

Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI FISICA E ASTRONOMIA "GALILEO GALILEI"
Corso di Laurea in Fisica

TESI DI LAUREA TRIENNALE

Caratterizzazione dello spettro di 3C 454.3 osservato dal Fermi LAT

Candidato:
Giulio Lucchetta
Matricola 1028346

Relatore:
Prof. Denis Bastieri
Correlatore:
Dr.ssa Sara Buson

INDICE

Introduzione	1
1 NUCLEI GALATTICI ATTIVI	3
1.1 Struttura di un AGN	3
1.2 Classificazione	5
1.3 Moti superluminali e variabilità	7
1.4 Gli effetti del toro di polveri	10
1.5 Il modello di unificazione	10
2 FERMI LAT	13
2.1 Obiettivi della missione e risultati raggiunti	13
2.2 Gli strumenti del LAT	16
2.2.1 Tracker	16
2.2.2 Calorimetro	18
2.2.3 ACD	19
2.2.4 DAQ e Trigger	19
2.3 Acquisizione e selezione dei dati	20
3 ANALISI DELLA SORGENTE 3C 454.3	23
3.1 Introduzione alla sorgente 3C 454.3	23
3.2 Analisi della sorgente tramite la Pass8	26
3.2.1 Maximum Likelihood Approach	26
3.2.2 Produzione delle light curve	27
3.2.3 Confronto fra i risultati ottenuti con la Pass8 e i risultati ottenuti con la Pass7	30
3.3 Conclusioni	34
Bibliografia	35

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1	Schema, non in scala, di un AGN	4
Figura 2	Confronto fra galassie Fanaroff-Riley di tipo I e Fanaroff-Riley di tipo II	6
Figura 3	Velocità apparente β_a in funzione dell'angolo di vista θ	8
Figura 4	Fattore di Doppler δ in funzione dell'angolo di vista θ	9
Figura 5	L'universo visto dal Fermi LAT	15
Figura 6	Rappresentazione schematica del Fermi LAT	16
Figura 7	Schema gerarchico del DAQ	20
Figura 8	Curva di luce pubblica di 3C 454.3	23
Figura 9	Analisi del terzo flare di 3C 454.3	25
Figura 10	Light curve dei primi tre flare della sorgente 3C 454.3, prodotte utilizzando le IRFs P8_SOURCE_V4.	29
Figura 11	Confronto fra le light curve prodotte utilizzando le IRFs Pass P8_SOURCE_V4 e le light curve prodotte utilizzando le IRFs Pass P7REP_SOURCE_V15	31
Figura 12	Confronto fra i flussi ottenuti utilizzando le IRFs Pass P8_SOURCE_V4 e i flussi ottenuti utilizzando le IRFs Pass P7REP_SOURCE_V15	32
Figura 13	Zoom dei primi flussi registrati per il terzo flare	33

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1	Principali parametri del LAT provenienti da Michelson et al.	14
-----------	--	----

INTRODUZIONE

Il *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, lanciato l'11 Giugno 2008, ha aperto la strada per lo studio di meccanismi ancora sconosciuti dell'universo, rendendo possibile fornire una visione sull'ultima componente mancante dello spettro elettromagnetico: i raggi gamma, con energie comprese tra le centinaia di MeV e le centinaia di GeV. Lo scopo di questa tesi è proprio quello di analizzare uno degli oggetti studiati con maggior successo dall'astrofisica delle alte energie, i nuclei galattici attivi o AGN (*Active Galactic Nuclei*).

La tesi è suddivisa in tre capitoli. Nel primo viene sinteticamente illustrata la struttura, la classificazione e le principali caratteristiche dei nuclei galattici attivi. Nel secondo capitolo vengono illustrate la struttura e il funzionamento generale del *Fermi LAT*. Nel terzo, infine, è presentata l'analisi di una sorgente, la 3C 454.3, una *blazar* il cui *jet* è praticamente allineato con la direzione di vista. Questo AGN si è rivelato essere la sorgente più luminosa e variabile del cielo gamma, stabilendo il record di flusso registrato dal satellite nel corso del suo terzo *flare*.

1 | NUCLEI GALATTICI ATTIVI

I nuclei galattici attivi o AGN (*Active Galactic Nuclei*) sono regioni compatte al centro di quelle che vengono definite come galassie attive, nelle quali il *core*, più luminoso dell'intera galassia ospitante, emette radiazione non termica con spettro continuo (dalle onde radio fino ai raggi γ) con variabilità su brevi scale temporali (anche solo di qualche giorno o meno). Tale emissione avviene attraverso processi fisici distinti dalla fusione nucleare presente nelle stelle e, sebbene l'aspetto tali oggetti extra-galattici dipenda fortemente dai diversi angoli di osservazione, può essere ricondotta ad un unico motore centrale: un buco nero supermassiccio al centro della galassia.

1.1 STRUTTURA DI UN AGN

Secondo l'attuale modello un nucleo galattico attivo, la cui struttura è illustrata in Figura 1, è costituito da un buco nero supermassiccio, con massa compresa fra 10^6 e 10^8 masse solari. La materia nelle vicinanze è attratta nella direzione del buco nero a causa dell'elevato campo gravitazionale, formando un disco di accrescimento; la grande quantità di energia acquistata viene in parte liberata sotto forma di onde elettromagnetiche. Tale processo può essere molto efficiente, giungendo a convertire in energia anche più del 10% della massa del materiale catturato. Attorno al disco di accrescimento orbitano nubi di gas che producono linee di emissione larghe, particolarmente intense nella banda della luce visibile e dell'ultravioletto, e definiscono quella che viene denominata *broad line region* o BLR. La BLR può essere oscurata da un denso toro di polveri posto ad una distanza maggiore rispetto al centro del buco nero. Linee sottili sono invece prodotte da nubi di gas che si muovono a velocità minore, situate oltre il toro (*narrow line region* o NLR). In molti casi, lungo l'asse di rotazione del buco nero, si osservano dei getti relativistici uscenti in direzioni opposte dal nucleo galattico attivo. Tuttavia non esiste ancora un modello che spieghi in modo completo i meccanismi di emissione e di collimazione dei raggi γ provenienti da essi.

Si distinguono diverse famiglie di nuclei galattici attivi, tra le quali le principali sono:

- **le galassie di Seyfert.** Scoperte nel 1943 dall'astronomo Karl Seyfert sono galassie a spirale di luminosità di oltre un centinaio di volte superiore a quella della Via Lattea, con nucleo caratterizzato da forti linee di emissione. Esse si distinguono in galassie di Seyfert di tipo I e galassie di Seyfert di tipo II in base alla larghezza delle righe di emissione;

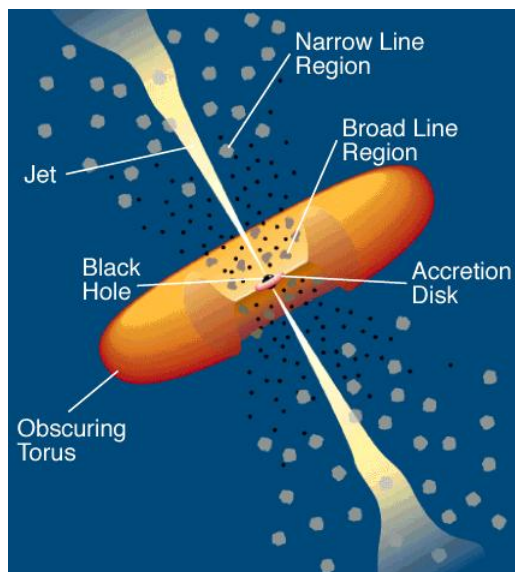


Figura 1: *Rappresentazione, non in scala, di un nucleo galattico attivo. Il buco nero centrale è circondato da un disco di accrescimento che si estende anche oltre un centinaio di raggi di Schwarzschild. Più lontano dal centro si trovano il toro di polveri e nubi di gas. Lungo l'asse di rotazione si notano invece i jets relativistici.*

- **radiogalassie.** Questa classe di nuclei galattici attivi è caratterizzata da una forte emissione radio che si estende su dimensioni molto più grandi della galassia stessa. Queste galassie sono caratterizzate dalla presenza di lobi radio estesi e diffusi, generalmente non collimati;
- **le Quasar.** Le Quasar sono nuclei galattici attivi con luminosità tale da "nascondere" l'intera galassia ospitante ed hanno un'apparenza stellare (il nome Quasar infatti sta per *Quasi stellar radio source*). Queste sorgenti furono identificate nel 1963 da Marteen Schmidt;
- **le BL Lac.** Gli oggetti di tipo BL Lac sono AGN con spettro continuo senza alcune linee di emissione o assorbimento, estremamente variabile nel tempo e con luce polarizzata. L'eponima di questa classe di sorgente, *BL Lacertae* fu scoperta nel 1929 da Cuno Hoffmeister.

L'origine della produzione della radiazione non termica da parte degli AGN va ricercata in due meccanismi correlati: l'emissione di sincrotrone, nella quale la radiazione viene prodotta da elettroni relativistici che interagiscono con un campo magnetico, e lo scattering Compton inverso, ovvero il processo in cui gli elettroni, interagendo con fotoni, cedono parte della loro energia accelerandoli. Ciò è ben visibile osservando il grafico della SED (*Spectral Energy Distribution*) ovvero l'intensità spettrale espressa in funzione dell'energia. Questo grafico presenta, infatti, due massimi: uno nella banda delle onde radio attribuito proprio all'emissione di sincrotrone e uno nella banda

dei raggi X duri o della radiazione γ causato, invece, dallo scattering Compton inverso da parte della stessa popolazione di elettroni di alta energia che ha prodotto la radiazione di sincrotrone. Un altro effetto che deve essere considerato è l'autoassorbimento di sincrotrone: una determinata popolazione di elettroni può assorbire parte della radiazione di sincrotrone prodotta dalla popolazione stessa. Tale processo può essere trascurato solo al di sotto di una certa frequenza caratteristica. Lo spettro in energia è generalmente descritto da una *power-law* del tipo:

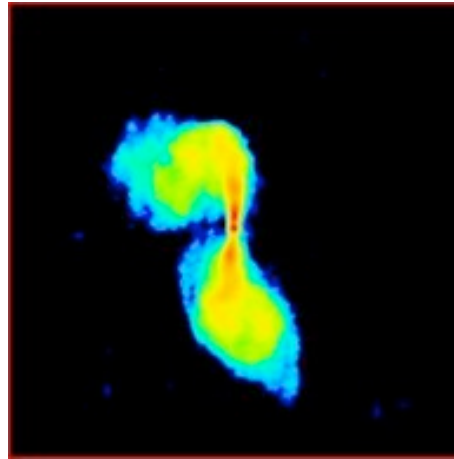
$$\frac{dN}{dE} = N_0 \left(\frac{E}{E_0} \right)^\gamma$$

Dove $\gamma \sim 2 + \alpha$ con α piccolo. Dall'integrale della SED si ricava infine la luminosità totale della sorgente.

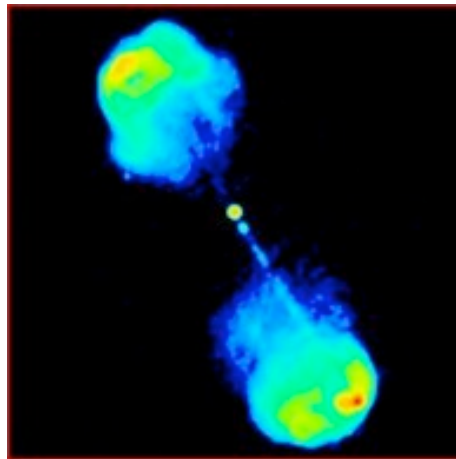
1.2 CLASSIFICAZIONE

Dalla descrizione della struttura di un AGN si comprende come il comportamento di questa vasta classe di sorgenti dipenda fortemente dall'orientazione rispetto al sistema di osservazione terrestre. Conseguentemente la classificazione di un nucleo galattico attivo risulta molto ampia e vasta. Tuttavia, in base alle proprietà del loro spettro di emissione nel visibile e nell'ultravioletto, gli AGN si possono suddividere in tre famiglie:

- **AGN di tipo 1.** Gli AGN di tipo 1 sono caratterizzati da una forte componente continua e da linee di emissione larghe, generate da gas caldo in moto ad alta velocità. All'interno di questa classe possiamo operare una suddivisione in due gruppi: si sono osservate, infatti, sorgenti che presentano una forte emissione di onde radio (*radio-loud AGN*) ma anche sorgenti non attive sotto questo punto di vista (*radio-quiet AGN*). I nuclei galattici attivi di tipo 1 che presentano forte emissione di onde radio sono chiamati *Broad-Line Radio Galaxies* (BLRG) se presentano una bassa luminosità e *Radio-loud Quasar* se caratterizzati da un'alta luminosità. Infine si può operare un'ulteriore suddivisione di quest'ultima classe di sorgenti, in base alla forma nello spettro delle onde radio: i *Flat Spectrum Radio quasar* (FSRQ) o gli *Steep Spectrum Radio quasar* (SSRQ). All'interno della classe di sorgenti *radio-quiet* troviamo le *galassie di Seyfert di tipo I*, caratterizzate da una luminosità relativamente bassa, e le *quasar radio-quiet*, caratterizzate da una luminosità più elevata;
- **AGN di tipo 2.** Gli AGN di tipo 2, differentemente dagli AGN di tipo 1, sono caratterizzati da una debole componente continua e da strette linee di emissione. Ciò significa che non vi è la presenza di gas ad alta velocità o, più probabilmente, si assiste ad un oscuramento da parte del toro di polveri. All'interno degli AGN di tipo 2 radio-quieti si trovano le *galassie di Seyfert di tipo II* e le *narrow-emission-line X-ray galaxies* contraddistinte da una bassa luminosità. Gli AGN di tipo 2 radio-loud sono spesso chiamati *Narrow-Line Radio Galaxies* (NLRG) le quali, in base alla



(a) Le FR I presentano getti radio gemelli, oscurati ai bordi.



(b) Le FR II presentano getti radio altamente collimati, brillanti ai bordi.

Figura 2: Confronto fra galassie Fanaroff-Riley di tipo I e Fanaroff-Riley di tipo II.

morfologia nello spettro radio, si distinguono in galassie Fanaroff-Riley di tipo I (FR I) e Fanaroff-Riley di tipo II (FR II). Le FR I presentano getti radio simmetrici e una luminosità che decresce man mano che ci si allontana dal centro, mentre le FR II sono caratterizzate da dei getti ben collimati e regioni più luminose a una distanza considerevole dal centro. Questa distinzione è ben visibile in Figura 2. Inoltre, a parità di luminosità nel radio le FR II presentano righe di emissione nell'ottico circa un ordine di grandezza più intense di quelle delle FR I;

- **AGN di tipo o.** Un piccolo numero di AGN possiede caratteristiche spettrali piuttosto insolite e non rientrano nelle due categorie precedentemente descritte. Queste sorgenti vengono denominate AGN di tipo o e si ritiene che il loro comportamento sia legato a un piccolo angolo con la nostra linea di vista. All'interno di

questa classe troviamo gli oggetti di tipo BL Lac fra gli AGN radio-loud, e i *Broad Absorption Line (BAL) quasar* che sono, invece, AGN radio-quiet.

Un sottoinsieme delle quasar di tipo 1, tra i quali le FSRQ, hanno un'emissione nello spettro continuo molto simile a quella delle BL Lac. Per questo motivo esse vengono complessivamente denominate con il termine *blazar*. In definitiva, un AGN viene classificato come Tipo 1 o Tipo 2 a seconda che il nucleo venga oscurato dal toro di polveri o meno, mentre la distinzione tra radio-galassie e blazar viene effettuata in base all'allineamento dei getti relativistici rispetto alla linea di vista dell'osservatore.

1.3 MOTI SUPERLUMINALI E VARIABILITÀ

Come diretta conseguenza delle trasformazione degli angoli in relatività speciale, l'emissione in un plasma che si muove con una velocità relativistica rispetto ad un osservatore in quiete, è collimata in avanti. Si pensa che attraverso la comprensione dei meccanismi alla base di questo processo, possano essere spiegate la grande luminosità, la polarizzazione della luce e l'elevata variabilità che caratterizzano le *blazar*. Bisogna innanzitutto osservare che in molte di queste sorgenti sono stati osservati quelli che vengono definiti come *moti superluminali*.

Con il termine moto superluminale si indica il moto di oggetti astronomici che presentano una velocità apparente maggiore della velocità della luce. Questo fenomeno è molto più evidente per regioni che si muovono ad una velocità prossima a quella della luce (ma, ovviamente, ancora subluminali) a piccoli angoli di vista: la sorgente rincorre i fotoni che emette, riducendo così l'intervallo temporale che separa due eventi nel sistema di riferimento dell'osservatore. Si può dimostrare che la velocità apparente osservata, rapportata alla velocità della luce, $\beta_a = v_a/c$ è legata alla vera velocità $\beta = v/c$ e all'angolo di vista θ tramite la relazione:

$$\beta_a = \frac{\beta \sin \theta}{1 - \beta \cos \theta}$$

Quindi, se per esempio abbiamo $\beta = 0.9$ e $\theta = 10^\circ$, allora la velocità apparente β_a sarà pari a 1.37.

Una rappresentazione del valore di β_a in funzione dell'angolo di vista θ , per vari valori del fattore di Lorentz γ , si può trovare in Figura 3. Si può facilmente notare come la velocità apparente dipenda fortemente dal fattore di Lorentz e come, in alcuni casi, essa possa essere considerevolmente maggiore dell'unità. Le maggiori velocità apparenti sono state osservate proprio nelle *blazar* a favore dell'ipotesi che i loro getti relativistici presentino un maggior allineamento con la direzione di osservazione rispetto alle altre classi di AGN. La velocità apparente può essere definita anche nel seguente modo:

$$\beta_a = \sqrt{2\delta\gamma - \delta^2 - 1}$$

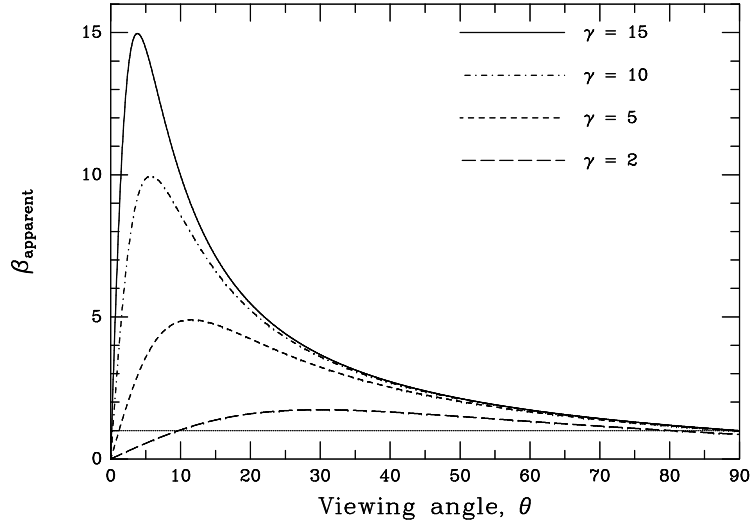


Figura 3: Il grafico mostra il valore di β_a in funzione dell'angolo di vista, per diversi valori del fattore di Lorentz γ . La retta orizzontale indica il valore $\beta_a = 1$.

dove è stato definito il fattore Doppler come:

$$\delta \equiv [\gamma(1 - \beta \cos \theta)]^{-1} \quad (1.1)$$

Così come la velocità apparente β_a anche il fattore Doppler, come si può osservare in Figura 4, dipende fortemente dall'angolo θ : per $\theta = 90^\circ$ il fattore Doppler raggiunge il valore minimo $\delta_{min} = \gamma^{-1}$, mentre per $\theta = 0^\circ$ si ha $\delta_{max} = \gamma \cdot (1 + \beta) \sim 2\gamma$ per $\gamma \gg 1$. Inoltre il fattore Doppler è pari all'unità per $\theta^* = \arccos \sqrt{\frac{\gamma-1}{\gamma+1}}$. La dipendenza descritta diventa più marcata all'aumentare del fattore di Lorentz.

Il fattore Doppler rappresenta, inoltre, una grandezza fondamentale per comprendere la relazione che lega il flusso intrinseco e il flusso osservato per una sorgente che si muove con una velocità relativistica $v = \beta/c$. Se l'emissione è isotropa nel sistema di riferimento inerziale con la sorgente il flusso di energia osservato in unità di tempo e di superficie F_ν vale, per uno spettro rappresentato da una *power-law* del tipo $F'_{\nu'} \propto (\nu')^{-\alpha}$:

$$F_\nu(\nu) = \delta^{3+\alpha} F'_{\nu'}(\nu') \quad (1.2)$$

dove α è l'indice spettrale e ν è la frequenza. La luminosità osservata L_j , invece, è legata a quella intrinseca \mathcal{L}_j tramite l'equazione:

$$L_j = \delta^p \mathcal{L}_j \quad (1.3)$$

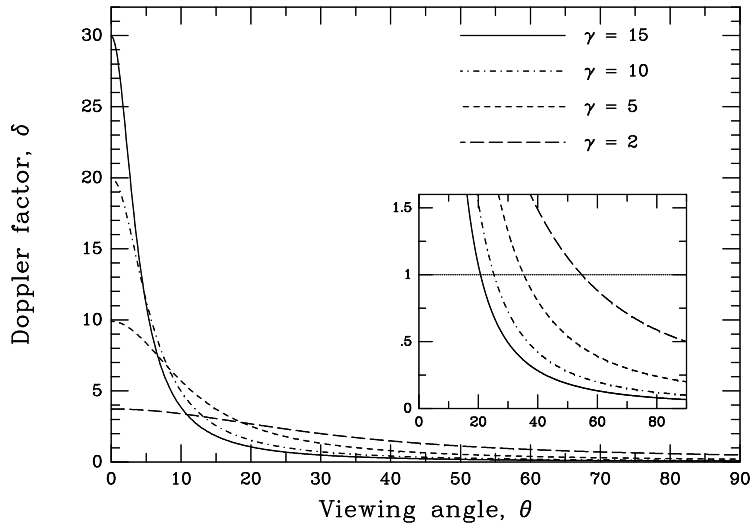


Figura 4: Rappresentazione del fattore Doppler δ in funzione dell'angolo di vista per, diversi valori del fattore di Lorentz γ . Nel riguardo si vede per quale valore dell'angolo di vista si ha $\delta = 1$

con $p = 3 + \alpha$. Infine la variabilità di un AGN può essere misurata attraverso la variazione del flusso per un dato intervallo temporale:

$$\frac{\Delta F}{\Delta t} = \delta^5 \frac{\Delta F'}{\Delta t'} \quad (1.4)$$

Queste equazioni sono state ricavate per una sorgente puntiforme; nel caso di un jet relativistico continuo il volume del mezzo emittente è ridotto di un fattore di Doppler a causa della contrazione di Lorentz. Pertanto gli esponenti di δ in Equazione (1.2), Equazione (1.3) e Equazione (1.4) vanno modificati rispettivamente in $2 + \alpha$, 4 e $p = 2 + \alpha$.

In ogni caso, come si può facilmente notare, tutte queste equazioni presentano una notevole dipendenza dal fattore di Doppler che, come abbiamo visto, può assumere valori decisamente maggiori dell'unità per oggetti che si muovono con una velocità relativistica a piccoli angoli con la direzione nella quale vengono osservati. Non c'è quindi da stupirsi se le *blazar* sono caratterizzate da un elevato grado di polarizzazione dello spettro continuo e da una variabilità molto rapida, su scale temporali generalmente dell'ordine del giorno. Solo per citare alcuni esempi ricordiamo che, l'intensità della sorgente 3C 279 è diminuita di un fattore 4 – 5 in meno di tre giorni (Kniffen et al. 1993), mentre quella di PKS0528 + 134 è raddoppiata in cinque giorni (Hunter et al. 1993).

Inoltre è interessante notare che per molti nuclei galattici attivi di alta luminosità si osservano dei *jets* solamente lungo una direzione e non in

quella opposta. Questo fatto ha sollevato una discussione sulla possibilità che i getti siano intrinsecamente *one-sided* o se, invece, siano presenti due getti, uno dei quali oscurato dall'elevata luminosità dell'altro, a causa dei fenomeni legati al *beaming* relativistico precedentemente descritti. Quest'ultima ipotesi sembra essere la più accreditata, supportata, per esempio, dagli studi sulla radio-galassia M 87. Infatti non è stato solo osservato un moto superluminale nella scala del kiloparsec, ma è stata dedotta anche la presenza di un jet opposto "invisibile" attraverso un *hot spot* polarizzato otticamente nel lobo radio.

1.4 GLI EFFETTI DEL TORO DI POLVERI

Come già precedentemente anticipato, un insieme di polveri e gas distribuiti su un toro o un disco deformato funge da materiale oscurante che impedisce alla luce dall'infrarosso all'ultravioletto di penetrare ad alcuni angoli di vista. Per questo motivo alcuni nuclei galattici attivi appaiono diversamente a differenti angoli di osservazione. Prove dirette di oscuramento sono state trovate in molti AGN di tipo II come NGC 1068 o la radio galassia 3C 234 attraverso tecniche spettro-polarimetriche. Una frazione della luce proveniente da queste sorgenti è altamente polarizzata con uno spettro con linee larghe tipico degli AGN di tipo 1 piuttosto che degli AGN di tipo 2. In 3C 234 il piano di polarizzazione è perpendicolare all'asse del jet radio, come ci si attende da un AGN di tipo 1 parzialmente oscurato da una nube di polveri il cui asse coincide con l'asse del jet relativistico.

La presenza di un'emissione anisotropa continua può anche essere dedotta da studi nell'infrarosso e nei raggi X (poiché la profondità della galassia che si riesce ad indagare diminuisce a lunghezze d'onda maggiori di quella ottica, una sonda molto più efficace e potente è rappresentata proprio da questo tipo di osservazioni) e dall'estensione delle regioni narrow line, seguendo i coni luce ionizzati tracciati, come si nota in immagini dirette di molti AGN di tipo 2 vicini.

Al momento, non ci sono prove dirette di oscuramento in galassie poco luminose come le Fanaroff-Riley di tipo I, sebbene ci siano forti indicazioni di emissione anisotropa continua da parte di alcuni sorgenti come, per esempio PKS 2152 – 69 o la radio galassia *Cygnus A*.

1.5 IL MODELLO DI UNIFICAZIONE

Come abbiamo visto, quindi, le due cause di anisotropia, ovvero l'oscuramento della luce dall'infrarosso all'ultravioletto da parte di un toro di polveri e il *beaming* relativistico dei getti radio dipendono fortemente dall'orientazione della sorgente studiata. Mentre la luce di alcuni AGN è rivolta sotto forma di getti verso l'osservatore, i restanti AGN appaiono disallineati e costituiscono quella che viene comunemente chiamata *parent population*. Tramite le proprietà note dei nuclei galattici attivi *radio-loud* (radio galassie, quasar e BL-Lac) si cerca di identificare la

corretta *parent population* e classificare gli AGN allineati (il cui numero è piccolo rispetto a quelli non allineati) con la giusta angolazione. In questo paragrafo verranno esposti solamente i principali criteri di confronto e alcuni risultati del modello di unificazione, rimandando il lettore interessato ad una trattazione più approfondita dell'argomento ad articoli specifici.

Alcune evidenze sperimentali come gli studi riguardanti le linee di emissione strette e l'emissione radio estesa hanno portato all'unificazione fra le quasar e le FR II. Questi due tipi di sorgenti presentano infatti, sotto questo punto di vista, caratteristiche comuni considerando anche il fatto che la luminosità sistematicamente maggiore di alcune righe di emissione delle quasar è attribuita, molto probabilmente, al parziale oscuramento del toro di polveri.

Per quanto riguarda gli studi sulla morfologia della galassia ospitante, che costituiscono comunque un buon test per il modello di unificazione, ci sono da segnalare osservazioni contrastanti. Attualmente la determinazione della grandezza della galassia ospitante delle quasar risulta molto difficile e ciò non ha permesso di ottenere dei risultati significativi.

Una seconda connessione prevista dal modello di unificazione è quella fra le BL Lac e le FR I. Tuttavia, se da un lato è stato osservato, già più di dieci anni fa, che l'emissione radio estesa delle BL Lac è paragonabile a quella delle FR I a bassa luminosità, dall'altro non è ancora chiaro se la luminosità delle linee strette delle BL Lac sia compatibile con quella delle galassie FR I.

Una grandezza che permette di distinguere fra sorgenti collimate e non, ed è di conseguenza fondamentale per l'unificazione, è l'angolo critico θ_c ; infatti al di sopra di tale valore diremo che il flusso rilevato proviene da un AGN non collimato rispetto alla nostra direzione di vista. Tralasciamo i dettagli di questa trattazione, che vanno oltre allo scopo di questa tesi, limitandoci a riportare solo i risultati fondamentali: dall'analisi statistica dei campioni a disposizione risulta che l'angolo critico che separa le FSRQ dalle FR II è $\theta_c \sim 14^\circ$, l'angolo critico che separa le SSRQ dalle FR II è di circa 38° , mentre l'angolo critico tra le FR I e le X-ray BL-Lac è $\theta_c \sim 30^\circ$.

2 | FERMI LAT

Il *Fermi Gamma-ray Space Telescope*, lanciato l'11 Giugno 2008, è il risultato di una collaborazione internazionale che coinvolge agenzie spaziali e istituti di ricerca di Stati Uniti, Francia, Germania, Italia, Svezia e Giappone, e rappresenta uno strumento fondamentale per lo studio dell'astrofisica delle alte energie. Esso è composto da uno strumento secondario, il *Gamma-ray Burst (GBM)*, e dal *Large Area Telescope (LAT)* un telescopio che rivela le coppie elettrone-positrone prodotte dai raggi γ . Il GBM, formato da due set di sei rivelatori di Ioduro di Sodio drogato Tallio, NaI(Tl), e uno scintillatore BGO, ovvero di Germanato di Bismuto, è sensibile ai raggi X e ai raggi γ con energia compresa fra gli 8 keV e i 40 MeV. Esso comunica la posizione dei *Gamma-ray Burst* al LAT; per *bursts* al di sopra di una soglia programmata, il telescopio è automaticamente ri-puntato in modo tale da riportare il GBM all'interno del angolo di vista del LAT per le successive cinque ore, permettendo l'ideale osservazione del fenomeno. Il LAT, invece, copre un range energetico fra i 20 MeV e i 300 GeV ed è costituito da un tracker, un calorimetro, un rivelatore di anti-coincidenza e un sistema di trigger e acquisizione dati.

Il LAT rappresenta la continuazione, con migliori prestazioni, grazie agli sviluppi tecnologici riguardanti l'elettronica e il tracciatore, del lavoro effettuato da EGRET¹, la missione che, tra il 1991 e il 2000, si è occupata dello studio del cielo nello spettro gamma. In particolare i miglioramenti ottenuti includono:

- una maggiore area effettiva e un campo visivo più ampio;
- una maggior risoluzione angolare nella ricostruzione degli eventi;
- un trigger e un sistema di acquisizione dati più veloce e flessibile.

Le osservazioni del satellite nella banda a più alta energia, inoltre, possono essere integrate con quelle, a terra, dei telescopi Cherenkov (H.E.S.S² e MAGIC³) che coprono un range che si estende dalle decine di GeV fino a 100 TeV. Le principali caratteristiche del *Fermi LAT* si possono trovare in Tabella 1.

2.1 OBIETTIVI DELLA MISSIONE E RISULTATI RAGGIUNTI

I principali obiettivi scientifici del Fermi LAT sono i seguenti:

- comprendere i meccanismi di accelerazione delle particelle, e i meccanismi di produzione e collimazione delle particelle γ dai jet

¹ Energetic Gamma Ray Experiment Telescope.

² High Energy Stereoscopic System.

³ Major Atmospheric Gamma-ray Imaging Cherenkov Telescopes

Parameter	Value or range
Energy range	20 MeV - 300 GeV
Effective area at normal incidence	$\leq 8400 \text{ cm}^2$
Energy resolution (eq. Gaussian 1 σ):	
100 MeV - 1 GeV	15% - 9%
1 GeV - 10 GeV	8% - 9%
10 GeV - 300 GeV	8.5% - 18%
Single photon angular resolution (space angle):	
> 10 GeV	$< 0.15^\circ$
1 GeV	0.6°
100 MeV	3.5°
Field of view	2.4 sr
Timing accuracy	300 ns
Single event readout time	26.5 μ s

Tabella 1: Principali parametri del LAT provenienti da Michelson et al.

relativistici, in sorgenti quali nuclei galattici attivi (AGN), residui di supernova (SNR), pulsar e nei flare solari;

- determinare la natura delle sorgenti non identificate da EGRET;
- chiarire l'origine dei *Gamma Ray Burst* (GRB) di alta energia, ovvero intense emissioni di raggi γ , concentrati in un intervallo temporale ristretto (da pochi millisecondi a qualche minuto), comparabili a delle vere e proprie esplosioni (sono infatti fra i fenomeni più energetici osservati nell'universo); i meccanismi alla base dell'emissione e del trasporto di questi fotoni continuano ad essere oggetto di dibattito;
- studiare l'*Extragalactic Gamma-ray Background* (EGB), una componente isotropa su $\sim 30^\circ$ di scala angolare, somma dei contributi di sorgenti non risolte ma anche di possibili contributi dovuti ad annichilazione di materia oscura e fenomeni di "fisica esotica".

Già dopo il primo anno di funzionamento, *Fermi* aveva rilevato più di 150 milioni di raggi γ , paragonati con gli 1.4 milioni rilevati da EGRET durante i suoi nove anni di attività. Nella prima Bright Source List, o 1FGL⁴, basata solamente sulle rilevazioni dei primi tre mesi del primo anno, è pubblicata una lista di 205 sorgenti di raggi γ ad alta energia (con una significatività $> 10\sigma$). Di queste 205 sorgenti, 50 non hanno una identificazione certa mentre le rimanenti 155 sono classificate nel seguente modo: 30 pulsars, 2 binarie X, 46 BL Lac blazar, 64 flat-spectrum radio quasar (FSRQ), 9 blazar di altra natura, 2 galassie radio, 1 ammasso globulare, e la Grande Nube di Magellano. Dopo questo primo catalogo ne sono seguiti altri quattro⁵ fino ad arrivare al 3FGL comprendente circa 3000 sorgenti; il 58 % di queste sono state identificate come nuclei galattici attivi. Ovviamente alla pubblicazione

⁴ La sigla sta per Fermi Gamma Lat

⁵ 1FGL basato sull'analisi dei dati raccolti nei primi undici mesi della missione, 2FGL basato su due anni di osservazioni, 1FHL (tre anni di osservazione), 3FGL (quattro anni di osservazione)

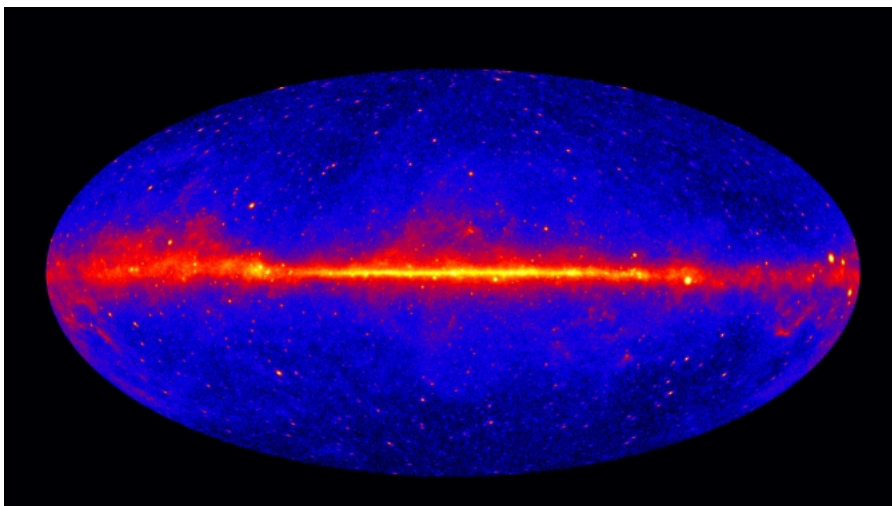


Figura 5: *L'immagine a falsi colori, basata sui dati raccolti nei cinque anni di attività del Fermi LAT, mostra l'intero cielo visto nello spettro gamma a energie maggiori di 1 GeV. Le sorgenti più luminose sono quelle con colori caldi. Generalmente le sorgenti più luminose vicine alla banda centrale, dominata dalla Diffuse Galactic Emission sono pulsar, quelle più distanti sono nuclei galattici attivi.*

di ogni catalogo si accompagnano continui studi sulla strumentazione del satellite, sulle sue prestazioni e sulla sua calibrazione. Sono proprio gli sviluppi in questo campo che hanno permesso l'identificazione di un così gran numero di sorgenti e dei grandi passi avanti nello studio di queste popolazioni. Al catalogo 3FGL seguirà un successivo catalogo, basato su sei anni di osservazione, grazie all'utilizzo delle *Pass8* ovvero l'aggiornamento delle funzioni di risposta del telescopio.

In Figura 5 possiamo vedere l'universo visto dal Fermi LAT. In particolare oltre alle sorgenti più luminose nello spettro gamma, visibili anche ad occhio nudo, si nota la presenza di due componenti diffuse: la già citata *Extragalactic Gamma-ray Background* e la *Diffuse Galactic Emission*. Quest'ultima componente è dovuta all'interazione dei raggi cosmici (principalmente protoni ed elettroni) con gas e radiazione interstellare attraverso i processi di *bremsstrahlung* e di *scattering Compton inverso*; questa componente è più intensa in prossimità del piano galattico e si indebolisce allontanandosi da esso. Oltre all'identificazione di sorgenti puntiformi, galattiche ed extra-galattiche, il LAT fornisce contributi anche per quanto riguarda la modellazione di queste componenti diffuse. L'analisi dell'*Extragalactic Gamma-ray Background* tuttavia è ostacolata fortemente da una serie di incertezze sistematiche: i contributi dell'emissione galattica diffusa e il rumore di fondo, sia strumentale, sia dovuto a raggi cosmici non correttamente classificati. Pertanto i tentativi di ricerca di tracce di annichilazione di materia oscura all'interno di questa componente non hanno prodotto, ad ora, risultati significativi.

Quindi, nonostante le osservazioni e le importanti scoperte effettuate dal Fermi LAT, molti sono i meccanismi ancora sconosciuti o incomple-

ti, come quelli alla base della formazione e della collimazione dei jet relativistici osservati in molte sorgenti, oppure quelli legati all'origine della componente diffusa, a testimonianza del fatto che l'astrofisica delle alte energie rappresenta un campo ancora aperto della fisica con notevoli possibilità di sviluppo.

2.2 GLI STRUMENTI DEL LAT

Come già anticipato il *Fermi LAT* è costituito da un rivelatore di anti-coincidenza (ADC) che circonda l'intero strumento con lo scopo di diminuire notevolmente il rumore di fondo generato da particelle cariche. All'interno dell'ADC si trova una matrice di 4×4 moduli, chiamati torri, dalle dimensioni di $40 \times 40 \text{ cm}^2$. Ciascun modulo è costituito da un tracciatore di precisione a strip di Silicio, seguito da un calorimetro elettromagnetico formato da cristalli di Ioduro di Cesio e da un modulo di acquisizione dati. Passiamo ora ad analizzare più in dettaglio le singole componenti dello strumento. Per la visualizzazione di una rappresentazione schematica dello strumento si faccia riferimento alla Figura 6.

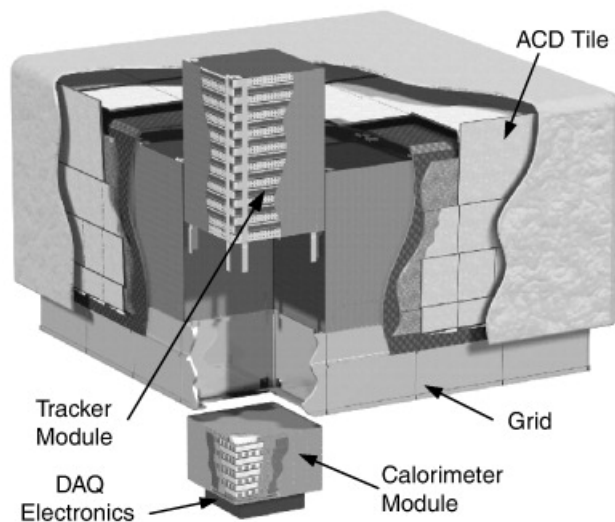


Figura 6: Rappresentazione schematica del Large Area Telescope (LAT); sono ben riconoscibili gli elementi fondamentali dello strumento.

2.2.1 Tracker

Un raggio gamma ad alta energia interagisce con la materia principalmente attraverso la produzione di coppie $e^+ e^-$, non potendo essere riflesso o rifratto. Il tracker del Fermi LAT ha quindi il compito di rivelare la traccia degli elettroni e dei positroni con una grande precisione e risoluzione. Esso è composto da una matrice 4×4 di moduli, e ciascun modulo è a sua volta costituito da 18 piani in configurazione (x,y) per il tracciamento. I primi 16 piani, più lontani dal calorime-

tro, sono alternati con stati di materiale ad alto numero atomico Z (tungsteno) in modo tale da poter aumentare la probabilità di conversione⁶. I materiali attivi del tracker, invece, sono rivelatori a strip di silicio o SSD (*Silicon Strip Detectors*). Ciascuna SSD ha un'area di $8.95 \times 8.95 \text{ cm}^2$, con un area inattiva di 1 mm e uno spessore di $400 \mu\text{m}$. L'elettronica di lettura è montata sul bordo di ogni pannello, in modo da massimizzare l'area efficace di rilevazione. Lo spazio morto tra l'area attiva di un modulo del tracker e quello adiacente è di soli 18 mm .

Un raggio gamma, pertanto, passa indisturbato attraverso il sottile rivelatore di anti-coincidenza e penetra nel tracciatore fino a quando non interagisce all'interno di uno strato di tungsteno producendo la coppia elettrone-positrone. Queste due particelle cariche, interagendo con la materia, ionizzano, creando coppie elettrone-lacuna lungo il loro percorso; è questo il segnale raccolto dalle SSD e successivamente elaborato attraverso l'elettronica di lettura. Le strip di Silicio, alternate su successivi piani nella direzione x e nella direzione y , permettono la completa ricostruzione tridimensionale della traccia di elettroni e positroni con grande precisione.

Infatti è proprio l'utilizzo di questo tipo di rivelatori a rappresentare la novità assoluta e un notevole passo in avanti del *Fermi LAT* rispetto alla camera a scintilla utilizzata in EGRET. Le nuove tecnologie sviluppatesi nella realizzazione di rivelatori a semiconduttore hanno portato alla costruzione di strumenti che soddisfano molto bene i seguenti requisiti: alta efficienza, ottima risoluzione spaziale nella ricostruzione di eventi, alto rapporto segnale/rumore, ed un'elettronica di readout molto veloce (con un tempo morto di $\sim 26 \mu\text{s}/\text{evento}$ nel caso del LAT). Inoltre, non essendo necessario l'utilizzo di materiali consumabili come il gas, si hanno, in linea teorica, vincoli meno restrittivi per quanto riguarda la durata della missione.

In verità la risoluzione spaziale dello strumento è limitata dai fenomeni di Scattering multiplo e di Bremsstrahlung; per avere un risultato ottimale è necessario misurare la direzione di elettroni e positroni immediatamente dopo la produzione di tali coppie. L'effetto è tutt'altro che trascurabile: se, per esempio, un fotone incidente con energia di 100 MeV non venisse rilevato dai primi piani di strip di Silicio si avrebbe un calo nella risoluzione di un fattore 2, con code sensibilmente più estese per la *Point Spread Function (PSF)*, ovvero la curva che rappresenta la distribuzione di probabilità del fotone incidente. Pertanto, non è solo necessario che tali rivelatori abbiano un'alta efficienza e un'ottimizzazione del materiale passivo, ma è anche fondamentale che i fogli di tungsteno coprano solamente l'area efficace delle strip di Silicio, in modo tale da avere un numero esiguo di particelle che non possano

⁶ Infatti la sezione d'urto per produzione di coppie, per $E_\gamma \gg m_e \cdot c^2$, aumenta all'aumentare del numero atomico Z secondo la formula:

$$\sigma_{\text{pair}} = 4Z^2 \alpha r_e^2 \cdot \left(\frac{7}{9} \ln \frac{183}{Z^{1/3}} - \frac{1}{54} \right)$$

con α costante di struttura fine.

essere rilevate dai primi strati.

2.2.2 Calorimetro

Il calorimetro elettromagnetico del LAT, costituito da cristalli di CsI(Tl), ha un duplice scopo:

1. misurare la deposizione di energia dovuta alla sciame elettromagnetico risultante della produzione di coppie $e^+ e^-$ da parte dei fotoni gamma incidenti;
2. ricostruire lo sviluppo dello sciame elettromagnetico, fornendo, in tale modo, un importante mezzo per discriminare il rumore di fondo e una stima delle fluttuazioni nell'energia di leakage⁷.

Il calorimetro è finemente segmentato sia in profondità che in direzione laterale, al fine di ottimizzare le prestazioni in risoluzione energetica.

Ogni modulo del calorimetro possiede 96 cristalli, ognuno di dimensioni $2.7 \times 2.0 \times 32.6$ cm. I cristalli sono otticamente isolati tra loro e sono sistemati su otto ripiani da dodici cristalli ciascuno. La profondità totale del calorimetro è di 8.6 lunghezze di radiazione mentre la profondità totale dello strumento è di 10.1 lunghezze di radiazione⁸. Ogni modulo del calorimetro, come già discusso per il tracciatore, è in configurazione odoscopica (configurazione (x-y) con ogni strato ruotato di 90° rispetto al precedente).

La luce di scintillazione prodotta in ogni cristallo viene raccolta nei fotodiodi per mezzo delle guide di luce. In particolare, sono presenti due fotodiodi all'estremità di ogni cristallo: un fotodiodo più grande con un'area di 147 mm², e un fotodiodo più piccolo con un'area di 25 mm². Questi due tipi di fotodiodi coprono differenti range energetici: i fotodiodi più grandi coprono il range compreso fra i 2 MeV e gli 1.6 GeV, mentre i fotodiodi più piccoli coprono il range compreso fra i 100 MeV e i 70 GeV. Ogni cristallo presenta poi la propria elettronica di readout formata da un pre-amplificatore, un shaper, un multiplexer e un convertitore analogico-digitale. L'asimmetria nella luce rivelata dai fotodiodi permette al LAT di ricostruire con buona precisione lo sciame elettromagnetico: la risoluzione va dai pochi millimetri per basse energie (~ 10 MeV) alle frazioni di millimetro per energie > 1 GeV.

⁷ Le fluttuazioni nell'energia di leakage sono dovute alla dimensione finita del calorimetro; lo sciame non è completamente contenuto all'interno del rivelatore. Le perdite longitudinali sono più importanti di quelle trasversali.

⁸ La lunghezza di radiazione X_0 è una quantità che caratterizza quanto una particella carica interagisce con la materia. Essa dipende dalla densità e dalla carica del nucleo secondo la seguente formula:

$$X_0 = \frac{A}{4\alpha N_A Z^2 r_e^2 \ln \frac{183}{Z^{1/3}}} \text{ [in g/cm}^2\text{]}$$

2.2.3 ACD

Uno dei problemi di maggiore importanza nella rilevazione di raggi γ nello spazio è rappresentato dal background dei raggi cosmici che colpiscono il *Fermi LAT* in ogni direzione. Lo scopo del rivelatore di anti-coincidenza o ACD (*Anticoincidence Detector*) è proprio quello di diminuire il più possibile il rumore di fondo generato da queste particelle cariche; pertanto, il requisito fondamentale dell'ACD è quello di avere un'efficienza estremamente elevata nel rilevare quando ogni singola particella carica entra nel campo visivo del telescopio (l'efficienza deve essere almeno pari a 0.9997).

Il limite maggiore è legato al fenomeno del backplash: particelle secondarie distribuite in modo isotropo, create dallo sciame elettromagnetico (principalmente fotoni nel range 100 – 1000 keV) possono produrre dei falsi segnali di veto interagendo nella materia per effetto Compton. Il verificarsi di tali eventi è tutt'altro che trascurabile vista la grande massa del calorimetro del LAT (circa 1800 kg) necessaria per fermare i raggi γ incidenti con energia molto elevata. Proprio per prevenire questo effetto di self-veto l'ACD è segmentato, riducendo l'area dell'ACD che contribuisce al backplash.

Per la costruzione del rivelatore si sono utilizzate delle “mattonelle” (*tiles*) di scintillatori plastici, essendo questo tipo di rivelatori efficienti, relativamente economici e ampliamenti studiati dato il loro utilizzo in altri esperimenti spaziali. La luce di scintillazione di ogni “mattonella” è raccolta dalle *Wavelength Shifting Fibers* e riemessa ad una lunghezza d'onda maggiore, per garantire un miglior accoppiamento fra la sensibilità spettrale dello scintillatore e quella del fotorivelatore (in questo caso un fotomoltiplicatore). I fotomoltiplicatori e l'elettronica di lettura sono posti intorno al perimetro inferiore dell'ACD.

2.2.4 DAQ e Trigger

Il sistema di acquisizione dati raccoglie i dati provenienti da altri sottosistemi seguendo la struttura gerarchica illustrata in Figura 7. Il trigger e l'elettronica di readout per ciascuna delle sedici coppie di tracciatori e calorimetri sono forniti da un modulo TEM (*Tower Electronics Module*). Al livello superiore troviamo il GASU (*Global trigger/ACD module/Signal distribution Unit*) composto da:

- la *Command Response Unit (CRU)* che riceve e invia comandi e distribuisce il segnale di clock del DAQ;
- il *Global Trigger Electronics Module (GEM)* che ha il compito di generare il segnale di decisione di lettura in base alle primitive di trigger delle TEMs;
- l' *ACD Electronics Module (AEM)* che ha per l'ACD una funzione analoga a quella del TEM per i rivelatori del LAT;
- l' *Event Builder Module (EBM)* che costruisce gli eventi completi per il LAT dalla informazioni ricevute dalle TEMs e dall'AEM.

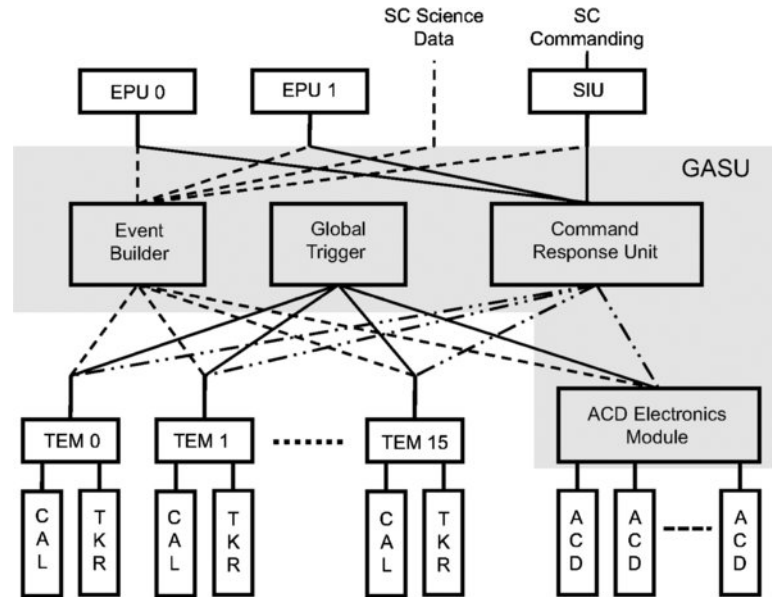


Figura 7: Schema gerarchico del sistema di acquisizione dati: al livello più basso troviamo le TEMs che “comunicano” direttamente con i rivelatori del LAT, al livello successivo si trova il GASU ed infine le EPU.

Gli eventi dell'EBM sono quindi inviati a due EPU (*Event Processor Units*) che processano gli eventi con dei filtri al fine di rimuovere il più possibile il rumore dovuto a particelle cariche e massimizzare conseguentemente il rate degli eventi corrispondenti ai raggi γ che veramente si vogliono osservare. La *Spacecraft Interface Unit* (SIU), infine, controlla il LAT e contiene l'interfaccia di comando del satellite. Vi è, inoltre, un altro elemento fondamentale, non rappresentato in Figura 7, la *Power Distribution Unit* (PDU), che fornisce l'alimentazione alle TEMs, al GASU e alle EPU.

2.3 ACQUISIZIONE E SELEZIONE DEI DATI

Il *Fermi LAT* raramente punta verso un singolo punto dell'universo; generalmente, al fine di ottimizzare il tempo di osservazione mantenendo una buona uniformità nell'esplorazione dell'intera volta celeste, opera nel cosiddetto *all-sky scanning survey mode*. Il telescopio percorre l'intera orbita in circa 96 minuti puntando alternativamente a $+50^\circ$ rispetto allo zenit oppure a -50° rispetto ad esso. Le osservazioni sono costantemente interrotte durante il passaggio attraverso l'Anomalia Sud-Atlantica, una regione del campo geomagnetico che comprende gran parte del Sud Atlantico e parti del Sud America e Sud Africa, caratterizzata da un flusso di particelle particolarmente elevato. Inoltre, al verificarsi di un *Gamma-ray Burst*, il LAT è automaticamente ripuntato lungo la direzione di tale fenomeno per alcune ore in modo tale da acquisire ulteriori dati.

I dati si possono liberamente trovare nel sito <http://fermi.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/ssc/LAT/LATDataQuery.cgi>. I file scaricati sono in formato `.fits` (*Flexible Image Transport System*), un formato molto utilizzato in astronomia e per immagini scientifiche. Generalmente vengono scaricati due file indicati rispettivamente con le sigle `ft1` e `ft2`. Il primo contiene la vera e propria *photon list* che consiste in una grande tabella contenente la direzione, l'energia e il tempo d'arrivo di ogni singolo evento osservato. Il file `ft2` contiene invece le informazioni riguardanti la posizione, l'orientazione e i *Good Time Intervals (GTI)* del telescopio, ovvero i periodi nei quali il LAT stava prendendo dei dati corretti, non affetti da errori sistematici.

I dati devono essere opportunamente selezionati; essendo interessati ad analizzare una specifica sorgente dobbiamo ovviamente isolare gli eventi relativi ad una particolare regione dell'universo. Una volta selezionata la regione di interesse (ROI), dovremo anche compiere degli opportuni tagli nel range energetico e temporale. In particolare i dati possono essere selezionati in differenti modi in base a quale dei seguenti tre tipi di sistema temporale viene utilizzato:

- usando il *Modified Julian Date (MJD)*, introdotto dallo *Smithsonian Astrophysical Observatory* nel 1957, il tempo viene misurato in giorni a partire dalla mezzanotte del 17 Novembre del 1858;
- utilizzando invece il *Mission Elapsed Time (MET)* si misura il tempo in secondi a partire dalla mezzanotte del 1 Gennaio 2001;
- infine può essere utilizzato il calendario Gregoriano: in tal caso il tempo viene espresso attraverso il formato YYYY-MM-DD HH:MM:SS.

Ovviamente non vi è nessuna differenza nell'utilizzo di uno qualsiasi di questi sistemi essendo essi "intercambiabili": un convertitore che permetta di passare velocemente da un sistema all'altro si trova all'indirizzo <http://heasarc.gsfc.nasa.gov/cgi-bin/Tools/xTime/xTime.pl>. Inoltre, nell'operazione di selezione degli eventi, sarà fondamentale considerare solo quelli corrispondenti ai *Good Time Intervals*. Le operazioni descritte vengono eseguite attraverso i comandi `gtselect` e `gtmktime` mandando in input i dati raccolti nei file `ft1.fits` e `ft2.fits`. Una volta effettuate queste operazioni si può iniziare la vera e propria analisi della sorgente desiderata.

Prima di chiudere il capitolo è necessario ricordare che gli eventi possono essere selezionati in base a tre classi di analisi che sono state definite in base alle prestazioni del LAT e alla conoscenza attuale del cielo nello spettro dei raggi gamma e al rumore di fondo atteso. Queste tre classi differiscono in base a restrizioni sempre maggiori sulla corrispondenza fra il comportamento dell'evento all'interno del tracciatore e del calorimetro e quanto atteso per un raggio gamma di uno sciame. La classe con la migliore reiezione del fondo è la *diffuse class*, progettata in modo tale che neanche i tagli più restrittivi producano un aumento significativo del rapporto segnale-rumore. La

source class è stata invece progettata affinché la contaminazione dovuta al rumore di fondo sia confrontabile con quanto atteso dall'EGB. Infine il taglio più approssimativo è quello della *transient class*, per la quale la reiezione del fondo è stata impostata in modo tale da aver non più di un evento di background ogni cinque secondi all'interno di un raggio di 10° dal centro della sorgente interessata. Grazie ai dati raccolti durante il primo anno di attività del LAT queste classi sono state perfezionate. Per analizzare una normale sorgente puntiforme si può usare semplicemente la *source class*; se, invece, si vuole cercare di indicare possibili tracce di annichilazione della materia oscura nella componente extra-galattica diffusa sarà necessario far uso della *diffuse class*. Si noti, infine, che queste tre classi sono organizzate secondo una scala gerarchica: ogni evento della *diffuse class* è contenuto nella *source class* così come ogni evento della *source class* è contenuto all'interno della *transient class*.

3

ANALISI DELLA SORGENTE 3C 454.3

3.1 INTRODUZIONE ALLA SORGENTE 3C454.3

La sorgente 3C 454.3 è una Flat Spectrum Radio Quasar, situata alle coordinate $RA = 343.49^\circ$ e $DEC = 16.148^\circ$, con redshift pari a $z = 0.859$ e fattore di Lorentz pari a 15.6 ± 2.2 . L'angolo rispetto all'asse di osservazione è uguale a $\theta = 1.3^\circ \pm 1.2^\circ$ mentre il fattore di Doppler, come si può facilmente calcolare da Equazione (1.1), vale ~ 27 .

Questa sorgente, particolarmente luminosa nello spettro gamma coperto dal *Fermi LAT*, presenta un flusso molto elevato che, il 18-19 Novembre 2010 ha raggiunto il valore record di $(66 \pm 2) \cdot 10^{-6} \text{ fotoni} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ad energia $E > 100 \text{ MeV}$. L'elevato ha permesso analisi molto dettagliate e l'osservazione di comportamenti di variabilità nell'ordine del giorno e anche inferiori; la sorgente 3C 454.3 rappresenta, infatti, la *blazar* più studiata nel range energetico dei GeV.

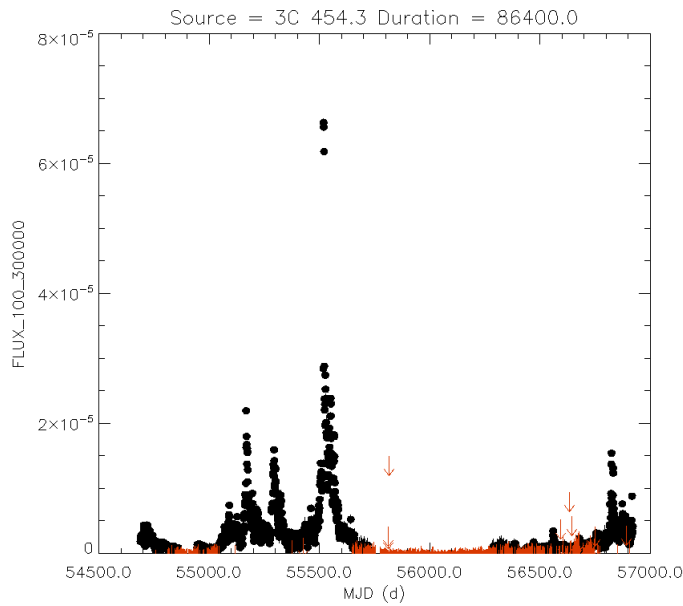


Figura 8: Grafico di curva luce pubblica (o light curve) della sorgente 3C 454.3, consultabile al sito http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/access/lat/msl_lc/. Il grafico rappresenta il flusso osservato, misurato in $\text{fotoni} \cdot \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, in funzione del tempo misurato in giorni secondo il sistema MJD. Si possono osservare molto bene i quattro flare della sorgente; le frecce in rosso indicano una stima del valore massimo del flusso quando questo non è stato effettivamente misurato.

Lo spettro della sorgente non è consistente con una semplice legge

di potenza ma è meglio descritto con una *broken power-law*, ovvero una legge di potenza a doppio indice del tipo

$$N(E) = \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma_2} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{\gamma_1}$$

con γ_1 e γ_2 indici spettrali differenti, rispettivamente per energie al di sopra e al di sotto dei 2 GeV ed E_0 parametro. Questo *break* coincide con un addolcimento dello spettro che potrebbe essere causato da un cambiamento della distribuzione delle particelle irradiate. Alternativamente, un'altra spiegazione di questo fenomeno potrebbe risiedere nell'assorbimento dei raggi γ causato dalla produzione di coppie di fotoni nel range dei raggi X a bassa energia, che richiederebbero che la regione di dissipazione fosse localizzata molto vicino al buco nero. Questo fenomeno è stato osservato anche in altre Flat Spectrum Radio Quasar.

Particolarmente interessante è il grafico di curva luce o *light curve*, illustrato in Figura 8, ovvero un plot del flusso medio della sorgente, misurato in *fotoni* · $cm^{-2}s^{-1}$, in funzione del tempo. Si può osservare il notevole aumento del flusso in prossimità dei periodi temporali corrispondenti a quattro flare molto intensi della sorgente.

Questi flare, osservati in numerosi AGN rappresentano un fenomeno fisico ancora non pienamente compreso. L'ipotesi più accreditata che descrive questi rapidi quanto sorprendenti aumenti del flusso emesso è quella di un effetto di *tidal disruption* di una stella passante vicino al buco nero centrale oppure degli effetti legati ad instabilità nel disco di accrescimento del nucleo galattico attivo.

Risulta particolarmente significativo il terzo flare avvenuto nel mese di Novembre del 2010: la sorgente ha raggiunto in questo periodo il flusso record di $(66 \pm 2) \cdot 10^{-6}$ *fotoni* · $cm^{-2}s^{-1}$ diventando la sorgente di raggi gamma nell'ordine dei GeV più luminosa dell'intera volta celeste. Grazie all'eccezionale natura del fenomeno osservato è stato possibile compiere numerose analisi di tale flare; alcuni dei risultati ottenuti, di seguito esposti, sono ben visibili in Figura 9. Innanzitutto è possibile osservare come il flare vero e proprio, della durata di circa cinque giorni, sia preceduto da una fase di "preparazione" della sorgente a tale evento. In particolare, si possono distinguere quattro fasi differenti:

- il *pre-flare*, ovvero una fase piuttosto lunga nella quale la sorgente 3C 454.3 ha aumentato leggermente il proprio flusso medio prima del salto dovuto alla fase di *plateau*;
- il *plateau*, della durata di circa tredici giorni, nel quale la sorgente ha raddoppiato il proprio flusso medio, in "preparazione" all'evento di flare vero e proprio;
- il *flare*, dalla durata di cinque giorni (dal 17 al 21 Novembre 2010), nel quale si manifestano tutte le caratteristiche tipiche delle blazar: una rapida variabilità su brevissime scale temporali, durante la quale il flusso di raggi gamma è aumentato di un fattore sei, e una

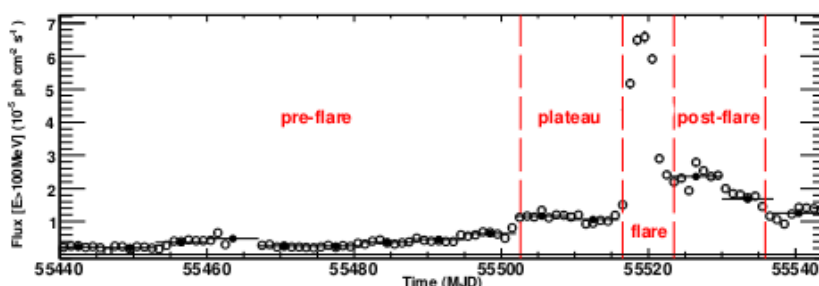
luminosità apparente talmente elevata da portare questo AGN ad essere l'oggetto astronomico più brillante del cielo, ad eccezione dei GRB;

- il *post-flare*, ovvero una rapida fase in cui il flusso di 3C 454.3 è tornato ai valori di quiescenza.

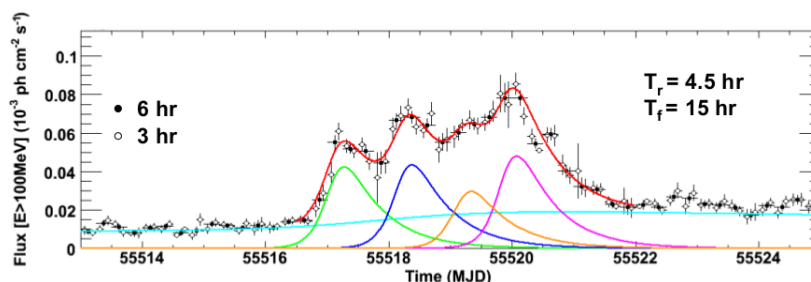
Sono state inoltre possibili analisi ad alta risoluzione attraverso la produzione di curve luce con bin temporali anche di sei e tre ore. Si può notare come il flare sembri costituito da quattro componenti diverse, o *sub-flares*, trovate fittando i dati sperimentali attraverso delle curve del tipo:

$$F = 2F_0 \cdot (e^{(t_0-t)/T_r} + e^{(t_0-t)/T_f})^{-1}$$

con F_0 flusso al tempo t_0 . I tempi caratteristici di salita e di discesa T_r e T_f sono stati stimati per ciascun sub-flare ottenendo $T_r = 4.5 \pm 1.0$ ore e $T_f = 15 \pm 2$ ore.



(a) Curva luce del terzo flare di 3C 454.3 per energie > 100 MeV in un intervallo di 103 giorni; sono ben visibili le quattro fasi precedentemente descritte: pre-flare, plateau, flare, e post-flare. I punti in bianco indicano i dati ottenuti con bin temporali da un giorno, quelli in nero i dati ottenuti con bin temporali di una settimana.



(b) Curva luce, ad alta risoluzione, del terzo flare di 3C 454.3 per energie > 100 MeV in un intervallo di 14 giorni. I punti in bianco rappresentano i dati ottenuti con bin temporali da tre ore, quelli in nero i dati ottenuti con bin temporali da sei ore. Con questi ultimi sono stati prodotti i cinque fit osservabili (quattro subflares e il background).

Figura 9: Analisi del terzo flare di 3C 454.3

Tale fenomenologia, sebbene in misura più limitata, è stata osservata anche per il primo e il secondo flare rivelati dal *Fermi LAT*, rispettivamente nel Giugno 2008 e nel Dicembre 2009: le varie curve di luce mostrano evidenti analogie come la presenza di un plateau e il rapido sviluppo del flare su scale temporali di qualche giorno. Le differenze

riguardano invece alcune stime caratteristiche del fenomeno; per esempio, mentre il plateau del terzo flare si è sviluppato nel corso di tredici giorni, quello del secondo flare è durato all'incirca sei giorni. Inoltre, il tempo caratteristico di salita del secondo flare è stato stimato essere circa il doppio di quello del terzo flare (8.9 ore). Il flare del Novembre 2010 rimane, pertanto, il più lungo in durata e il maggiore in flusso e, conseguentemente, il più studiato per investigare i meccanismi di rapida variabilità osservati nelle blazar.

3.2 ANALISI DELLA SORGENTE TRAMITE LA PASS8

L'analisi di una sorgente puntiforme viene effettuata generalmente tramite la produzione di due "diagrammi diagnostici": la SED (*Spectral Energy Distribution*) e la *light curve* o curva di luce. Nella SED il flusso viene plottato in funzione dell'energia dei fotoni incidenti mentre nella curva luce il flusso viene riportato in funzione del tempo registrato. L'analisi effettuata non si è focalizzata sulla produzione dei grafici di SED, che comunque forniscono importanti informazioni sulla sorgente (si faccia riferimento, per esempio, a quanto esposto nel primo capitolo di questa tesi), ma sulla produzione delle *light curve*. Questa scelta è stata fatta con uno scopo ben preciso: andare ad osservare possibili differenze derivanti dall'utilizzo di funzioni di risposta del telescopio diverse (*Instrument Response Function*, IRF).

Infatti recentemente la collaborazione *Fermi* ha sviluppato un nuovo insieme di IRF definite *Pass8*. Queste ultime si differenziano notevolmente rispetto alle precedenti *Pass7* in quanto consentiranno di migliorare notevolmente le prestazioni dello strumento consentendo, in particolare, di allargare la banda di energia studiata. Tuttavia, per sorgenti del tipo FSRQ studiate nella banda di energia da 100 MeV a 300 GeV non ci dovremmo aspettare grosse differenze nei risultati ottenuti con *Pass7* e *Pass8*. Le IRF *Pass8* sono ancora in fase di testing all'interno della collaborazione ed è pertanto importante investigare comunque possibili differenze rispetto alle *Pass7*. Nello specifico per la nostra tesi abbiamo utilizzato la versione P8_SOURCE_V4, confrontata con la più recente versione delle *Pass7* (P7REP_SOURCE_V15).

L'analisi dei dati raccolti dal telescopio è stata effettuata attraverso programmi specifici scritti in linguaggio Python e utilizzando il software pubblico distribuito dalla NASA (*Science Tools*).

3.2.1 Maximum Likelihood Approach

L'analisi dei dati raccolti dal *Fermi LAT* sulla sorgente di interesse si basa sulla tecnica del *Maximum Likelihood Approach*, ovvero della ricerca della Massima Verosimiglianza, che permette di identificare il set di parametri che meglio rappresenta i nostri dati. Si parte da un modello di riferimento, che nel nostro caso descrive la distribuzione delle sorgenti gamma nel cielo (definita in un file in formato .xml). Il modello sarà pertanto composto da tutte le sorgenti puntiformi conosciute (quelle contenute nel catalogo *Fermi*), e dalle due componenti

diffuse, generalmente denominate come componente diffusa galattica e isotropa extragalattica. Le sorgenti del modello saranno descritte da una forma spettrale derivata dal catalogo *Fermi* (ad esempio una legge di potenza) e avranno alcuni parametri liberi di variare come, per esempio, il flusso e l'indice spettrale. Siamo interessati a determinare quale sia il miglior set di parametri che rappresenta i dati sperimentali; utilizzando il metodo della massima verosimiglianza questo avviene trovando il set di valori che massimizza la funzione di likelihood.

Inoltre, per determinare se una sorgente è stata osservata o meno si può utilizzare la *likelihood ratio*, definita come il rapporto fra la massima verosimiglianza del modello senza la sorgente supplementare L_0 (che costituisce l'ipotesi nulla) e quella del modello con la sorgente supplementare L_1 (che costituisce, invece, l'ipotesi alternativa). In particolare possiamo definire la quantità chiamata *TS* (*Test Statistic*) tramite la seguente espressione:

$$TS \equiv -2 \ln \frac{L_0}{L_1}$$

Il *TS* segue asintoticamente la distribuzione di un χ^2 a n gradi di libertà e la radice quadrata del *TS* è approssimativamente uguale al numero di σ gaussiane per l'analisi effettuata. Tanto maggiore è il valore del *TS*, tanto meno è probabile l'ipotesi nulla rispetto all'ipotesi alternativa; saremo quindi più confidenti di aver osservato la sorgente ipotizzata.

Ricordiamo, inoltre, che vi è la possibilità di scegliere se effettuare un'analisi di tipo *binned* oppure un'analisi di tipo *unbinned*. Mentre attraverso il primo tipo di analisi gli eventi osservati vengono raggruppati attraverso una mappatura della ROI (*Region Of Interest*), con il secondo tipo di analisi ogni evento viene selezionato singolarmente. L'analisi *unbinned* presenta quindi una maggiore robustezza dell'analisi di tipo *binned*; tuttavia ciò va a discapito dell'elasticità e velocità del trattamento computazionale dei dati. In questo caso l'analisi svolta è di tipo *unbinned*.

3.2.2 Produzione delle light curve

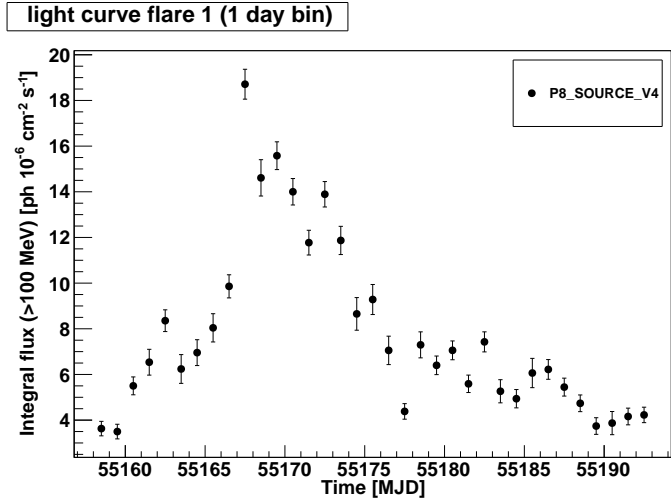
Per l'analisi della variabilità della sorgente 3C 454.3 sono stati selezionati i dati nel seguente modo:

- *intervallo energetico:*
 $\Delta E = 100 - 300000 \text{ MeV}$
- *centro della sorgente:*
 $RA = 343.4904^\circ$
 $DEC = 16.148110^\circ$
- *raggio della regione di interesse (ROI):*
 $R = 22^\circ$
- *angolo massimo di zenit:*
 $z_{max} = 100^\circ$

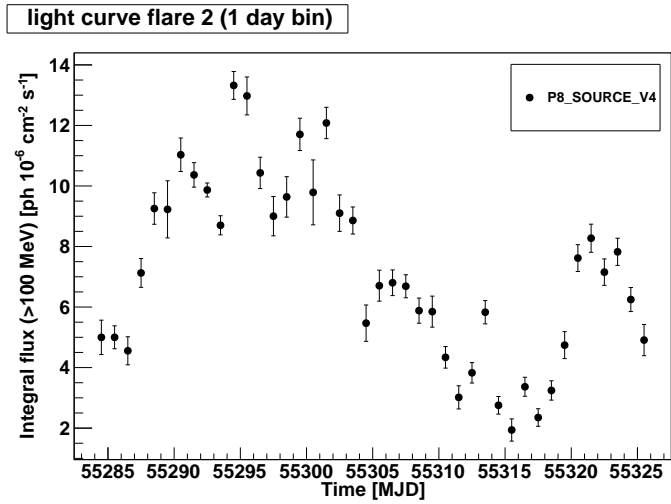
In particolare sono state prodotte le *light curve* per i primi tre flare della sorgente selezionando i seguenti intervalli temporali, espressi in formato MET:

- *primo flare*:
 $\Delta t_1 = 280627200 - 283651200$
- *secondo flare*:
 $\Delta t_2 = 291513600 - 295142400$
- *terzo flare*:
 $\Delta t_3 = 309657600 - 316915200$

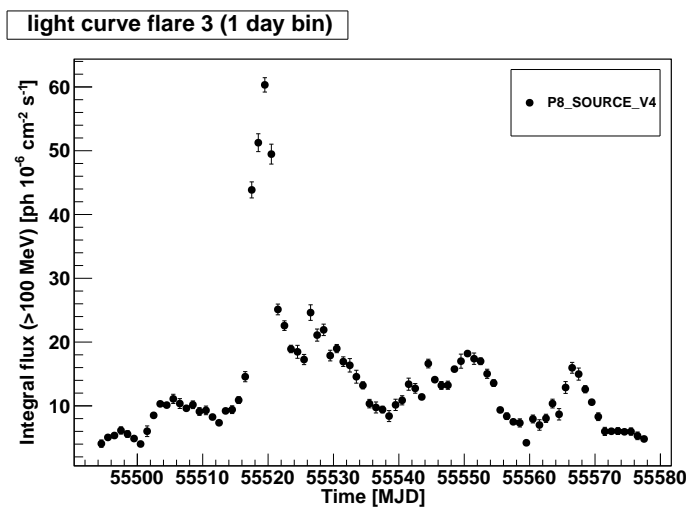
Non è stato possibile effettuare l'analisi del quarto flare, avvenuto nel mese di Giugno di questo anno, poiché i dati di questo evento con la *Pass8* non sono ancora disponibili. In Figura 10 possiamo osservare i grafici di *light curve* ottenuti, in bin da un giorno: in particolare si nota come ogni evento di flare si sviluppi nell'arco temporale di qualche giorno e porti ad un notevole aumento del flusso registrato. Ogni flare è poi seguito da una fase di post-flare, generalmente di durata maggiore, caratterizzata da una diminuzione del flusso fino al ritorno al valore medio. Inoltre possiamo osservare come per il terzo flare si ripresenti la suddivisione in fasi precedentemente esposta: si distinguono molto bene la fase di pre-flare, il plateau della durata di circa undici giorni, il flare vero e proprio, della durata di cinque giorni ed infine la fase di post-flare.



(a) Primo flare



(b) Secondo flare



(c) Terzo flare

Figura 10: *Light curves dei primi tre flare della sorgente 3C 454.3, prodotte utilizzando le IRFs P8_SOURCE_V4.*

3.2.3 Confronto fra i risultati ottenuti con la Pass8 e i risultati ottenuti con la Pass7

Avendo prodotto le curve di luce attraverso la Pass8 siamo ora interessati a fare un passo successivo, andando a confrontare i risultati ottenuti con quelli ottenuti, invece, con la Pass7 (versione P7REP_SOURCE_V15); vogliamo quindi individuare ed analizzare quali siano le differenze fra le due analisi effettuate.

In Figura 11 viene riproposto, per ciascuno dei tre flare analizzati, il grafico di curva luce esposto nella sezione precedente a cui è stato sovrapposto il grafico di curva luce ottenuto invece con la Pass7. I *bins* in nero sono quelli corrispondenti all'analisi tramite la Pass8 mentre i *bins* in rosso sono quelli corrispondenti all'analisi tramite la Pass7. Possiamo notare come i punti non si sovrappongano perfettamente ma vi siano delle differenze nel flusso registrato. Tuttavia gran parte dei valori sono compatibili entro un sigma e i restanti comunque entro i due sigma.

Un confronto fra questi due tipi di analisi può anche essere effettuato attraverso la produzione dei grafici ottenuti in Figura 12: per ogni flare studiato è rappresentato in ascissa, per ciascun bin, il valore del flusso ottenuto attraverso l'analisi con la Pass8, con il relativo errore, mentre in ordinata possiamo trovare il flusso ottenuto attraverso l'analisi con la Pass7, sempre con il relativo errore associato. Per il terzo flare, inoltre, è stato prodotto con un grafico analogo in Figura 13 per i primi bin in modo tale da aver una migliore lettura visiva dei risultati ottenuti. Come atteso i dati non si dispongono esattamente lungo la bisettrice ma sono comunque compatibili entro gli errori. Possiamo quindi affermare che nel caso della sorgente studiata i risultati ottenuti con la Pass7 e Pass8 non presentano grosse differenze.

3.2 ANALISI DELLA SORGENTE TRAMITE LA PASS8

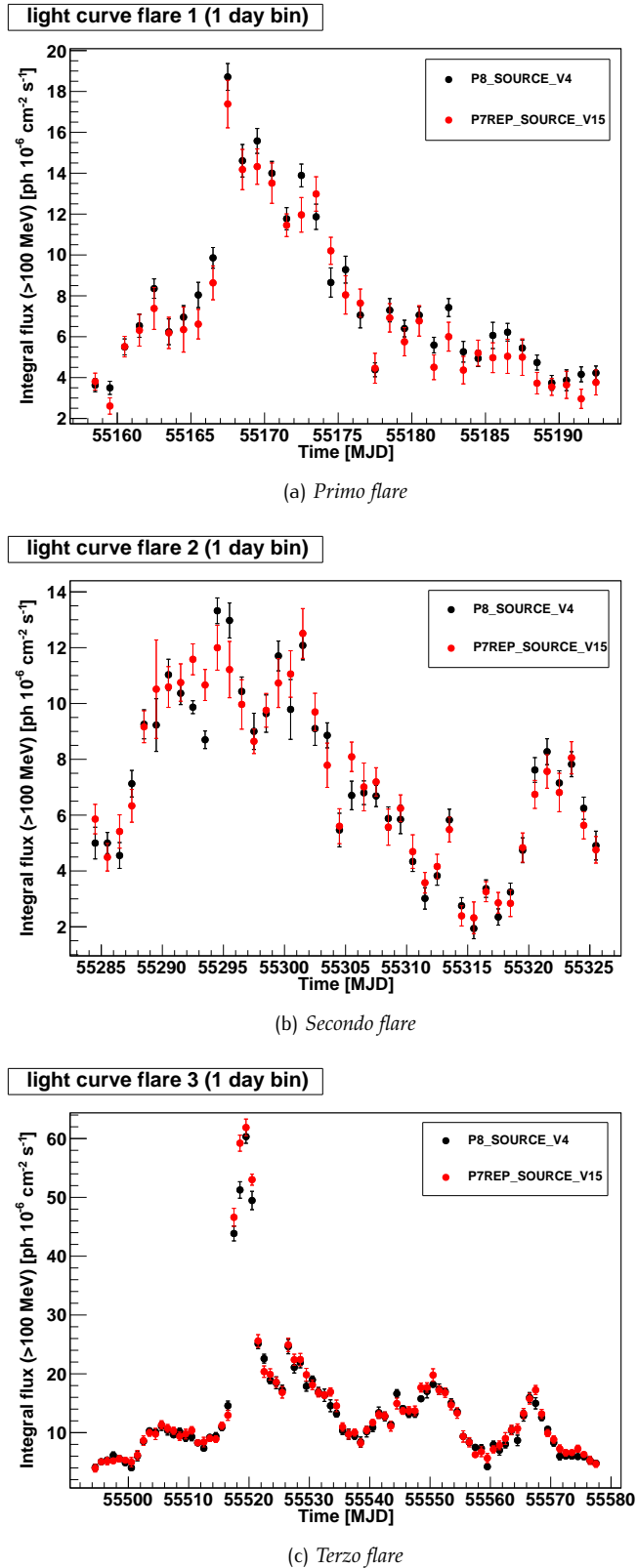
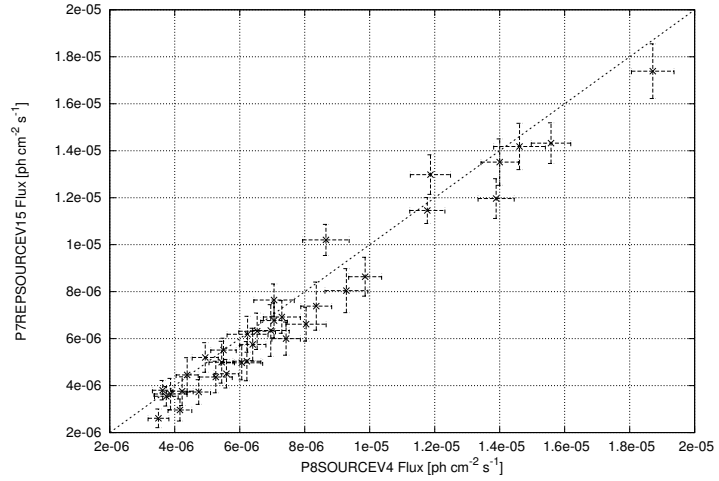
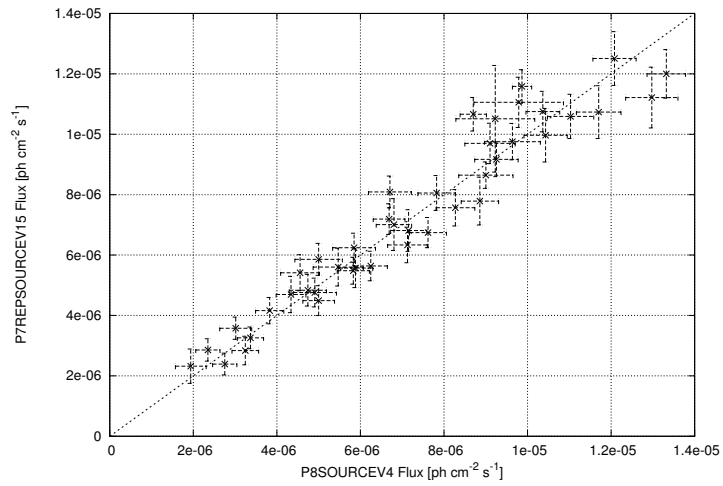


Figura 11: Confronto fra le light curve prodotte utilizzando le IRFs Pass P8_SOURCE_V4 e le light curve prodotte utilizzando le IRFs Pass P7REP_SOURCE_V15

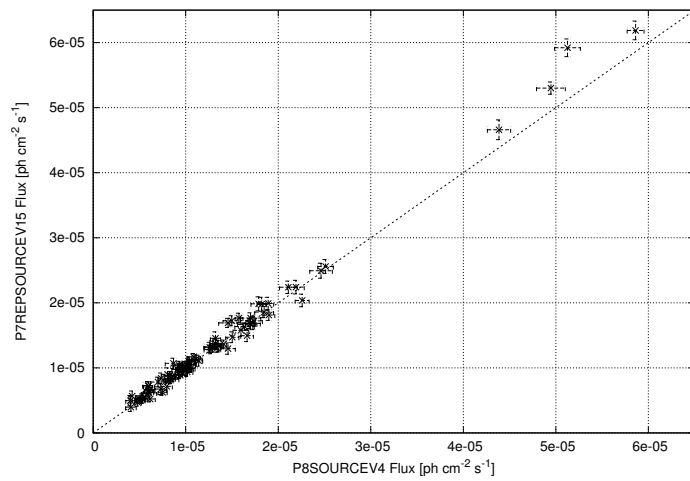
ANALISI DELLA SORGENTE 3C454.3



(a) Primo flare



(b) Secondo flare



(c) Terzo flare

Figura 12: Confronto fra i flussi ottenuti utilizzando le IRFs Pass P8_SOURCE_V4 e i flussi ottenuti utilizzando le IRFs Pass P7REP_SOURCE_V15

3.2 ANALISI DELLA SORGENTE TRAMITE LA PASS8

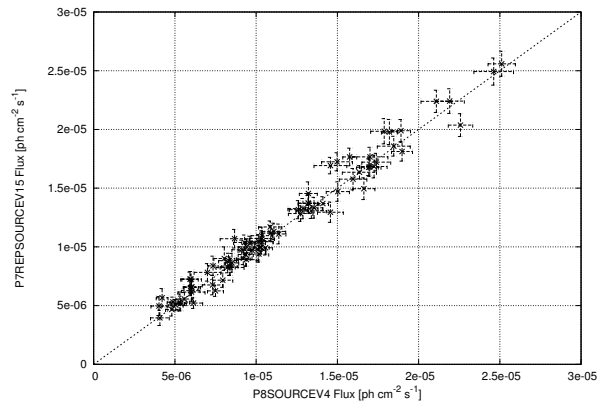


Figura 13: Zoom dei primi flussi registrati per il terzo flare

3.3 CONCLUSIONI

Durante questa tesi si sono innanzitutto studiate le principali caratteristiche dei nuclei galattici attivi, le tecniche di osservazione delle sorgenti extragalattiche gamma e i metodi di analisi del satellite *Fermi LAT*. In particolare il lavoro è stato focalizzato sulla validazione delle nuove funzioni di risposta Pass8 dello strumento *Fermi LAT*. Passo successivo sarà sfruttare i vantaggi offerti dall'utilizzo di Pass8. Per prima cosa vi è la possibilità di estendere lo studio in una banda di energia finora inesplorata, cioè investigare le sorgenti gamma al di sotto dei 100 MeV. Inoltre altra miglioria importante di Pass8 è una maggiore area efficace, specialmente ad alta energia. Questo sarà molto importante nello studio di AGN in generale in quanto questi oggetti emettono maggiormente nella banda MeV-GeV; ottenere una migliore caratterizzazione della loro SED ad alta energia aiuterà ad individuare quali processi fisici siano alla base dei meccanismi di emissione da parte degli AGN.

BIBLIOGRAFIA

- [1] C. Megan Urry and Paolo Padovani, *Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei*, 1995.
- [2] W. B. Atwood, P. F. Michelson and S. Ritz, *Fermi gamma-ray space telescope: High-energy results from the first year*, 2010.
- [3] W. B. Atwood et al., *The large area telescope on the fermi-gamma ray space telescope mission*, *The Astrophysical Journal*, 2009.
- [4] Glennys R. Farrar and Andrei Gruzinov, *Giant AGN flares and cosmic ray bursts*, *the Astrophysical Journal*, 2009 March.
- [5] K. I. Kellermann et al., *Doppler Boosting, Superluminal Motion, and the Kinematics of AGN Jets*, 2007 August.
- [6] J. Ballet and T. H. Burnett, *The Fermi LAT Third Source Catalog*, the 33rd International Cosmic Ray Conference, 2013.
- [7] J. R. Mattox et al., *The likelihood analysis of EGRET data*, 1995.