorgenti EGRET non identificate, non variabili ed ad alta latitudine galattica. In questo meccanismo un ruolo importante lo avrebbero gli elettroni altamente energetici presenti nel mezzo interammasso. La loro presenza si manifesta attraverso emissione diffusa, sia radio che X-dura, rilevata dagli ammassi. La sorgente EGRET 3EG J1234-1318 è citata nel lavoro di Kawasaki e Totani in quanto nella sua scatola di errore è presente una coppia di ammassi di galassie, ABELL 1558 e ABELL 1555.

Tale teoria può considerarsi al momento speculativa, non tanto per la sua validità o non, quanto per l'impossibilità di testarla con i dati a disposizione. Non si può escludere tuttavia che i dati di future missioni spaziali possano permetterne una verifica.

6.2 3EG J1212+2304

La sorgente EGRET in questione è stata rivelata da EGRET durante diversi VP, quasi sempre con una bassa significatività statistica. È durante il VP=204.0 (dal 22 al 29 Dicembre 1999) che è stata dettata con la più alta significatività ($\sqrt{TS}=4.4$) e con un flusso medio pari a $F_{204.0}=(50.8\pm 16.6) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. Il suo spettro tra 30 MeV e 30 GeV è ben rappresentato da una legge di potenza con indice spettrale fotonico $\Gamma_\gamma=2.76\pm 0.6$. La sorgente è localizzata ad alta latitudine galattica ($b=80.34^\circ$) e, come già spiegato nel paragrafo 4.2.2, può essere considerata variabile. La sua scatola di errore è piuttosto grande, con un contorno al 95% di forma circolare e raggio pari a 50.8 arcmin. In figura 6.4 mostriamo tutti i contorni di confidenza della sorgente sovrapposti al campo MECS BeppoSAX.

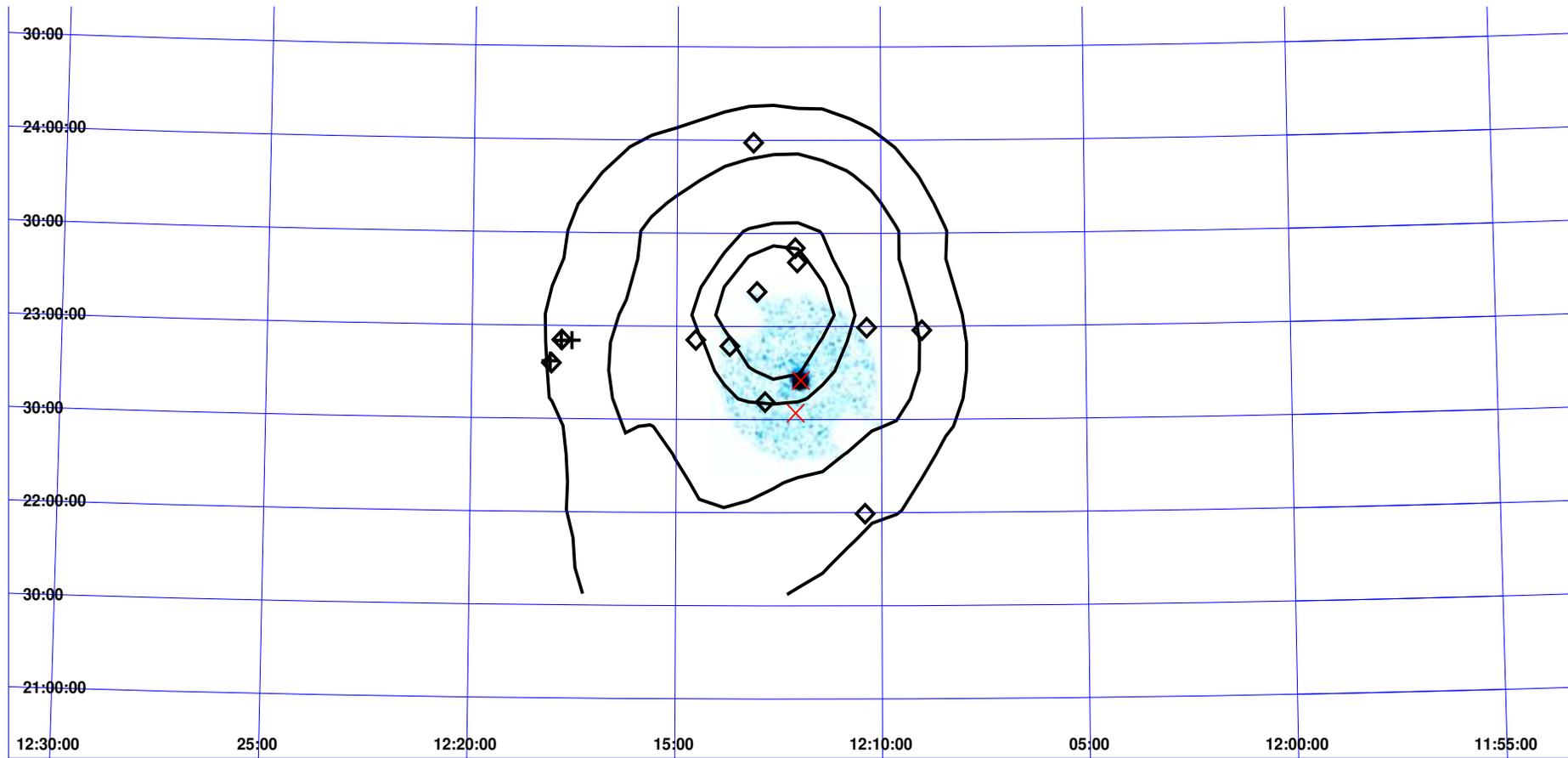


Figura 6.4: Campo MECS (2-10 KeV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1212+2304. Sono indicate tutte le sorgenti X pesenti: i rombi si riferiscono alle sorgenti Rosat Faint, le x alle Rosat Bright e le croci alle Rosat WGA.

6.2.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto tre osservazioni della sorgente BL Lac RXSJ121158+2242, già conosciuta essere presente all'interno della scatola di errore di 3EG J1212+2304. In effetti, come si può ben vedere in figura 6.4, il BL Lac è localizzato tra i contorni di confidenza al 50% e 68%, al centro del campo MECS. Scopo dell'osservazione X è stato quello di provare a sfruttare la buona qualità degli spettri ad ampia banda (con l'eventuale detezione del PDS) per dimostrare l'associazione del BL Lac con 3EG J1212+2304.

Per indagare la parte di box d'errore gamma non coperta dall'osservazione BeppoSAX, abbiamo utilizzato dati X di archivio (HEASARC). Tutte le sorgenti trovate sono listate in tabella 6.2, con le loro coordinate, il conteggio in fotoni al secondo (nella banda 0.1-2.4 keV per le Rosat F e B, nella banda 0.24-2 keV per le Rosat WGA), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Bright B, Rosat Faint F, Rosat WGA). Abbiamo individuato un totale di 17 sorgenti X; 12 sono Rosat del tipo F, 2 del tipo B e le restanti 3 Rosat WGA. Sono tutte indicate in figura 6.4 con simboli diversi. La sorgente X in assoluto più forte è la Rosat B n.2, identificata con il BL Lac. Invece la Rosat B n.1 è stata identificata (SIMBAD) con l'oggetto celeste variabile CC Com, una binaria ad eclisse del tipo W Ursae Majoris. In oggetti di quest'ultimo tipo, l'emissione X proviene dalla cromosfera e dalla corona stellare ed è pertanto inverosimile che possano essere in grado di produrre fotoni gamma. È da tener presente che le sorgenti X n.12 (F) e n.16 (WGA) sono in realtà lo stesso oggetto con due designazioni differenti, analogamente per quelle n.13 (F) e n.17 (WGA). Tale sorgenti non sono identificate. Dall'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X è emerso che le sorgenti Rosat F n.5, n.8, n.9, n.10 e n.11 potrebbero essere stelle, dato che l'unico oggetto ivi presente appartiene a questa tipologia. Le restanti otto sorgenti infine sono non identificate. Abbiamo investigato il box di errore di tutte le sorgenti X, utilizzando i cataloghi radio disponibili presso HEASARC. È risultato che solo una di esse ha controparte radio, il BL Lac 1RXSJ121158+2242. Il suo flusso però è piuttosto basso (20 mJy a 20 cm), cosa piuttosto insolita e strana per una blazar.

Alla luce delle considerazioni sopra esposte, il migliore candidato responsabile dell'emissione gamma sembrerebbe essere il BL Lac 1RXS J121158.1+224236. Infatti è la sorgente X in assoluto più forte, ed è l'unica fra tutte quelle presenti nel box di errore EGRET a possedere una controparte radio, sebbene

Tabella 6.2: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J121205.5+223207	12 12 05.5	+22 32 07.0	0.08	35.428	B
2	1RXS J121158.1+224236	12 11 58.1	+22 42 36.0	0.41	26.318	B
3	1RXS J121302.2+231111	12 13 02.2	+23 11 11.0	0.0292	5.850	F
4	1RXS J121342.1+225339	12 13 42.1	+22 53 39.5	0.0096	17.143	F
5	1RXS J121203.2+232039	12 12 03.2	+23 20 39.0	0.0108	18.227	F
6	1RXS J121206.1+232516	12 12 06.1	+23 25 16.5	0.0198	21.796	F
7	1RXS J121432.0+225539	12 14 32.0	+22 55 39.0	0.0084	25.567	F
8	1RXS J121250.2+223540	12 12 50.2	+22 35 40.0	0.0284	30.334	F
9	1RXS J121021.4+225939	12 10 21.4	+22 59 39.0	0.0275	34.860	F
10	1RXS J121307.7+235914	12 13 07.7	+23 59 14.0	0.0190	53.381	F
11	1RSX J120900.4+225845	12 09 00.4	+22 58 45.0	0.0464	53.408	F
12	1RXS J121748.5+225527	12 17 48.5	+22 55 27.5	0.0457	69.400	F
13	1RXS J121803.5+224758	12 18 03.5	+22 47 58.0	0.0142	74.301	F
14	1RXS J121024.3+215941	12 10 24.3	+21 59 41.5	0.0140	74.395	F
15	1WGA J1217.5+2255	12 17 33.7	+22 55 17.0	0.0071	66.063	WGA
16	1WGA J1217.8+2255	12 17 49.3	+22 55 09.0	0.0081	69.631	WGA
17	1WGA J1218.0+2248	12 18 05.3	+22 48 34.0	0.0052	74.557	WGA

estremamente debole.

6.2.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente BL Lac 1RXS J121158.1+224236

Il BL Lac 1RXS J121158+2242, il cui redshift è pari a $z=0.77$, è stato osservato da BeppoSAX in tre puntamenti il 27 Dicembre 1999, 28 Dicembre 2001 e 11 Gennaio 2002. In nessuna di queste osservazioni c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS, mentre la sorgente è ben rilevata sia con il LECS che con il MECS in tutte e tre le osservazioni. La significatività registrata tra 0.1-2 keV (LECS) è di rispettivamente 17σ , 26σ e 12σ , mentre tra 2-10 keV (MECS) è di rispettivamente 34σ , 63σ e 31σ . I tempi di esposizione sono stati per il LECS e per il MECS rispettivamente di 19.492 ks, 20.595 ks, 5.083 ks e 46.421 ks, 56.770 ks, 16.355 ks. In figura 6.5 mostriamo i campi LECS e MECS relativi all'osservazione del 27 Dicembre 1999. La sorgente ben evidente al centro di entrambi i campi è il BL Lac. Si può notare inoltre la presenza nel LECS di un'altra sorgente (indicata in figura 6.5 con la lettera A), con coordinate RA=12h 12m 04.7s DEC=+22° 33' 16.5" e significatività pari a $\sim 3\sigma$. È situata poco al di sotto del BL Lac (a circa 10 arcmin) e non compare nel campo MECS. Tale sorgente coincide posizionalmente con quella ROSAT Bright n.1 1RXS J121205.5+223207, identificata come già detto nel paragrafo precedente con una variabile binaria ad eclisse del tipo W Ursae Majoris. Il

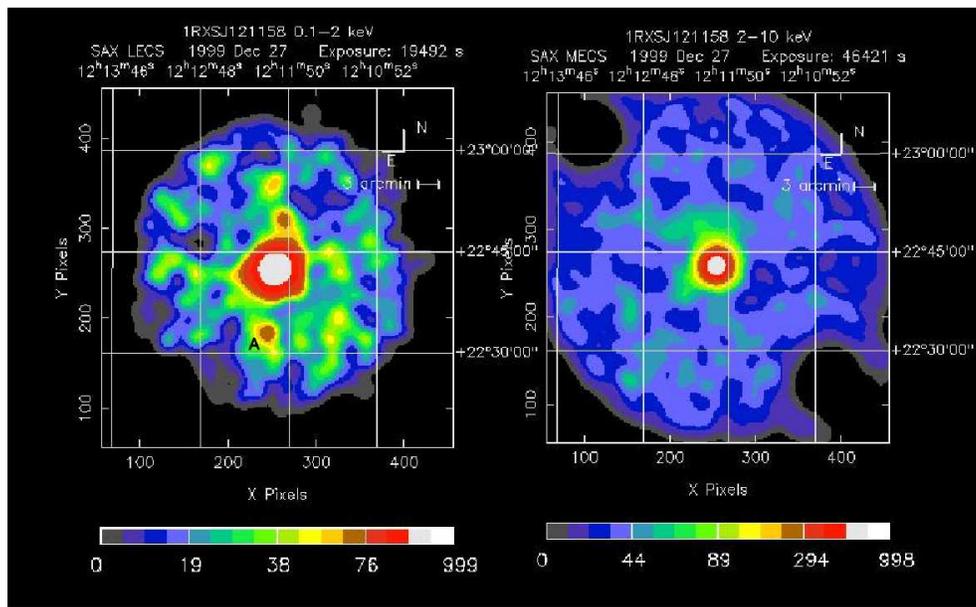


Figura 6.5: Campo LECS (sulla sinistra) e campo MECS (sulla destra) relativi all'osservazione BeppoSAX del 27 Dicembre 1999 di 1RXS J121158.1+224236

BL Lac in questione è listato in un catalogo di spettri X e di SED relativi a 84 blazar osservate con BeppoSAX (Giommi et al. 2002). L'analisi spettrale di questa sorgente è stata effettuata da Giommi et al. (2002) combinando i dati LECS (0.3-2 keV) e MECS (2-10 keV), il modello spettrale usato con il pacchetto software XSPEC 11.0 è stato quello di parabola logaritmica (vedi paragrafo 6.1.2). I risultati dell'analisi forniscono, per l'osservazione relativa al 27 Dicembre 1999, i valori $\gamma=1.6\pm 0.3$ e $\beta=-0.5\pm 0.3$, con un $\chi^2/\text{d.o.f.}=1.24$ ed un flusso nella banda 2-10 keV pari a $F_X=2.4\times 10^{-12}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

Mostriamo in figura 6.6 la SED del BL Lac, da noi ricostruita usando i dati MECS (2-10 keV) e i dati fotometrici non simultanei di archivio (HEASARC) alle frequenze radio e ottiche. Abbiamo considerato anche i dati gamma EGRET, allo scopo di vedere come si dispongono nella SED. Come si può ben vedere dalla figura, ci sono evidenze del primo picco (quello sincrotrone) nella banda UV-X. Si deve trattare quindi di un BL Lac del tipo HBL (High energy peaked), con il secondo picco (quello Compton) localizzato conseguentemente nella banda GeV-TeV. Ciò tuttavia non è in accordo con la nostra SED alle alte energie in quanto i dati gamma non sembrano disporsi in modo tale da riprodurre il picco Compton.

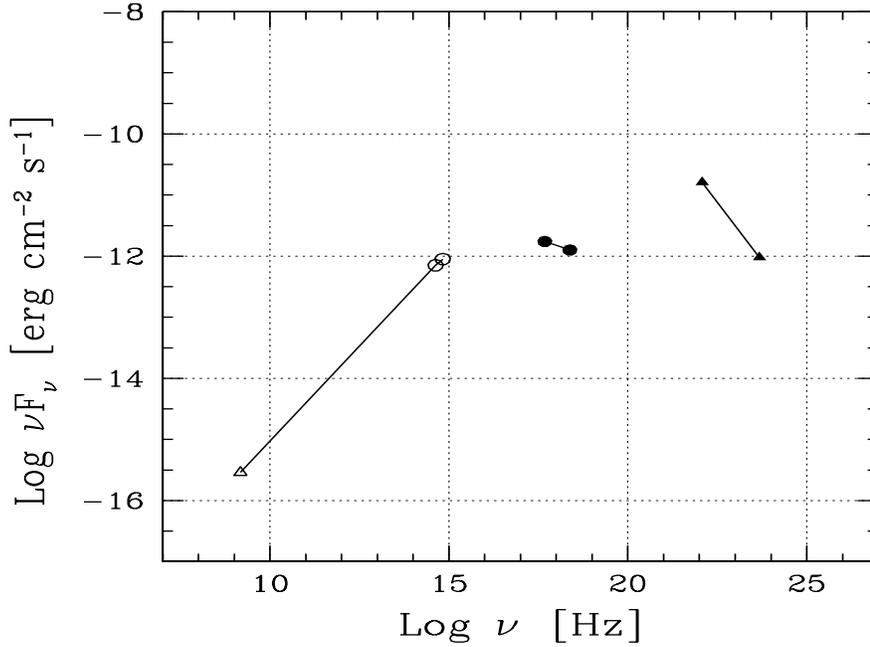


Figura 6.6: Distribuzione di energia spettrale del BL Lac 1RXS J123511.1-140332. I pallini pieni si riferiscono alle misure MECS BeppoSAX, quelli vuoti invece a dati ottici di archivio (USNO). I triangoli pieni si riferiscono ai dati EGRET mentre quelli vuoti a misure radio, entrambe di archivio

6.2.3 Caratteristiche globali della sorgente

In questo paragrafo utilizzeremo tutti gli indizi raccolti per escludere o confermare l'associazione del BL Lac 1RXS J121158.1+224236 con 3EG J1234-1318.

Innanzitutto alcune caratteristiche della sorgente EGRET in questione, come l'alta latitudine galattica ($b=80.34^\circ$) e la variabilità, sono forti indizi di un'origine extragalattica del tipo blazar. Questa ipotesi è rafforzata dalla presenza del BL Lac nel box di errore gamma. Tuttavia altri indizi raccolti contrastano fortemente un'ipotesi di questo tipo. Tale situazione è molto simile a quella già vista per la precedente sorgente EGRET 3EG J1234-1318 (vedi paragrafo 6.1): il BL Lac 1RXS J121158.1+224236 non è una forte radiosorgente compatta (il suo flusso radio a 20 cm è di soli ~ 20 mJy) come invece lo sono tutte le blazar-EGRET, le tre osservazioni BeppoSAX (ben distanziate temporalmente) del BL Lac non hanno rilevato emissione alle alte energie (PDS) ed infine la SED del BL Lac e i dati EGRET appaiono "incompatibili". Anche in questo caso, il fatto che un BL Lac presente nella

scatola di errore di una sorgente gamma non ne sia responsabile dell'emissione, può risultare piuttosto strano, soprattutto considerando che si tratta della sorgente X in assoluto più forte fra tutte quelle presenti nella scatola di errore gamma, nonché l'unica a possedere una controparte radio, sebbene debole. Come per 3EG J1234-1318, una soluzione a questa situazione piuttosto strana, con alcuni indizi a favore del BL Lac e altri invece contrari, potrebbe essere che il BL Lac in questione sia piuttosto "atipico", nel senso che sotto alcuni punti di vista rispecchia le tipiche caratteristiche delle 'classiche' blazar-EGRET (variabilità, alta latitudine), mentre sotto altri se ne differenzia e discosta (SED, flusso radio).

Il fatto che il BL Lac sia una modesta radiosorgente, ci ha spinto ad indagare sulla presenza di sorgenti radio ben più forti nel box di errore gamma. Mattox et al. (2001) hanno trovato, tra i contorni di confidenza al 95% e 99%, tre sorgenti radio compatte del tipo blazar (denominate PMN J1206+2306, PMN J1207+2237 e PMN J 1210+2414). I loro flussi a 6 cm (5 GHz) sono rispettivamente di 166 mJy, 111 mJy e 64 mJy, si tratta delle più forti sorgenti radio presenti nella scatola di errore. Mattox et al. (2001) tuttavia valutano la probabilità di una loro associazione con la sorgente EGRET come estremamente bassa. Inoltre da una ricerca con HEASARC non risulta associata nessuna sorgente X a ciascuna delle tre PMN, come ci si dovrebbe aspettare nel caso di una blazar gamma. Sowards-Emmerd et al. (2003) hanno rivalutato la correlazione tra sorgenti a spettro radio piatto del tipo blazar e sorgenti EGRET dell'emisfero Nord (con declinazione positiva). Hanno considerato come soglia per i flussi delle radiosorgenti il valore di ~ 100 mJy, alla frequenza di 8.4 GHz. Sowards-Emmerd et al. (2003) classificano la sorgente 3EG J1212+2304 come non-blazar, sulla base dell'assenza nel suo box di errore di una forte sorgente radio a 8.4 GHz. Infine, data l'elevata latitudine galattica e la variabilità di 3EG J1212+2304, una sua origine del tipo pulsar è assolutamente da escludere.

Riassumendo, il quadro appena delineato per la sorgente EGRET in questione risulta molto simile a quello della 3EG J1234-1318, analizzata nel precedente paragrafo. Infatti nel box di errore di entrambe è presente un BL Lac, con la caratteristica di essere la sorgente X più forte e una radiosorgente estremamente debole. Osservazioni BeppoSAX di entrambi i BL Lac non hanno rilevato emissione alle alte energie (PDS), inoltre la SED dei due BL Lac non sembra accordarsi con quella a doppio picco tipica delle blazar. Questi due casi simili potrebbero essere un esempio suggestivo di sorgenti EGRET le

cui controparti sono BL Lac “atipici“, che presentano alcune caratteristiche uguali alle “classiche“ blazar gamma, altre invece diverse. Tali “particolari“ sorgenti EGRET sono state proposte da Torres et al. (2003) come il risultato di amplificazioni da microlente gravitazionale di AGN di fondo, altrimenti non dettibili. Nel loro lavoro Torres et al. (2003) citano espressamente le due sorgenti in questione, 3EG J1212+2304 e 3EG J1234-1318. Il modello da loro elaborato, con una adeguata selezione dei parametri di lente, è in grado di giustificare le diversità osservate tra le classiche blazar gamma e quelle “atipiche“, come ad esempio la non variabilità del flusso e la bassa emissione radio.

Infine citiamo, come scenario alternativo a quello degli AGN, il suggestivo lavoro di Punsly (1998a, 1998b). Alcune delle EGRET variabili non identificate ad alta latitudine galattica potrebbero essere buchi neri isolati, situati in ambienti a bassa densità di materia (condizione soddisfatta ad alta latitudine galattica). Tali buchi neri sarebbero magnetizzati, carichi elettricamente e rapidamente rotanti (del tipo Kerr-Newman). Secondo il modello elaborato da Punsly, l'emissione gamma variabile sarebbe prodotta attraverso i meccanismi di Compton inverso, sincrotrone e annichilazione, e avverrebbe lungo due getti collimati di elettroni-positroni, generati dal buco nero che funge da motore centrale. Dato che quest'ultimo è il risultato del collasso gravitazionale di una stella di massa cospicua, ci si aspetta un elevato moto proprio come per le pulsar, con la conseguenza di una possibile collocazione per l'oggetto celeste ad alta latitudine galattica. Altre importanti caratteristiche dei buchi neri tipo Kerr-Newman sono: un'emissione gamma non pulsata (dato che gli assi di rotazione e magnetico sono allineati), spettro piuttosto ripido, mancanza di forte emissione X termica dato che i buchi neri non hanno una “superficie solida“ come le stelle di neutroni, flusso radio molto basso. Alcune caratteristiche della sorgente 3EG J1212+2304 possono in effetti essere spiegate e giustificate dal modello di Punsly, tipo la variabilità, la mancanza di una forte sorgente radio nella scatola di errore, un indice spettrale fotonico gamma ($\Gamma_\gamma=2.76\pm 0.6$) piuttosto grande se confrontato con quello medio delle blazar-EGRET. Per il momento quella dei buchi neri Kerr-Newman è una ipotesi affascinante, ma non verificabile con i dati a disposizione. Si spera lo possa essere con quelli più precisi, soprattutto dal punto di vista spettrale, di future missioni gamma.

6.3 3EG J1621+8203

La sorgente 3EG J1621+8203, localizzata ad alta latitudine galattica ($b=31.67^\circ$), è stata detettata dallo strumento EGRET durante diversi VP. La più alta significatività statistica registrata ($\sqrt{TS}=4.1$) è quella relativa al VP=P1 (da Aprile 1991 a Novembre 1992), con flusso medio pari a $F_{P1}=(1.1\pm 0.3) \times 10^{-7}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. Lo spettro gamma ha un andamento a legge di potenza con un indice fotonico pari a $\Gamma_\gamma=2.29\pm 0.59$, la maggior parte dei fotoni sono stati rilevati nella banda tra 100 MeV e 500 MeV. Il valore di entrambi gli indici di variabilità I e τ è tale da indicare un comportamento non variabile della sorgente. La scatola di errore gamma è piuttosto grande, il raggio per il contorno di confidenza al 95% è di 51 arcmin. In figura 6.7 mostriamo tutti i contorni di confidenza della sorgente sovrapposti al campo MECS BeppoSAX puntato sulla radiogalassia NGC 6251.

6.3.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

BeppoSAX ha compiuto un'osservazione della radiogalassia NGC 6251, sorgente celeste già oggetto di numerosi studi date le sue peculiarità. In figura 6.7 si può vedere come il campo MECS, al cui centro vi è la radiogalassia, copre solo una piccola parte della grande scatola di errore di 3EG J1621+8203. Per indagare la restante parte non coperta da BeppoSAX abbiamo utilizzato dati X di archivio (HEASARC). La ricerca effettuata ha individuato un totale di 29 sorgenti X; 25 sono Rosat del tipo F (Faint), 4 del tipo B (Bright). Sono tutte indicate in figura 6.7 con due simboli diversi e listate in tabella 6.4 con le loro coordinate, il conteggio in fotoni al secondo (nella banda 0.1-2.4 keV), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Bright B, Rosat Faint F). Abbiamo effettuato un'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X di tutte le sorgenti per indagarne la natura. In tabella 6.3 elenchiamo solo quelle con controparte radio.

La sorgente X più forte, la Rosat B n.1, è una stella variabile del tipo CVn (Eker 1992), pertanto non è possibile che sia responsabile dell'emissione gamma osservata. La sorgente X successivamente più forte è la Rosat B n.3, la quale è risultata essere anche una forte radiosorgente con un flusso di 800 mJy a 20 cm e 738 mJy a 8.4 GHz. È stata identificata non a caso con la radiogalassia NGC 6251. Le sorgenti Rosat F n.11, n.15, n.22, n.26, n.27 e n.29 potrebbero essere stelle dato che l'unico oggetto presente nel loro box di errore X è proprio di questo tipo e pertanto possiamo escluderle. La sorgente Rosat F n.10 invece

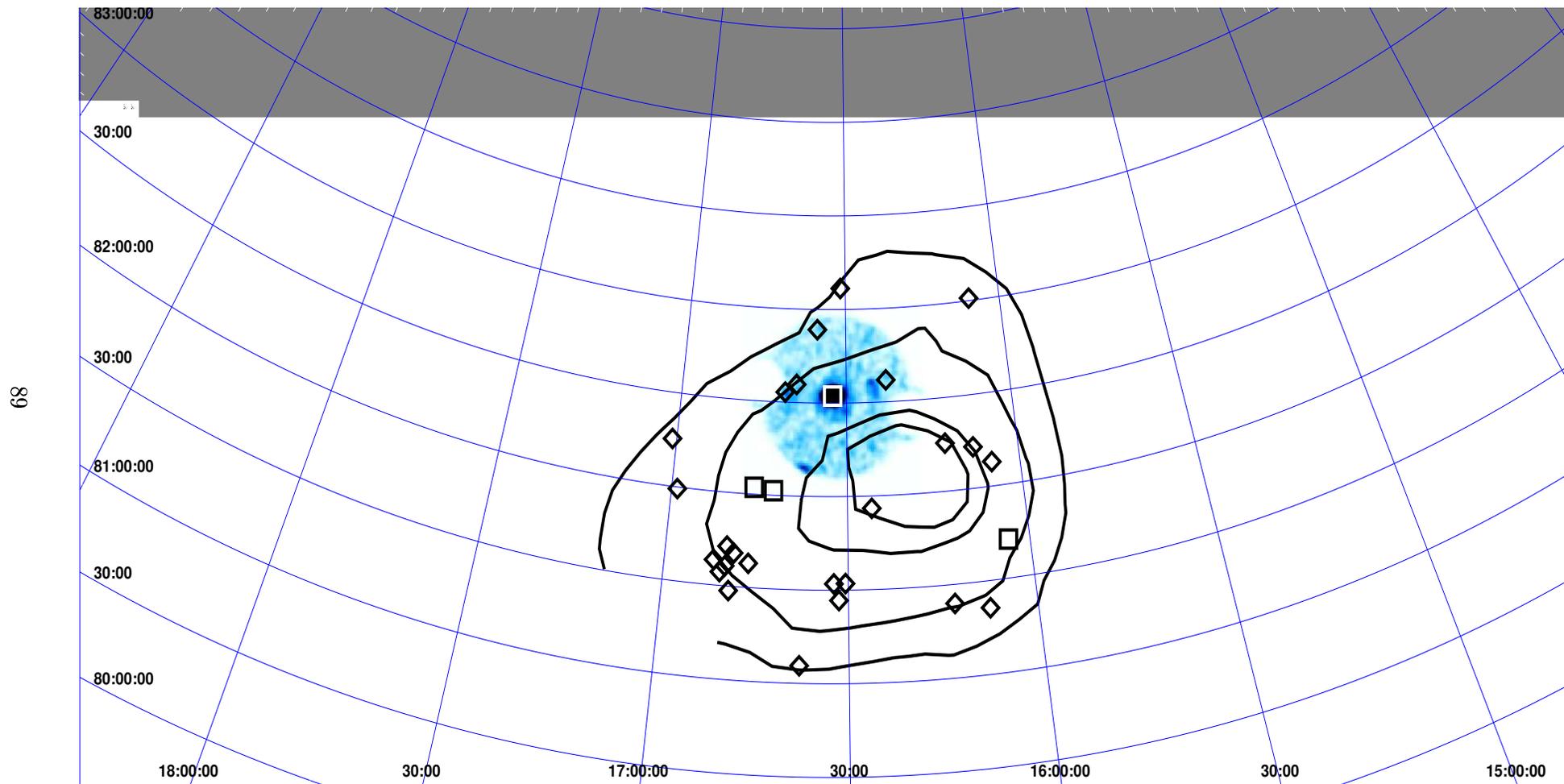


Figura 6.7: Campo MECS (2-10 KeV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1621+8203. Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: i rombi si riferiscono alle sorgenti Rosat Faint, i quadrati alle Rosat Bright.

Tabella 6.3: Sorgenti Rosat con controparte radio

n.	Sorgente	Distanza Radio-X (arcmin)	Flusso radio (mJy, 20 cm)
3	1RXS J163230.3+823214	0.16	801
14	1RXS J163525.2+825330	0.10	24
25	1RXS J165053.5+813424	0.30	160

è stata identificata con il cluster di galassie ZW1646+8236 ($z=0.26$) che ha vicino un'altra sorgente X (Rosat F n.9), ma non è chiaro se fa parte del cluster o è una sorgente a parte. La possibilità che i cluster X di galassie possano essere emettitori gamma è molto dibattuta. È stato suggerito che alcune delle EGRET non identificate ad alta latitudine possano essere cluster gamma emittenti (Totani & Kitayama 2000) attraverso Compton inverso di fotoni della radiazione millimetrica di fondo con elettroni accelerati da onde d'urto generatesi con la formazione del cluster stesso. In questo caso specifico, malgrado la coincidenza posizionale, Totani & Kitayama (2000) considerano altamente improbabile che l'emissione gamma di 3EG J1621+8203 sia generata dal cluster ZW1646+8236. La sorgente Rosat F n.25 è piuttosto particolare, in quanto risulta essere una sorgente ottica (USNO), infrarossa (2MASS) e radio (NVSS) con un flusso di 160 mJy a 20 cm. È stata identificata con l'oggetto celeste denominato SHK 166-2, appartenente al catalogo SHK di gruppi compatti di galassie early-type (Shakhbazian 1973). Simulazione N-Body suggeriscono che tali gruppi compatti andrebbero incontro, in tempi evolutivi relativamente brevi ($\sim 10^9$ anni), ad una coalescenza che porterebbe alla formazione di una gigante galassia ellittica (Barnes 1989, Mamon 1986, Bode et. al 1993). La sorgente Rosat F n.14 risulta avere una controparte radio, il cui flusso è piuttosto basso (24 mJy a 20 cm). Infine le restanti 18 sorgenti Rosat non sono identificate, con nessuna particolarità interessante. Alla luce di tutte le informazioni raccolte ed appena esposte, NGC 6251 fra tutte le sorgenti presenti nella scatola di errore di 3EG J1621+8203 è quella in assoluto più forte sia nel radio che nell'X (una volta esclusa, per quel che riguarda l'X, la Rosat n.1 che è una stella). Si presta quindi come la migliore candidata controparte di 3EG J1621+8203. Un risultato identico è stato raggiunto da Mukherjee et al. (2002) con uno studio X Rosat della scatola di errore gamma, simile a quello da noi presentato.

Tabella 6.4: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J164558.1+870214	16 45 58.1	+82 02 14.0	1.050	43.287	B
2	1RXS J164238.4+820126	16 42 38.4	+82 01 26.4	0.070	36.889	B
3	1RXS J163230.3+823214	16 32 30.3	+82 32 14.5	0.100	24.817	B
4	1RXS J160332.0+814224	16 03 32.0	+81 42 24.5	0.070	54.561	B
5	1RXS J162554.6+815602	16 25 54.6	+81 56 02.5	0.011	15.788	F
6	1RXS J162241.7+823702	16 22 41.7	+82 37 02.0	0.010	25.813	F
7	1RXS J161242.6+821525	16 12 42.6	+82 15 25.0	0.009	26.075	F
8	1RXS J160752.0+821316	16 07 52.0	+82 13 16.0	0.016	35.756	F
9	1RXS J163907.5+823548	16 39 07.5	+82 35 48.0	0.005	36.240	F
10	1RXS J164110.4+823314	16 41 10.4	+82 33 14.0	0.021	37.934	F
11	1RSX J163027.4+813206	16 30 27.4	+81 32 06.0	0.025	41.101	F
12	1RXS J160452.7+820748	16 04 52.7	+82 07 48.0	0.021	42.229	F
13	1RXS J163220.1+813201	16 32 20.1	+81 32 01.0	0.014	42.386	F
14	1RXS J163525.2+825330	16 35 25.2	+82 53 30.0	0.009	45.993	F
15	1RXS J163121.3+812641	16 31 21.3	+81 26 41.0	0.022	46.845	F
16	1RXS J161305.2+812353	16 13 05.2	+81 23 53.5	0.022	54.703	F
17	1RXS J164618.4+813745	16 46 18.4	+81 37 45.5	0.003	55.624	F
18	1RXS J163059.0+830644	16 30 59.0	+83 06 44.0	0.002	55.948	F
19	1RXS J164846.7+814042	16 48 46.7	+81 40 42.5	0.006	58.077	F
20	1RXS J164955.5+814246	16 49 55.5	+81 42 46.0	0.012	58.994	F
21	1RXS J160555.1+830049	16 05 55.1	+83 00 49.0	0.007	61.789	F
22	1RXS J165005.3+813623	16 50 05.3	+81 36 23.0	0.003	62.937	F
23	1RXS J160733.9+812118	16 07 33.9	+81 21 18.0	0.014	63.378	F
24	1RXS J165158.3+813807	16 51 58.3	+81 38 07.0	0.008	65.265	F
25	1RXS J165053.5+813424	16 50 53.5	+81 34 24.0	0.017	65.543	F
26	1RXS J164916.6+812834	16 49 16.6	+81 28 34.5	0.012	66.625	F
27	1RXS J165901.5+815929	16 59 01.5	+81 59 29.0	0.003	70.314	F
28	1RXS J163740.9+810539	16 37 40.9	+81 05 39.5	0.004	71.297	F
29	1RXS J170046.2+821513	17 00 46.2	+82 15 13.0	0.023	71.703	F

6.3.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente NGC 6251

La radiogalassia NGC 6251 è stata osservata da BeppoSAX il 19 Luglio 2001. I tempi di esposizione per gli strumenti LECS, MECS e PDS sono stati rispettivamente di 30.7, 80.9 e 36.2 ks. È stata registrata detezione ad alta energia da parte del PDS con una significatività di 4.5σ tra 20 e 100 keV. In figura 6.8 mostriamo i campi LECS e MECS, è evidente come la radiogalassia

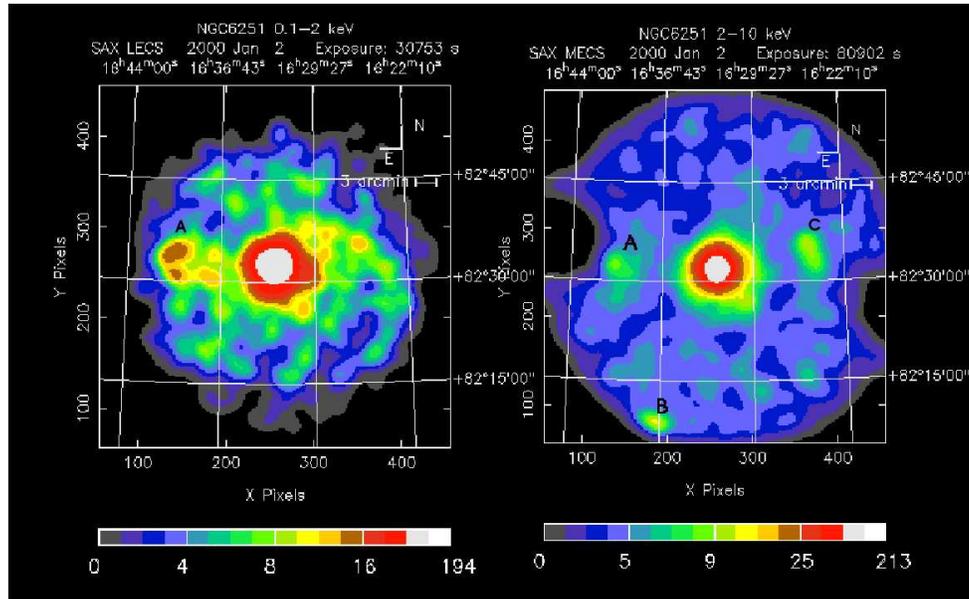


Figura 6.8: Sulla sinistra è mostrato il campo LECS e sulla destra quello MECS, relativi all'osservazione BeppoSAX del 19 Luglio 2001

è ben rilevata al centro di entrambi i campi, con una significatività di 22σ tra 0.1-2 keV (LECS) e di 62σ tra 2-10 keV (MECS). Notiamo che sono state detettate nel campo MECS, sia pur marginalmente rispetto a NGC 6251, altre tre sorgenti che indicheremo con i simboli A, B, C (vedi figura 6.8). Le loro coordinate e significatività sono: (A) RA=16h 40m 03s, DEC=82° 32' 21.4", 6σ ; (C) RA=16h 24m 56.4s, DEC=82° 34' 30.7", 9σ ; (B) RA=16h 37m 02.7s, DEC=82° 08' 53.5", 4σ . Come si può bene vedere in figura 6.8, solo una di queste tre sorgenti (A) compare anche nel campo LECS, con una significatività di 5σ . Indagando sulla loro natura (HEASARC), è risultato che la sorgente A è associata alla sorgente Rosat F n.10 e quindi al cluster di galassie ZW1646+8236, delle quali abbiamo già parlato nel paragrafo precedente. La sorgente C, invece, è stata identificata con una debole radiosorgente (46 mJy a 20 cm) e con una Rosat PSPC: Mukherjee et al. (2002) suggeriscono possa trattarsi di una candidata quasar. Infine la sorgente B è associata alla sorgente

ASCA AXG J163720+8207, identificata spettroscopicamente con una Seyfert 1 a $z=0.0402$ (Mukherjee et al. 2002). Tutte e tre le sorgenti appena citate, come già indicato da Mukherjee et al. (2002), è improbabile siano responsabili dell'emissione gamma di 3EG J1621+8203.

L'analisi spettrale X di NGC 6251 con i dati BeppoSAX a disposizione (Chiaberge et al. 2003) ha evidenziato come lo spettro tra 0.1 e 200 keV è ben rappresentato da una legge di potenza assorbita con indice fotonico pari a 1.79 ± 0.06 e assorbimento $N_H = 4.7^{+4.3}_{-4.7} \times 10^{20} \text{ cm}^{-2}$, in eccesso rispetto a quello galattico. Simili risultati sono stati trovati anche da Guainazzi et al. (2003). Considerando l'ipotesi che NGC 6251 sia la controparte di 3EG J1621+8203 (Mukherjee et al. 2002), Chiaberge et al. (2003) ne hanno ricostruito la SED dalla banda radio fino a quella gamma. Come si può vedere in figura 6.9, è piuttosto evidente una forma a doppio picco, che ricorda molto quella delle blazar. Inoltre i dati sembrano concordare con il modello di emissione SSC (Synchrotron Self Compton, Ghisellini et al. 1998) indicato in figura dalla linea tratteggiata. Nel caso in di un'associazione tra NGC 6251 e 3EG J1621+8203, la luminosità gamma risultante per quest'ultima è di $\sim 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$. È più piccola di un fattore $10^{-5} \div 10^{-2}$ rispetto a quella tipica delle blazar EGRET, compresa tra $10^{45} \text{ erg s}^{-1}$ e $10^{48} \text{ erg s}^{-1}$.

6.3.3 Caratteristiche globali della sorgente

In questo paragrafo utilizzeremo tutti gli indizi raccolti a favore dell'associazione di NGC 6251 con 3EG J1621+8203.

NGC 6251 è una radiogalassia ($z=0.0234$) del tipo FRI (Fanaroff & Riley 1974), presenta cioè una morfologia radio caratterizzata da un nucleo compatto e due lobi estesi, con un evidente getto inclinato rispetto alla linea di vista di circa 45° (Sudou & Taniguchi 2000). Tale sorgente è l'oggetto radio ed X in assoluto più forte presente all'interno della scatola di errore della EGRET. Fino ad ora l'unica sorgente EGRET identificata con certezza con una radiogalassia è 3EG J1324-4314. La radiogalassia in questione è Centaurus A ($z=0.0018$), del tipo FRI con un getto inclinato di circa 70° rispetto alla linea di vista (Bailey et al. 1986). Si tratta della radiogalassia in assoluto più vicina. Molte proprietà di 3EG J1621+8203 sono simili a quelle di 3EG J1324-4314. Entrambe infatti sono sorgenti gamma piuttosto "deboli", con una luminosità di $\sim 10^{43} \text{ erg s}^{-1}$, significativamente più piccola rispetto a quella tipica delle blazar-EGRET, rispetto alle quali hanno anche un indice spettrale fotonico più ripido. Le due radiogalassie Centaurus A e NGC 6251 condividono un'altra proprietà molto

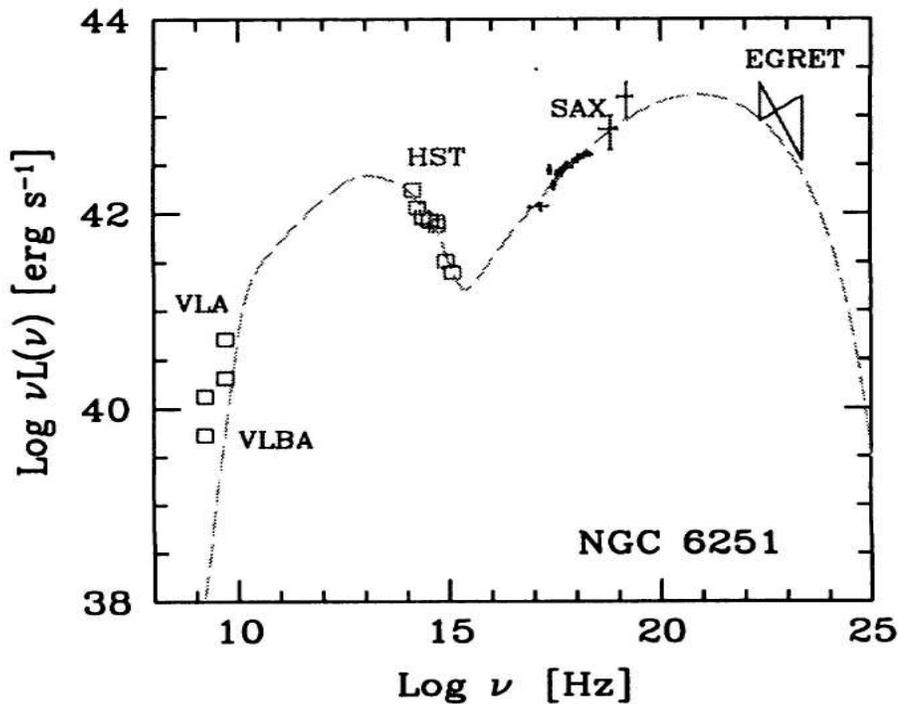


Figura 6.9: SED di NGC 6251, dalla banda radio a quella gamma. La linea tratteggiata corrisponde al modello di emissione SSC (Chiaberge et al. 2003)

importante. La loro SED, dalla banda radio a quella gamma, ha una forma a doppio picco uguale a quella delle blazar. Ciò è in accordo con il modello di unificazione degli AGN in base al quale le radiogalassie del tipo FRI, come NGC 6251 e Centaurus A, sono una popolazione “parente” alle blazar della classe BL Lac. L’idea è che le radiogalassie FRI siano in realtà BL Lac “male allineati”, con il getto che forma un angolo piuttosto grande rispetto alla linea di vista, anziché essere praticamente allineato come accade invece per le blazar (Urry & Padovani 1995, Bicknell 1994).

Non deve sorprendere il fatto che fino ad oggi non siano state molte le radiogalassie rilevate dallo strumento EGRET a $E > 100 \text{ MeV}$, contrariamente all’elevato numero conosciuto per questi oggetti celesti. Ciò può essere dovuto alla bassa luminosità gamma delle radiogalassie e alla limitata sensibilità dello strumento EGRET; in tal caso la rilevazione di Centaurus A, unica nel suo genere fino ad ora, sarebbe stata “facilitata” dalla sua estrema vicinanza. Non è da escludere tuttavia che qualche altra radiogalassia possa essere stata rilevata da EGRET, a tal proposito NGC 6251 è senzadubbio la candidata migliore.

Pur essendo più distante rispetto a Cen A, la detezione di NGC 6251 come sorgente gamma potrebbe forse essere stata favorita dall'angolo tra il getto e la linea di vista, più piccolo nel suo caso rispetto a quello di Cen A. Recentemente Combi et al. (2003) hanno individuato in un'altra radiogalassia (J1737-15) la possibile controparte di una sorgente EGRET non identificata (3EG J1735-1500). In futuro strumenti gamma a più alta sensibilità potrebbero rivelare un alto numero di radiogalassie, anche molto distanti, confermandole definitivamente come una nuova classe di emettitori gamma, sia pur deboli. Le implicazioni di una tale scoperta sarebbero interessanti. Infatti dato che la densità spaziale delle radiogalassie FRI è circa 1000 volte più grande di quella delle blazar, esse costituirebbero una popolazione di emettitori gamma ben più numerosa delle blazar.

Capitolo 7

Sorgenti EGRET non identificate a bassa latitudine

In questo capitolo ci occuperemo delle sorgenti del nostro campione localizzate sul piano galattico. Le sorgenti in questione sono 3EG J0542+2610, 3EG J1837-0423, 3EG J1837-0606, 3EG J1824-1514, 3EG J1800-2338 e 3EG J1410-6147.

7.1 3EG J0542+2610

Si tratta di una sorgente rivelata durante diversi VP, la più alta significatività statistica registrata ($\sqrt{TS}=5.1$) è quella relativa al VP=P12 (da Aprile 1991 a Settembre 1993). Il flusso medio durante tale periodo è pari a $F_{P12}=(19.1\pm 4.0) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. La latitudine galattica della sorgente è $b= -2.26^\circ$ ed il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.67\pm 0.22$. Come già spiegato nel paragrafo 4.2.2, la sorgente può essere considerata variabile. In figura 7.1 mostriamo tutti i suoi contorni di confidenza sovrapposti al campo MECS BeppoSAX. Si può notare come la scatola di errore è piuttosto grande, caratterizzata da contorni non circolari ed estremamente irregolari che non si chiudono al 95% e 99% di confidenza.

7.1.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto tre osservazioni della sorgente X transiente A0535+26. Il campo MECS, come si può ben vedere in figura 7.1, copre solo una piccola parte della scatola di errore di 3EG J0542+2610. Per indagare la restante parte non coperta da BeppoSAX abbiamo usato dati X di archivio

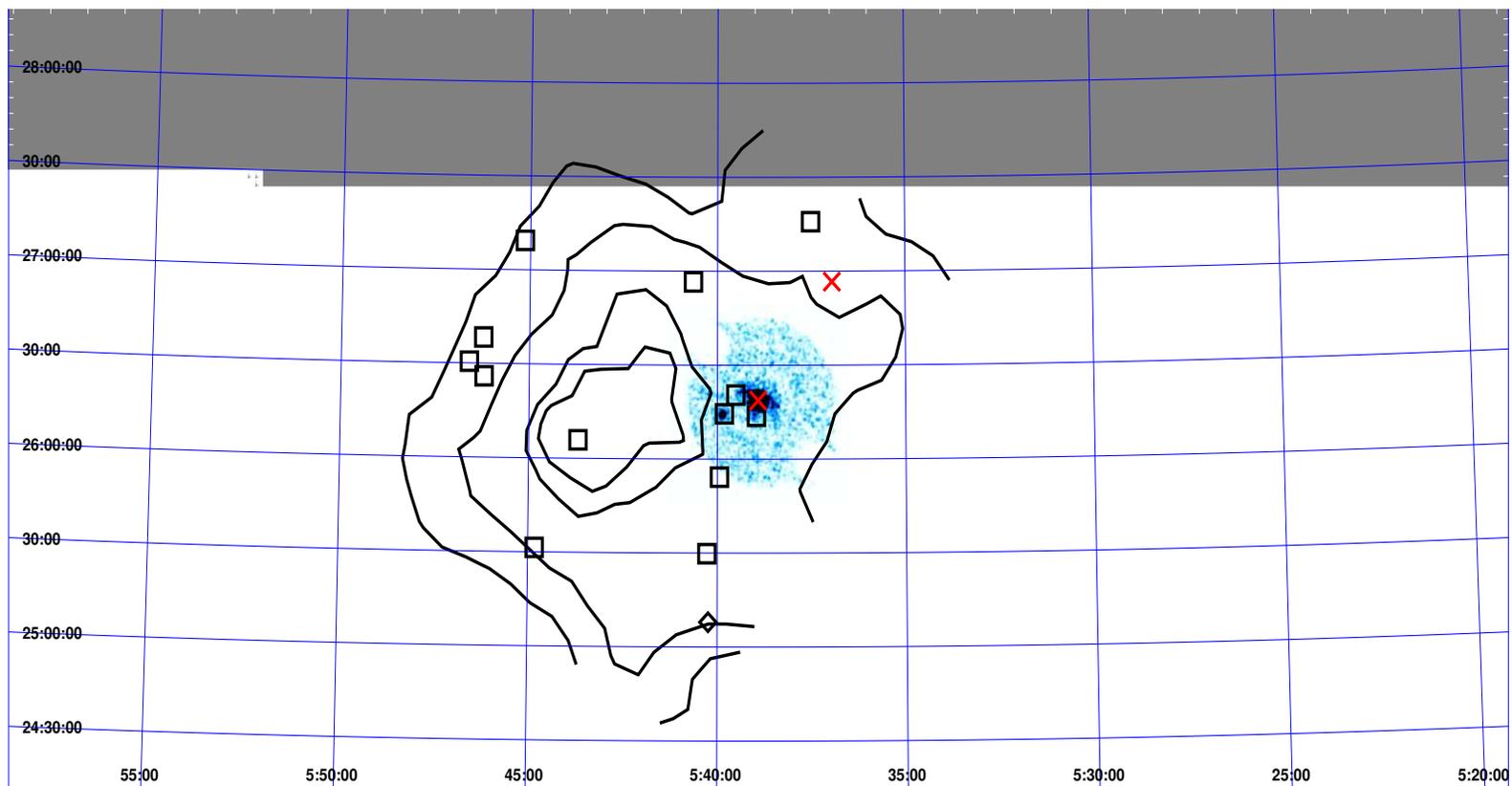


Figura 7.1: Campo MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J0542+2610. Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: le x sono le sorgenti Rosat brillanti (Bright), i quadrati sono le Rosat deboli (Faint).

Tabella 7.1: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J053855.1+261843	05 38 55.1	+26 18 43.0	0.2700	34.777	B
2	1RXS J053657.1+265638	05 36 57.1	+26 56 38.5	0.1500	76.371	B
3	1RXS J053948.9+261427	05 39 48.9	+26 14 27.0	0.0346	22.018	F
4	1RXS J053956.6+255415	05 39 56.6	+25 54 15.5	0.0156	24.552	F
5	1RXS J053930.7+262026	05 39 30.7	+26 20 26.5	0.0326	27.863	F
6	1RXS J054341.6+260553	05 43 41.6	+26 05 53.0	0.0332	31.042	F
7	1RXS J053857.8+261341	05 38 57.8	+26 13 41.5	0.0373	33.132	F
8	1RXS J054016.2+252948	05 40 16.2	+25 29 48.0	0.0206	42.064	F
9	1RXS J054038.7+265635	05 40 38.7	+26 56 35.0	0.0197	48.650	F
10	1RXS J054449.6+253123	05 44 49.6	+25 31 23.5	0.0168	59.620	F
11	1RXS J054612.0+262557	05 46 12.0	+26 25 57.0	0.0184	66.740	F
12	1RXS J054613.4+263820	05 46 13.4	+26 38 20.0	0.0291	71.137	F
13	1RXS J054635.8+263032	05 46 35.8	+26 30 32.5	0.0215	73.109	F
14	1RXS J054508.6+270921	05 45 08.6	+27 09 21.5	0.0180	78.495	F
15	1RXS J053730.9+271548	05 37 30.9	+27 15 48.0	0.0201	84.688	F

(HEASARC). Tutte le sorgenti trovate sono listate in tabella 7.1, con le loro coordinate, il conteggio di fotoni (nella banda 0.1-2.4 keV), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la loro tipologia (Rosat Bright B, Rosat Faint F). Sono state individuate 15 sorgenti X, 13 delle quali sono Rosat del tipo F e le restanti 2 Rosat del tipo B. La sorgente X in assoluto più forte è la Rosat B n.1, identificata con l'oggetto celeste A0535+26, target dell'osservazione BeppoSAX. Un'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X delle sorgenti Rosat F n.3, n.4, n.6, n.7, n.10, n.12 e n.13 suggerisce che si potrebbe trattare di stelle, dato che l'unico oggetto ivi presente appartiene a questa tipologia. Infine le restanti sette sorgenti Rosat F non sono identificate, in quanto nel loro box di errore vi sono diversi oggetti infrarossi ed ottici. Infine è da notare come nessuna delle 15 Rosat risulta avere una controparte radio.

La migliore candidata controparte X di 3EG J0542+2610 sembrerebbe essere l'oggetto celeste A0535+26, in quanto è la sorgente in assoluto più forte ed interessante fra tutte quelle presenti nella scatola di errore gamma.

7.1.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente A0535+26

La sorgente X transiente A0535+26 è un sistema binario costituito da una stella di neutroni, a rapida rotazione e fortemente magnetizzata, e da una stella Be denominata HDE 245770. Tali stelle sono oggetti celesti caratterizzati da rapida rotazione e cospicua perdita di materiale, il quale tende a disporsi

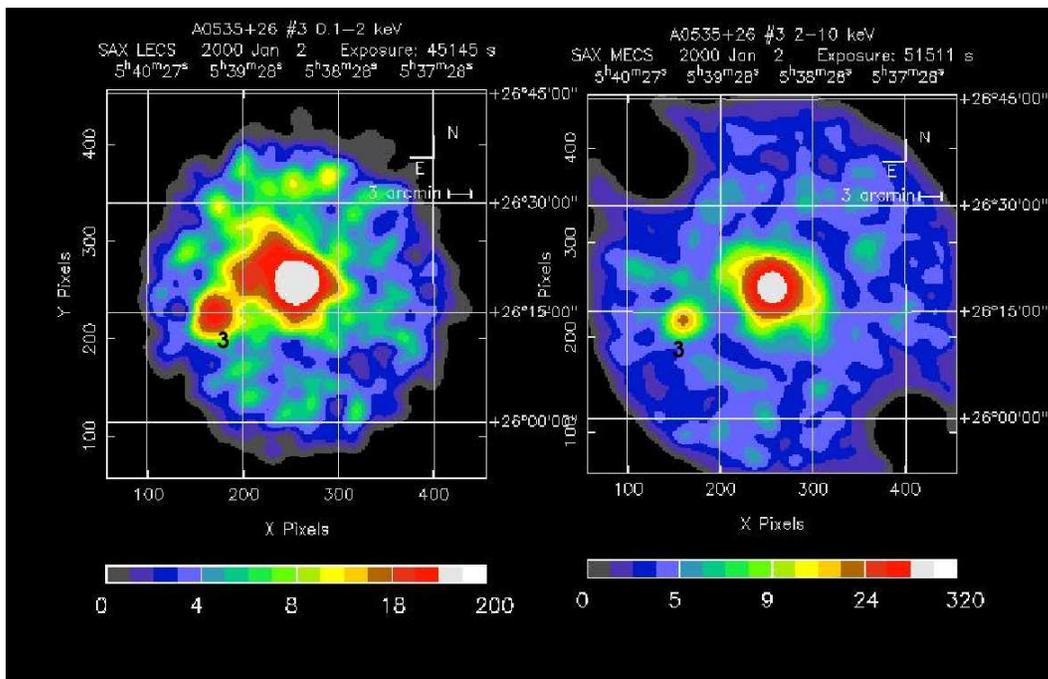


Figura 7.2: Sulla sinistra è mostrato il campo LECS e sulla destra quello MECS, relativi all'osservazione BeppoSAX del 5 Marzo 2001

sul loro piano equatoriale formando un disco gassoso. Dato che l'orbita dei due oggetti è di solito molto stretta, l'accrescimento di materiale dalla stella Be alla stella di neutroni produce emissione X. Nel caso di A0535+26, sono osservati ricorrenti aumenti del flusso X con un periodo di circa 111 giorni, uguale al periodo orbitale del sistema binario. Ciò fa dedurre che tali aumenti si verificano in seguito al passaggio al periastro, durante il quale si ha un incremento dell'accrescimento di materiale. Occasionalmente, tali aumenti del flusso X di A0535+26 assumono proporzioni tali da generare dei veri e propri forti "outburst". Agli inizi del 1994, durante uno dei più forti outburst X registrati nonché l'ultimo, lo strumento BATSE a bordo del Compton Gamma Ray Observatory ha rivelato una larga oscillazione quasi periodica (QPO, quasi-periodic oscillation) nello spettro di potenza del flusso X (Finger et al. 1996). Ciò ha fornito una prova evidente del fatto che tali forti outburst X sono dovuti alla formazione di un disco di accrescimento transiente intorno alla pulsar, al momento del passaggio al periastro.

Il sistema binario A0535+26 è stato osservato da BeppoSAX, durante uno stato di quiescenza, in tre puntamenti datati rispettivamente 4 Settembre 2000, 5 Ottobre 2000 e 5 Marzo 2001. La sorgente è ben rivelata, sia con il LECS che con il MECS, in tutte e tre le osservazioni. La sua significatività tra 2-

10 keV (MECS) è di rispettivamente 30σ , 38σ e 61σ ; tra 0.1-2 keV (LECS) è di rispettivamente 10σ , 11σ e 22σ . I tempi di esposizione, per il MECS e per il LECS, sono stati rispettivamente di 32.730 ks, 46.476 ks, 51.511 ks e 19.712 ks, 31.444 ks, 45.145 ks. In figura 7.2 mostriamo i campi MECS e LECS relativi all'osservazione del 5 Marzo 2001. La sorgente ben evidente al centro di entrambi i campi è A0535+26. Si può notare la presenza di un'altra sorgente X sia nel MECS che nel LECS (indicata con il numero 3 in figura 7.2), con significatività rispettivamente di 10σ e 7σ . Tale oggetto coincide posizionalmente con la sorgente Rosat F n.3 (1RXS J053948.9+261427), nel cui box di errore X abbiamo individuato, da una ricerca con HEASARC, una stella (USNO) che è anche una sorgente infrarossa (2MASS). È probabile che l'oggetto celeste responsabile dell'emissione X sia proprio la stella.

In ciascuna delle tre osservazioni è stata rivelata emissione alle alte energie (PDS), attribuita a A0535+26 (Orlandini et al. 2003). Il modello che meglio fitta i dati è quello di una legge di potenza. Il flusso tra 20-200 keV e l'indice spettrale sono, per ciascuna osservazione, rispettivamente di: 5×10^{-11} erg cm⁻² s⁻¹ e $\Gamma_x \simeq 1 \pm 0.8$; 1.6×10^{-11} erg cm⁻² s⁻¹ e $\Gamma_x \simeq 2$; 6×10^{-11} erg cm⁻² s⁻¹ e $\Gamma_x \simeq 1 \pm 0.8$. L'indice spettrale Γ_x , visto il suo errore, può essere considerato compreso tra i valori numerici 1-2. In figura 7.3 mostriamo la SED da noi ricostruita utilizzando i dati EGRET relativi a 3EG J0542+2610 e i flussi BeppoSAX tra 20-200 keV di A0535+26, relativi alle osservazioni del 5 Ottobre 2000 e 5 Marzo 2001. I flussi di A0535+26 relativi alla osservazione del Settembre 2000 non sono stati considerati in figura 7.3 in quanto si sovrappongono totalmente con quelli relativi all'osservazione di Ottobre 2000. Il nostro scopo è stato verificare come i due set di dati (gamma ed X) si disponevano nella SED uno rispetto all'altro. Si può notare dalla figura 7.3 come lo spettro X di A0535+26 si irripidisce da una osservazione all'altra, conseguentemente ai valori assunti dall'indice spettrale ($\Gamma_x \simeq 2$ a Ottobre 2000 e $\Gamma_x \simeq 1$ a Marzo 2001). Tale variazione del valore di Γ_x probabilmente è dovuto al suo errore, piuttosto che essere una caratteristica intrinseca della sorgente. Dalla figura 7.3 sembra che lo spettro X di A0535+26 si dispone con quello EGRET creando un picco nella banda MeV.

7.1.3 Caratteristiche globali della sorgente

Il sistema binario A0535+26 è la sorgente X più forte ed interessante fra tutte quelle presenti all'interno della scatola di errore gamma e si propone quindi come la migliore candidata controparte di 3EG J0542+2610. È stato

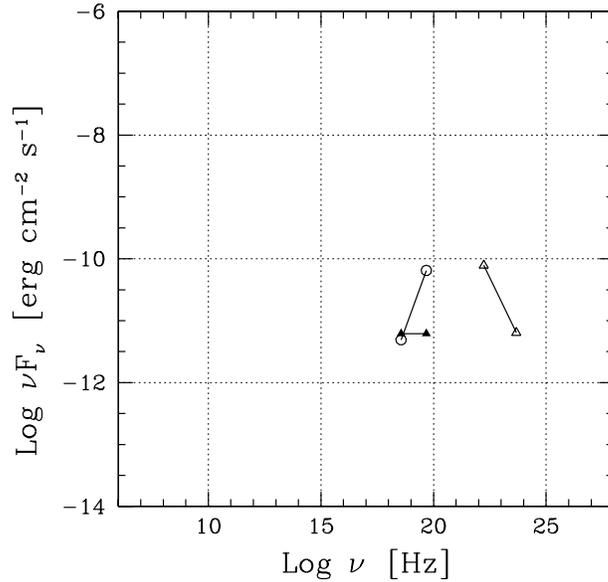


Figura 7.3: Distribuzione di energia spettrale ottenuta utilizzando i dati EGRET (triangoli vuoti) e i flussi PDS tra 20-200 keV (i triangoli pieni si riferiscono alla osservazione del 5 Ottobre 2000, i cerchi vuoti a quella del 5 Marzo 2001)

interessante verificare un'eventuale correlazione tra l'ultimo forte outburst X di A0535+26 e la detezione, in quello stesso periodo, di 3EG J0542+2610 da parte dello strumento EGRET. Infatti nell'ipotesi che A0535+26 sia responsabile dell'emissione gamma osservata, ci si aspetterebbe, in corrispondenza del picco dell'outburst X, una detezione EGRET di 3EG J0542+2610 altamente significativa. L'ultimo forte outburst X di A0535+26 è stato registrato agli inizi del 1994, tra il 28 Gennaio e il 20 Marzo, con un picco il 18 Febbraio. La sorgente 3EG J0542+2610 è stata detettata da EGRET con una significatività di $\sqrt{TS}=3.6$ durante il VP=321.1 (8-15 febbraio 1994), quando cioè l'emissione X di A0535+26 stava crescendo. Nel momento in cui A0535+26 era al picco dell'outburst X (18 Febbraio 1994), 3EG J0542+2610 non è stata detettata da EGRET (VP=321.5, 15-17 Febbraio 1994). Sembra cioè che l'emissione gamma si sia "spenta" proprio in corrispondenza del picco dell'outburst X, quando il disco di accrescimento intorno alla pulsar si era ormai ben formato. La mancanza della correlazione che ci si aspettava potrebbe indurci a pensare che A0535+26 non è responsabile dell'emissione gamma osservata. Tuttavia Romero et al. (2001) hanno elaborato un modello di emissione gamma da parte di A0535+26, in grado di giustificare quanto suddetto e nello stesso

tempo in grado di prevedere la variabilità di 3EG J0542+2610, il suo flusso e la mancanza di emissione radio da parte del sistema binario. Senza entrare troppo nei dettagli, tale modello suggerisce un'origine adronica per i fotoni gamma: i protoni vengono accelerati fino ad energie relativistiche nella magnetosfera della pulsar, la loro collisione con il disco di accrescimento transiente in formazione produce mesoni π^0 , i quali decadendo originano i fotoni gamma. Se questo meccanismo funziona realmente in A0535+26, i dati di future missioni spaziali (GLAST e AGILE) potrebbero permetterne una sua verifica.

Una considerazione interessante da aggiungere è che A0535+26 non è l'unico caso di binaria X/Be candidata controparte di una sorgente gamma non identificata. Altri due casi sono le sorgenti SAX J0635+0533 e LSI+61°303, individuate nelle scatole di errore di rispettivamente 2EG J0635+0521 (Kaaret et al. 1999) e 2CG 135+01 (Strickman et al. 1998). I sistemi binari X/Be conosciuti entro 5 Kpc sono circa 200 (Rappaport & van de Heuvel 1982), diverse sorgenti EGRET non identificate a bassa latitudine e diversi sistemi binari X/Be sono stati individuati vicino ad associazioni OB (Kaaret & Cottam 1996), ciò suggerisce un interessante collegamento tra le due tipologie di oggetti celesti. È comunque da escludere che i sistemi binari X/Be diano un contributo significativo alla popolazione delle EGRET non identificate sul piano galattico, in quanto è probabile che tale contributo si limiti a pochi casi.

Data la mancanza di una prova definitiva dell'associazione di A0535+26 con 3EG J0542+2610, una soluzione alternativa potrebbe essere quella di una blazar dietro il piano della galassia, vista la variabilità della sorgente gamma. Sowards-Emmerd et al. (2003) hanno effettuato un lavoro di ricerca, alla frequenza di 8.4 GHz, di forti sorgenti a spettro radio piatto del tipo blazar nel box di errore di sorgenti EGRET non identificate con declinazione positiva. Nel caso di 3EG J0542+2610, hanno individuato una sorgente a spettro radio piatto con un flusso di 207 mJy a 8.4 GHz, a $z=0.62$. Una nostra indagine radio della scatola di errore gamma, attraverso tutti i cataloghi disponibili presso HEASARC, ha invece evidenziato la presenza di diversi oggetti alla frequenza di 5 GHz, tra questi il più forte ha un flusso di 206 mJy. Tale sorgente coincide posizionalmente con quella a spettro radio piatto individuata da Sowards-Emmerd et al. (2003) e per essa sono disponibili misure radio ad altre lunghezze d'onda (267 mJy a 20 cm, 632 mJy a 82 cm). Questa sorgente radio è piuttosto interessante, tuttavia due aspetti possono suscitare qualche perplessità riguardo una sua associazione con 3EG J0542+2610. Il primo è che i valori di tutti i suoi flussi radio sono inferiori a quelli tipici delle blazar gamma

(≥ 1 Jy), inoltre la sorgente radio in questione non risulta avere controparte X (HEASARC), contrariamente a tutte le blazar gamma che come abbiamo visto presentano forte emissione X.

7.2 3EG J1837-0423

Durante il VP=423 (dal 20 al 30 Giugno 1995) è stata rivelata da EGRET una nuova sorgente gamma transiente, denominata 3EG J1837-0423 o GRO J1838-04 (Tavani et al. 1997). La sua significatività statistica e il flusso medio registrati durante tale periodo sono pari a $\sqrt{TS}=5.8$ e $F_{423}=(3.3\pm 0.7) \times 10^{-6}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. Nel successivo puntamento EGRET nella direzione di GRO J1838-04 (VP=429, dal 20 al 27 Settembre 1995), la sorgente non è stata dettata ($\sqrt{TS}=0.3$). Anche nei quattro anni precedenti al VP=423, durante i quali lo strumento EGRET ha compiuto 16 osservazioni puntate nella direzione di GRO J1838-04 (durata tipica di 1-2 settimane), la sorgente non è quasi mai stata rivelata. Fanno eccezione solo due detezioni marginali ($\sim 2\sigma$) durante il VP=334 (dal 18 al 25 Luglio 1994) e durante i Viewing Period VP=229 e VP=229.5 combinati insieme (dal 10 al 17 Agosto 1993). Una caratteristica estremamente interessante della sorgente gamma transiente GRO J1838-04 è il suo elevato flusso medio F_{423} ; inoltre negli ultimi 3.5 giorni del VP=423 il valore del flusso ha raggiunto un picco di $(4.0\pm 1.1) \times 10^{-6}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. La luminosità gamma corrispondente a tale picco, nel caso di emissione isotropa, è di $L_\gamma=7.2 \times 10^{34} d_{kpc}^2$ (Tavani et al. 1997), dove d_{kpc} è la distanza della sorgente in kiloparsec. Ciò fa di GRO J1838-04 una delle più intense sorgenti gamma transienti dettate, con un flusso comparabile a quello della pulsar Geminga o all'intensità raggiunta durante il flare da AGN come 3C 279 (Kniffen et al. 1993) e PKS 0528+134 (Mukherjee et al. 1996). Lo spettro della sorgente a $E>30$ MeV, durante il picco di emissione, è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico pari a $\Gamma_\gamma=2.09\pm 0.18$. Un'altra interessante peculiarità di GRO J1838-04 è la sua spiccata e rapida variabilità. È chiaramente riscontrata su tempi scala dell'ordine del giorno (3.5 giorni) se si considera la sua curva di luce durante i VP=421, VP=422, VP=423 e VP=429, dal 6 Giugno al 27 Settembre 1995 (Tavani et al. 1997). Il valore molto grande di entrambi gli indici di variabilità I e τ per GRO J1838-04 conferma tale caratteristica. Per quel che riguarda la scatola di errore gamma, è piuttosto piccola rispetto agli "standard" delle sorgenti EGRET, infatti il

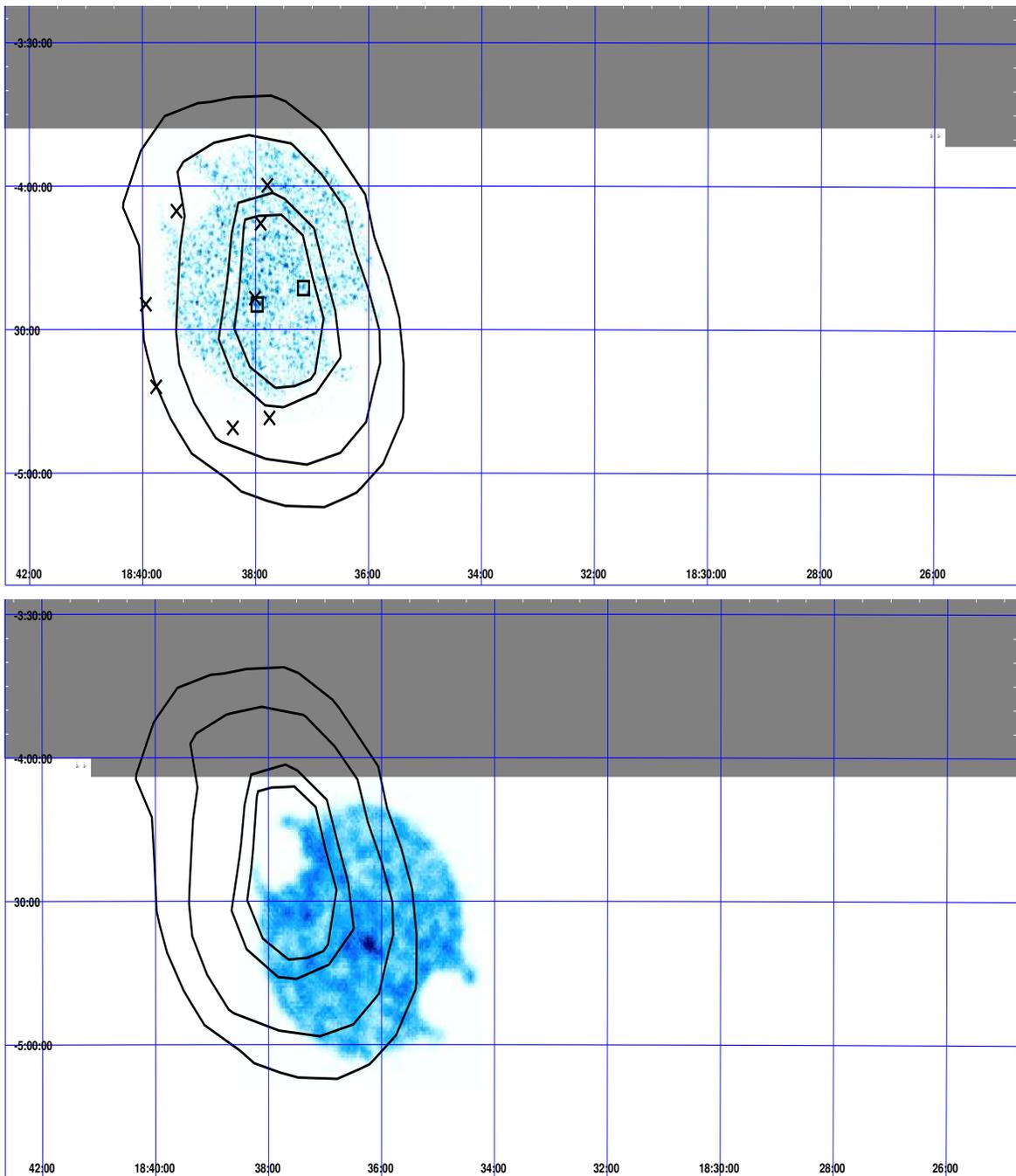


Figura 7.4: Campi MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposti ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1837-0423. Sono indicate inoltre tutte le sorgenti X presenti: le x sono le sorgenti Rosat deboli (Faint), i quadrati sono le sorgenti ASCA

raggio per il contorno di confidenza al 95% è pari a ~ 31 arcmin, inoltre la sorgente è localizzata sul piano galattico a $b = 1.02^\circ$. In figura 7.4 riportiamo tutti i suoi contorni di confidenza sovrapposti ai due campi MECS BeppoSAX.

Tabella 7.2: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J183800.7-042326	18 38 00.7	-04 23 26.5	0.0267	3.831	F
2	1RXS J183754.6-040750	18 37 54.6	-04 07 50.0	0.0115	16.325	F
3	1RXS J183747.4-035951	18 37 47.4	-03 59 51.0	0.0105	24.155	F
4	1RXS J183745.2-044829	18 37 45.2	-04 48 29.5	0.0245	24.492	F
5	1RXS J183824.1-045034	18 38 24.1	-04 50 34.0	0.0241	28.255	F
6	1RXS J183923.9-040514	18 39 23.9	-04 05 14.5	0.0182	30.882	F
7	1RXS J183956.5-042442	18 39 56.5	-04 24 42.5	0.0239	32.663	F
8	1RXS J183945.6-044159	18 39 45.6	-04 41 59.0	0.0198	34.918	F
9	AXS J18370-0421	18 37 09.1	-04 21 21.0	0.0040	7.7930	A
10	AXS J18380-0435	18 37 58.3	-04 24 46.8	0.0043	5.0210	A

7.2.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto due osservazioni con lo scopo di studiare nella banda X la sorgente EGRET non identificata GRO J1838-04. I due puntamenti hanno coordinate leggermente differenti in modo tale da garantire la copertura quasi totale del box di errore gamma (vedi figura 7.4). Abbiamo usato dati X di archivio (HEASARC) per individuare le sorgenti, già conosciute e catalogate, presenti nella scatola di errore. Sono tutte listate in tabella 7.2, con le loro coordinate, la distanza dalla posizione della sorgente EGRET, la tipologia (Rosat Faint F e ASCAGIS A) e il conteggio di fotoni (nella banda 0.1-2.4 keV per le sorgenti Rosat e nella banda 2-10 keV per quelle ASCA) La ricerca effettuata ha individuato un totale di 10 sorgenti X, 8 delle quali sono Rosat del tipo F e le restanti 2 ASCAGIS. Sono tutte estremamente deboli in X, ciò può essere ricollegato al fatto che 3EG J1837-0423, essendo una sorgente transiente, probabilmente era in uno stato di quiescenza all'epoca dell'osservazione X.

Per quel che riguarda le due sorgenti ASCA (Maccarone et al. 1998), AXS J18370-0421 (n.9) è una sorgente X “dura“ non identificata, ha una significatività di $\sim 5\sigma$ a $E > 2$ keV, mentre AXS J18380-0435 (n.10) è una sorgente diffusa con una significatività di 3.5σ a $E > 2$ keV e dista 1.4 arcmin dalla Rosat F n.1. Abbiamo effettuato un'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X delle sorgenti Rosat per individuarne controparti ad altre lunghezze d'onda. È risultato che la Rosat F n.4 è una stella di tipo spettrale F2; le Rosat F n.3 e n.5 potrebbero essere anch'esse stelle data la presenza di tale tipo di oggetto celeste nella loro scatola di errore. Infine le restanti cinque sorgenti Rosat non sono identificate, in quanto nel loro

box di errore sono presenti molteplici sorgenti infrarosse ed ottiche.

7.2.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente GRO J1838-04

La prima osservazione della sorgente GRO J1838-04 compiuta da BeppoSAX è datata 19 Aprile 1997, con puntamento centrato alle coordinate equatoriali RA=18h 37m 43s e DEC=-04° 18' 06.9" ed un tempo di esposizione per il MECS pari a 20.618 Ks. La seconda osservazione invece è datata 20 Aprile 1997, con puntamento centrato alle coordinate equatoriali RA=18h 36m 31.6s e DEC=-04° 47' 0.9" ed un tempo di esposizione per il MECS di 23.079 Ks. La differenza di coordinate dei due puntamenti ha permesso di ottenere la copertura X quasi totale della scatola di errore gamma (vedi figura 7.4). In nessuna delle due osservazioni c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS. Mostriamo in figura 7.5 i due diversi campi MECS BeppoSAX. Risulta evidente come in entrambi non è presente nessun forte oggetto X, sebbene ci siano solo due debolissime sorgenti (Maccarone et al. 1998). Una è SAX J18379-0424, indicata con il cerchietto 1 nel campo MECS del 19 Aprile 1997. Tra 1.5-4.5 keV ha una significatività di 3.5σ ed un flusso pari 1.9×10^{-13} erg cm⁻² s⁻¹. Oltre 4.5 keV l'emissione della sorgente non è significativa (Maccarone et al. 1998). L'altra è SAX J18363-0438, indicata con il cerchietto 1 nel campo MECS del 20 Aprile 1997. Tra 1.5-4.5 keV ha una significatività di 3σ ed un flusso pari a 1×10^{-13} erg cm⁻² s⁻¹. Anche per questa sorgente l'emissione oltre i 4.5 keV non è significativa (Maccarone et al. 1998). È da notare come SAX J18379-0424 coincide posizionalmente con la sorgente ASCA diffusa AXS J18380-0435 e con quella Rosat F non identificata 1RXS J183800.7-042326 (rispettivamente n.10 e n.1 in tabella 7.2).

In definitiva, sia da osservazioni BeppoSAX che da dati di archivio (HEASARC), non emerge nessuna forte sorgente X all'interno della scatola di errore gamma. Ciò tuttavia può essere dovuto al fatto che, essendo 3EG J1837-0423 una sorgente transiente, probabilmente si trovava in uno stato di quiescenza all'epoca dell'osservazione X.

7.2.3 Caratteristiche globali della sorgente

La spiccata variabilità e l'elevato flusso della sorgente gamma GRO J1838-04 suggeriscono fortemente un'origine extragalattica, verosimilmente una blazar dietro il piano della Galassia. Per verificare tale ipotesi, può essere utile ed indicativa una indagine radio della scatola di errore gamma. Tavani et al.

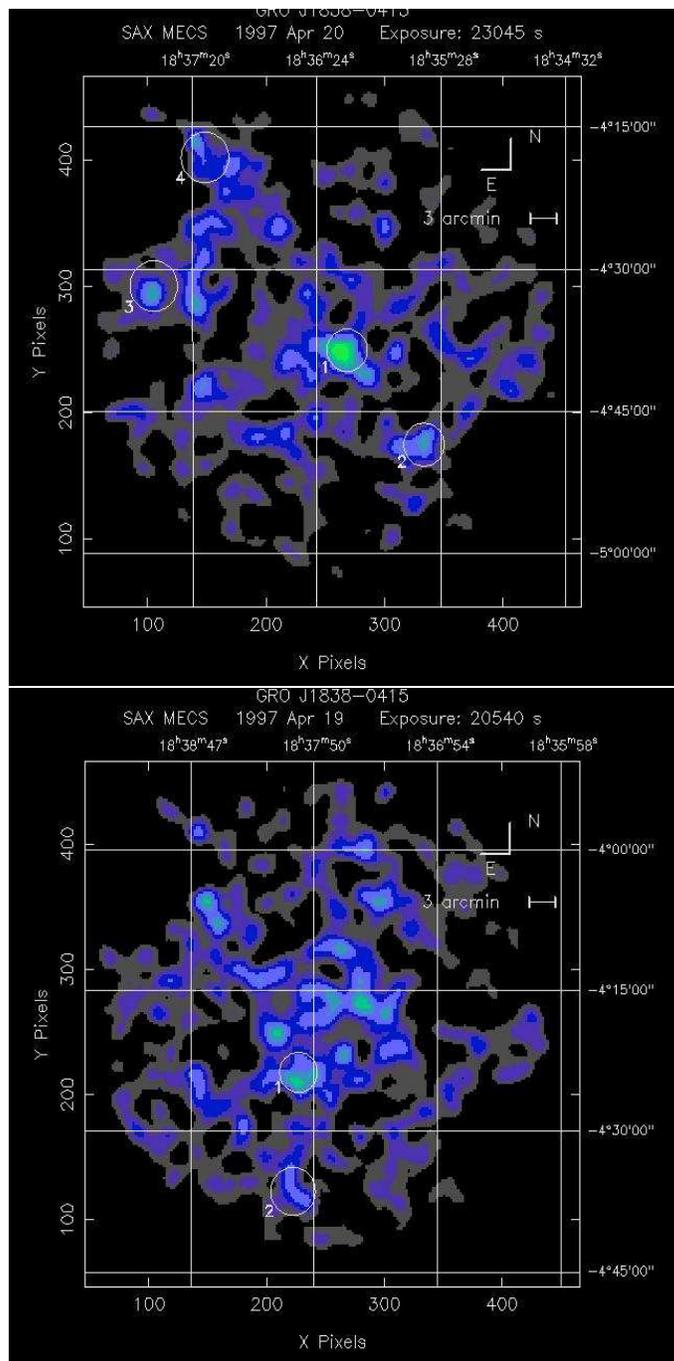


Figura 7.5: In alto è mostrato il campo MECS BeppoSAX relativo all'osservazione del 19 Aprile 1997, sotto quello relativo all'osservazione del 20 Aprile 1997

(1997) hanno già effettuato uno studio di questo tipo, usando la survey radio del piano galattico a 20 cm (Helfand et al. 1992). Hanno individuato nel box di errore numerose sorgenti radio, quella più forte in assoluto ha un flusso di 743 mJy a 20 cm, piuttosto alto ma comunque inferiore a quello tipico delle blazar gamma (≥ 1 Jy). Il suo indice spettrale radio, calcolato utilizzando

altre misure del flusso a 13 cm e 3.6 cm, è pari a $\alpha=-1$ (Tavani et al. 1997). Tale valore, nel caso in cui si considera $S(\nu)\propto\nu^\alpha$, non soddisfa la condizione di spettro radio piatto ($\alpha\geq-0.5$). Tavani et al. (1997), sulla base dell'assenza da loro riscontrata nella scatola di errore gamma di forti sorgenti radio a spettro piatto del tipo blazar, hanno interpretato l'origine di GRO J1838-04 in termini di una nuova classe di sorgenti galattiche variabili.

C'è da notare tuttavia che per la loro indagine radio Tavani et al. (1997) hanno considerato la regione entro il contorno di confidenza al 95% e la lunghezza d'onda di 20 cm. Abbiamo quindi pensato di investigare la scatola di errore gamma fino al contorno di confidenza al 99% utilizzando tutti i cataloghi radio disponibili presso HEASARC. Alla lunghezza d'onda di 20 cm abbiamo "ritrovato" come sorgente radio più forte quella già individuata da Tavani et al. (1997). Misure radio disponibili ad altre lunghezze d'onda per tale sorgente (1.729 Jy a 82 cm, 500 mJy a 13 cm) ci hanno permesso di calcolarne l'indice spettrale radio. Il valore da noi ottenuto ($\alpha=-0.7$) concorda con il risultato di Tavani et al. (1997), cioè non si tratta di una sorgente radio a spettro piatto, inoltre questa sorgente non sembra presentare una controparte X (HEASARC). Alla luce di ciò, la sua associazione con 3EG J1837-0423 risulta piuttosto improbabile ed inverosimile. Alla frequenza di 4.85 GHz, invece, sono state individuate diverse sorgenti radio, la maggior parte delle quali hanno flussi inferiori a 300 mJy. Solo due di esse hanno valori paragonabili a quelli delle blazar gamma rivelate da EGRET, si tratta delle sorgenti radio PMN J1839-0419 (RA=18h 39m 47.6s e DEC=-04° 23' 11", 782 mJy) e PMN J1839-0423 (RA=18h 39m 25.1s DEC=-04° 19' 10", 1.124 Jy), localizzate tra i contorni di confidenza al 95% e 99%. Nessuna delle due presenta una controparte X (HEASARC), inoltre entrambe sono localizzate in quella piccola zona della scatola di errore gamma non coperta dall'osservazione BeppoSAX, precludendo quindi la possibilità di una loro eventuale detezione X. Tuttavia con un'indagine attraverso gli altri cataloghi disponibili presso HEASARC, abbiamo individuato la presenza del resto di supernova SNR 027.8-00.6 ad una distanza di 1 arcmin da PMN J1839-0423, mentre ad una analoga distanza da PMN J1839-0419 è presente la nebulosa planetaria PN G027.7+00.7, la quale può essere esclusa dall'essere responsabile dell'emissione gamma osservata. Giusto all'esterno del resto di supernova SNR 027.8-00.6, invece, è localizzata una pulsar. Torres et al. (2001) tuttavia escludono, alla luce della natura transiente e variabile di 3EG J1837-0423, un'associazione tra questi due oggetti celesti e la sorgente gamma in questione.

In definitiva, sono indispensabili ulteriori osservazioni a multifrequenza (radio, ottico, X) della scatola di errore gamma di 3EG J1837-0423, in quanto potrebbero fornire ulteriori informazioni utili per l'individuazione della sua controparte.

7.3 3EG J1837-0606

La sorgente 3EG J1837-0606 (conosciuta anche con il nome GROJ1835-06) è stata dettata dallo strumento EGRET con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=6.5$) nel VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995). Il flusso medio durante tale periodo è stato $F_{P1234}=(49.6\pm 7.9) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. La sorgente, localizzata sul piano galattico ($b=+0.38^\circ$), ha uno spettro tra 100 MeV e 10 GeV ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=1.82\pm 0.14$. Tale valore è all'interno dell'intervallo numerico 1.66-2.19 che caratterizza gli indici fotonici delle 7 pulsar gamma fino ad oggi conosciute (Thompson et al. 1999). Come già detto nel paragrafo 4.2.2, la sorgente può essere considerata non variabile sulla base del valore assunto dal suo indice τ . La scatola di errore gamma ha un raggio per il contorno di confidenza al 95% di soli 11.4 arcmin, valore molto piccolo se confrontato con quello tipico della stragrande maggioranza delle sorgenti EGRET (compreso tra 30 e 60 arcmin). Tale vantaggio è una diretta conseguenza del fatto che 3EG J1837-0606 è una sorgente gamma GeV, pertanto è conosciuta anche con la sigla GEV J1837-0610. È riportata nel catalogo di Lamb & Macomb (1997) con una significatività e un flusso a $E>1$ GeV rispettivamente pari a 6σ e $(8.3\pm 1.6) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. La scatola di errore di GEV J1837-0610 è praticamente uguale a quella della stessa sorgente catalogata come 3EG. In figura 7.6 mostriamo tutti i contorni di confidenza di 3EG J1837-0606 sovrapposti ai due campi MECS BeppoSAX.

7.3.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto due osservazioni con lo scopo di studiare nella banda X la sorgente EGRET non identificata 3EG J1837-0606. La copertura della scatola di errore gamma è totale, come si può ben vedere in figura 7.6. Abbiamo usato dati X di archivio (HEASARC) per individuare le sorgenti, già conosciute e catalogate, presenti nel box di errore. Sono tutte listate in tabella 7.3, con le loro coordinate equatoriali, il conteggio di fotoni

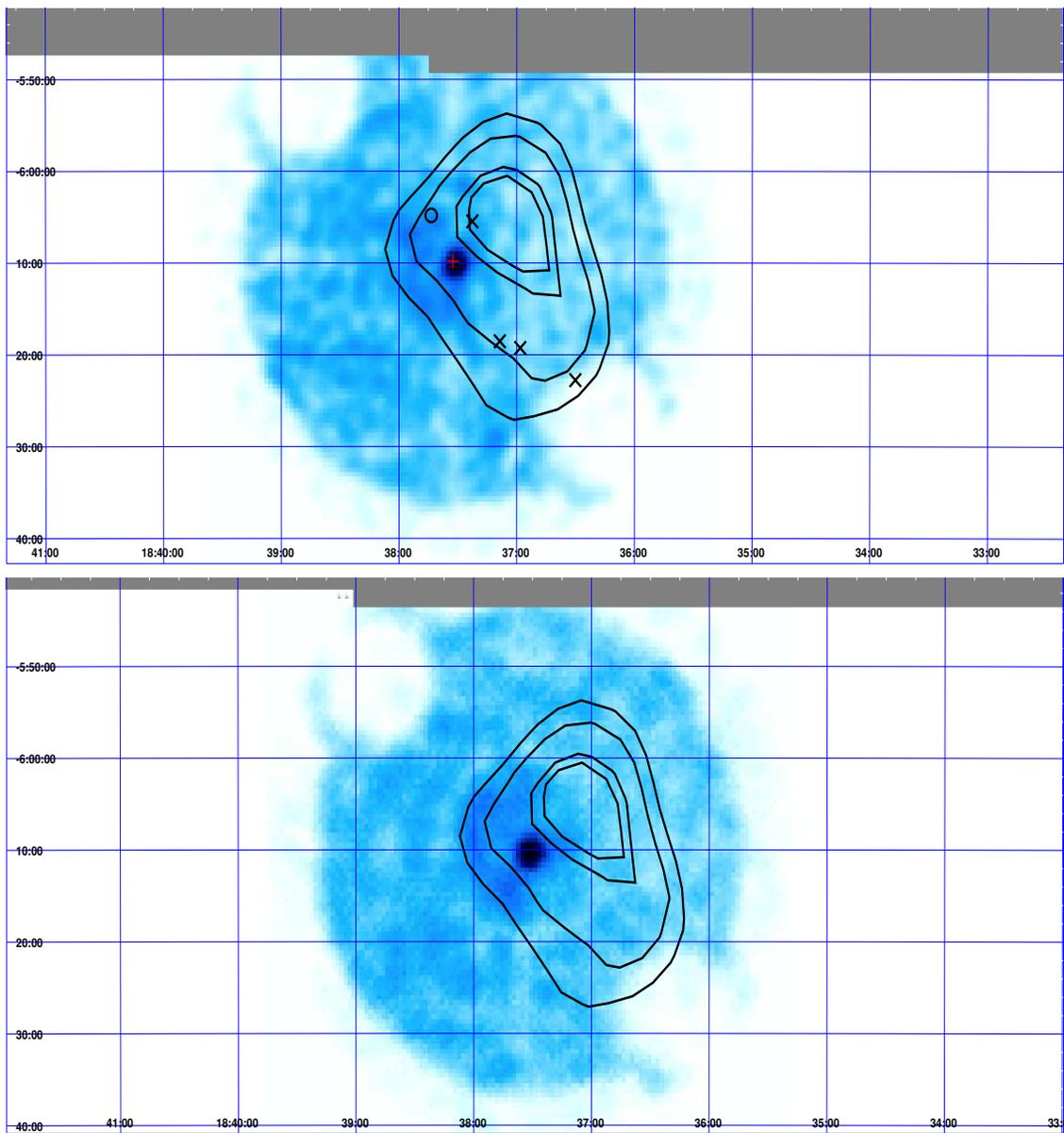


Figura 7.6: Contorni di confidenza della sorgente EGRET sovrapposti ai campi MECS BeppoSAX relativi alle osservazioni del 17 Aprile 2001 (sopra) e 12 Marzo 2001 (sotto). Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: ASCA con il simbolo +, Rosat WGA con il simbolo x. Il cerchietto invece è rappresentativo della posizione radio della pulsar PSR J1837-0604.

(nella banda 0.24-2 keV per le sorgenti Rosat WGA), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat WGA e ASCAGIS A). La ricerca effettuata ha individuato un totale di cinque sorgenti X, quattro sono Rosat del tipo WGA e la restante è una ASCAGIS. La sorgente Rosat n.1 è identificata con una stella di tipo spettrale F2. Per indagare la natura delle altre tre sorgenti Rosat abbiamo effettuato un'indagine multifrequenza (HEASARC)

Tabella 7.3: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1WGA J1837.3-0605	18 37 22.6	-06 05 28.0	0.0085	6.522	WGA
2	1WGA J1837.1-0618	18 37 08.6	-06 18 32.0	0.0053	9.066	WGA
3	1WGA J1836.9-0619	18 36 58.2	-06 19 16.0	0.0016	9.715	WGA
4	1WGA J1836.5-0622	18 36 30.1	-06 22 46.0	0.0027	15.41	WGA
5	AX J1837.5-0610	18 37 32.5	-06 09 49.0		8.399	A

del loro box di errore X. È risultato che anche la sorgente Rosat n.4 potrebbe essere una stella, mentre le restanti due non sono identificate, data la presenza nel loro box di errore di molteplici oggetti infrarossi ed ottici. Le quattro sorgenti Rosat WGA sono relativamente deboli e non sono state detettate dal MECS (vedi figura 7.6) probabilmente perché si tratta di oggetti con spettro ripido. Tali sorgenti non sembrano avere caratteristiche tali da poter essere considerate interessanti candidate controparti di 3EG J1837-0606.

Per quel che riguarda AX J1837.5-0610, invece, si tratta di una sorgente puntiforme individuata in una precedente immagine ASCA GIS nella banda “dura“ (2-10 keV) (Roberts et al. 2001). Lo spettro X misurato da ASCA è piuttosto piatto, ha un andamento a legge di potenza assorbita con $N_H = (0.58^{+1.17}_{-0.58}) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ e indice fotonico $\Gamma_x = 0.48^{+0.55}_{-0.57}$, il flusso tra 2-10 keV è pari a $(1.63 \pm 0.15) \times 10^{-12} \text{ fotoni cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Roberts et al. 2001). Osservazioni nella banda radio hanno evidenziato la presenza di dense nubi molecolari intorno a AX J1837.5-0610, le quali sembrano formare un cerchio con un raggio di circa 20 parsec (Sakamoto et al. 2001). Nella corrispettiva immagine ASCA GIS nella banda “soft“ (0.7-2 keV) è ben evidente infatti un’emissione diffusa di origine termica, che si estende per un raggio di circa 10 arcmin. Il suo centroide dista 5 arcmin dalla sorgente puntiforme “dura“ AX J1837.5-0610, la quale emerge ad energie più alte (2-10 keV) (Sakamoto et al. 2001). Un aspetto interessante è che AX J1837.5-0610 coincide posizionalmente con la sorgente BeppoSAX detettata dal MECS, come si può ben vedere in figura 7.6, in entrambi i campi osservati. Abbiamo effettuato un’indagine multifrequenza (HEASARC) per individuare eventuali controparti di AX J1837.5-0610. In una regione entro 1 arcmin da AX J1837.5-0610 sono presenti molteplici sorgenti ottiche (USNO) ed infrarosse (2MASS), due sorgenti radio (NVSS J183733-061035 a 0.8 arcmin di distanza con flusso a 20 cm di 150 mJy; NVSS 183730-061122 a 1 arcmin di distanza con flusso a 20 cm di 45 mJy) ed una stella conosciuta con la sigla PPM 201944 o BD-06 4814. Quest’ultima appartiene

a diversi cataloghi ottici, la sua magnitudine apparente è pari a $m=9.5$. È probabile tuttavia che tali oggetti celesti non siano la controparte di AX J1837.5-0610 e che la loro vicinanza sia dovuta solo ad un effetto di proiezione. In definitiva, alla luce di tutte le informazioni raccolte, AX J1837.5-0610 si presta come la migliore candidata controparte X di 3EG J1837-0606.

7.3.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente 3EG J1837-0606

3EG J1837-0606 è stata osservata da BeppoSAX in due puntamenti distanziati temporalmente di circa un mese. La prima osservazione è datata 12 Marzo 2001 con tempi di esposizione per il LECS e MECS di 13.494 e 40.060 ks; la seconda invece 17 Aprile 2001 con tempi di esposizione pari a 20.039 e 42.605ks. In entrambe le osservazioni c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS, con una significatività di $\sim 12\sigma$ tra 20 e 100 keV. Mostriamo in figura 7.7 i campi LECS/MECS relativi alle due osservazioni. Si può notare come al centro di entrambi i campi MECS (2-10 keV) è ben evidente una forte sorgente X la cui significatività è di $\sim 15\sigma$; tale oggetto celeste appare circondato tutt'intorno da una debole emissione diffusa. Alle basse energie, invece, non sembra essere visibile, come si può vedere in figura 7.7 in entrambi i campi LECS (0.7-2 keV), in accordo con le osservazioni Rosat che non l'hanno detettata. Ciò probabilmente è dovuto al fatto che a quelle energie risente dell'elevato assorbimento sul piano galattico.

I fit spettrali dei dati MECS della sorgente, per ciascuna delle due osservazioni, sono stati effettuati prendendo in considerazione una componente di assorbimento galattico, che nella direzione della sorgente stessa è di $1.85 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (ottenuta da dati radio a 21 cm e calcolata tramite XSPEC). Lo spettro tra 2-10 keV relativo alla prima osservazione è rappresentato da una legge di potenza assorbita con indice fotonico $\Gamma_X = 1.5_{-0.52}^{+0.75}$. Oltre all'assorbimento galattico è richiesto (ad un livello di confidenza del 75%, $\Delta\chi=1.55$ per un solo parametro di libertà) un addizionale assorbimento intrinseco $N_H \sim 2 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$. È presente una riga gaussiana (richiesta ad un livello di confidenza del 99%, $\Delta\chi=7.5$ per un solo parametro di libertà) centrata a $6.4_{-0.2}^{+0.2}$ keV la cui larghezza equivalente è di $EW = 661_{-370}^{+420}$ eV. Il flusso tra 2-10 keV è pari a $1.2 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Lo spettro tra 2-10 keV relativo alla seconda osservazione è rappresentato da una legge di potenza assorbita con indice fotonico $\Gamma_X = 1.6_{-0.4}^{+0.4}$, l'unico assorbimento richiesto è quello galattico. È presente anche questa volta una riga gaussiana (richiesta ad un livello di confidenza superiore al 99%, $\Delta\chi=10.3$ per un solo parametro di

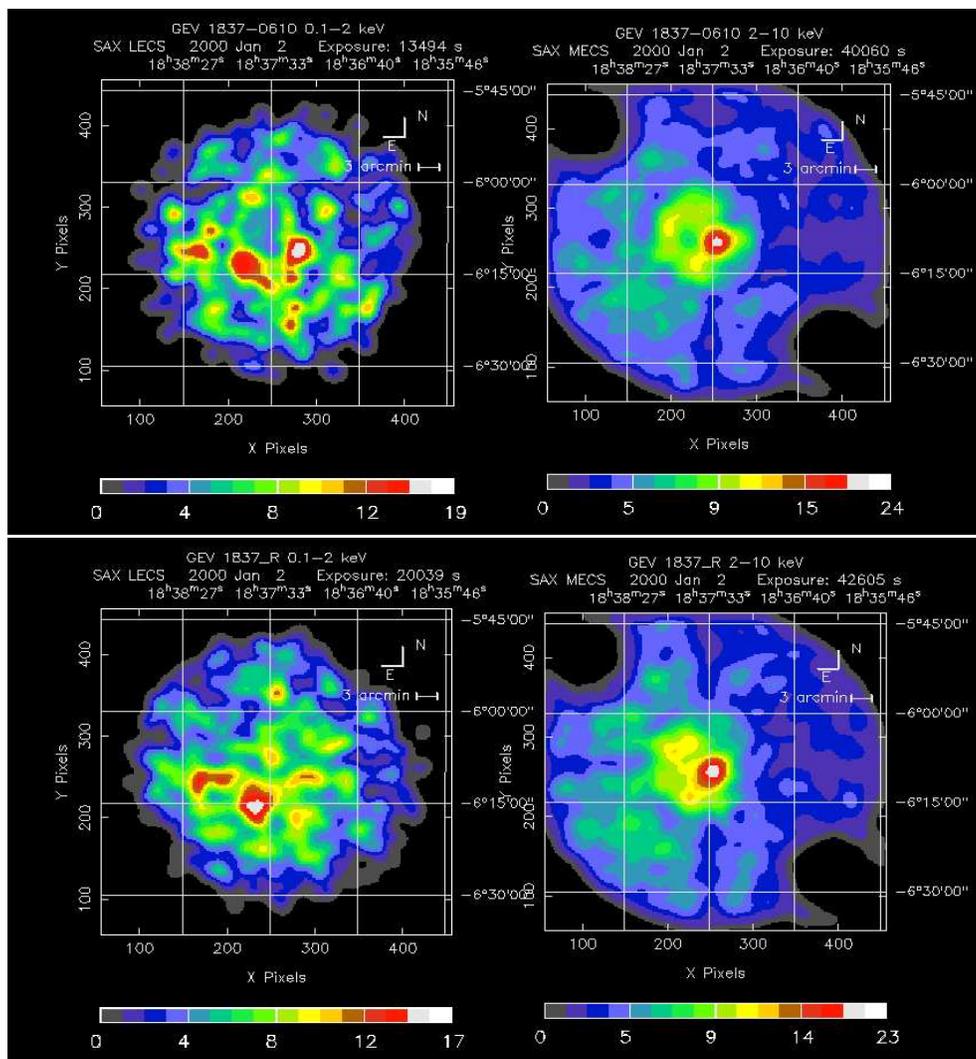


Figura 7.7: In alto sono mostrati i campi LECS e MECS relativi all'osservazione BeppoSAX del 12 Marzo 2001, in basso quelli del 17 Aprile 2001

libertà) centrata a $6.8_{-0.2}^{+0.3}$ keV la cui larghezza equivalente è di $EW=1510_{-738}^{+860}$ eV. Il flusso tra 2-10 keV è pari a 7.5×10^{-13} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$. Abbiamo provato a verificare se effettivamente c'è stata una qualche variazione delle caratteristiche fisiche della sorgente tra un'osservazione e l'altra. In figura 7.8 (in alto) sono plottati i contorni relativi all'energia della riga in funzione di quelli relativi alla costante di normalizzazione [andando dall'interno verso l'esterno, i contorni sono rispettivamente al 65%(1 σ), 95%(2 σ), 99%(3 σ)]. Quelli tratteggiati si riferiscono alla prima osservazione mentre quelli continui alla seconda. Si può vedere come i contorni sono compatibili al 90%, quindi non c'è stata una effettiva variazione dell'energia della riga da una osservazione all'altra. Non possiamo comunque trarre una conclusione definitiva a riguardo,

data la scarsa statistica a disposizione. Ecco perché, nel tentativo di migliorare la statistica e fissare meglio i valori dei parametri, abbiamo sommato i dati MECS relativi alle due diverse osservazioni ed effettuato l'analisi spettrale (vedi figura 7.8 in basso). Lo spettro (2-10 keV) è rappresentato da una legge di potenza assorbita (assorbimento fissato al valore galattico $N_H=1.85 \times 10^{22}$ cm^{-2}) con indice fotonico $\Gamma_X=1.2_{-0.2}^{+0.2}$. È presente una riga gaussiana (richiesta ad un livello di confidenza superiore al 99%, $\Delta\chi=10.3$ per un solo parametro di libertà) centrata a $6.6_{-0.1}^{+0.1}$ keV la cui larghezza equivalente è di $\text{EW}=574_{-270}^{+320}$ eV. Il flusso tra 2-10 keV è pari a 1×10^{-12} $\text{erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

Allo scopo di migliorare la qualità dell'immagine, abbiamo anche sommato

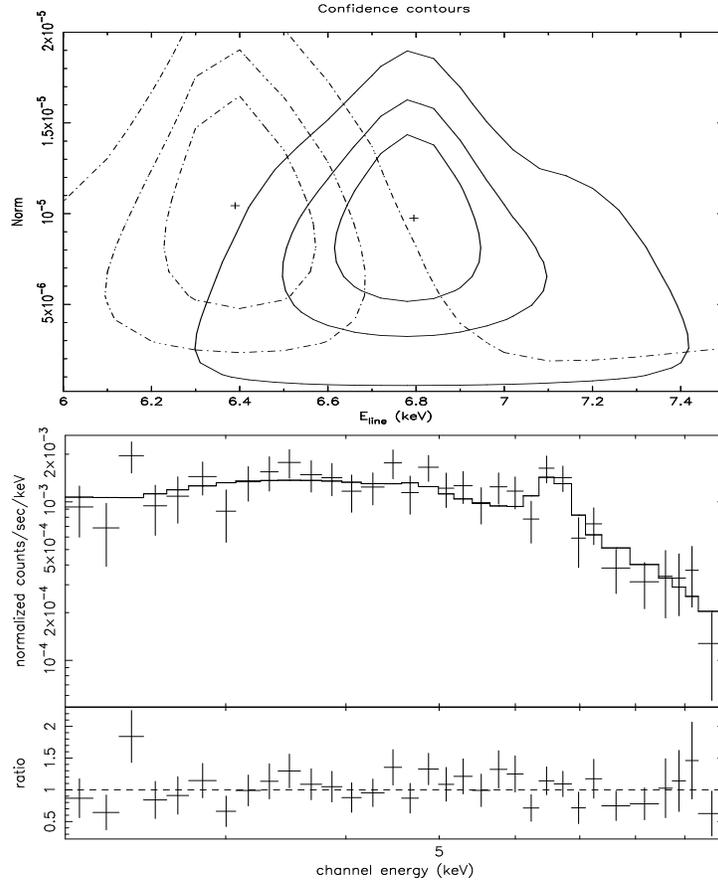


Figura 7.8: in alto: contorni relativi all'energia della riga e alla costante di normalizzazione; in basso: fit spettrale (2-10 keV) della somma dei dati MECS relativi alle due osservazioni

tra loro le due immagini MECS; cosa analoga è stata fatta anche per le immagini LECS (vedi figura 7.9). Si può notare come oltre alla sorgente puntiforme (indicata in figura 7.9 con una X), emerge una emissione più o meno diffusa sia alle basse energie (LECS) che alle alte energie (MECS). Abbiamo considerato la regione entro cui è racchiusa tutta l'emissione X

rivelata (di raggio $r=8$ arcmin, indicata in figura 7.9 con un cerchio) e abbiamo effettuato l'analisi spettrale. L'emissione tra 2-10 keV (MECS) è rappresentata ($\chi^2/\text{d.o.f.}=104/80$, $\chi^2_{\nu}=1.3$) da una legge di potenza ($\Gamma_X=0.8^{+0.2}_{-0.2}$) più un modello spettrale termico (MEKAL) tipico di un gas caldo e diffuso, con una temperatura pari a $KT \sim 6$ keV. È richiesta (ad un livello di confidenza tra il 95% e 99%, $\Delta\chi=5.6$ per un solo parametro di libertà) una riga gaussiana centrata a $6.4^{+0.3}_{-0.4}$ keV.

Come abbiamo già detto ad inizio paragrafo, in entrambe le osservazioni

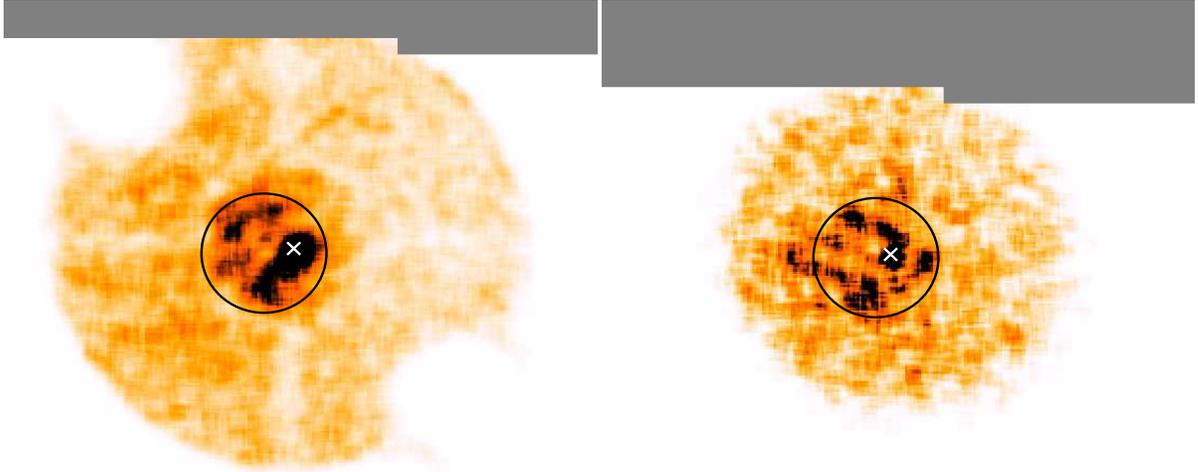


Figura 7.9: Campo MECS (sulla sinistra) e campo LECS (sulla destra) ottenuti dalla somma delle due osservazioni BeppoSAX del 12 Marzo e 17 Aprile 2001

BeppoSAX c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS, con una significatività di $\sim 12\sigma$ tra 20 e 100 keV. Tale strumento non ha la capacità di fornire immagini e pertanto qualsiasi oggetto all'interno del suo campo può essere responsabile dell'emissione detettata ad alta energia. A prima vista sarebbe naturale attribuire l'emissione rivelata dal PDS alla sorgente AX J1837.5-0610. Per controllare la veridicità di una tale supposizione abbiamo effettuato un'analisi spettrale combinando insieme i suoi dati MECS con quelli del PDS. Le costanti di cross calibrazione tra i due strumenti MECS/PDS, per ciascuna delle due osservazioni, sono risultate pari rispettivamente a $23.42^{+14.58}_{-8.17}$ e 54^{+36}_{-20} . Tali valori sono ben all'esterno dell'intervallo nominale (0.75-0.95) riportato da Fiore, Guainazzi & Grandi (1998). Abbiamo a questo punto provato a fittare i dati MECS/PDS simultaneamente considerando il caso in cui la discrepanza tra le costanti di cross calibrazione fosse dovuta alla presenza di materiale assorbente con N_H

molto elevato ($N_H \geq 10^{24} \text{ cm}^{-2}$). Questi fit sono stati effettuati sia utilizzando il flusso della sola sorgente X puntiforme AX J1837.5-0610, che di quest'ultima e di tutta l'emissione diffusa intorno (vedi figura 7.9). Anche in questo caso i risultati ottenuti sembrano suggerire che l'emissione rivelata dal PDS non è dovuta alla sorgente AX J1837.5-0610, ma quasi sicuramente ad un altro oggetto X presente nel suo campo di vista. Abbiamo allora cercato (HEASARC) possibili sorgenti ad alta energia localizzate all'interno del campo del PDS ma fuori dal campo MECS. In effetti è stata localizzata, ad una distanza di ~ 47 arcmin dal puntamento BeppoSAX, una sorgente ASCA (AX J183800-0655) brillante con coordinate RA=18h 38m 0.1s DEC=-06° 55' 54" e un flusso tra 0.7-10 keV di $1.1 \times 10^{-11} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Tale sorgente coincide posizionalmente con altri due oggetti X brillanti, 2E 1835.3-0658 e EXO1835-070, quest'ultimo ha un conteggio di fotoni al secondo pari a 1.27 ± 0.19 tra 2-6 keV. È probabile che sia questa la sorgente responsabile dell'emissione ad alta energia rivelata dal PDS.

7.3.3 Caratteristiche globali della sorgente

La sorgente 3EG J1837-0606 è localizzata sul piano galattico, presenta un flusso gamma non variabile e ha un indice fotonico pari a $\Gamma_\gamma = 1.82 \pm 0.14$, valore ben all'interno dell'intervallo numerico 1.66-2.19 che caratterizza gli indici fotonici delle pulsar gamma fino ad oggi conosciute (Thompson et al. 1999). Queste tre caratteristiche suggeriscono fortemente un'origine galattica del tipo pulsar. Tale ipotesi è resa ancor più affascinante dalla recente scoperta, nella scatola di errore gamma, della giovane pulsar radio PSR J1837-0604 (D'amico et al. 2001). Le sue coordinate sono RA=18h 37m 43.55s e DEC=-06° 04' 49" mentre la sua distanza è pari a $D=6.2 \text{ Kpc}$; in figura 7.6 la localizzazione della pulsar nel box di errore gamma è indicata con un cerchietto. Come abbiamo già spiegato nel paragrafo 1.4.3 relativo alle pulsar EGRET, il rapporto tra i due parametri \dot{E}/D^2 (dove \dot{E} è il rate di perdita di energia rotazionale e D è la distanza) viene considerato un indicatore dell'osservabilità gamma di una pulsar, nel senso che tanto più alto è tale rapporto tanto più la pulsar ha le potenzialità per emettere fotoni gamma. PSR J1837-0604 possiede un valore di \dot{E}/D^2 molto alto, simile a quello delle pulsar individuate da EGRET. La stessa cosa vale anche per tutti gli altri parametri di PSR J1837-0604 (età, periodo P , campo magnetico B , rate di rallentamento \dot{P} , luminosità L_γ , flusso F_γ , efficienza conversione energia rotazionale in luminosità gamma η_γ). PSR J1837-0604 si presta quindi

come un'ottima candidata pulsar gamma. Sorprendentemente, nessun resto di supernova è presente entro $1^\circ.5$ dalla posizione della pulsar, osservazioni radio tuttavia hanno evidenziato che PSR J1837-0604 è localizzata sul bordo di una estesa shell designata con il nome G26.0+0.1 (D'amico et al. 2001). Dati infrarossi (IRAS e MSX) della regione in questione mostrano anch'essi la presenza di una brillante shell con una morfologia simile a quella vista nel radio (Roberts et al. 2001); inoltre nella parte più brillante di G26.0+0.1 sono state rivelate varie righe di ricombinazione dell'idrogeno (Wink, Wilson, & Bieging 1983). Tutti questi indizi suggeriscono fortemente che G26.0+0.1 è una regione HII. Ciò spiegherebbe l'assenza del resto di supernova, dato che quest'ultimi sono difficili da individuare in prossimità di brillanti regioni HII (Sarma et al. 1997). La velocità sistemica di G26.0+0.1 implica una distanza di circa 6-9 Kpc, il primo valore è consistente con la distanza stimata per PSR J1837-0604 ($D=6.2$ Kpc) ed è pertanto possibile che entrambi gli oggetti siano associati con lo stesso gruppo di stelle massicce.

Le pulsar gamma conosciute possono essere divise in due categorie: pulsar giovani (ad esempio Crab e Vela) circondate da una brillante nebulosità X e radio le cui caratteristiche peculiari permettono di distinguerle ad esempio dai resti di supernova (si parla in questo caso di Pulsar Wind Nebulae, PWN); pulsar più "vecchie" rispetto a quelle precedenti, che appaiono invece come sorgenti X puntiformi senza PWN (ad esempio Geminga e PSR 1055-52). Per quel che riguarda la PSR J1837-0604, la ricerca di una sua eventuale PWN radio è piuttosto difficile da effettuare data la sua localizzazione sul bordo di una brillante shell radio (D'amico et al 2001). Dal punto di vista X nessuna emissione è stata fin ora rivelata alla posizione di PSR J1837-0604 sia con osservazioni ASCA tra 2-10 keV (Roberts et al. 2001) che con osservazioni BeppoSAX (vedi figura 7.6) Recentemente anche un'osservazione Chandra della regione in questione (tempo di esposizione di 10 ks) non ha mostrato evidenza di nessuna sorgente X associata con la pulsar a livelli di flusso estremamente bassi (Roberts et al. 2003). Tenuto conto di ciò, abbiamo ricostruito la SED (vedi figura 7.10) prendendo in considerazione i dati EGRET relativi a 3EG J1837-0606 (triangoli pieni) ed i dati MECS BeppoSAX (2-10 keV) di AX J1837.5-0610 (pallini vuoti). Sono stati indicati inoltre i limiti superiori (upper limit) della pulsar (a 2σ) relativi alla singola osservazione BeppoSAX del 12 Marzo 2001 (triangoli vuoti) e alla somma delle due osservazioni del 12 Marzo 2001 e 17 Aprile 2001 (pallini pieni). Per quel che riguarda la sorgente X puntiforme AX J1837.5-0610 rivelata da

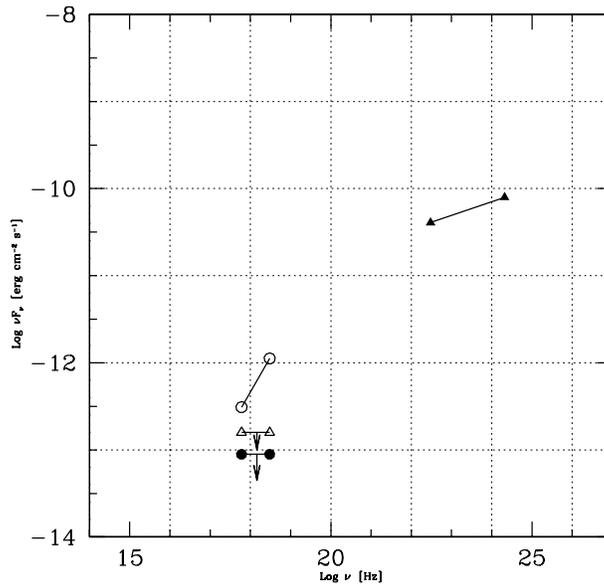


Figura 7.10: SED ricostruita attraverso i dati EGRET relativi a 3EG J1837-0606 (triangoli pieni) ed i dati MECS BeppoSAX (2-10 keV) di AX J1837.5-0610 (pallini vuoti). Sono stati inoltre indicati gli upper limit della pulsar PSR J1837-0624 (a 2σ) relativi alla singola osservazione BeppoSAX del 12 Marzo 2001 (triangoli vuoti) e alla somma delle due osservazioni del 12 Marzo 2001 e 13 Aprile 2001 (pallini pieni)

BeppoSAX, essa è molto probabilmente di origine galattica; è localizzata nei dintorni della pulsar PSR J1837-0624 (vedi figura 7.6) ma non è chiaro se questi due oggetti celesti sono in qualche modo “correlati” tra loro o meno. AX J1837.5-0610 e PSR J1837-0624 sembrano essere localizzati nella stessa regione, per la quale gli indizi raccolti suggeriscono una origine del tipo regione di formazione stellare HII. Le caratteristiche X di AX J1837.5-0610 (in particolar modo la presenza nel suo spettro di una riga a 6.6 keV) sembrano escludere una natura del tipo pulsar. L’alternativa è quella che si tratti di un buco nero o microquasar, soprattutto se si considera la sua localizzazione in una regione HII, presumibilmente ricca di stelle calde e massicce di tipo spettrale O e B. Abbiamo infine effettuato una indagine radio (alla frequenza di 5 Ghz) della scatola di errore gamma di 3EG J1837-0606 (HEASARC) individuando un’unica sorgente, PMN J1837-0615, con un flusso di 5 Jy. Tale oggetto non presenta controparte X (HEASARC) mentre è disponibile un’altra sua misura del flusso radio a 20 cm (2.4 Jy). A 0.8 arcmin di distanza è localizzata (SIMBAD) la regione HII GAL 025.77+00.21 la quale molto probabilmente è

l'oggetto responsabile dell'emissione.

In definitiva, sebbene molti degli indizi raccolti sono tali da individuare nella pulsar PSR J1837-0604 un'ottima candidata controparte di 3EG J1837-0606, non è da "sottovalutare" la presenza nelle sue vicinanze di una brillante sorgente X puntiforme (AX J1837.5-0610) che potrebbe fornire un contributo importante all'emissione gamma osservata. Dati X e gamma più precisi dal punto di vista spaziale, temporale e spettrale, potrebbero fornire informazioni tali da chiarire il quadro ed individuare la controparte di 3EG J1837-0606.

7.4 3EG J1824-1514

Si tratta di una sorgente detettata da EGRET con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=5.6$) durante il VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione VP compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995). Il suo flusso medio è di $F_{P1234}=(35.2\pm 6.5) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. La sorgente è localizzata sul piano galattico ($b=-1.1^\circ$) ed il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.19\pm 0.18$. Il raggio per il contorno di confidenza al 95% è di 31.2 arcmin, in figura 7.11 mostriamo tutti i suoi contorni sovrapposti al campo MECS BeppoSAX.

7.4.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

Il satellite BeppoSAX ha compiuto un'osservazione della sorgente RX J1826.2-1450, identificata recentemente con una microquasar (Paredes et al. 2000). Il relativo campo MECS (2-10 keV), come si può ben vedere in figura 7.11, copre solo una parte della scatola di errore di 3EG J1824-1514. Per indagare la restante parte non coperta abbiamo usato dati X di archivio (HEASARC), le sorgenti trovate sono tutte listate in tabella 7.4, con le loro coordinate equatoriali, il conteggio di fotoni al secondo nella banda 0.1-2.4 keV, la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Faint F e Rosat Bright B). Abbiamo individuato un totale di 5 sorgenti X, 4 sono Rosat del tipo F ed una invece è del tipo B. La sorgente X più forte (Rosat B n.5) coincide con la microquasar target dell'osservazione BeppoSAX, la sua controparte radio (NVSS J182614-145054) è piuttosto compatta, brillante e moderatamente variabile (Martì et al. 1998). Un'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X delle quattro Rosat Faint ha evidenziato la natura di stelle per le sorgenti n.3 e n.4 mentre quelle restanti (n.1 e n.2) non sono identificate data la presenza nella loro scatola di errore di molteplici

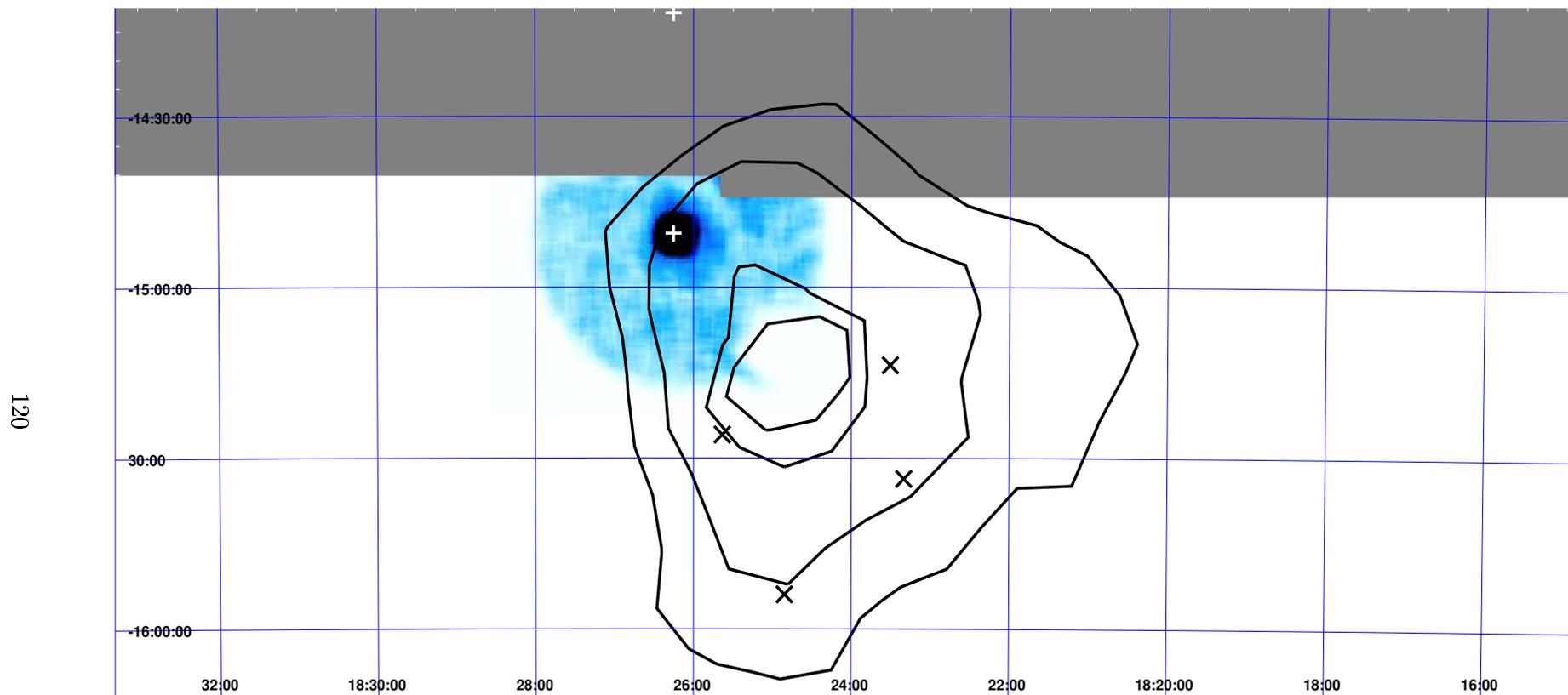


Figura 7.11: Campo MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1824-1514. Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: le croci sono le sorgenti Rosat brillanti (Bright), le x sono le Rosat deboli (Faint).

Tabella 7.4: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J182330.5-151342	18 23 30.5	-15 13 42.5	0.0271	15.238	F
2	1RXS J182538.1-152555	18 25 38.1	-15 25 55.0	0.0256	20.493	F
3	1RXS J182320.1-153338	18 23 20.1	-15 33 38.5	0.0255	27.491	F
4	1RXS J182450.8-155357	18 24 50.8	-15 53 57.0	0.0251	41.559	F
5	1RXS J182615.1-145034	18 26 15.1	-14 50 34.0	0.0600	32.974	B

sorgenti ottiche ed infrarosse.

In definitiva, la microquasar RX J1826.2-1450 risulta essere la sorgente X più forte ed interessante fra tutte quelle presenti nella scatola di errore gamma e si presta quindi come la migliore candidata controparte di 3EG J1824-1514.

7.4.2 Osservazione BeppoSAX della sorgente RX J1826.2-1450

Le microquasar sono oggetti celesti che presentano, su scale spaziali più piccole, le tipiche caratteristiche degli AGN della classe blazar. Si tratta cioè di sistemi binari X in cui un oggetto compatto (buco nero o stella di neutroni) accresce materia da una stella compagna. Il parametro chiave nella distinzione quasar-microquasar è la massa dell'oggetto compatto che funge da motore centrale, inferiore di circa nove ordini di grandezza rispetto a quella dei buchi neri supermassicci degli AGN. La firma incontrovertibile della natura di microquasar è rappresentata dalla presenza di due getti radio relativistici ben collimati, individuabili su scale dell'ordine dei milliarcsec con osservazioni VLBA. Il numero di microquasar fino ad oggi individuate è pari a 14 (Mirabel & Rodriguez 1999) su un totale di ~ 280 binarie X conosciute.

La sorgente RX J1826.2-1450 è stata osservata da BeppoSAX in data 8 Ottobre 2000 per circa 35 ks con lo strumento MECS e 12 ks con quello LECS. Come si può ben vedere in figura 7.12, la microquasar è ben rivelata al centro dei due campi con una significatività di 32σ (2-10 keV) e 6σ (0.1-2 keV). Nel campo MECS si può notare la presenza di un'altra sorgente X (RA=18h 25m 32s DEC=-14° 40' 30.7", indicata con la lettera A) la cui significatività è di $\sim 8\sigma$. Tale oggetto è più debole della microquasar, infatti non compare nel campo LECS probabilmente a causa dell'elevato assorbimento sul piano della galassia. Ad esso non risulta associata nessuna sorgente X o radio (HEASARC), abbiamo individuato (SIMBAD) la presenza a circa 1.9 arcmin di distanza di una stella del tipo Wolf-Rayet (WR) denominata WR115. Tale oggetto celeste fa parte dell'ammasso aperto Do 78 (Manchanda et al. 1996).

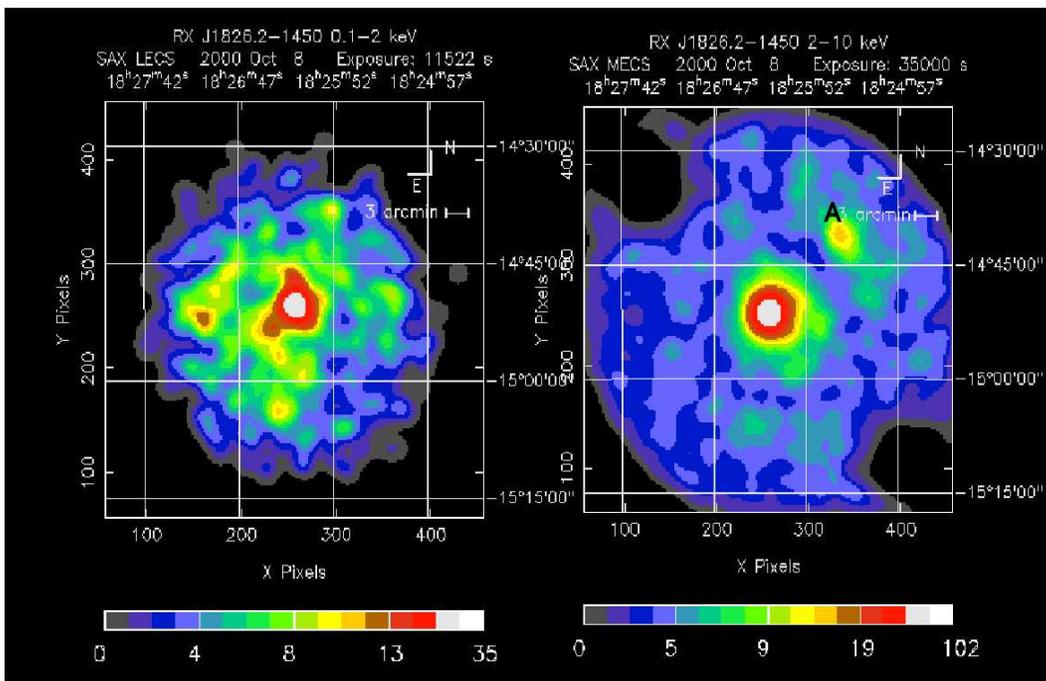


Figura 7.12: Sulla sinistra è mostrato il campo LECS e sulla destra quello MECS, relativi all'osservazione BeppoSAX del microquasar RX J1826.2-1450

Le stelle WR sono conosciute essere X emittenti, quindi è probabile che proprio WR115 sia responsabile della debole emissione X rivelata nel campo MECS. Sebbene dal punto di vista teorico, sotto talune condizione, le stelle WR siano considerate potenziali sorgenti di emissione gamma (White & Chen 1992, Chen & White 1991, Casse' & Paul 1980, Manchanda et al. 1996), la stella di Wolf-Rayet in questione (WR115) non sembra avere le caratteristiche fisiche giuste per poter emettere eventualmente fotoni gamma, ad esempio i suoi venti stellari non hanno un'elevata velocità terminale (Manchanda et al. 1996); possiamo quindi escludere WR115.

L'analisi spettrale dei dati MECS BeppoSAX riguardanti RX J1826.2-1450 (Reig et al. 2003) è stata effettuata usando un modello di legge di potenza assorbita. I valori dell'indice fotonico e dell'assorbimento sono risultati pari a $\Gamma_X = 1.8 \pm 0.1$ e $N_H = (1.2 \pm 0.4) \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$, con un flusso tra 1.6-10 keV di $4.6 \times 10^{-12} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Tale valore è circa un ordine di grandezza più piccolo di quello ottenuto con osservazioni del satellite RXTE due anni e mezzo prima; ciò è stato interpretato in termini di diminuzione del rate di massa accresciuta dall'oggetto compatto.

7.4.3 Caratteristiche globali della sorgente

Come abbiamo avuto modo di vedere, nella scatola di errore gamma di 3EG J1824-1514 sono presenti poche sorgenti X, tra di esse la microquasar RX J1826.2-1450 è quella più forte ed interessante. Dal punto di vista radio, invece, un'indagine con HEASARC non ha evidenziato la presenza di nessuna sorgente del tipo blazar nel box di errore gamma. L'oggetto radio in assoluto più forte (1.129 Jy a 4.85 GHz) risulta associato (SIMBAD) ad una regione HII. Per quel che riguarda la variabilità della sorgente gamma, il suo indice I (Torres et al. 2001) ha un valore tale da indicarne un comportamento variabile. Mirabel & Rodriguez (1999) sostengono che le microquasar i cui getti radio formano piccoli angoli con la linea di vista dell'osservatore, in analogia con il modello di unificazione per gli AGN, possono apparire e comportarsi come "microblazar". Bernado et al. (2002) hanno proposto un modello di emissione gamma da parte di microblazar attraverso Compton inverso tra elettroni relativistici del getto radio e fotoni ultravioletti originati dalla stella compagna dell'oggetto compatto; tale modello è in grado tra l'altro di giustificare e prevedere variabilità nell'emissione gamma. La formazione dell'oggetto compatto (buco nero o stella di neutroni) della binaria X richiede necessariamente un'esplosione di supernova che non distrugga il sistema; tale evento esplosivo può cambiare considerevolmente le proprietà cinematiche del sistema stesso. Infatti recenti misurazioni dirette delle velocità proprie di microquasar (Mirabel et al. 2001) hanno evidenziato in alcuni casi alti valori per la componente della velocità perpendicolare al piano galattico, ciò permetterebbe alla microquasar di allontanarsi dal suo luogo di origine e raggiungere possibilmente latitudini galattiche medie. Dato che le microquasar conosciute si ritiene siano solo una piccola parte di quelle totali nella nostra galassia, non è da escludere che alcuni di questi oggetti a basse e medie latitudini possano essere, alla luce del modello di Bernado, le controparti di sorgenti gamma non identificate. A tal proposito, oltre RX J1826.2-1450, un altro caso di microquasar considerata quale migliore candidata controparte per una EGRET variabile non identificata è quello di LS I +61°303 e 3EG J0241+6103 (Tavani et al. 1998, Torres et al. 2001). La possibilità che le microquasar possano rappresentare una nuova classe di emettitori gamma è affascinante ma al momento non confermabile con i pochi casi potenziali a disposizione. Una prova molto importante potrebbe essere l'individuazione, nello spettro gamma, della riga (a pochi MeV) di annichilazione elettroni-

positroni, una sfida che può essere forse affrontata con i dati spettrali più precisi di prossime missioni spaziali.

7.5 3EG J1800-2338

È durante il VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995) che 3EG J1800-2338 è stata detettata con la più alta significatività statistica ($\sqrt{TS}=9.6$); durante tale periodo il flusso medio è risultato pari a $F_{P1234}=(61.3\pm 6.7)\times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ a $E>100$ MeV. La sorgente è localizzata sul piano galattico ($b=-0.2^\circ$) e il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.1\pm 0.1$. Tutti e tre gli indici I, V e τ hanno valori tali da indicare non variabilità nel flusso. La scatola di errore gamma ha un raggio per il contorno di confidenza al 95% di soli 19.2 arcmin, un valore piccolo se confrontato con quello tipico per la stragrande maggioranza delle sorgenti EGRET (compreso tra 30 e 60 arcmin). Tale vantaggio è una diretta conseguenza del fatto che 3EG J1800-2338 è una sorgente gamma GeV, pertanto è conosciuta anche con la sigla GEV J1800-2328. È riportata nel catalogo di Lamb & Macomb (1997) con una significatività e un flusso (a $E>1$ GeV) pari rispettivamente a 5.4σ e $(6.3\pm 1.3)\times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. In figura 7.13 mostriamo tutti i contorni di confidenza di 3EG J1800-2338 sovrapposti al campo MECS BeppoSAX.

7.5.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

L'osservazione compiuta dal satellite BeppoSAX tramite lo strumento MECS copre una discreta parte della piccola scatola di errore di 3EG J1800-2338, come si può ben vedere in figura 7.13. Per indagare la restante parte non coperta abbiamo usato dati X di archivio (HEASARC), le sorgenti trovate sono tutte listate in tabella 7.5, con le loro coordinate equatoriali, il conteggio di fotoni al secondo (nella banda 0.1-2.4 keV per le Rosat B e F, nella banda 0.24-2 keV per le Rosat WGA), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Faint F, Rosat Bright B, Rosat WGA). Abbiamo individuato un totale di otto sorgenti X, quattro sono Rosat del tipo WGA, tre del tipo F ed una invece è del tipo B. Le sorgenti Rosat WGA n.7 e n.9 sono già identificate con stelle. Un'indagine multifrequenza (HEASARC) del box di errore X per le restanti Rosat ha evidenziato la natura di stella per la F n.1 mentre tutte le altre non sono identificabili. C'è da sottolineare come la sorgente Rosat

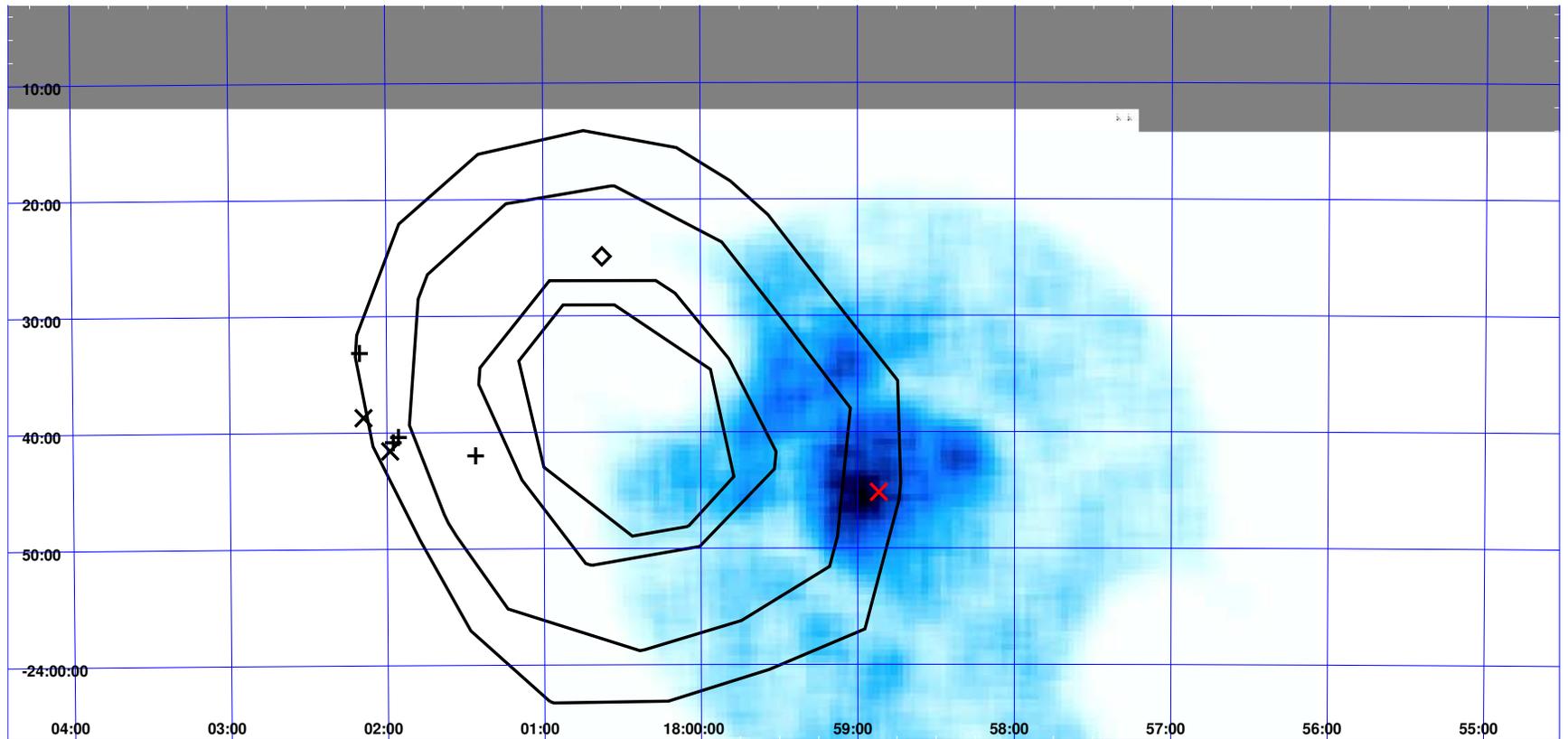


Figura 7.13: Campo MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1800-2338. Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: le croci sono le sorgenti Rosat WGA, le x sono le Rosat deboli (Faint) e i rombi quelle Brillanti (Bright).

Tabella 7.5: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J180158.8-234134	18 01 58.8	-23 41 34.5	0.0751	19.631	F
2	1RXS J180208.9-233842	18 02 08.9	-23 38 42.5	0.0189	21.865	F
3	1RXS J175851.9-234511	17 58 51.9	-23 45 11.0	0.0157	23.917	F
4	1RXS J180037.6-232454	18 00 37.6	-23 24 54.5	0.9200	14.722	B
5	1WGA J1801.1-2342	18 01 26.1	-23 42 00.0	0.1180	12.280	WGA
6	1WGA J1801.9-2340	18 01 55.6	-23 40 23.0	0.1140	18.815	WGA
7	1WGA J1801.9-2340	18 01 57.6	-23 40 50.0	0.0406	19.295	WGA
8	1WGA J1802.1-2333	18 02 10.3	-23 33 09.0	0.0242	23.095	WGA

F n.3 è localizzata in prossimità dell'emissione X diffusa rivelata dal MECS (vedi figura 7.13).

7.5.2 Osservazione BeppoSAX

L'osservazione compiuta dal satellite BeppoSAX non ha un target specifico, in quanto rientra in un programma di monitoraggio del bulge galattico il cui scopo era la ricerca di sorgenti X transienti caratterizzate da burst X del tipo I (quelli dovuti a flash termonucleari sulla superficie di stelle di neutroni in accrescimento). L'osservazione è stata compiuta in data 23 Febbraio 1999 con puntamento RA=17h 58m 03.4s DEC=-23° 46' 32", il tempo di esposizione per il MECS è stato di 21 ks, non c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS. Mostriamo in figura 7.14 il campo MECS relativo all'osservazione BeppoSAX. Si può notare come non vi è nessuna forte sorgente puntiforme in evidenza. È stata rivelata un'emissione X piuttosto diffusa (~ 5 arcmin di raggio) e molto debole, il cui centroide (17h 59m 01.7s, -23° 45' 0.3", rappresentato dal cerchietto numero 4 in figura 7.14) sembra presentare un'intensità lievemente superiore a quella delle regioni circostanti. Da tale emissione diffusa non emerge nessun forte oggetto X, tale da poter effettuare un'analisi spettrale. Una ricerca con SIMBAD ha evidenziato che entro un raggio di ~ 2.5 arcmin dal centroide è presente la sorgente Rosat F n.3, una regione HII ed una sorgente infrarossa.

Indipendentemente dalla natura dell'oggetto celeste responsabile dell'emissione X rivelata da BeppoSAX, è improbabile che esso possa comunque essere la controparte di 3EG J1800-2338. Infatti essendo quest'ultima anche una sorgente GeV, in questo caso il suo box di errore è più piccolo rispetto a quello della stessa sorgente classificata come 3EG. In tale scatola di errore più piccola il campo MECS BeppoSAX non è compreso.

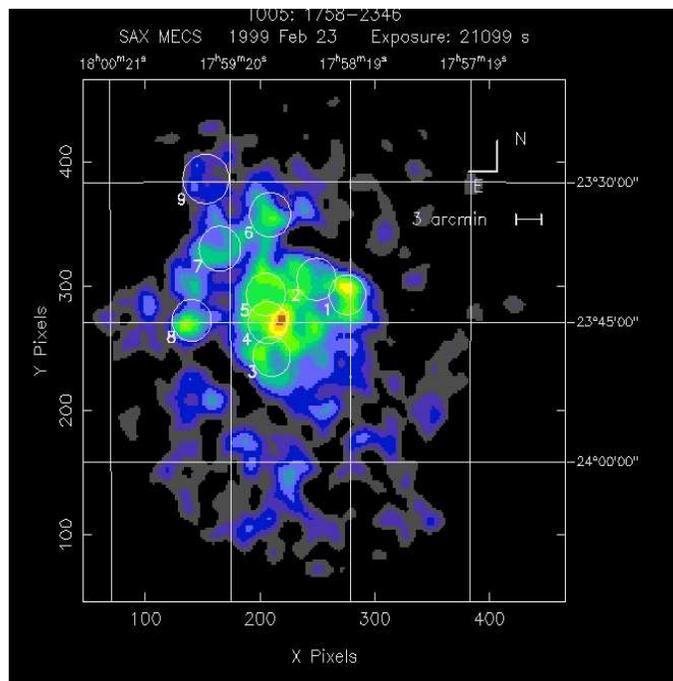


Figura 7.14: Campo MECS relativo all'osservazione BeppoSAX

7.5.3 Caratteristiche globali della sorgente

La sorgente 3EG J1800-2338 è localizzata sul piano galattico e presenta un flusso gamma non variabile. Il suo indice spettrale fotonico ha un valore ($\Gamma_\gamma=2.1\pm 0.1$) interno all'intervallo numerico (1.66-2.19) che caratterizza gli indici fotonici delle 7 pulsar gamma fino ad oggi conosciute. Tuttavia solo una tra quest'ultime (la Crab) presenta un Γ_γ di poco superiore a 2 (come accade per 3EG J1800-2338) contrariamente alle restanti sei pulsar che invece hanno un $\Gamma_\gamma < 2$. Zhang & Cheng (1998) hanno individuato una correlazione posizionale tra 3EG J1800-2338 e la pulsar PSR B1758-23, tuttavia essi suggeriscono (alla luce dei parametri posseduti dalla pulsar) che PSR B1758-23 può al massimo essere responsabile solo di una piccola parte dell'emissione gamma osservata. Un'osservazione ASCA, con una copertura quasi completa della scatola di errore di 3EG J1800-2338 (Roberts et al. 2001), non ha evidenziato nessuna emissione X tra 2-10 keV in corrispondenza della posizione della pulsar stessa. Una particolarità interessante è che PSR B1758-23 sembra essere localizzata sul bordo del resto di supernova W28 (Kaspi et al. 1993), tuttavia l'età calcolata per i due oggetti celesti è piuttosto differente. È pertanto probabile che la loro associazione sia apparente e dovuta solo ad un effetto prospettico. Il resto di supernova W28 è stato associato a 3EG

J1800-2338 (Romero et al. 1999, Zhang & Cheng 1998) alla luce del fatto che tali oggetti celesti, secondo alcune teorie, potrebbero produrre fotoni gamma attraverso diversi processi (decadimento di π^0 prodotti in collisioni adroniche, Compton inverso tra elettroni relativistici e fotoni di bassa energia, bremsstrahlung relativistica di e^\pm con materia circostante la SNR). Tale scenario è supportato tra l'altro dalla localizzazione di W28 in una regione molto complessa del piano galattico, ricca di regioni HII, nubi molecolari e Maser OH (Wootten 1981, Claussen et al. 1997). Tale ambiente potrebbe in effetti favorire i meccanismi di emissione gamma citati precedentemente.

Alla luce delle considerazioni sovraesposte, è probabile che l'emissione gamma di 3EG J1800-2338 sia dovuta al contributo di più sorgenti, tipo la pulsar PSR B1758-23, il resto di supernova W28 o addirittura una pulsar radio-quiet nascosta in W28. I dati più precisi di future missioni spaziali potrebbero aiutare a chiarire il quadro, confermando possibilmente quelle che al momento sono solo ipotesi.

7.6 3EG J1410-6147

La sorgente 3EG J1410-6147 è stata detettata con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=7.8$) nel VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione VP compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995). Il flusso medio durante tale periodo è $F_{P1234}=(64.2\pm 8)\times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, a $E>100$ MeV. La sorgente è localizzata sul piano galattico ($b=-0.34^\circ$) ed il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.12\pm 0.14$. Tutti e tre gli indici I, V e τ hanno valori tali da indicare non variabilità del flusso. La scatola di errore gamma ha un raggio per il contorno di confidenza al 95% pari a 21.6 arcmin, un valore piccolo se confrontato con quello tipico della stragrande maggioranza delle sorgenti EGRET (compreso tra 30 e 60 arcmin). In figura 7.15 mostriamo tutti i contorni di confidenza di 3EG J1410-6147 sovrapposti al campo MECS BeppoSAX.

7.6.1 Ricerca della controparte X nella scatola di errore

L'osservazione compiuta dal satellite BeppoSAX tramite lo strumento MECS non copre totalmente la scatola di errore gamma, come si può ben vedere in figura 7.15, pertanto abbiamo utilizzato dati X di archivio (HEASARC) per indagare la parte non coperta. Sono state individuate solo due sorgenti X Rosat, una del tipo F ed una del tipo B: sono listate in tabella 7.6, con le loro

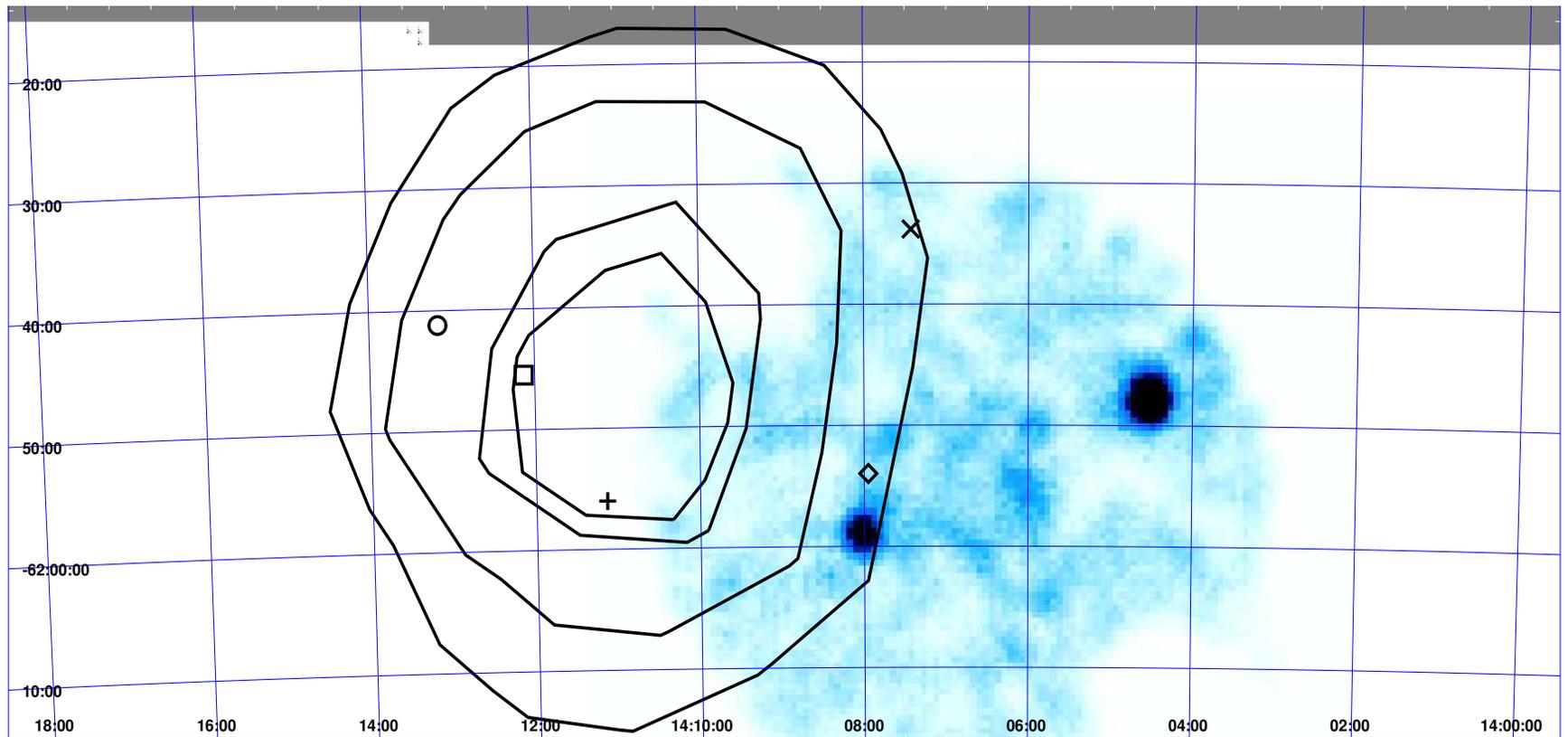


Figura 7.15: Campo MECS (2-10 keV) BeppoSAX sovrapposto ai contorni di confidenza al 50%, 68%, 95% e 99% della sorgente 3EG J1410-6147. Sono indicate tutte le sorgenti X presenti: le croci sono le sorgenti Rosat brillanti Bright B, le x sono le Rosat deboli Faint F. I restanti tre simboli (rombo, quadrato, cerchietto) sono rappresentativi di tre diverse pulsar.

Tabella 7.6: Ricerca della controparte X nel box di errore gamma

n.	Sorgente	RA (J2000)	Dec J(2000)	conteggio Cts/s	distanza <i>arcmin</i>	Tipologia
1	1RXS J140725.5-613348	14 07 25.5	-61 33 48.5	0.0115	29.076	F
2	1RXS J141108.2-615601	14 11 08.2	-61 56 01.0	0.09	9.817	B

coordinate equatoriali, il conteggio di fotoni al secondo (nella banda 0.1-2.4 keV), la distanza dalla posizione della sorgente EGRET e la tipologia (Rosat Faint F, Rosat Bright B). Un'indagine multifrequenza (HEASARC/SIMBAD) del box di errore X ha evidenziato la natura di stella per la sorgente F n.1, mentre la Rosat B n.2 non è identificabile a causa della presenza di diversi oggetti ottici ed infrarossi nella sua scatola di errore.

7.6.2 Osservazione BeppoSAX

L'osservazione compiuta dal satellite BeppoSAX non ha un target specifico, in quanto rientra in un programma di monitoraggio del piano galattico. È stata compiuta in data 19 Gennaio 2000 con puntamento RA=14h 06m 43s DEC=-61° 55' 18.9", il tempo di esposizione per il LECS e MECS è rispettivamente di 7 e 19 ks; non c'è stata detezione alle alte energie da parte dello strumento PDS. Come si può ben vedere in figura 7.16, ci sono due sorgenti detettate tra 2-10 keV (MECS), solo una delle quali (la meno brillante, indicata sia nel LECS che nel MECS con la lettera A) è contenuta nella scatola di errore gamma (vedi figura 7.15). Tale sorgente ha coordinate RA=14h 08m 00.7s DEC=-61° 58' 54.8", la sua distanza dal puntamento BeppoSAX è di ~10 arcmin mentre la sua significatività (2-10 keV) è di circa 8σ . Da una ricerca tramite HEASARC e SIMBAD non risulta associato ad essa nessun oggetto X o radio già conosciuto e catalogato, è solo presente a poco meno di 5 arcmin di distanza una pulsar radio (vedi figura 7.15, dove la pulsar è indicata con un rombo). Si tratta pertanto di una nuova sorgente X, fino ad ora mai osservata e rivelata, a cui è stato dato il nome di SAX J140800-6158. Tale sorgente è localizzata in una regione della scatola di errore gamma (vedi figura 7.15) mai investigata fino ad ora con osservazioni X atte alla ricerca della controparte di 3EG J1410-6147. L'analisi spettrale dei dati MECS BeppoSAX riguardanti SAX J140800-6158 è stata effettuata prendendo in considerazione una componente di assorbimento galattico, che nella direzione della sorgente stessa è di $2.26 \times 10^{22} \text{ cm}^{-2}$ (ottenuta da dati radio a 21 cm e calcolata tramite XSPEC). Lo spettro tra 2-10 keV (vedi figura 7.17) è rappresentato da una

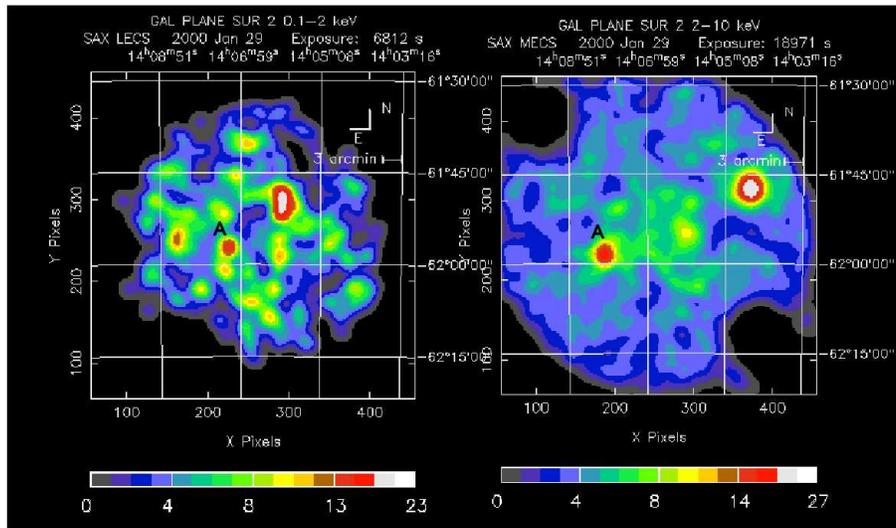


Figura 7.16: Campo MECS (sulla destra) e campo LECS (sulla sinistra) relativi all'osservazione BeppoSAX

legge di potenza assorbita ($\chi^2/\text{d.o.f.}=48/36$, $\chi^2_\nu=1.33$) con indice fotonico $\Gamma_X=1.89^{+1.71}_{-1.72}$. Oltre all'assorbimento galattico è richiesto (ad un livello di confidenza del 95%, $\Delta\chi=4.3$ per un solo parametro di libertà) un addizionale assorbimento intrinseco piuttosto alto ($N_H\sim 13.6\times 10^{22}\text{ cm}^{-2}$). Il flusso tra 2-10 keV è di $1.1\times 10^{-12}\text{ erg cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

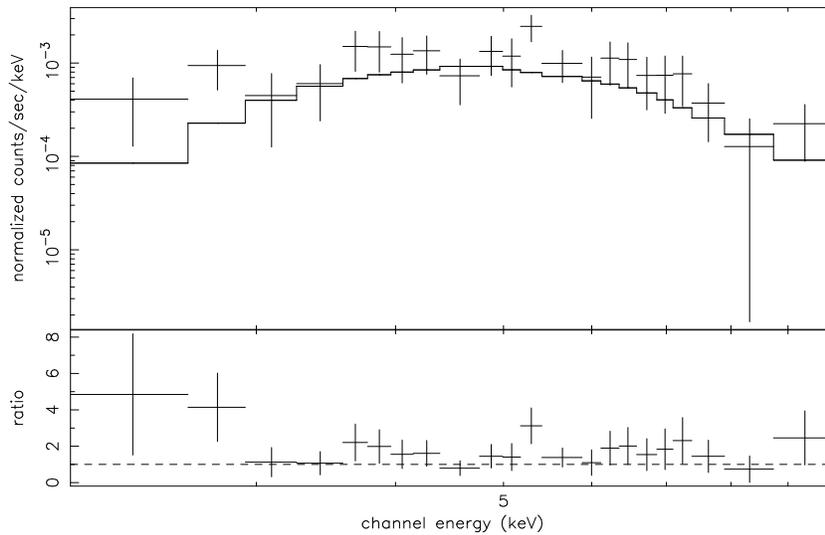


Figura 7.17: Fit spettrale BeppoSAX (2-10 keV) dei dati MECS relativi alla sorgente SAX J140800-6158

7.6.3 Caratteristiche globali della sorgente

La sorgente 3EG J1410-6147 è localizzata sul piano galattico e presenta un flusso gamma non variabile. Tali caratteristiche sono indicative di una origine del tipo pulsar. Se consideriamo il suo indice spettrale fotonico ($\Gamma_\gamma=2.12\pm 0.14$), esso ha un valore al limite dell'intervallo numerico (1.66-2.19) che caratterizza gli indici fotonici delle 7 pulsar gamma fino ad oggi conosciute (Thompson et al. 1999). Tenendo conto di tutto ciò, non è da escludere (oltre all'ipotesi pulsar) che l'emissione possa originarsi da una regione estesa, per esempio un resto di supernova (SNR). In effetti all'interno della scatola di errore gamma sono stati individuati un SNR (denominato G312.4-0.4) e tre pulsar radio.

Quest'ultime sono state scoperte recentemente dalla Parkes Multibeam Survey (Manchester et al. 2001), la loro posizione è indicata in figura 7.15 con tre simboli diversi (PSR J1407-6153-rombo, PSR J1412-6145-quadrato, PSR J1413-6141-cerchietto). Due di esse (PSR J1412-6145 e PSR J1413-6141) sono pulsar del tipo Vela, cioè giovani, veloci e con un alto rate di perdita di energia rotazionale \dot{E} (Torres et al. 2001), potrebbero perciò sotto talune condizioni essere pulsar gamma. La loro distanza, stimata con il metodo della misura di dispersione (DM) assumendo il modello di densità elettronica di Taylor & Cordes (1993), è pari rispettivamente a 9.3 e 11 Kpc (Torres et al. 2001). Se si considerano tali valori, l'efficienza η delle due pulsar, richiesta per giustificare il flusso gamma osservato, è tuttavia troppo alta ($\eta > 100\%$) rispetto ai valori tipici delle pulsar gamma conosciute ($0.01\% \leq \eta \leq 19\%$) (Torres et al. 2001). Tuttavia il modello di densità elettronica di Taylor & Cordes (1993), utilizzato con il metodo DM per ottenere le distanze, è piuttosto inaffidabile per la regione del piano galattico in cui sono localizzate le due pulsar (braccio del Centauro). Le distanze ottenute possono essere sovrastimate fino ad un fattore ~ 4 (Camilo et al. 2001). Tenuto conto di ciò, se si considerano per le due pulsar distanze dell'ordine di 2 Kpc, la loro efficienza η richiesta scende a valori compresi nell'intervallo prima specificato ($0.01\% \leq \eta \leq 19\%$) (Torres et al. 2001).

Una particolarità interessante è che entrambe le pulsar sono localizzate nel resto di supernova G312.4-0.4, indicato da Hartman et al. (1999) come plausibile controparte radio di 3EG J1410-6147. Tale SNR è stato individuato da Caswell & Barnes (1985), i quali hanno stimato un distanza minima di 3.8 Kpc da misurazioni dell'assorbimento di H_2CO . Questo valore è in disaccordo

con quello ottenuto da Yadigaroglu & Romani (1997) con il metodo Σ -D (2 Kpc). Confrontando le rispettive distanze stimate, non si evince in maniera chiara se le due pulsar sono connesse fisicamente al SNR o se si tratta di un effetto prospettico. Recentemente Doherty et al. (2003) hanno compiuto osservazioni X (Chandra) e radio (Australia Compact Array, frequenza di 1384 MHz) del resto di supernova, al fine di studiare la sua eventuale associazione con 3EG J1410-6147. È stata stimata per G312.1-0.4 una distanza minima di ~ 6 Kpc, un centro corrispondente alle coordinate RA=14h 13m 00s DEC= $-61^\circ 43' 00''$ ed un raggio della shell di circa 13 arcmin. L'osservazione radio ha evidenziato come la zona a Ovest del SNR, in cui è localizzata PSR J1412-6145, è notevolmente più brillante rispetto alle altre zone. L'idea è che si possa trattare di una PWN (Pulsar Wind Nebula), con PSR J1412-6145 verosimilmente progenitrice di G312.4-0.4. La mancanza di una simile PWN intorno all'altra pulsar PSR J1413-6141 sembra invece escludere un suo collegamento fisico con il SNR. Tali ipotesi tuttavia non sono al momento confermabili. Per quel che riguarda l'osservazione X compiuta da Chandra, non è presente nessun oggetto puntiforme brillante mentre è stata detettata marginalmente sempre nella zona ad Ovest di G312.4-0.4 una debole emissione X diffusa. Doherty et al. (2003), alla luce del loro studio multifrequenza, non considerano il SNR e le due pulsar come plausibili controparti di 3EG J1410-6147.

È infine utile sottolineare come BeppoSAX ha individuato una nuova sorgente X, fino ad ora mai osservata e rivelata, a cui è stato dato il nome di SAX J140800-6158 (vedi figura 7.15). Tale sorgente si trova in una zona della scatola di errore gamma diversa da quella in cui è localizzato il SNR e le due pulsar e mai investigata nella banda X alla ricerca della controparte di 3EG J1410-6147. Come abbiamo visto nel precedente paragrafo, SAX J140800-6158 è estremamente assorbita in quanto presenta una densità di colonna (in eccesso rispetto a quella galattica) piuttosto elevata ($\sim 10^{23}$ cm $^{-2}$). Il suo flusso non corretto tra 2-10 keV è di $\sim 10^{-12}$ erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$.

Alla luce di tutte le considerazioni sovraesposte, il quadro per 3EG J1410-6147 è piuttosto complicato. Si può escludere quasi sicuramente un'origine del tipo blazar. Nella scatola di errore gamma sono presenti due pulsar in un SNR, ciò fa pensare che in un qualche modo questi tre oggetti contribuiscano all'emissione gamma osservata. È piuttosto interessante, infine, la nostra individuazione con BeppoSAX di una nuova sorgente X. I dati più precisi di future missioni spaziali, riducendo fino a pochi arcmin la scatola di errore

gamma, potranno forse permettere la risoluzione di questo ingarbugliato puzzle.

7.7 Casi particolari: 3EG J1652-0223 e 3EG J1757-0711

Il campione di 10 sorgenti EGRET non identificate fin qui analizzato è stato creato correlando le coordinate di tutte le sorgenti gamma non identificate listate in Mattox et al. (2001) con l'intero archivio NFI BeppoSAX, alla ricerca di quelle osservazioni X il cui campo LECS/MECS osservato non distasse più di 60 arcmin dalla posizione della sorgente EGRET.

Analizzeremo ora due sorgenti EGRET non identificate (3EG J1652-0223 e 3EG J1757-0711), target di due osservazioni BeppoSAX, osservate con il solo strumento PDS, pertanto non sono disponibili immagini LECS e MECS. Come già detto, contrariamente a quest'ultimi strumenti, il PDS non è in grado di fornire immagini del campo di vista osservato perciò qualsiasi sorgente presente nel campo può essere responsabile dell'emissione rivelata. Segue una breve descrizione delle osservazioni BeppoSAX relative alle due sorgenti EGRET.

7.7.1 3EG J1652-0223

La sorgente 3EG J1652-0223 è stata dettata da EGRET con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=5.1$) nel VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995). Il suo flusso medio è pari a $F_{P1234}=(16.6\pm 3.7)\times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, a $E>100$ MeV. La sorgente è localizzata a latitudini galattiche intermedie ($b=25^\circ.05$) ed il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.53\pm 0.24$. Per quel che riguarda il comportamento variabile/non variabile di 3EG J1652-0223, il valore del suo indice τ è tale da indicare non variabilità, mentre quello dell'indice I rientra in una situazione di incertezza. La scatola di errore gamma è piuttosto grande ed inoltre i suoi contorni di confidenza al 95% e 99% non si chiudono (vedi figura 7.18).

3EG J1652-0223 è stata osservata da BeppoSAX in data 28 Febbraio 2002 con il solo strumento PDS, il tempo di esposizione è stato di 42 ks. Nell'analisi dei dati PDS sono state utilizzate solo le unità numero 1, 3 e 4 in quanto nella unità 2 sono state riscontrate delle anomalie. Le coordinate del puntamento BeppoSAX sono RA=16h 52m 00s e DEC=-02° 23' 59.9", simili a quelle della sorgente EGRET (RA=16h 51m 16.8s e DEC=-02° 30' 36"). In figura 7.18 mostriamo tutti i contorni di confidenza di 3EG J1652-0223 sovrapposti alla

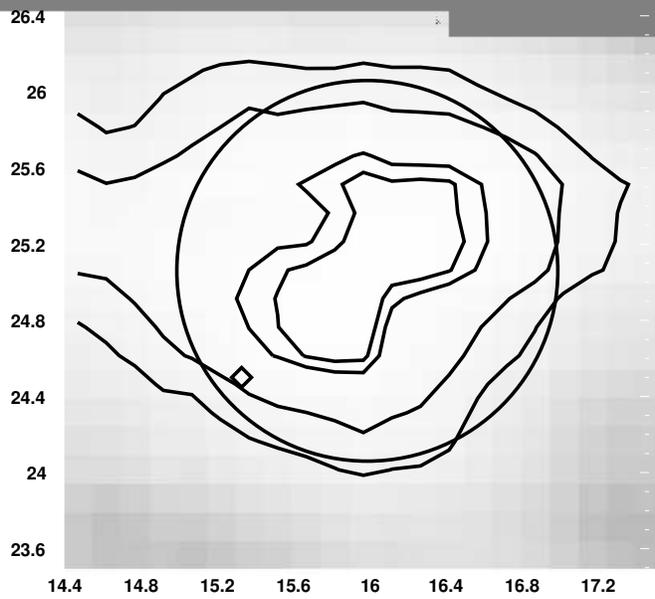


Figura 7.18: Contorni di confidenza di 3EG J1652-0223 sovrapposti alla scatola di errore del PDS BeppoSAX, rappresentata da un cerchio di raggio 1° . Le coordinate sono quelle galattiche.

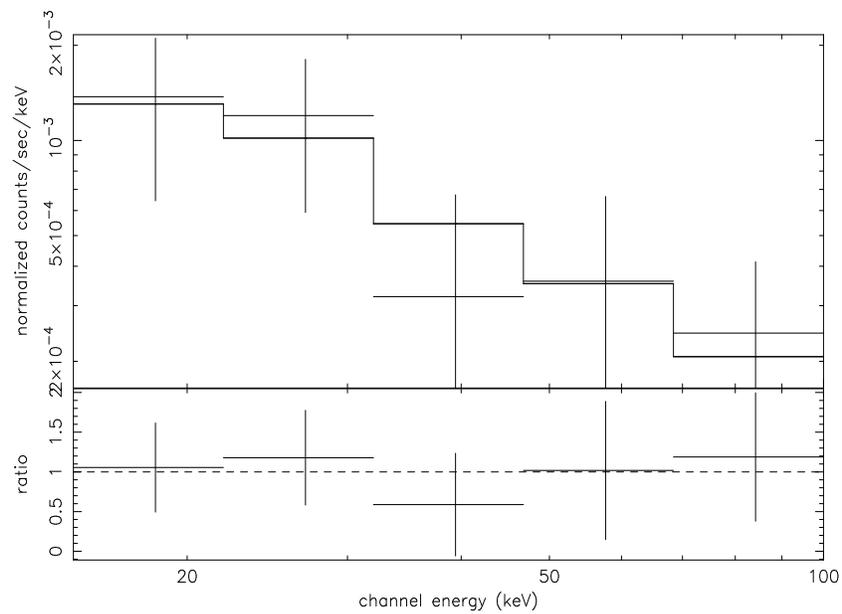


Figura 7.19: Fit spettrale BeppoSAX (20-100 keV) dei dati PDS

scatola di errore del PDS, rappresentata con un cerchio di raggio $r=1^\circ$. Come si può ben vedere la copertura è pressoché totale.

L'emissione rivelata dal PDS ha un conteggio di fotoni al secondo tra 20-100 keV pari a $4.2 \times 10^{-2} \pm 1.3 \times 10^{-2}$ cts/s, con una significatività di 3.2σ . Il fit spettrale dei dati PDS tra 20-100 keV è rappresentato da una legge di potenza ($\chi^2/\text{d.o.f.}=0.56/3$) con indice fotonico $\Gamma_X=1.5_{-1.17}^{+1.47}$, il flusso (20-100 keV) è pari a 6.4×10^{-12} erg cm $^{-2}$ s $^{-1}$. In figura 7.19 mostriamo il fit dello spettro PDS con il relativo rapporto dati/modello.

Abbiamo effettuato una indagine X e radio (HEASARC) del campo PDS alla ricerca di sorgenti "interessanti". Sono state individuate 10 sorgenti X Rosat Faint (nessuna delle quali ha controparte radio) ed una Rosat Bright, quest'ultima identificata con una stella "Late-Type" (Hunsch et al. 1998). Dal punto di vista radio, la sorgente più forte tra quelle presenti è PMN J1652-0311 (indicata in figura 7.18 con un rombo), il cui flusso a 5 GHz è di 111 mJy. Sono disponibili per essa misure del flusso radio ad altre lunghezze d'onda (207.7 mJy a 20 cm, 590 mJy a 82 cm), il suo indice energetico è $\alpha=0.4$, pertanto si tratta di una sorgente a spettro radio piatto ($S(\nu) \propto \nu^\alpha$ con $\alpha \geq -0.5$). Dal punto di vista X, questo oggetto radio non sembra presentare una controparte (HEASARC). Mattox et al. (2001) stimano per PMN J1652-0311 una bassa probabilità di associazione con 3EG J1652-0223, cioè è dovuto essenzialmente ai suoi flussi radio piuttosto piccoli rispetto a quelli tipici delle blazar EGRET. PMN J1652-0311 resta comunque l'oggetto più interessante fra tutti quelli presenti all'interno della scatola di errore gamma. In figura 7.20 mostriamo la SED da noi ricostruita utilizzando i dati EGRET relativi a 3EG J1652-0223, il flusso del PDS BeppoSAX e i flussi radio della sorgente PMN J1652-0311. Questi pochi dati suggeriscono un possibile picco localizzato nella banda MeV. In definitiva la natura della controparte di 3EG J1652-0223 resta piuttosto incerta. È inverosimile una origine del tipo pulsar data la sua localizzazione a $b=25^\circ.05$ mentre potrebbe trattarsi piuttosto di un AGN della classe blazar o radiogalassia. I dati più precisi di missioni spaziali in corso (INTEGRAL) o future (GLAST, AGILE) potrebbero fornire informazioni "decisive" per il lavoro di identificazione.

7.7.2 3EG J1757-0711

La sorgente 3EG J1757-0711 è stata detettata da EGRET con la significatività statistica più alta ($\sqrt{TS}=5.5$) nel VP=P1234 (somma di tutti i periodi di osservazione compresi tra Aprile 1991 e Ottobre 1995). Il suo flusso medio è

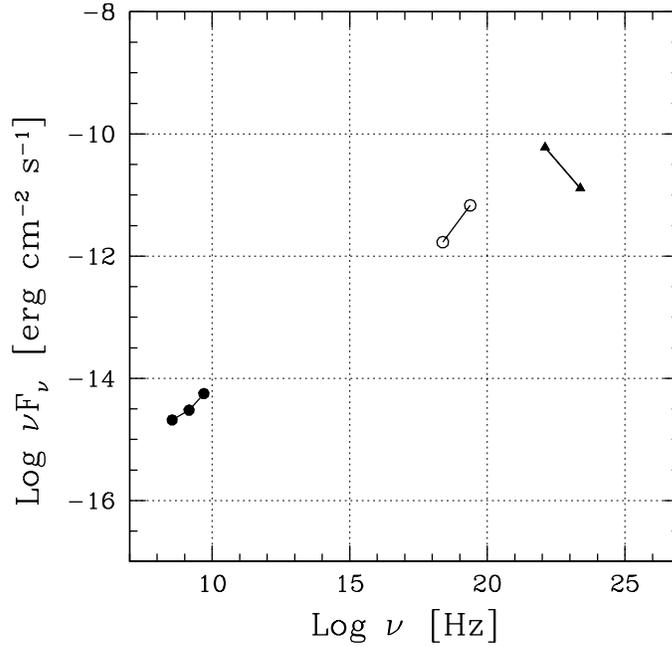


Figura 7.20: Distribuzione di energia spettrale ottenuta utilizzando i dati EGRET di 3EG J1652-0223 (triangoli pieni), il flusso del PDS BeppoSAX tra 10-100 keV (cerchietti vuoti) e i flussi radio di PMN J1652-0311 (cerchietti pieni)

pari a $F_{P1234} = (20.3 \pm 4) \times 10^{-8}$ fotoni $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, a $E > 100$ MeV. La sorgente ha una latitudine galattica pari a $b = 8.47^\circ$ ed il suo spettro è ben rappresentato da una legge di potenza con indice fotonico $\Gamma_\gamma = 2.51 \pm 0.2$. Per quel che riguarda il comportamento variabile/non variabile di 3EG J1757-0711, il valore di entrambi i suoi due indici τ ed I sono tali da rientrare in una situazione di incertezza. La scatola di errore gamma ha un contorno di confidenza al 95% con un raggio di circa 41 arcmin.

3EG J1757-0711 è stata osservata da BeppoSAX in data 25 Marzo 2002 con il solo strumento PDS, il tempo di esposizione è stato di 33 ks. Le coordinate del puntamento sono $RA = 17\text{h } 57\text{m } 55.2\text{s}$ e $DEC = -07^\circ 12' 00''$, simili a quelle della sorgente EGRET ($RA = 17\text{h } 58\text{m } 04.8\text{s}$ e $DEC = -07^\circ 19' 48''$). In figura 7.21 mostriamo tutti i contorni di confidenza di 3EG J1757-0711 sovrapposti alla scatola di errore del PDS, rappresentata in figura con un cerchio di raggio $r = 1^\circ$. Come si può ben vedere la copertura è anche in questo caso pressoché totale. L'emissione rivelata dal PDS ha un conteggio di fotoni al secondo ed una significatività tra 20-100 keV pari rispettivamente a $2.9 \times 10^{-2} \pm 2.3 \times 10^{-2}$ cts/s e 1.3σ .

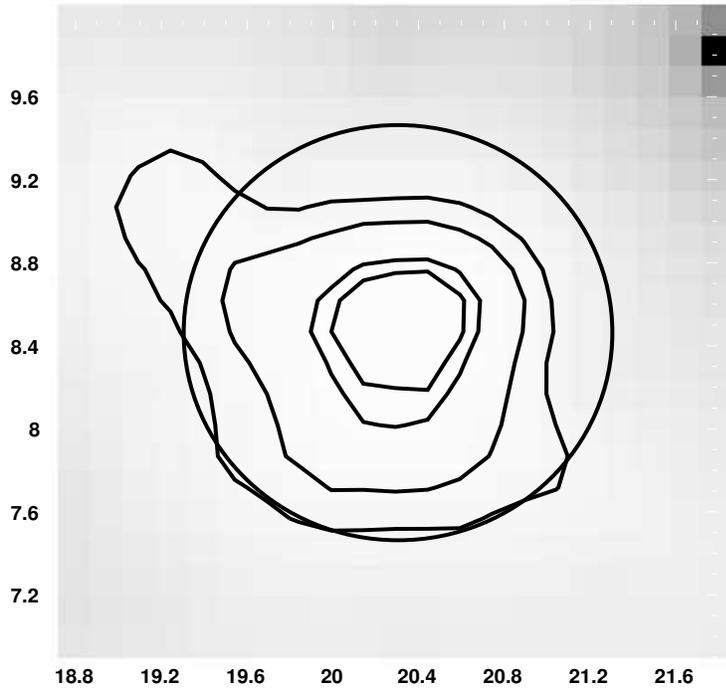


Figura 7.21: Contorni di confidenza di 3EG J1757-0711 sovrapposti alla scatola di errore del PDS BeppoSAX, rappresentata da un cerchio di raggio 1° . Le coordinate sono quelle galattiche

Abbiamo effettuato una indagine X e radio (HEASARC) del campo PDS. Sono state individuate solo 3 sorgenti X Rosat del tipo Faint. Una è stata identificata con una stella e nessuna ha controparte radio. Dal punto di vista radio le sorgenti più forti, tra tutte quelle presenti nella scatola di errore del PDS, sono PMN J1758-0710 e PMN J1759-0709, con un flusso a 5 GHz rispettivamente di 80 e 92 mJy. Sono disponibili misure del flusso radio anche alla lunghezza d'onda di 20 cm (rispettivamente 73 mJy e 17 mJy), mentre anche in questo caso dal punto di vista X non sembrano presentare una controparte (HEASARC). Mattox et al. (2001) stimano come estremamente bassa la probabilità di una loro associazione con 3EG J1757-0711.

I dati più precisi di missioni spaziali in corso (INTEGRAL) o future (GLAST, AGILE), riducendo la scatola di errore gamma, potranno fornire informazioni preziose per l'individuazione della controparte di 3EG J1757-0711.

Conclusioni

L'idea che ha dato vita a questo lavoro di tesi è stata quella di fornire un possibile contributo al lavoro di identificazione di sorgenti gamma, attraverso uno studio X con osservazioni del satellite BeppoSAX. L'ampia copertura spettrale di BeppoSAX (0.1-200 keV) può costituire la chiave vincente per l'individuazione del "miglior candidato" responsabile dell'emissione nella scatola di errore gamma.

A tal scopo è stato "setacciato" l'intero archivio NFI BeppoSAX alla ricerca di quelle osservazioni i cui campi LECS/MECS si sovrappongono totalmente o parzialmente (in seguito a puntamenti mirati o in maniera casuale) a scatole di errore di sorgenti EGRET non identificate, listate nel catalogo 3EG (Hartmann et al. 1999). Così facendo abbiamo selezionato un campione di 10 sorgenti, per ognuna delle quali è stato compiuto uno studio spettrale degli oggetti X BeppoSAX presenti nella loro scatola di errore. In aggiunta a queste 10 sorgenti EGRET, sono state considerate altre ulteriori due, osservate da BeppoSAX con il solo strumento ad alta energia (PDS). Per queste due sorgenti si hanno informazioni solo nella banda 20-100 keV e pertanto non sono disponibili osservazioni LECS (0.1-2 keV) e MECS (2-10 keV). Per tutte le 12 sorgenti del campione è stata condotta inoltre una ricerca su molteplici banche dati (ottico, radio, infrarosso, X) mirata all'individuazione di ulteriori controparti a tali frequenze della sorgente BeppoSAX presente o all'individuazione di altre sorgenti presenti nella scatola di errore che potessero fungere da potenziali controparti.

I dati più precisi di missioni spaziali, in corso o future, permetteranno di ridurre fino a pochi arcmin le scatole di errore delle sorgenti EGRET non identificate, facilitando enormemente la loro identificazione. In attesa di ciò, il nostro lavoro ha in un certo senso confermato come lo studio multifrequenza del box di errore gamma costituisce, per il momento, l'unica strada percorribile per tentare l'identificazione, e come di tale studio la banda X rivesta un'importanza fondamentale.

In tal senso il nostro lavoro ha portato all'identificazione di una sorgente del campione (3EG J2027+3429) con una blazar dietro il piano della galassia. I risultati relativi a questa identificazione sono stati da noi presentati in un lavoro attualmente in fase di pubblicazione (Sguera V., Malizia A., Bassani L., Stephen J., Di Cocco G., A&A, 2003). Si tratta della seconda identificazione di questo tipo, dopo 3EG J2016+3657 (Halpern et al. 2001). 3EG J2027+3429 presenta un flusso gamma variabile ed un indice fotonico pari a $\Gamma_\gamma=2.28\pm 0.15$, caratteristiche che suggeriscono fortemente un'origine extragalattica del tipo AGN. Abbiamo individuato con BeppoSAX nella scatola di errore gamma una sorgente X da noi associata a 3EG J2027+3429. Tale sorgente X è detettata da 2 keV fino a 100 keV, ha uno spettro piatto ($\Gamma_X=0.6-1.5$) e fortemente variabile sia in forma che in intensità. I dati indicano anche la presenza di una riga del ferro (~ 6 keV) nel sistema di riferimento della sorgente. La sorgente X ha una controparte radio estremamente brillante, con uno spettro piatto tra 0.3-10 GHz. Anche nel millimetrico coincide con un oggetto brillante mentre nell'ottico è stata identificata con una quasar a $z=0.22$. La SED da noi ricostruita con tutti questi dati è compatibile con una blazar LBL, il cui picco Compton cade nella banda soft gamma.

Un caso rivelatosi molto interessante è quello di 3EG J1837-0606, conosciuta anche con la sigla GEV J1837-0610. Nel suo piccolo box di errore (raggio di circa 12 arcmin) è presente una potenziale pulsar gamma (giovane ed energetica) localizzata sul bordo di una shell radio. In effetti la non variabilità di 3EG J1837-0606 e il valore del suo indice fotonico ($\Gamma_\gamma=1.82\pm 0.14$) sono caratteristiche tipiche delle pulsar gamma rivelate da EGRET. La pulsar sembra essere localizzata in una regione HII di formazione stellare. In questa stessa regione BeppoSAX, sebbene non abbia rivelato nessuna emissione X in corrispondenza della posizione della pulsar, ha individuato una sorgente puntiforme brillante AX J1837.5-0610 (sul bordo della shell radio, dal lato opposto rispetto alla pulsar) circondata da una emissione X debole e diffusa. Le caratteristiche X di AX J1837.5-0610 (in particolar modo la presenza nel suo spettro di una riga a 6.6 keV) sembrano escludere un'origine del tipo pulsar, privilegiando e suggerendo piuttosto una del tipo buco nero o microquasar, soprattutto se si considera la sua localizzazione in una regione HII, presumibilmente ricca di stelle calde e massicce di tipo spettrale O e B. Ulteriori studi, con l'operativo satellite INTEGRAL, potrebbero fornire importanti informazioni a riguardo, aiutando a svelare la natura della controparte di 3EG J1837-0606.

Altro caso interessante è quello di 3EG 1410-6147. Si tratta di una sorgente non variabile con un indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.12$, caratteristiche compatibili con quelle delle pulsar gamma fin ora rivelate da EGRET. In effetti nel box di errore gamma sono presenti due pulsar localizzate in un resto di supernova (SNR), tuttavia l'associazione di questi oggetti celesti con 3EG J1410-6147 non è certa sulla base dei dati multifrequenza a disposizione. L'osservazione di BeppoSAX invece ha scoperto una nuova sorgente X, mai rivelata e pertanto non catalogata, a cui è stato dato il nome SAX J140800-6158. Tale oggetto celeste si trova in una regione della scatola di errore gamma in cui non sono mai stati effettuati studi multifrequenza atti all'individuazione della controparte di 3EG J1410-6147. SAX J140800-6158 è un sorgente estremamente assorbita e debole e potrebbe trattarsi di un oggetto compatto in accrescimento. Sebbene non presenti proprietà spettrali particolari e tali da poter giustificare una sua associazione con 3EG J1410-6147, potrebbe essere comunque interessante raccogliere ulteriori informazioni multifrequenza a riguardo.

Per le sorgenti 3EG J1234-1318 e 3EG J1212+2304, il nostro studio BeppoSAX ha individuato come migliori candidate controparti due BL Lac, in accordo con l'elevata latitudine galattica delle due sorgenti EGRET (rispettivamente di $b=+49^\circ.3$ e $b=+80^\circ.34$) che esclude categoricamente un'origine del tipo pulsar. Tali BL Lac tuttavia presentano caratteristiche "atipiche", nel senso che sotto alcuni aspetti si discostano dalle tipiche blazar-EGRET (hanno per esempio un flusso radio basso e non mostrano spiccata variabilità gamma). Fermo restando che le caratteristiche peculiari delle blazar gamma (forte flusso radio, spettro radio piatto, forte variabilità) costituiscono importanti condizioni da imporre per la ricerca delle controparti di sorgenti EGRET non identificate, il nostro risultato a proposito di 3EG J1234-1318 e 3EG J1212+2304 può comunque essere indicativo della necessità, "in taluni casi", di rilassare tali condizioni.

Per tre sorgenti del campione (3EG J0542-2610, 3EG J1824-1514 e 3EG J1621+8203) il nostro studio BeppoSAX ha confermato precedenti lavori, individuando come migliore candidata controparte un oggetto celeste differente da pulsar o blazar, fino ad oggi le uniche tipologie di sorgenti conosciute essere emittitori gamma con certezza. Ciò è in linea con la ragionevole ipotesi che possano esserci diverse tipologie di oggetti celesti galattici responsabili di emissione gamma. La migliore candidata controparte per 3EG J1621+8203 è la radiogalassia NGC 6251, associazione in accordo con la latitudine della sorgente gamma ($b=+32^\circ$). 3EG J1621+8203 condivide molte proprietà (indice fotonico, bassa luminosità gamma, ecc. ecc.) con 3EG J1324-4314,

l'unica sorgente EGRET fino ad ora identificata con certezza con una radiogalassia (Centaurus A). Una microquasar ed un sistema binario X/Be sono invece le migliori candidate controparti di rispettivamente 3EG J1824-1514 e 3EG J0542-2610, entrambe localizzate sul piano galattico.

Un caso particolare è quello della sorgente 3EG J1652-0223, per la quale è disponibile un'osservazione BeppoSAX con il solo strumento ad alte energie (PDS). Tale strumento non è in grado di fornire immagini del campo osservato (di raggio 1°) perciò qualsiasi sorgente presente può essere responsabile dell'emissione rivelata. La scatola del PDS copre interamente quella di 3EG J1652-0223, l'emissione dettata tra 10-100 keV ha una significatività di 3σ . Utilizzando tutti i cataloghi radio e X disponibili con HEASARC, abbiamo individuato nel campo del PDS una sola sorgente radio interessante, con un flusso a 5 GHz di 111 mJy ed un indice energetico $\alpha=0.4$, pertanto si tratta di una sorgente a spettro radio piatto ($S(\nu)\propto\nu^\alpha$ con $\alpha\geq-0.5$). Pur essendo il flusso radio piuttosto basso rispetto a quello tipico delle blazar EGRET, tali indizi suggeriscono un'origine extragalattica del tipo AGN per 3EG J1652-0223, ipotesi in accordo tra l'altro con la sua localizzazione a latitudini galattiche intermedie ($b=25^\circ.05$). La SED da noi ricostruita utilizzando i dati EGRET relativi a 3EG J1652-0223, il flusso del PDS e i flussi radio suggeriscono un possibile picco localizzato nella banda MeV. I dati più precisi di missioni spaziali in corso (INTEGRAL) o future (GLAST, AGILE) potrebbero fornire informazioni "decisive" per il lavoro di identificazione.

Infine per quel che riguarda le sorgenti 3EG J1800-2338 e 3EG J1837-0423 il nostro studio con BeppoSAX non è riuscito ad individuare nessun candidato responsabile dell'emissione gamma (blazar, pulsar o più in generale altri oggetti celesti conosciuti). 3EG J1837-0423, localizzata sul piano galattico, è una delle sorgenti gamma transienti più forti che siano mai state dettate. Ciò esclude categoricamente un'origine del tipo pulsar mentre suggerisce piuttosto una del tipo blazar. Tuttavia nessuna sorgente radio brillante a spettro piatto è stata individuata nel suo box di errore gamma, pertanto 3EG J1837-0423 potrebbe appartenere ad una nuova classe di sorgenti galattiche. L'osservazione di BeppoSAX, pur coprendo quasi interamente la scatola di errore, non è riuscita ad individuare nessuna sorgente X puntiforme. Va tenuto conto che, essendo 3EG J1837-0423 una sorgente transiente, probabilmente si trovava in uno stato di quiescenza all'epoca dell'osservazione X. 3EG J1800-2338 è localizzata sul piano galattico, presenta un flusso gamma non variabile ed ha un indice fotonico $\Gamma_\gamma=2.1$, tutte caratteristiche che suggeriscono un'origine del tipo

pulsar o comunque legata ad una sorgente estesa del tipo resto di supernova SNR. In effetti nel box di errore gamma è presente una pulsar (poco energetica e al massimo responsabile di una parte dell'emissione gamma osservata) ed un SNR localizzato in una regione molto complessa, ricca di nubi molecolari e regioni HII. L'osservazione di BeppoSAX non è riuscita ad individuare nessuna sorgente brillante X puntiforme nella parte di scatola di errore gamma coperta dal suo campo MECS. Una situazione come quella delle due ultime sorgenti è rappresentativa della stragrande maggioranza delle sorgenti EGRET non identificate e da un'idea di quanto possa essere estremamente incerto il lavoro di identificazione.

Solo quando saranno disponibili dati gamma di più alta statistica, migliore sensibilità e migliore definizione spaziale temporale e spettrale (INTEGRAL, GLAST, AGILE) si avranno gli strumenti per poter far luce sulla natura delle numerosissime sorgenti gamma non ancora identificate.

APPENDICE A

Cataloghi utilizzati

Cataloghi X utilizzati per studiare la parte di scatola di errore gamma non coperta dai campi MECS BeppoSax:

- Satellite **ROSAT**: progettato e gestito dalla Germania, dotato di due strumenti sul piano focale. HRI (High resolution Imager) con un campo di vista di ~ 40 arcmin di diametro e PSPC (Position Sensitive Proportional Counter) il cui campo di vista è di $\sim 2^\circ$ di diametro.

1. catalogo **RASS-BSC** - Rosat All Sky Survey Bright Source Catalogue, in cui sono catalogate 18.811 sorgenti con un limite ROSAT PSPC di 0.05 cts/s nella banda $0.1 \div 2.1$ keV. Considerando come flusso limite quello corrispondente a 0.1 cts/s (8.547 sorgenti), il catalogo rappresenta una copertura del cielo al 92%.

2. catalogo **RASS-FSC** - Rosat All Sky Survey Faint Source Catalogue, in cui sono catalogate 105.924 sorgenti, rappresenta l'estensione del RASS-BSC per sorgenti più deboli.

3. catalogo **WGA-CAT** - contiene più di 84.000 sorgenti puntiformi rilevate da tutte le osservazioni puntate ROSAT PSPC, con una copertura del cielo pari al 75%.

- Satellite **HEAO1**: missione spaziale della NASA, ha monitorato il cielo nella banda da 0.2 keV a 10 MeV.

1. catalogo **A1** - lista 842 sorgenti nell'intervallo energetico $0.25 \div 25$

keV.

2. catalogo **A2point** - lista sorgenti rilevate da tre strumenti. Il LED (Low Energy Detector) con range energetico 0.15÷3 keV, MED (Medium Energy Detector) tra 1.5÷15 keV e HED (High Energy Detector) tra 2.5÷60 keV.
 3. catalogo **A3** - ci sono le sorgenti rilevate dallo strumento MC (Modulation Collimator) nell'intervallo energetico 0.9÷13.3 keV.
 4. catalogo **A4** - È il risultato di una survey di tutto il cielo ad alte energie, tra 13÷180 keV.
- Satellite **ASCA**: Satellite giapponese che ha operato nella banda 0.4÷10 keV con i due strumenti GIS (Gas Scintillation Proportional Counters, 0.8÷12 keV) e SIS (Solid-state Imaging Spectrometer, 0.4÷12 keV).
 1. catalogo **ASCAGIS** - contiene circa 1.343 sorgenti con una detezione significativa sopra i 5σ in almeno una delle tre bande 0.7÷7, 2÷10 e 0.7÷2 keV.
 2. catalogo **ASCASIS** - contiene sorgenti rilevate dallo strumento SIS.

Cataloghi radio, infrarossi ed ottici utilizzati per trovare eventuali controparti a queste frequenze delle sorgenti X presenti nella scatola di errore gamma:

- **Radio**: NVSS (21 cm), TEXAS (82 cm), WNSS (92 cm), PMN (4850 MHz), NORTH6CM (6 cm), NORTH20CM (20 cm), PMPULSAR, ATNFPULSAR, PULSAR.
- **Infrarosso**: MSXPSC (6 bande a 4.29, 4.35, 8.28, 12.13, 14.62, 21.34 μm), IRAS (quattro bande a 12, 25, 60 e 100 μ), 2MASS ()
- **Ottico**: USNO-A2.0.

Ringraziamenti

Finalmente è arrivato il momento!

È con la massima riconoscenza che voglio esprimere il mio grazie alla Dott.ssa Loredana Bassani e alla Dott.ssa Angela Malizia, miei co-relatori e soprattutto insostituibili consiglieri. Con la loro costante disponibilità, pazienza e simpatia mi hanno guidato passo dopo passo. Il loro coinvolgermi pienamente in ogni aspetto di questo lavoro mi ha permesso di affrontarlo con estrema passione, entusiasmo e curiosità. È mio desiderio oltretutto ringraziarle per avermi permesso di “intuire“ cosa significa “fare“ della ricerca astronomica. Grazie anche al Dott. John B. Stephen per i suoi “tempestivi e preziosi“ aiuti.

Grazie al Prof. Palumbo che, nonostante i suoi numerosi impegni, ha accettato di farmi da relatore. È mio desiderio ringraziarlo per tutti i consigli e per l'entusiasmo e la “carica“ che sa trasmettere ogni qual volta lo si incontra.

Grazie a tutti i “compagni di caserma della 306 e della 308“ all'istituto IASF/TESRE (Gabriele, Yuri, Nico, Andrea, Fabio, Luciano, Matteo, Enrico). La loro simpatia e disponibilità mi ha aiutato a “raffreddare la capoccia“ nei momenti di “delirio“, rendendo piacevole e meno pesante ogni giorno di lavoro.

Un GRAZIE incommensurabile a Raffaella e Giuseppe, senza il cui aiuto ed appoggio incondizionato tutto questo lavoro non sarebbe mai nato (.....e neanche io!!!). Non sanno quanto sia orgoglioso di loro e quanti motivi io abbia per esserlo. Grazie al mio “brother“ Raffaele, senza il suo tempestivo intervento in un afoso Agosto di “qualche“ anno fa la mia esperienza a Bologna non sarebbe mai cominciata!

È con l'affetto più sincero che voglio ringraziare gli amici che hanno lasciato un'impronta indelebile nella mia vita. In tutti questi indescrivibili anni passati lontano da casa e dalla mia famiglia, hanno rappresentato ogni giorno qui a Bologna la "mia casa e la mia famiglia". Insieme abbiamo "succhiato il midollo della vita", a loro mi legano esperienze ed emozioni incommensurabili, è con loro che io mi sento completo. GRAZIE a Mauro e Fenia, Alessandro, Gracco, Federico, Matteo Depa, Matteo V., Mirco.

Grazie a Luana ed Elisa, conosciute in un momento di delicati cambiamenti. Grazie per i tanti e bellissimi momenti passati insieme.

Grazie agli amici di "corso" Claudia, Gianluca, Angelica, Ruben, Claudio, Antonio A., Antonio P., ricordo con piacere i bei momenti passati insieme.

...ed infine...un GRAZIE incommensurabile a Rita, per tutto l'amore e la pazienza. Grazie perche' scorri in schiumanti fiamme. Grazie perche' sei vera, viva e bruci, riscaldando ed illuminando di immenso la mia vita.

Bibliografia

- [1] Arnaud, K. A., 1996, *Astronomical Data Analysis Software and Systems V*, A.S.P. Conference Series, 101, 17
- [2] Bailey, J., et al., 1986, *Nature*, 322, 150
- [3] Barnes, Joshua E., 1989, *Nature*, 338, 123
- [4] Benaglia, P., et al., 2001, *A&A*, 366, 605
- [5] Bicknell, G. V., 1994, *ApJ*, 422, 542
- [6] Bernado M. M. K., Romero G. E., Mirabel I. F., 2002, *AA*, 385, L10
- [7] Bode, P. W., et al. 1993, *Bulletin of the American Astronomical Society*, 25, 1427
- [8] Boella, G., et al.(a), 1997, *A&A Supplement series*, 122, 299
- [9] Boella, G., et al.(b), 1997, *A&A Supplement series*, 122, 327
- [10] Camilo F., et al., 2001, *ApJ*, 557, l51
- [11] Campana S, et al., 2001, *A&A*, 372, 241
- [12] Casse, M., Paul, J. A., 1980, *ApJ*, 237, 236
- [13] Caswell & Barnes, 1985, *MNRAS*, 216, 753
- [14] Chen, W., White, R. L., 1991, *ApJ*, 381, 63
- [15] Cheng, K. S., Ho, C., Ruderman, M., 1986, *ApJ*, 300, 500
- [16] Cheng, K. S., Ho, C., Ruderman, M., 1986, *ApJ*, 300, 522
- [17] Chiaberge, M., Gilli, R., Capetti, A., Macchetto, F. D., 2003, in press, eprint arXiv:astro-ph/0307120
- [18] Chiang, J., Mukherjee, R. 1998, *ApJ*, 496, 752

- [19] Claussen M. J., et al., 1997, ApJ, 489,143
- [20] Combi, J. A., Romero, G. E., Benaglia, P., 1998, A&A, 333, L91
- [21] Combi, J. A., et al., 2001, A&A, 366, 1047
- [22] Combi, J. A., et al., 2003, ApJ, 588, 731
- [23] D'amico N., et al., 2001, ApJ, 552, L45
- [24] Dar, A., Shaviv, Nir J. 1995, Physical Review Letters, 75, 3052
- [25] Dermer, C. D., Schlickeiser, R., Mastichiadis, A., 1992, A&A, 256, L27
- [26] Dermer, C. D., Sturmer, S. J., 1994, ApJ, 420, L79
- [27] Dermer, C. D., 1997, Proceedings of the Fourth Compton Symposium, AIP Conference Proceedings 410, 1275
- [28] Doherty M., et al., 2003, MNRAS, 339, 1048
- [29] Dickey, J. M., Lockman, F. J., 1990, Annual review of astronomy and astrophysics, 28, 215
- [30] Eker Z., 1992, ApJS, 79, 481
- [31] Esposito, J. A., et al., 1996, ApJ, 461, 820
- [32] Fanaroff, B. L., Riley, J. M., 1974, MNRAS, 167, 31
- [33] Finger, M. H., Wilson, R. B., Harmon, B. A., 1996, ApJ, 459, 288
- [34] Fiore, F., Guainazzi, M., Grandi, P., 1998, ftp://ftp.asdc.asi.it/pub/sax/doc/software_docs/saxabc_v1.2.ps.gz or <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/docs/sax/abc/saxabc/>
- [35] Fossati, G., et al., 1998, MNRAS, 299 Issue 2, 433
- [36] Frontera, F., et al., 1997, A&A Supplement series, 122, 357
- [37] Gehrels, N., et al., 2000, Nature, 404, 363
- [38] Ghisellini, G., Madau, P. 1996, MNRAS, 280, 67
- [39] Ghisellini, G., et al., 1998, MNRAS, 301 Issue 2, 451
- [40] Giommi P., et al., 2002, proceedings of the workshop Blazar Astrophysics with BeppoSAX and other Observatories ASI Science Data Center, ESA-ESRIN, Frascati, Italy, p. 63 or <http://www.asdc.asi.it/blazars/>

- [41] Grenier, I. A., 1997, The Transparent Universe, Proceedings of the 2nd INTEGRAL Workshop, European Space Agency, p.187
- [42] Grenier, I. A., 2000, A&A, 364, L93
- [43] Grenier, I. A., Perrot, C. A., 2001, AIP Conference Proceedings, Vol. 587. Melville, NY: American Institute of Physics, p.649
- [44] Guainazzi, M., Grandi, P., Comastri, A., Matt, G., 2003, in press A&A, eprint arXiv:astro-ph/0308076
- [45] Halpern, J. P., Eracleous, M., Mukherjee, R., Gotthelf, E. V., 2001, ApJ, 551, 1016
- [46] Harding, A. K., Daugherty, J. K., 1993, Bulletin of the American Astronomical Society, 25, 91
- [47] Harding, A. K., Zhang, B., 2001, ApJ, 548, L37
- [48] Hartman, R. C., et al. 1999, ApJS, 123, 79
- [49] Helfand, D. J., et al., 1992, ApJS, 80, 211
- [50] Hunsch, M., Schmitt, J. H. M. M., Voges, W., 1998, A&A Supplement, 127, 251
- [51] Jager, R., et al., 1997, A&A Supplement series, 125, 557
- [52] Kaaret, P., Cottam, J., 1996, ApJLetter, 462, 35
- [53] Kaaret, P., et al., 1999, ApJ, 523, 197
- [54] Kaufman-Bernad, M. M., Romero, G. E., Mirabel, I. F., 2002, New Views on MICROQUASARS, the Fourth Microquasars Workshop, Institut d'Etudes Scientifiques de Cargse, Corsica, France, May 27 - June 1, 2002. p. 148.
- [55] Kaspi V. M., et al., 1993, ApJ, 409, L57
- [56] Kawasaki, W., Totani, T., 2002, ApJ, 576, 679
- [57] Kniffen, D. A., et al., 1993, ApJ, 411, 133
- [58] Lamb, R. C., Macomb, D. J., 1997, ApJ, 488, 872
- [59] Laurent-Muehleisen, S. A., et al., 1998, APJS, 118 Issue 1,127

- [60] Maccarone M. C., et al. 1998, Nuclear Physics B (Proc. Suppl.) 69/1-3, 379
- [61] Mamon, G. A., 1986, ApJ, 307, 426
- [62] Manchanda, R. K., et al., 1996, A&A, 305, 457
- [63] Manchester R. N., et al., 2001, MNRAS, 328, 17
- [64] Manzo, G., et al., 1997, A&A Supplement series, 122, 341
- [65] Maraschi, L., Ghisellini, G., Celotti, A., 1992, ApJS, 397, L5
- [66] Marti, J., Paredes, J. M., Ribo, M., 1998, A&A, 338, L71
- [67] Mattox, J. R., et al. 1996, ApJ, 461, 396
- [68] Mattox J. R., et al., 1997, ApJ, 481, 95
- [69] Mattox, J.R., Hartman, R.C., Reimer, O. 2001, ApJS, 135, 155
- [70] McLaughlin, M. A., et al., 1996, ApJ, 473, 763
- [71] Mirabel, I. F., Rodriguez, L. F., 1999, Annual Review of Astronomy and Astrophysics, 37, 409
- [72] Mirabel, I. F., et al., 2001, Nature, 413, 139
- [73] Mukherjee, R., et al., 1996, ApJ, 470, 831
- [74] Mukherjee R., J. Halpern, N. Mirabal, E. V. Gotthelf, 2002, ApJ, 574, 693
- [75] Orlandini M., et al., 2003 in preparazione
- [76] Paredes, J. M., Mart, J., Rib M., Massi M., 2000, Science, 288, 2340
- [77] Parmar, A. N., et al., 1997, A&A Supplement series, 122, 309
- [78] Perlman, S., et al. , 1998, Astronomical Journal, 115 Issue 4, 1253
- [79] Press W. H., et al., 1992, Numerical Recipes : The Art of Scientific Computing (Cambridge Univ. Press)
- [80] Punsly, B.(a), 1998, ApJ, 498, 640
- [81] Punsly, B.(b), 1998, ApJ, 498, 660
- [82] Punsly, B., 1999, ApJ, 516, 141

- [83] Punsly, B., et al., 2000, *A&A*, 364, 552
- [84] Rappaport, S., Van den Heuvel, E. P. J., 1982, *Be stars; Proceedings of the Symposium, Munich, April 6-10, 1981*, p. 327-344
- [85] Reig, P., Ribo, M., Paredes, J. M., Marti, J., 2003, *A&A*, 405, 285
- [86] Roberts, M. S. E., Romani, R. W., Kawai, N., 2001, *ApJS*, 133, 451
- [87] Roberts, M. S. E., et al., 2003, in preparazione
- [88] Romero, G.E., et al., 1994, *A&A*, 288, 731
- [89] Romero, G. E., Benaglia, P., Torres, D. F., 1999, *A&A*, 348, 868
- [90] Romero, G. E., et al., 2001, *A&A*, 376, 599
- [91] Sambruna, R. M., Maraschi, L., Urry, C. M., 1996, *ApJ*, 463, 444
- [92] Sakamoto, T., et al. 2001, *New Century of X-ray Astronomy, ASP Conference Proceedings Vol. 251. Astronomical Society of the Pacific*, 2001, p.406
- [93] Sarma A. P., et al., 1997, *ApJ*, 483, 335
- [94] Scarsi, L., et al. 1977, *ESA Recent Advan. In Gamma-Ray Astronomy*, 3
- [95] Schwope, A.D., et al. 2000, *Astronomische Nachrichten*, 321,1
- [96] Shakhbazian, R. K., 1973, *Astrofizika*, 9, 495
- [97] Sikora, M., Begelman, M. C., Rees, M. J. 1994, *ApJ*, 421, 153
- [98] Sowards-Emmerd, et al., 2003, *ApJ*, 590, 109
- [99] Strickman, M. S., et al., 1998, *ApJ*, 497, 419
- [100] Sudou, H., Taniguchi, Y., 2000, *Astronomical Journal*, 120, 697
- [101] Tavani, M., et al., 1997, *ApJLetter*, 479, 109
- [102] Tavani M., et al., 1998, *ApJ*, 497, L89
- [103] Taylor & Cordes, 1993, *ApJ*, 411, 674
- [104] Totani, T., Kitayama, T., 2000, *ApJ*, 545, 572
- [105] Thompson, D. J., et al. 1993, *ApJS*, 629, 656

- [106] Thompson, D. J., et al., 1993, ApJS, 86, 629
- [107] Thompson, D. J., et al., 1999, ApJ, 516, 297
- [108] Tompkins, W. F., 1999, Thesis (PhD) STANFORD UNIVERSITY.
- [109] Torres, D. F., Butt, Y. M., Camilo, F., 2001, ApJ, 560 Issue 2, L155
- [110] Torres D. F., et al., 2001, A&A, 370, 468
- [111] Torres, D. F., et al., 2003, MNRAS, 339, 335
- [112] Urban S., et al., 1997, A&ASupplement series, 191, 5707
- [113] Urry, C. M., Padovani, P., 1995, Publications of the Astronomical Society of the Pacific, 107, 803
- [114] White, B. L., Chen, W., 1992, Nonisotropic and Variable Outflows from Stars, ASP Conference Series, 22, 274
- [115] White, N. E., Giommi, P., Angelini, L., 1994, Bulletin of the American Astronomical Society, 26, 1372
- [116] Wink J. E., Wilson T. L., Biegging J. H., 1983, A&A, 127, 211
- [117] Wootten A., 1981, ApJ, 245, 105
- [118] Yadigaroglu & Romani, 1997, ApJ, 476, 347
- [119] Zhang L., et al., 2000, A&A, 357, 957
- [120] Zhang L., Cheng K. S., 1998, A&A, 335, 234

Legenda: ApJ = *The Astrophysical Journal*; A&A = *Astronomy & Astrophysics*; ApJS = *The Astrophysical Journal Supplementes Series*; MNRAS = *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*;