

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI BOLOGNA

Scuola di Scienze
Corso di Laurea in Fisica

Calcolo del flusso di raggi- γ del Blazar PKS B1424-418

Relatore:
Prof. Maurizio Spurio

Presentata da:
Valerio Pia

Sessione II
Anno Accademico 2015/2016

Sommario

Lo scopo di questo lavoro è quello di analizzare i dati raccolti dal *Large Area Telescope* a bordo del satellite Fermi con l'obiettivo di ricavare il flusso di raggi- γ , di energia compresa tra 100 MeV e 300 GeV, prodotti dal Blazar PKS B1424-418 in un periodo compreso tra l'1 Gennaio 2012 e il 4 Settembre 2016. Secondo alcuni modelli questo blazar potrebbe essere infatti la prima sorgente di *Ultra High Energy Cosmic Ray* associata sperimentalmente all'emissione di neutrini.

L'analisi dei dati è effettuata tramite il pacchetto di software Fermi Science Tools.

Indice

Introduzione	1
1 Raggi Cosmici e Neutrini	3
1.1 Raggi cosmici	3
1.1.1 Storia	3
1.1.2 Composizione e spettro energetico	4
1.2 Neutrini	5
1.2.1 Storia	5
1.2.2 Proprietà fisiche	7
1.3 Connessione tra RC e neutrini: Accelerazione dei RC e sorgenti di neutrini.	8
1.3.1 Neutrini atmosferici	8
1.3.2 Sorgenti galattiche ed extragalattiche	9
2 Telescopi di neutrini e FermiLAT	13
2.1 Telescopi di neutrini	13
2.1.1 Principio di rivelazione	14
2.1.2 Luce Cherenkov	15
2.1.3 Proprietà del mezzo	16
2.2 Il rivelatore IceCube	18
2.3 Il rivelatore ANTARES	19
2.3.1 Sistema di acquisizione dati	20
2.4 Il Fermi Large Area Telescope	22
2.4.1 Principio di funzionamento e progettazione	24
3 Calcolo del flusso del Blazar PKS B1424-418 con i Fermi Science Tools	27
3.1 Blazar come fonte di neutrini	27
3.1.1 L'evento BigBird ed il blazar PKS B1424-418	27
3.2 Analisi dati e risultati	28
3.2.1 Metodo di analisi	29

3.2.2 Risultati	29
Conclusioni	33
A Utilizzo dei Fermi Science Tools	35
Bibliografia	42

Introduzione

Lo scopo della seguente tesi è quello di analizzare il flusso di raggi gamma del blazar PKS B1424-418. Questo infatti, a causa di un evento registrato dal rivelatore di neutrini IceCube, potrebbe risultare essere la prima fonte di neutrini e di raggi cosmici ad alta energia (UHECR) sperimentalmente identificata.

Nel primo capitolo è spiegata l'importanza di raggi cosmici e neutrini nell'ambito dell'astrofisica delle particelle, quel settore della fisica che si occupa dello studio di problemi astronomici utilizzando apparati sperimentale tipici della fisica delle particelle. Dopo una breve introduzione storica saranno quindi analizzate le caratteristiche principali di RC e neutrini, focalizzando poi l'attenzione sugli acceleratori di RC e quindi sulle sorgenti di neutrini.

Nel secondo capitolo sono spiegati i principi alla base di un rivelatore di neutrini, partendo dal metodo di rivelazione tramite luce Cherenkov fino ad arrivare alle proprietà del materiale mediatore all'interno del rivelatore. È posta particolare attenzione sul rivelatore di neutrini ANTARES, un rivelatore situato a 40 km dalla costa sud della Francia, il più grande dell'emisfero Nord. Sempre nel secondo capitolo è descritto il Fermi Large Area Telescope (LAT), il telescopio del satellite Fermi in orbita attorno la Terra usato per la rivelazione di raggi cosmici, focalizzandosi sulla spiegazione del funzionamento del tracker, il componente del LAT che si occupa di ricostruire la direzione di provenienza dei raggi cosmici rivelati.

Nel terzo ed ultimo capitolo è descritto brevemente l'evento che ha portato all'ipotesi che il blazar PKS B1424-418 possa essere una sorgente di neutrini e di UHECR, l'evento Big Bird, per poi concentrare l'attenzione sull'analisi vera e propria della tesi. L'analisi consiste nel calcolo del flusso di fotoni di energia compresa tra 100 MeV e 300 GeV provenienti dal blazar PKS B1424-418 utilizzando i Fermi Science Tools, una suite di software realizzata appositamente per l'analisi dei dati raccolti dal FermiLAT, in un periodo compreso tra l'1 Gennaio 2012 ed il 4 Settembre 2016

Capitolo 1

Raggi Cosmici e Neutrini

L'astrofisica con i neutrini è un modo nuovo ed unico per osservare l'Universo, ed offre nuove prospettive per la sua investigazione. Fino ad oggi infatti, la sonda utilizzata nell'astronomia classica è stata la radiazione elettromagnetica. Questa però, presenta dei limiti.

Si ha, ad esempio, l'interazione dei fotoni ad alta energia con la radiazione di fondo (CMB), che ne limita l'utilizzo ad energie maggiori di ~ 10 TeV. Questi inoltre, interagendo con la materia, non sono in grado di sfuggire dalle loro sorgenti. La componente carica (prevalentemente protoni), subisce invece una deflessione della traiettoria da parte di campi magnetici galattici, che impedisce l'identificazione della sorgente.

I neutrini, avendo carica elettrica nulla e sezione d'urto molto piccola, non risentono di nessuno di questi effetti e riescono quindi a raggiungere la Terra indisturbati. Nel seguente capitolo è esposta brevemente la storia che ha portato alla scoperta dei raggi cosmici e dei neutrini, le loro caratteristiche principali e le possibili fonti galattiche ed extragalattiche.

1.1 Raggi cosmici

1.1.1 Storia

La scoperta dei raggi cosmici è avvenuta nel 1912, ed è attribuita a Victor Hess, che, a seguito della scoperta della radioattività (Henri Becquereel, 1896), e della radioattività naturale (Wilson, 1900) condusse il primo esperimento in grado di dimostrare l'esistenza di una radiazione di natura extraterrestre. L'esperimento sfruttava la proprietà di una radiazione ionizzante di scaricare le foglie cariche di un elettroscopio. Questa, essendo presente anche in assenza di materiali radioattivi (materiali che emettono radiazione ionizzante) portò alla formulazione dell'ipotesi

dell'esistenza di una radiazione esterna alla Terra. Nei primi anni del '900 si susseguirono quindi una serie di misurazioni a diverse altitudini nel tentativo di dimostrare la provenienza della radiazione. Sfruttando un pallone aerostatico, Hess raggiunse la quota di 5200 m e riuscì a dimostrare l'aumento della radiazione con l'aumentare della quota. Vinse per questo, nel 1936, il Nobel per la scoperta dei raggi comici. Sino a metà degli anni '50 i raggi cosmici diventarono di primaria importanza nello studio delle interazioni fondamentali tra particelle elementari. Grazie ad essi infatti furono scoperti il positrone (C. Anderson, 1932), il muone (C. Anderson e S. Neddermeyer, 1937), i pioni (G. Occhialini, C. Powell e C. Lattes, 1947) ed altre particelle. Oggi suddividiamo i raggi cosmici in primari e secondari, rispettivamente quelli provenienti dallo spazio extraterrestre e quelli prodotti dall'interazione tra i primari e l'atmosfera terrestre.

1.1.2 Composizione e spettro energetico

I raggi cosmici primari sono composti per il $\sim 90\%$ da protoni, il $\sim 9\%$ da Elio e da $\sim 1\%$ da nuclei più pesanti. La loro energia varia tra 10^9 e 10^{21} eV seguendo la seguente legge di potenza:

$$\left[\frac{dN_p}{dE} \right]_{obs} = K \cdot E^{-\alpha} \quad (cm^{-1}sr^{-1}s^{-1}GeV^{-1}) \quad (1.1)$$

in cui il parametro α assume diversi valori per differenti intervalli di energia: per energie fino a circa 3×10^{15} eV $\alpha=2.7$, per energie comprese tra 3×10^{15} eV e circa 10^{19} eV $\alpha=3.1$ (zona *knee*), al di sopra di questa zona si ha un appiattimento dello spettro (zona *ankle*) [2], come mostrato in figura 1.1.

La misura dei raggi cosmici primari può essere effettuata, per energie fino a 10^{14} eV, direttamente sopra l'atmosfera. Utilizzando palloni aerostatici e satelliti è infatti possibile ricavare le informazioni più rilevanti sulla composizione dei raggi cosmici nella galassia. Per energie superiori a 10^{14} eV è necessario effettuare misurazioni indirette dei raggi cosmici secondari attraverso grandi rivelatori, posti sulla superficie terrestre, grazie ai quali è possibile analizzare lo sciame di particelle prodotte dal raggio cosmico principale e ricavare quindi l'energia di quest'ultimo.

I raggi cosmici che superano l'energia di 10^{19} eV sono probabilmente di origine extragalattica (UHECR, *ultra high-energy cosmic ray*). Un effetto che deve essere preso in considerazione nell'analisi degli UHECR è il Greisen-Zatsepin-Kuzmin cutoff (GZK), che impone un limite superiore all'energia dei raggi cosmici extragalattici. Ad energie maggiori di 10^{19} eV infatti, i protoni reagiscono con la radiazione cosmica di fondo (CMB) di 2.7 K perdendo energia.

Cosmic Ray Spectra of Various Experiments

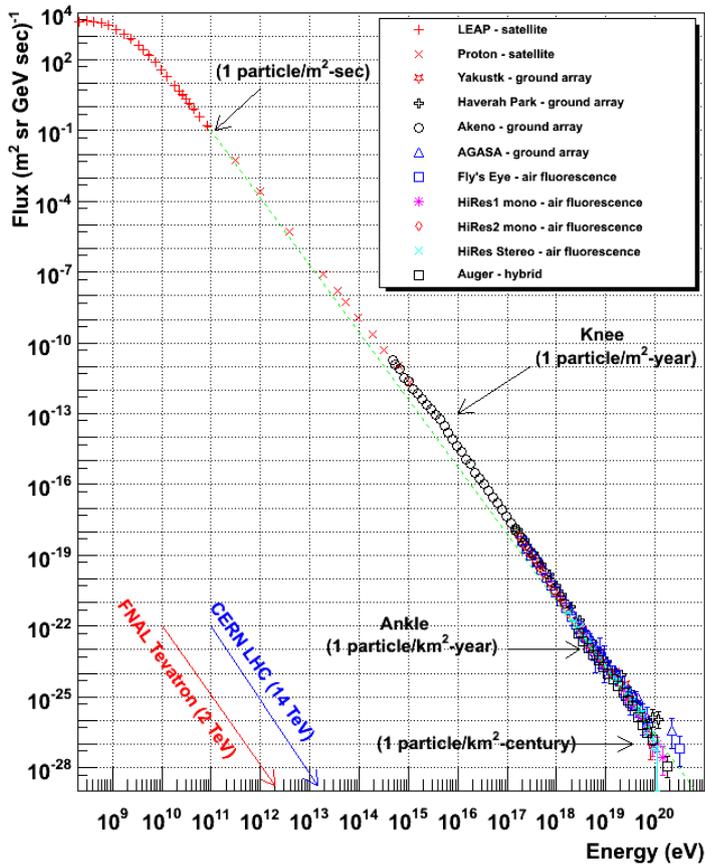
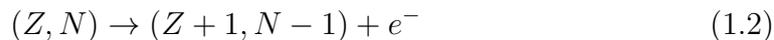


Figura 1.1: Spettro energetico dei raggi cosmici

1.2 Neutrini

1.2.1 Storia

Storicamente, la prima evidenza sperimentale dell'esistenza del neutrino si ebbe con lo studio del decadimento beta. Nel 1911 Lise Meitner e Otto Hahn mostrarono che l'energia degli elettroni emessi durante questo tipo di decadimento ha un andamento continuo piuttosto che discreto, come previsto invece dalla legge della conservazione dell'energia. Nel decadimento beta infatti, si ha la trasmutazione di un elemento con Z protoni ed N neutroni, in uno con $Z \pm 1$ protoni. Nel seguente caso di decadimento:



il nucleo, essendo notevolmente più massivo dell'elettrone, ha un rinculo trascurabile e l'elettrone dovrebbe essere emesso con energia costante, pari all'energia totale rilasciata dal decadimento (figura 1.2).

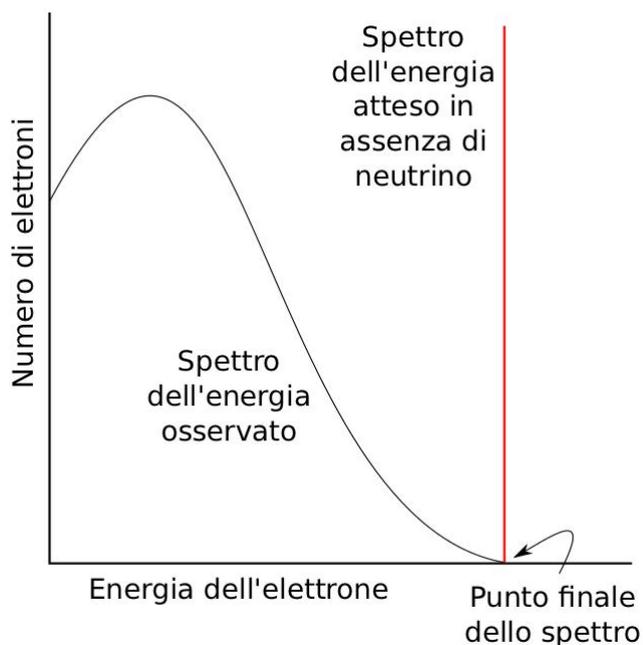


Figura 1.2: Spettro energetico decadimento beta

Nel 1930 venne formulata, da Wolfgang Pauli, l'ipotesi del rimedio disperato, in cui si introduce una nuova particella neutra (inizialmente chiamata da Pauli neutrone), associata all'elettrone e non soggetta alle forze nucleari, in grado di permettere la conservazione dell'energia e dell'impulso.

Fu Enrico Fermi, nel 1934, a sviluppare una teoria del decadimento beta che includesse il neutrino (così aveva rinominato la particella ipotizzata da Pauli), considerato privo di massa e di carica. Grazie a questa teoria poteva essere stimata la sezione d'urto per il processo di cattura del neutrino (beta inverso):



che portò, 20 anni dopo, alla scoperta sperimentale del neutrino elettronico (1952-1956 Clyde L. Cowan e Frederick Reines, nobel 1995), il primo dei tre attualmente noti. Nel 1937, la scoperta del muone nei raggi cosmici aprì la strada

all'ipotesi del secondo neutrino, il neutrino muonico. Nel 1941 si mostrò il decadimento del muone in un singolo elettrone, che fece ipotizzare la presenza del neutrino. Qualche anno dopo, nel 1948, venne scoperto che lo spettro del decadimento muonico è continuo, anziché discreto, e divenne ovvia la presenza di due neutrini (inizialmente chiamati neutrino e neutretto). Solo nel 1962 si ebbe la scoperta sperimentale del neutrino muonico al *Alternating Gradient Synchrotron* (AGS), da parte di Leon Lederman, Melvin Schwartz e Jack Steinberger, sfruttando prevalentemente il risultato del decadimento del pione:

$$\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm + (\nu/\bar{\nu}) \quad (1.4)$$

L'ultimo leptone, delle tre famiglie note, fu individuato nel 1975 quando fu annunciata l'esistenza di una nuova particella, il τ , a seguito di un processo in cui si ha la formazione di un elettrone e di un muone:

$$\tau^\pm \rightarrow e^\pm + \mu^\mp \quad (1.5)$$

Tutti i processi in cui era coinvolto il τ rispettavano il modello secondo cui ad ogni leptone è associato un rispettivo neutrino. Le prime prove a supporto dell'esistenza del neutrino tauonico arrivarono dall'osservazione dell'energia e del momento mancanti nel decadimento del τ , in maniera analoga a quanto accaduto con il decadimento beta del primo neutrino:

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + e^- + \bar{\nu}_e \quad (1.6)$$

$$\tau^- \rightarrow \nu_\tau + \mu^- + \bar{\nu}_\mu \quad (1.7)$$

La prima rivelazione effettiva del terzo neutrino è avvenuta nel 2000 da parte della collaborazione DONUT.

1.2.2 Proprietà fisiche

Secondo il modello standard, i neutrini (ν_e, ν_μ, ν_τ), sono particelle prive di massa, di spin $\frac{1}{2}$, che possiedono una carica elettrica nulla e sono soggetti solo all'interazione debole tramite i mediatori W^\pm (corrente carica) e Z (corrente neutra) [1].

$$\begin{aligned} W^+ &\rightarrow e^+ + \nu_e & W^- &\rightarrow e^- + \bar{\nu}_e & Z &\rightarrow \nu_e + \bar{\nu}_e \\ W^+ &\rightarrow \mu^+ + \nu_\mu & W^- &\rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu & Z &\rightarrow \nu_\mu + \bar{\nu}_\mu \\ W^+ &\rightarrow \tau^+ + \nu_\tau & W^- &\rightarrow \tau^- + \bar{\nu}_\tau & Z &\rightarrow \nu_\tau + \bar{\nu}_\tau \end{aligned} \quad (1.8)$$

Questa interazione, avendo un range d'azione molto basso, implica una sezione d'urto dei neutrini estremamente piccola. Per questo motivo la loro lunghezza di

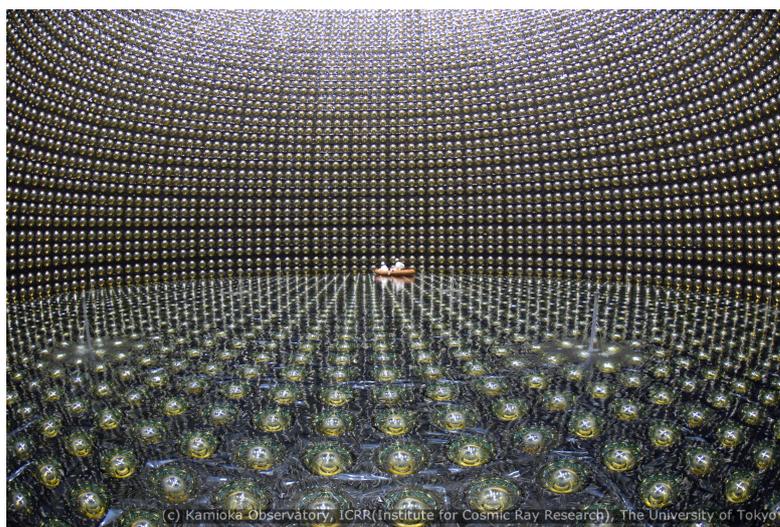


Figura 1.3: Rivelatore Super-Kamiokande in fase di riempimento

interazione è estremamente grande e i rilevatori devono avere un'elevata densità o, alternativamente, coprire un'ampia area.

La scoperta dell'oscillazione del sapore dei neutrini da di diversi esperimenti che misuravano neutrini atmosferici (SuerKamiokande, MACRO ed altri), solari (Homestake, Gallex, SNO ed altri) e da reattori (KamLAND), ha portato, infine, all'ipotesi secondo la quale i neutrini, contrariamente a quanto detto dal modello standard, possiedono massa.

1.3 Connessione tra RC e neutrini: Accelerazione dei RC e sorgenti di neutrini.

L'interazione di raggi cosmici fortemente accelerati con nuclei o gas di fotoni viene considerata la causa della produzione di neutrini ad alta energia. Questi metodi di accelerazione dei raggi cosmici variano in base al range di energia preso in considerazione ed oltre ad accelerare i raggi cosmici, sono candidati per la produzione di fotoni ad alta energia e neutrini. È possibile, come prima approssimazione, distinguere tra sorgenti locali, galattiche ed extragalattiche.

1.3.1 Neutrini atmosferici

I raggi cosmici, bombardando l'alta atmosfera, producono molte particelle, alcune delle quali (pioni e muoni) decadono in neutrini muonici ed elettronici. I neutrini

atmosferici, così vengono chiamati, hanno energie dell'ordine del GeV e un rapporto tra ν_μ e ν_e , dovuto all'oscillazione del sapore, di 1 a 1[2]. I neutrini atmosferici possono penetrare diversi chilometri di acqua e ghiaccio, andando a costituire un problema di fondo per i telescopi di neutrini.

1.3.2 Sorgenti galattiche ed extragalattiche

Per energie dei RC primari fino all'ordine di 10^{14} eV, il meccanismo responsabile dell'accelerazione di particelle è un modello sviluppato nella sua forma originaria da E. Fermi. Questo modello prevede che l'accelerazione sia dovuta ad un processo di scattering iterativo di particelle cariche con fronti d'onda piani, come le onde d'urto generate da collassi gravitazionali o simili eventi esplosivi. Ad ogni processo di scattering, la particella, di energia E, guadagna un $\Delta E \sim \beta E$ ($\beta \sim 10^{-2}$). Per energie fino a $\sim 10^{16}$ eV, i responsabili dell'accelerazione sono considerati essere i *Supernova remnants* (SNR). Per energie fino alla regione della caviglia (figura 1.1), i potenziali acceleratori di particelle sono legati allo stadio finale dell'evoluzione di progenitori stellari. Il processo che lega la produzione di neutrini ad alte energie a raggi- γ e cosmici è detto processo adronico, in cui protoni accelerati interagiscono con fotoni nei pressi della sorgenti di RC:

$$\begin{aligned} p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^0 + p \\ p + \gamma &\rightarrow \Delta^+ \rightarrow \pi^+ + n \end{aligned} \tag{1.9}$$

a loro volta i mesoni decadono come segue, dando origine ai neutrini:

$$\begin{aligned} \pi^+ &\rightarrow \nu_\mu + \mu^+ & \mu^+ &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + \nu_e + e^+ \\ \pi^- &\rightarrow \bar{\nu}_\mu + \mu^- & \mu^- &\rightarrow \bar{\nu}_e + \nu_\mu + e^- \end{aligned} \tag{1.10}$$

I principali candidati per la formazione di UHECR sono invece gli *Active Galactic Nuclei* (AGN) e i *γ -ray burst* (GRBs).

Supernova remnants (SNR)

I resti di supernove sono ciò che resta in seguito all'esplosione di una stella molto massiva (8-10 masse del sole). Quando stelle di questa taglia consumano tutto il combustibile a loro disposizione, e la pressione interna non è più in grado di sostenere il peso degli strati esterni, si ha il cosiddetto collasso gravitazionale. L'onda d'urto libera $\sim 90\%$ dell'energia sotto forma di ν . Questi oggetti sono i miglior candidati per l'accelerazione di neutrini.

Pulsar wind nebulae (PWNe)

Le PWNe si differenziano dai SNR perché nel centro della nebulosa si viene a creare una pulsar che emette venti equatoriali e, in alcuni casi, getti di materia molto veloce dentro la nebulosa.

Microquasar

I *microquasar* sono sistemi binari in cui sono presenti getti radio relativistici. Il nome deriva dal fatto che, similmente agli AGN, presentano dei getti che li fanno assomigliare a piccole quasar. Sono generalmente composti da buchi neri di massa paragonabile a quella solare e da una stella compagna che fornisce materia, generando i getti (figura 1.4). Il processo fisico che governa la formazione del disco di accrescimento e l'espulsione di materia potrebbero essere, su scala molto maggiore, gli stessi che governano gli AGN. I *microquasar* sono candidati ad essere i siti di accelerazione delle particelle cariche per energie fino a $\sim 10^{16}$ eV.

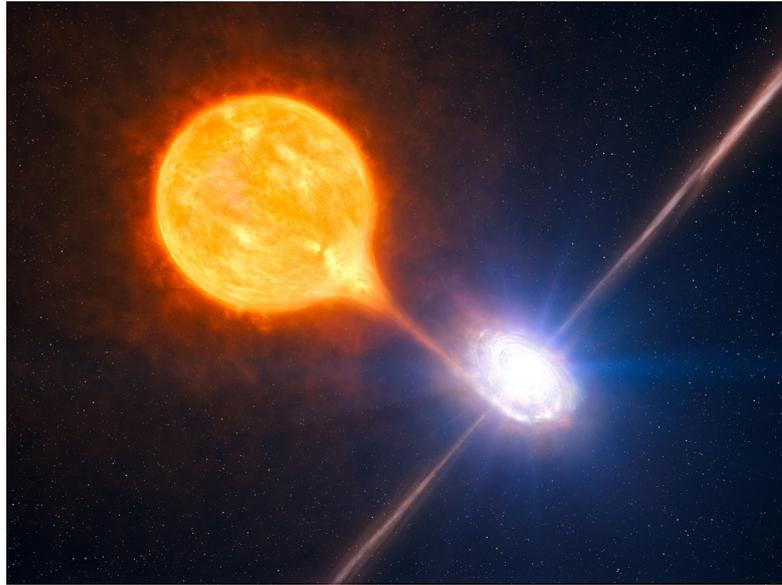


Figura 1.4: Rappresentazione di un sistema binario in cui la stella fornisce materia al buco nero. Sono stati trovati diversi microquasar con massa compresa tra 3.5 e ~ 15 masse solari. La stella compagna è sopravvissuta all'esplosione della supernova che ha creato il buco nero

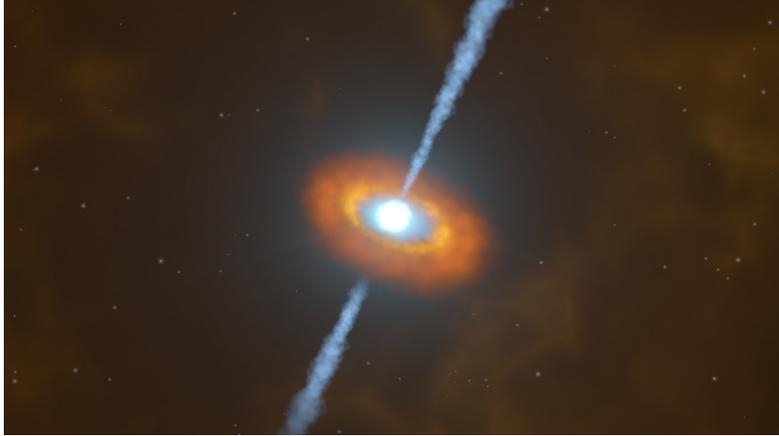


Figura 1.5: Rappresentazione di un Blazar.

Active galactic nuclei (AGN)

Active galactic nuclei sono galassie con un nucleo molto energetico, probabilmente un buco nero supermassivo ($M \sim 10^6 \div 10^9 M_\odot$). Questo buco nero attrae materiale verso di se, che va a formare il cosiddetto disco di accrescimento, rilasciando poi grandi quantità di energia gravitazionale, causa dell'elevata luminosità del centro galattico (i primi modelli prevedevano una luminosità massima di 10^{47}ergs^{-1})[2].

Una particolare classe di AGN, i blazar (figura 1.5), hanno i loro getti allineati con l'osservatore. A causa di questo allineamento i blazar, grazie all'elevato flusso del getto, consentono l'identificazione di AGN come sorgenti puntiformi.

Gamma ray burst (GRBs)

I *gamma ray burst* sono brevi lampi di raggi γ , della durata compresa tra pochi millisecondi a ~ 10 secondi. La loro origine è causata dal collasso di stelle molto massive in un buchi neri. Si tratta degli eventi più energetici fino ad ora osservati, con energie che arrivano all'ordine di $10^{51} \div 10^{54}$ erg.

Il *fireball model* è il modello usato maggiormente per spiegare i GRB. Secondo questo modello, la fireball prodotta nel collasso si espande con velocità relativistica (fattore di Lorentz $\Gamma \sim 10^{2.5}$), spinta dalla pressione di radiazione. I protoni accelerati nello schock della fireball interagiscono con i fotoni dell'ambiente circostante in cui prevale la risonanza Δ^+ . Per avere la produzione di raggi γ con $E_\gamma \sim 1$ MeV, sono richiesti protoni con $E_p = 10^{16}$ eV. A causa dell'elevata densità di fotoni, si ha un alto rate di interazione fotone-protone, che provoca la formazione di pioni. Questi a loro volta decadono formando neutrini aventi circa il 5% dell'energia del protone, circa cioè 10^{14} eV.

Capitolo 2

Telescopi di neutrini e FermiLAT

2.1 Telescopi di neutrini

Un rivelatore di neutrini ad alta energia può essere considerato un telescopio se la direzione di provenienza del neutrino viene ricostruita con una precisione di 1° o migliore. Nota la direzione è possibile quindi associare il neutrino ad una sorgente.

La prima idea di telescopio di neutrino la ebbe Markov, nel 1960, che propose di determinare la direzione di particelle cariche prodotte dall'eventuale interazione dei neutrini con l'aiuto della luce Cherenkov [3].

L'osservazione di neutrini in un telescopio Cherenkov è basata sulla rivelazione di muoni generati dalle interazioni di correnti cariche dei neutrini con la materia circostante; i muoni possiedono sufficiente massa per poter attraversare diversi chilometri di materia e consentire la determinazione della traccia della particella all'interno del rivelatore prima che interagisca o decada.

L'idea alla base di un telescopio di neutrini è quindi quella di avere un array tridimensionale di tubi fotomoltiplicatori (PMT) in un mezzo di propagazione trasparente (acqua in ANTARES, ghiaccio in IceCube), in modo tale da avere un grande bersaglio per l'interazione delle particelle e da consentire la propagazione e rilevazione della luce Cherenkov, dalla quale è poi possibile costruire la direzione d'arrivo del muone o dello sciame che l'ha generata per poi ricavare la direzione d'arrivo del neutrino.

Per evitare il rumore formato dai muoni prodotti nei raggi cosmici secondari, i telescopi di neutrini sono posti sotto un ampio strato di materia e "guardano" verso il centro della Terra, usandola come scudo; il segnale in questa direzione infatti, è praticamente libero dal rumore di fondo, costituito solo dai neutrini atmosferici che hanno attraversato la Terra. Si fa quindi una distinzione tra particelle che provengono dall'alto e vanno verso il basso (*down-going*) o di quelle che al contrario vanno dal basso verso l'alto (*up-going*).

2.1.1 Principio di rivelazione

Nei rivelatori di neutrini è possibile distinguere due categorie principali di eventi: quelli con una traccia lunga causata dal passaggio di un muone, e quelli a cascata, in cui il muone non è presente.

Tra le possibili reazioni possibili (vedi figura 2.1), quella che meglio viene rivelata è la corrente carica (CC) del ν_μ dato che la lunghezza della traccia del muone è circa tre ordini di grandezza più lunga di quella della cascata.

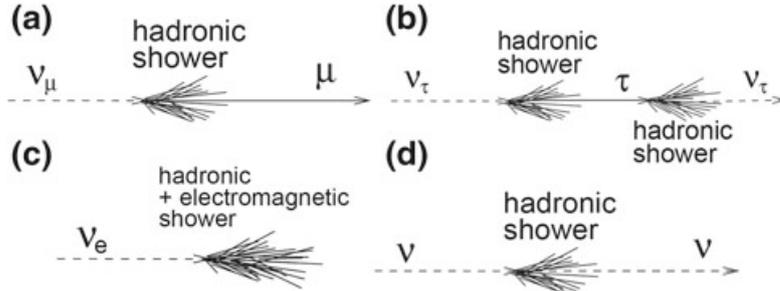


Figura 2.1: Alcune topologie di eventi caratteristiche per i diversi sapori di neutrini e di interazioni: **a** interazione CC di un ν_μ che produce un muone e una cascata adronica; **b** interazione CC di un ν_τ che produce un τ che decade a sua volta in un ν_τ ; **c** interazione CC di un ν_e che produce una cascata elettromagnetica ed una adronica; **d** un'interazione NC che produce una cascata adronica [3].

Rivelazione del neutrino muonico

Il passaggio di un muone all'interno del rivelatore genera un segnale che consente la ricostruzione della sua direzione in maniera accurata, che è strettamente connessa a quella del neutrino e quindi alla sua sorgente. L'angolo medio $\theta_{\nu\mu}$ tra la direzione del neutrino incidente e quella del muone può essere approssimato come segue[2]:

$$\theta_{\nu\mu} \leq \frac{0.6^\circ}{\sqrt{E_\nu(\text{TeV})}} \quad (2.1)$$

con E_ν energia del neutrino.

Il muone che viaggia attraverso la materia subisce una serie di scattering multipli che lo deviano dalla direzione originale; l'intensità di questa deviazione è tuttavia trascurabile per le energie e distanze in questione. La precisione con cui è possibile misurare la direzione del muone dipende comunque da molti fattori; tramite una simulazione di Monte Carlo è stata calcolata essere dell'ordine di $\sim 1^\circ$ nel ghiaccio e $\sim 0.2^\circ$ nell'acqua.

Eventi a cascata

I neutrini elettronici e tauonici, così come le correnti neutre di tutti e tre i sapori di neutrini, sono di difficile rivelazione.

Un neutrino elettronico ad esempio, produce un elettrone ad alte energie che emette fotoni tramite bremsstrahlung, che porta alla formazione di cascate elettromagnetiche. L'estensione di queste cascate non supera la lunghezza di qualche metro (~ 8 m per elettroni con $E=10$ TeV), che, confrontato con il passo dei PMT del rivelatore, fanno risultare la cascata elettromagnetica come una sorgente puntiforme.

Le correnti neutre danno lo stesso risultato per ogni sapore dei neutrini: una frazione di energia viene portata via dal neutrino in uscita, rendendo difficile l'identificazione della direzione incidente.

L'interazione del neutrino tauonico invece produce un τ che percorre una certa distanza in base alla sua energia per poi decadere e produrre una seconda cascata. Per energie minori di 1 PeV la traccia del τ non è distinguibile e l'interazione del ν_τ non può essere ricavata. Per energie maggiori si possono avere eventi *double bang* (se entrambe le cascate sono interne al rivelatore) o eventi *lollipop* (una sola cascata interna al rivelatore); i primi possono essere rivelati per neutrini con energie fino a $\sim 10^{16}$ eV mentre il rate dei secondi è ben al di sotto di 1 per anno. Il τ inoltre può decadere in un μ , dando origine ad un evento non distinguibile da quelli generati dai ν_μ .

2.1.2 Luce Cherenkov

I telescopi di neutrini lavorano analizzando i fotoni prodotti dall'effetto Cherenkov di particelle relativistiche. Il numero di fotoni rivelati insieme al loro tempo di arrivo sono usati per ricavare informazioni, come sapore, direzione ed energia, sui neutrini incidenti.

La luce Cherenkov è emessa da particelle cariche che attraversano un mediatore di cui è costituito il rivelatore, a velocità maggiori di quella della luce nel mezzo. Le particelle cariche polarizzano le molecole del materiale che, diseccitandosi, tornano alla condizione di equilibrio, emettendo una radiazione coerente in un cono con un angolo caratteristico; questo avviene perché nell'intervallo di tempo t l'onda percorre una distanza $\frac{tc}{n}$ (n indice di rifrazione del materiale, $n > 1$), mentre la particella percorre una distanza $t\beta c$. Da queste è possibile quindi ricavare l'angolo di propagazione della radiazione (Figura 2.2):

$$\cos\theta_C = \frac{c/n}{\beta c} = \frac{1}{\beta n} \quad (2.2)$$

Per particelle relativistiche ($\beta \simeq 1$) in acqua di mare ($n \simeq 1.364$) l'angolo della radiazione Cherenkov è $\theta_C \simeq 43^\circ$ [2].

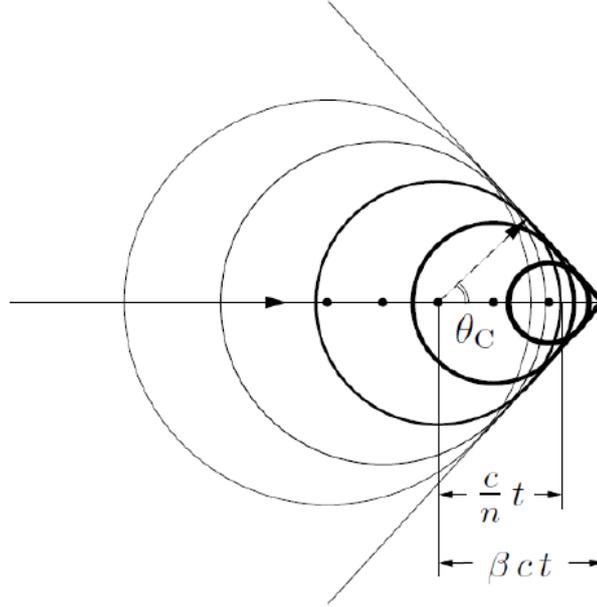


Figura 2.2: Cono d'onda della luce Cherenkov

Il numero di fotoni Cherenkov N_γ , emesso per unità di lunghezza $d\lambda$ e unità di lunghezza percorsa dx , da una particella carica è dato da:

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi}{137\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{n^2\beta^2}\right) \quad (2.3)$$

che in un mezzo come l'acqua corrisponde a circa 350 fotoni/cm nell'intervallo tra 300 e 600 nm.

2.1.3 Proprietà del mezzo

Gli effetti dell'acqua e del ghiaccio sulla propagazione della luce sono l'assorbimento e lo scattering dei fotoni. L'assorbimento riduce l'ampiezza del fronte d'onda della radiazione Cherenkov (la quantità di luce che giunge ai PMT), lo scattering modifica la direzione di propagazione dei fotoni Cherenkov e il loro tempo di arrivo ai PMT. Questi effetti influenzano la capacità di identificare la direzione d'arrivo del neutrino incidente.

Per una certa lunghezza d'onda λ , la propagazione della luce in un materiale è quantificata dalle sue proprietà ottiche: assorbimento $a(\lambda)$, scattering $b(\lambda)$ e

attenuazione $a(\lambda) + b(\lambda)$, o lunghezze di assorbimento, scattering e attenuazione definiti rispettivamente come segue:

$$\begin{aligned} L_a(\lambda) &= \frac{1}{a(\lambda)} \\ L_b(\lambda) &= \frac{1}{b(\lambda)} \\ L_c(\lambda) &= \frac{1}{a(\lambda) + b(\lambda)} \end{aligned} \tag{2.4}$$

che rappresentano la distanza dopo la quale un fascio di intensità iniziale I_0 di lunghezza d'onda λ è ridotta di un fattore $\frac{1}{e}$ attraverso lo scattering e l'assorbimento tramite la seguente relazione:

$$I_i(x, \lambda) = I_0(\lambda)e^{\frac{-x}{L_i(\lambda)}}; \quad i = a, b, c \tag{2.5}$$

Generalmente si ha una lunghezza d'assorbimento minore per l'acqua e maggiore per il ghiaccio che quindi risulta essere più trasparente; viceversa, a causa delle minori impurità dell'acqua, la lunghezza di scattering è minore nel ghiaccio che quindi consente una peggior risoluzione angolare del muone rivelato.

Proprietà del ghiaccio

Il processo di formazione del ghiaccio antartico, durato circa 10^5 anni, ha fatto sì che le bolle d'aria, gli accumuli di sporadiche eruzioni vulcaniche, la densità di polvere atmosferica siano in concentrazione dipendente dalla profondità; per profondità fino a ~ 1250 m le bolle d'aria costituiscono la maggior fonte di impurità che causano lo scattering della luce. A profondità maggiori la pressione trasforma queste bolle in cristalli che si discostano di poco dalle proprietà del ghiaccio.

Proprietà dell'acqua

Le proprietà ottiche dell'acqua sono influenzate da fattori come la temperatura, la salinità e la quantità di particolato che galleggia e possono quindi variare nel tempo; i rivelatori vengono quindi posti a grandi profondità, in modo tale che le caratteristiche dell'acqua siano il più costanti possibili. Questo comporta tuttavia la presenza di un background irriducibile, dato dalla radioattività dei decadimenti di potassio e dalla bioluminescenza prodotta dagli organismi che vivono nelle profondità.

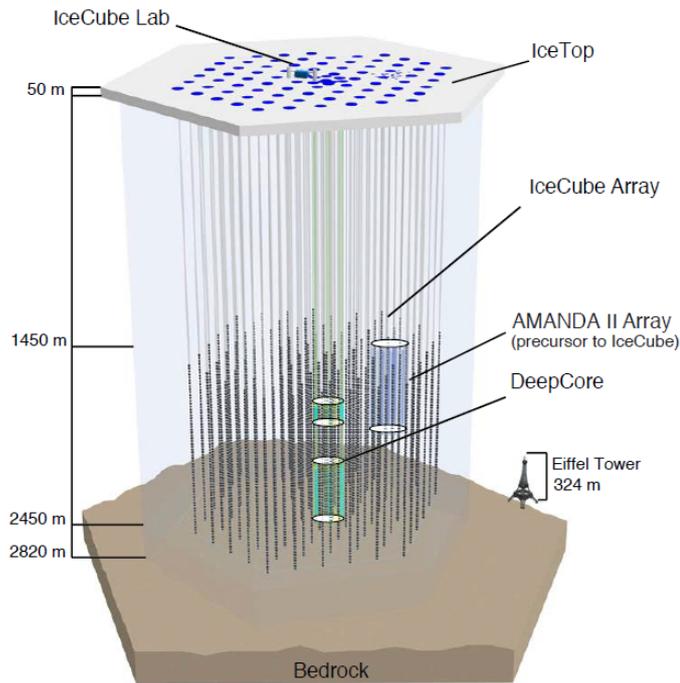


Figura 2.3: Vista laterale del rivelatore IceCube, formato da 86 stringhe sepolte nel ghiaccio. Sono evidenziati il DeepCore e l'IceTop[5].

2.2 Il rivelatore IceCube

Il rivelatore di neutrini IceCube è localizzato presso l'*Amudsen-Scott South Pole Station*, e sfrutta il ghiaccio Antartico come mezzo mediatore; è composto da un rivelatore posto in profondità (*InIce*), che raggiunge ~ 2500 m, e da un rivelatore superficiale (*IceTop*). Le componenti *InIce* del rivelatore sono composte da 5160 moduli ottici digitali (DOM) disposti su 86 stringhe verticali di profondità compresa tra 1450 m e 2450 m. Le stringhe sono collocate in una griglia esagonale, separate tra loro 125 metri, andando ad occupare un volume totale di 1 Km^3 ; ogni stringa sostiene 60 DOM, separati tra loro 17 metri. Otto di queste stringhe sono più compatte, con una separazione orizzontale di 70 metri e una distanza tra i DOM di 7 metri (*DeepCore*).

IceTop è costituito da 81 stazioni, ognuna disposta sopra una stringa di IceCube, il cui scopo è quello di studiare gli sciami di raggi cosmici. Ogni stazione contiene due serbatoi riempiti di ghiaccio, che contengono a loro volta due DOM dello stesso tipo di quelli usati nella parte *InIce* del rivelatore. Questa griglia superficiale misura la direzione di arrivo e la composizione dei raggi cosmici, e per-

mette di analizzare le coincidenze con gli eventi *InIce*, andando quindi a scartare i muoni *down-going*[4]. In figura 2.3 è rappresentato uno schema del rivelatore.

2.3 Il rivelatore ANTARES

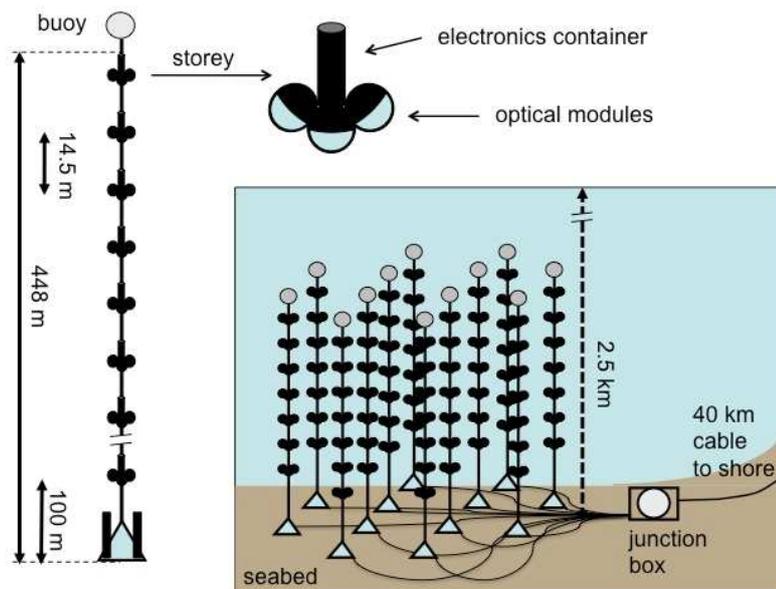


Figura 2.4: Schema riassuntivo del telescopio ANTARES. Sulla sinistra e in alto sono mostrati i dettagli sulla composizione di ogni stringa[6].

Il rivelatore ANTARES usa l'acqua di mare come mezzo di propagazione ed è attualmente il più grande rivelatore di neutrini dell'emisfero Nord; questa posizione fornisce una vista privilegiata alle zone più interessanti del cielo, dove ci sia aspetta un elevato numero di fonti di neutrini.

Dopo una serie di studi su diversi fattori ambientali ed un programma *R&D* condotto dal 1996 al 1999, è stato scelto come sito del rivelatore una zona a 40 km da La Seyne-sur-Mer, a sud della Francia, ad una profondità di 2475 m.

Il rivelatore è composto da un array tridimensionale di 885 moduli ottici (OM) inclinati di 45° verso il basso e distribuiti a gruppi da tre (storey) lungo 12 stringhe di rivelazione distanti tra loro circa 70 metri; Il primo storey è collocato circa 100 metri sopra il fondale marino e distano tra di loro 14.5 metri (Figura 2.4). Le stringhe possono muoversi a causa della corrente marina, fino anche a 15 metri in

cima alla stringa; sono necessari quindi una serie di apparecchi acustici e bussole in grado di consentire la ricostruzione della forma delle stringhe e l'orientazione degli storey ogni due minuti[8]. Complessivamente ANTARES copre un'area totale del cielo di 3.5π sr, con una sovrapposizione di 0.5π sr con l'esperimento IceCube (figura 2.5).

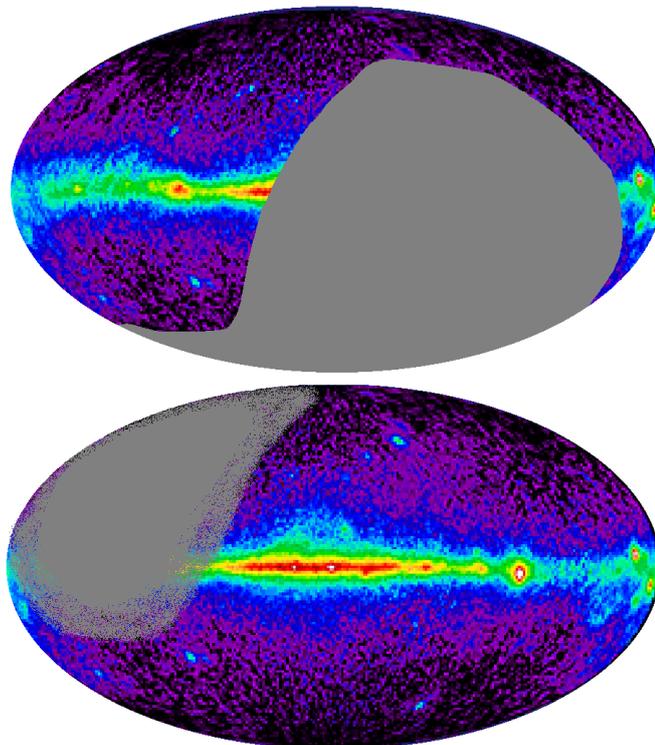


Figura 2.5: In alto: cielo osservabile dal telescopio IceCube al Polo Sud; In basso: cielo osservabile dal telescopio ANTARES, nel Mediterraneo[6].

2.3.1 Sistema di acquisizione dati

Ogni OM contiene un tubo fotomoltiplicatore (PMT), diversi sensori e componenti elettroniche ad essi associati, tutto contenuto in una sfera di vetro. I PMT sono tenuti nella sfera con l'utilizzo di un gel ottico mentre una sottile gabbia li schermava dal campo magnetico terrestre (figura 2.6)[7]. Tutti gli storey sono poi equipaggiati con un *Local Control Module* (LCM) che contiene l'elettronica necessaria per la lavorazione dei segnali del OM, il posizionamento acustico delle stringhe ed il trasferimento dei dati. Alla base di ogni stringa è presente il *String Control Module* (SCM), che fornisce energia all'intera stringa.

Un fotone che colpisce il PMT può indurre un segnale elettrico; se l'ampiezza di questo segnale è maggiore di una certa tensione viene digitalizzato dall'*Analogue Ring Sampler* (ARS) situato nel LCM. La soglia è generalmente impostata ad $\frac{1}{3}$ del livello del singolo fotoelettrone. Il tempo in cui questo segnale supera la soglia viene registrato dal *Time-to-Voltage Converter* (TVC) e digitalizzato dall'*Analog to Digital Converter* (ADC); i TVC restano inattivi per qualche μs dopo l'utilizzo, ogni ARS contiene quindi due TVC per eliminare il tempo morto.

Un sistema di LED presenti in ogni OM consente infine la determinazione dell'offset tra i clock locali, permettendo così di conoscere il timing relativo dei fotoni in arrivo e di ricostruire correttamente le tracce dei fotoni in arrivo[2].

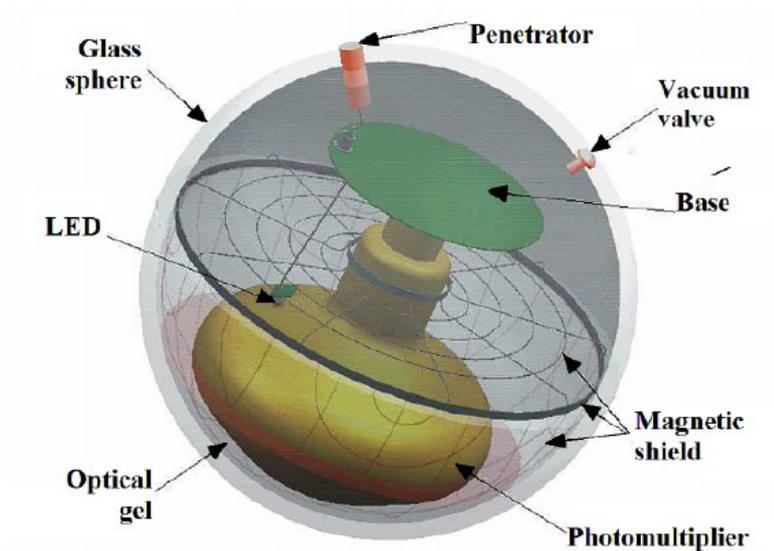


Figura 2.6: Schema di un modulo ottico di ANTARES.

Ogni singola SCM è collegato ad un *junction box* che comunica con la sala di controllo a terra tramite un cavo elettro-ottico, consentendo la selezione e l'analisi dei dati; in mare non viene fatta alcuna selezione del segnale, se non quella effettuata dai trigger degli ARS, e tutti gli hit (combinazione dell'informazione sul tempo e di quella sulla carica di un segnale digitalizzato di un PMT) rivelati sono trasferiti a terra; qui gli hit sono suddivisi in tre categorie di eventi:

- Livello L0, se il segnale registrato da un PMT è maggiore di 0.3 p.e.¹;

¹Per definizione, 1 p.e. è l'ampiezza del segnale elettrico che in media si registra sull'anodo del PMT quando un elettrone raggiunge il primo diodo.

- Livello L1, se vengono registrati almeno due hit L0 tra gli OM di uno stesso storey in una finestra di 20 ns o se il segnale supera i 3 p.e.;
- Livello T3, se in una finestra di 80 ns si registrano due coincidenze L1 su due piani vicini di una stessa stringa;

Il *DataFilter* analizza quindi tutti i dati mandati nel tentativo di individuare eventi fisici; cerca quindi un set correlato di hit L1 in tutto il rivelatore in una finestra temporale di $\sim 4 \mu s$. Nel caso in cui si trova l'evento cercato, tutti gli hit L0 avvenuti durante quella finestra temporale vengono memorizzati.

2.4 Il Fermi Large Area Telescope

Il *Large Area Telescope* (LAT) è il principale strumento del satellite Fermi e consente l'analisi di raggi cosmici ad alta energia compresi tra ~ 20 MeV e più di 300 GeV (figura 2.7); è stato lanciato l'11 Giugno 2008 ed orbita intorno alla Terra ad un'altitudine di 535 km, percorrendo un'orbita ogni 96 minuti. La missione,

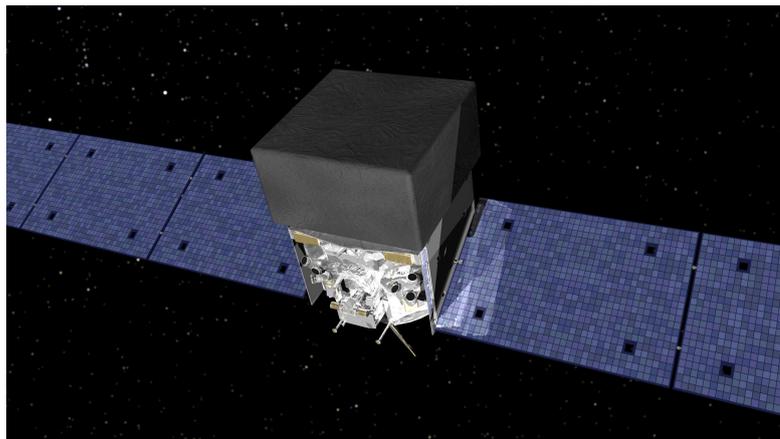


Figura 2.7: Rappresentazione del satellite Fermi.

originariamente chiamata *Gamma-Ray Large Area Space Telescope* (GLAST), e solo successivamente rinominata in onore di Enrico Fermi, è stata designata per avere una durata di 5 anni, l'11 Agosto 2013 però, Fermi è entrato in una fase estesa della missione, il cui obiettivo è il 2018, per uno studio più approfondito dei raggi cosmici ad alte energie[9].

L'osservatorio del Fermi opera principalmente in modalità *all-sky scanning survey*, in modo tale da mantenere un'uniformità eccellente e da massimizzare il tempo di osservazione. Il LAT quindi scansiona il cielo alternativamente tra emisfero nord

e sud ad ogni orbita, garantendo 30 minuti di esposizione per ogni punto del cielo ogni due orbite (circa tre ore).

Le osservazioni del satellite sono interrotte regolarmente durante il passaggio attraverso l'Anomalia Sud Atlantica; in questa zona un elevato flusso di particelle obbliga a porre la strumentazione in uno stato protetto e, come risultato, si ha una differenza di esposizione tra nord e sud di $\sim 15\%$ [11].

Da quando ha avuto inizio la missione, il LAT ha aiutato l'accrescimento delle conoscenze dell'astrofisica delle alte energia, fornendo un'incredibile quantità di dati (figura 2.8).

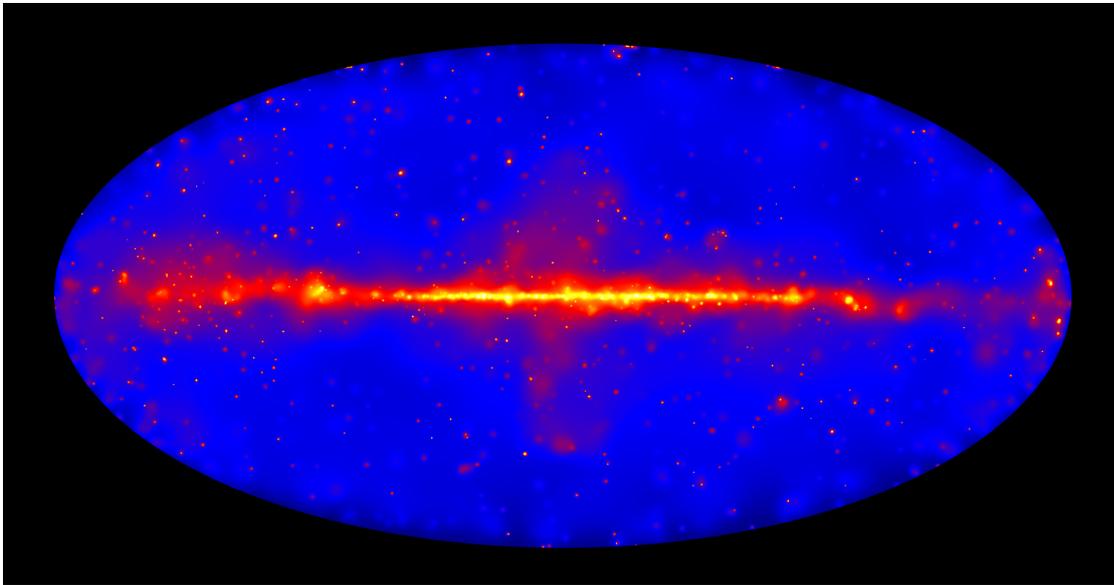


Figura 2.8: Immagine costruita sulla base di circa 6 anni di osservazioni della missione Fermi. È presente un bagliore nella zona centrale, corrispondente al piano galattico della nostra galassia. Le Fermi Bubbles sono visibili come due estensioni rosse a nord e sud del piano galattico. Altri fonti di raggi gamma come pulsar wind nebulae, supernova remnants o blazar sono visibili distribuite in tutta l'immagine.

2.4.1 Principio di funzionamento e progettazione

I raggi gamma ad alte energie (> 20 MeV) si convertono in una coppia positrone-elettrone in uno dei 16 livelli di fogli di tungsteno. Le particelle cariche passano poi attraverso 36 livelli di rivelatori sensibili alla posizione alternati con i fogli di tungsteno all'interno del *Tracker*, lasciando dietro di se una traccia che punta direttamente all'origine del raggio gamma. Superato l'ultimo strato di tracciamento, le particelle entrano nel *Calorimeter*, composto da cristalli di ioduro di cesio (CsI), che consente l'analisi energetica del raggio incidente. Attorno al sistema di tracciamento è posto un terzo rivelatore, l'*anticoincidence detector* (ACD), che consiste in pannelli di scintillatori plastici ed è usato per scartare eventi generati raggi cosmici carichi come elettroni protoni o nuclei più pesanti.

Tracker e *Calorimeter* sono suddivisi in 16 torri (figura 2.9), ricoperte dall'ACD e da uno scudo contro le piccole asteroidi e termico. Una griglia di alluminio supporta il modulo di rivelazione ed il sistema di acquisizione dati (DAQ), collocati sotto il calorimetro.

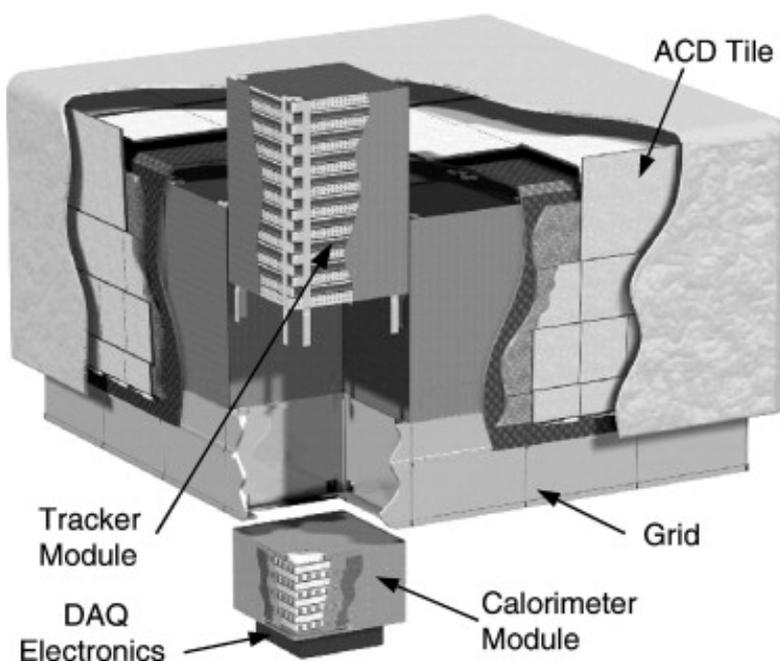


Figura 2.9: Sezione della strumentazione del LAT. Ogni torre nell'array 4x4 include un Tracker ed un Calorimeter.

Il LAT è stato creato con l'obiettivo di migliorare la sensibilità nell'analisi delle sorgenti di raggi gamma di un fattore 30-100; questo è stato possibile grazie all'impiego di rivelatori solidi (*silicon-strip detector*, SSD), che, rispetto ai rivelatori basati sui gas, offrono un gran numero di vantaggi: usano solo corrente elettrica a basso voltaggio, rivelano particelle cariche con alta efficienza e sono molto robuste una volta installate.

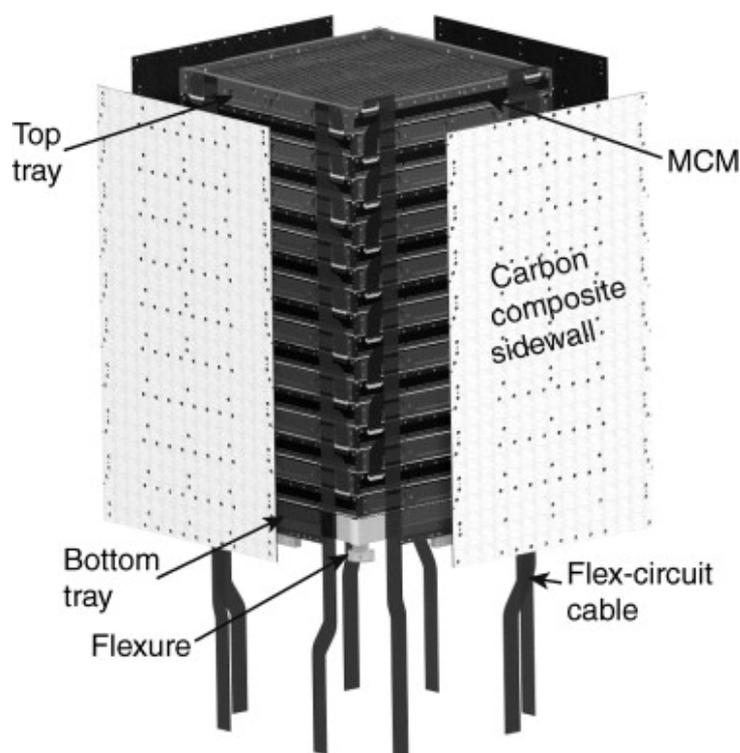


Figura 2.10: Componenti del Tracker contenuto in una delle 16 torri del rivelatore.

Tracker

Ogni torre delle 16 che compongono il *Tracker* è divisa in 19 *trays* sostenuti da un quattro mura laterali (figura 2.10). I *tray* comprendono gli elementi di rivelazione e le componenti elettroniche a loro associati e i fogli di tungsteno. Otto cavi connettono l'elettronica al DAQ mentre delle cerniere in titanio e delle fascette di rame collegano il modulo alla griglia. La larghezza delle torri (37.3cm) è stata determinata dalla lunghezza delle SSD che consentiva la miglior lettura con il minor rumore possibile, l'altezza (66 cm) è stata invece regolata per avere un giusto rapporto altezza/larghezza che ne aumentasse il più possibile il campo visivo.

Ogni torre contiene 576 SSD in 18 livelli di misurazione; ogni *top-level* è preceduto da uno strato di tungsteno che converte $\sim 63\%$ dei fotoni in arrivo in coppie e^+e^- .

Per energie intorno ai 100 MeV, la maggior parte delle informazioni del fotone in arrivo viene dai primi due punti spaziali della particella con energia più alta, è essenziale quindi che questi punti siano presi il più vicino possibile al vertice di conversione dei fotoni, per evitare gli effetti degli scattering multipli che avvengono negli strati di tungsteno successivi; per questo motivo gli SSD sono posti immediatamente sotto i fogli di tungsteno (figura 2.11). Per fotoni ad alte energie gli effetti di scattering invece sono trascurabili ma è necessario aumentare lo spessore dei fogli di tungsteno per garantire un'efficienza migliore nel loro tracciamento; i primi 12 strati sono quindi spessi 0.095mm, mentre gli ultimi quattro 0.72 mm[12].

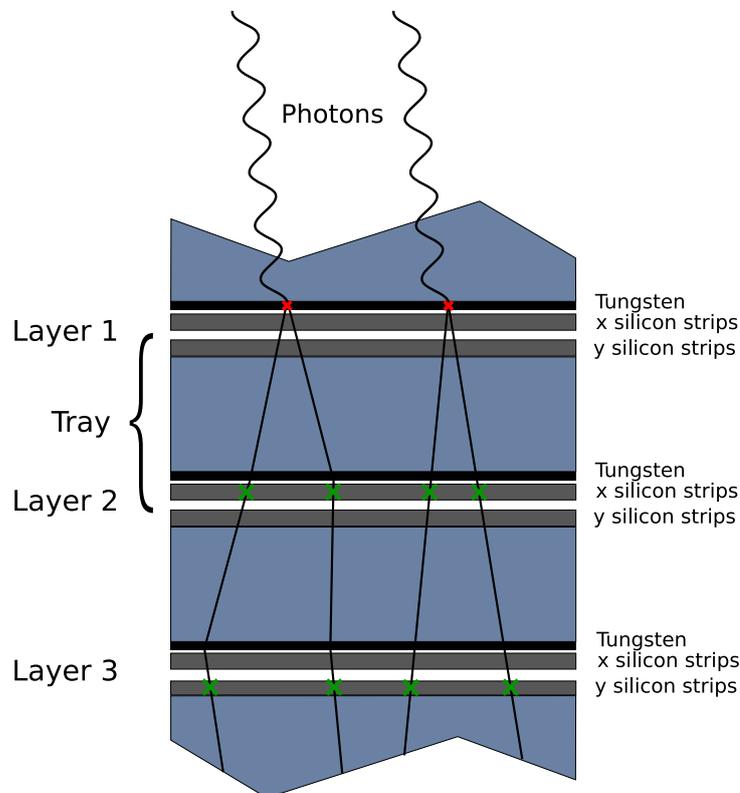


Figura 2.11: Rappresentazione schematica della misura della conversione di un raggio gamma. Per fotoni ad alte energie (a destra nell'immagine) non si hanno effetti rilevanti di scattering, per fotoni a più basse energie (a sinistra) scattering multipli degradano la precisione con cui è possibile identificare la direzione d'origine.

Capitolo 3

Calcolo del flusso del Blazar PKS B1424-418 con i Fermi Science Tools

3.1 Blazar come fonte di neutrini

Come descritto in sezione 1.3.2, i blazar sono AGN con i getti allineati con la linea d'osservazione. Questa caratteristica aumenta sostanzialmente la luminosità apparente di questi oggetti a causa dell'effetto Doppler.

L'associazione diretta di neutrini con energie dell'ordine del PeV con un singolo blazar avrebbe un'importante implicazione: gran parte dei raggi gamma emessi sarebbero generati da decadimenti adronici, e i getti del blazar diventerebbero anche sorgenti di UHECR.

Le emissioni di raggi gamma e di raggi X dei blazar possono essere generati dalla fotoproduzione di pioni da parte di protoni accelerati. I protoni accelerati nel getto possono interagire con i fotoni di fondo (fotoni ultravioletti generati dal disco di accrescimento del buco nero supermassivo) generando una cascata contenente pioni carichi e neutri che, decadendo, producono neutrini e fotoni ad alta energia.

3.1.1 L'evento BigBird ed il blazar PKS B1424-418

Nei primi due anni di osservazione, il rivelatore IceCube ha registrato due eventi con energia dell'ordine di 1 PeV (IC 14 e IC 20, chiamati rispettivamente Bert ed Ernie). Il 4 Dicembre 2012 fu registrato un terzo evento, chiamato *BigBird*, con

energia di 2004_{-262}^{+236} TeV ed un'incertezza sulla posizione $R_{50} = 15.9^\circ$ centrato sulle coordinate RA = 208.4° e Dec = -55.8° ¹.

La ricerca di possibili sorgenti attorno alla regione R_{50} , basata sul secondo catalogo di AGN generato dal FermiLAT (2LAC) durante l'osservazione *all-sky* tra Agosto 2008 e Settembre 2010, ha identificato 20 possibili candidati, 17 delle quali blazar. Il blazar dominante nella regione considerata è il blazar PKS B1424-418, classificato come *flat spectrum radio quasars* (FSRQ)², inizialmente non incluso nella *Bright Source List* del FermiLAT a causa del flusso di raggi gamma relativamente basso nei primi tre mesi della missione Fermi.

Nel 2009 e successivamente nel 2011, PKS B1424-418 ebbe due flares di raggi gamma che lo fecero includere nei cataloghi di FermiLAT. Nell'estate del 2012, tuttavia, cominciò un incredibile aumento di emissione di raggi gamma che, diversamente dai primi due flares, segnò l'inizio di una fase destinata a durare più di un anno, con un flusso superiore dalle 15 alle 30 volte a quello riportato nel catalogo 2LAC e che coincideva con l'evento *BigBird* per posizione e periodo.

Sulla base dell'analisi dei raggi gamma del blazar PKS B1424-418 è stato possibile quindi ricavare un modello che suggerisce, per la prima volta, l'associazione fisica tra un evento ad alta energia di IceCube ed un blazar. Questo modello tuttavia non è stato confermato dal telescopio ANTARES, che non ha trovato nessun segnale nella posizione di PKS B1424-418, escludendo la possibilità di una correlazione[13].

3.2 Analisi dati e risultati

Lo scopo di questo lavoro è quello di effettuare un'analisi dei dati del FermiLAT nella regione R_{50} dell'evento *BigBird*, per poter ricavare il flusso di raggi gamma del blazar PKS B1424-418 in un periodo successivo a quello del picco del 2012/2013, in modo tale da consentire lo studio ed il confronto dei dati con quelli del telescopio ANTARES.

Il periodo preso in considerazione è compreso tra il primo Gennaio 2012, pochi mesi prima del picco, e il 4 Settembre 2016. La regione del picco è stata analizzata per avere un confronto tra i dati ottenuti nelle analisi precedenti e questa, in modo tale da poter avere un'indicazione sull'attendibilità dei risultati.

¹Le coordinate RA/Dec sono le coordinate sferiche astronomiche. RA, right ascension (indicato normalmente con la lettera α), misura la distanza angolare di un corpo verso est lungo l'equatore celeste (la proiezione dell'equatore terrestre nella sfera celeste) partendo dall'equinozio di primavera, uno dei due punti cioè dove l'orbita del sole interseca l'equatore celeste. Dec, declination (indicato normalmente con la lettera δ), misura la distanza angolare di un corpo perpendicolarmente all'equatore celeste, positiva verso nord, negativa verso sud.

²La sigla FSRQ deriva dal fatto che questo tipo di blazar ha una compact radio structure e tende ad avere uno spettro radio piatto)

3.2.1 Metodo di analisi

Per l'analisi dei dati del FermiLAT sono stati utilizzati i *Fermi Science Tools* (v10r0p5)[14] con dati Pass 8 ed è stata effettuata un'analisi binned likelihood.

È stata presa un raggio di interesse di raggio 10° in un intervallo di energie compreso tra 100 MeV e 300 GeV. Agli eventi che rispettavano queste condizione è stato imposto un limite all'angolo id zenit di 90° e un taglio $(DATA_QUAL>0)\&\&(LAT_CONFIG==1)$ con `gtmktime` (Appendice A per approfondimenti).

Sono stati presi in considerazione il diffuse background, modellizzato utilizzando il modello di emissione galattica `gll_iem_v06.fits` e il modello di diffusione isotropica `iso_source_v06.txt`, Cen A, considerandolo puntiforme, e tutte le sorgenti luminose in una regione di interesse leggermente maggiore di quella di partenza (14°).

Per tutte le sorgenti oltre PKS B1424-418 sono stati impostati, e mantenuti costanti, tutti i parametri così come sono riportati nel terzo catalogo del LAT (3FGL). La curva di luce è stata infine ottenuta usando 121 bin di 14 giorni.

3.2.2 Risultati

I seguenti grafici, ottenuti utilizzando il programma di analisi dati ROOT e il tool `gtmodel` dei *Fermi Science Tools*, insieme al programma di visualizzazione file fits `ds9`, evidenziano come l'analisi discussa nella sezione precedente sia compatibile con quelle effettuate da altri gruppi di ricerca (figure 3.1 e 3.2).

Nella figura 3.3 è poi mostrato il confronto tra le count maps di PKS B1424-418 durante il picco del 2012/2013 e un periodo esterno ad esso; le immagini sono state ottenute tramite il tool `gtmodel`.

La curva di luce in figura 3.4, infine, è il risultato complessivo dell'analisi, in cui viene mostrato per intero l'andamento del flusso di PKS B1424-418 in funzione del tempo, espresso nel sistema MJD.

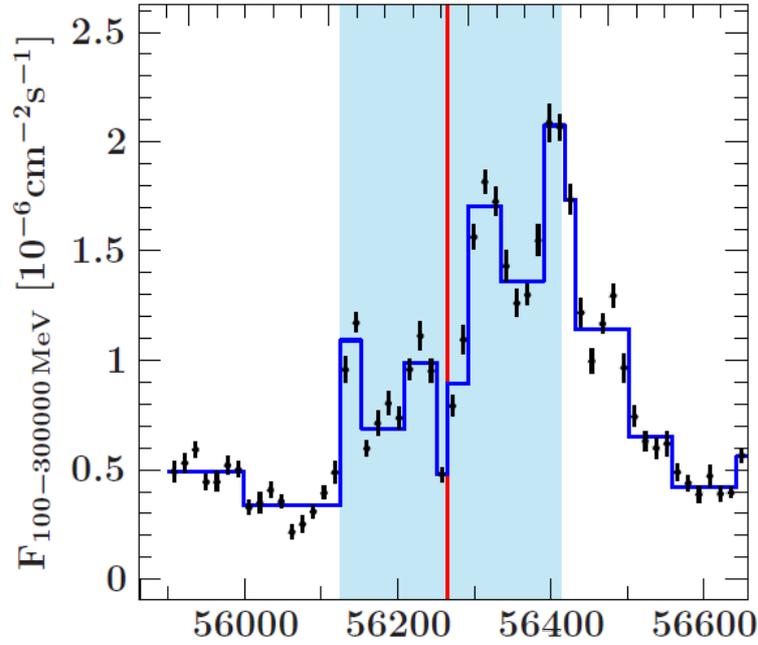


Figura 3.1: Curva di luce di PKS B1424-418 dell'articolo [13] riportato in bibliografia, usata come modello di riferimento durante l'analisi.

Light Curve

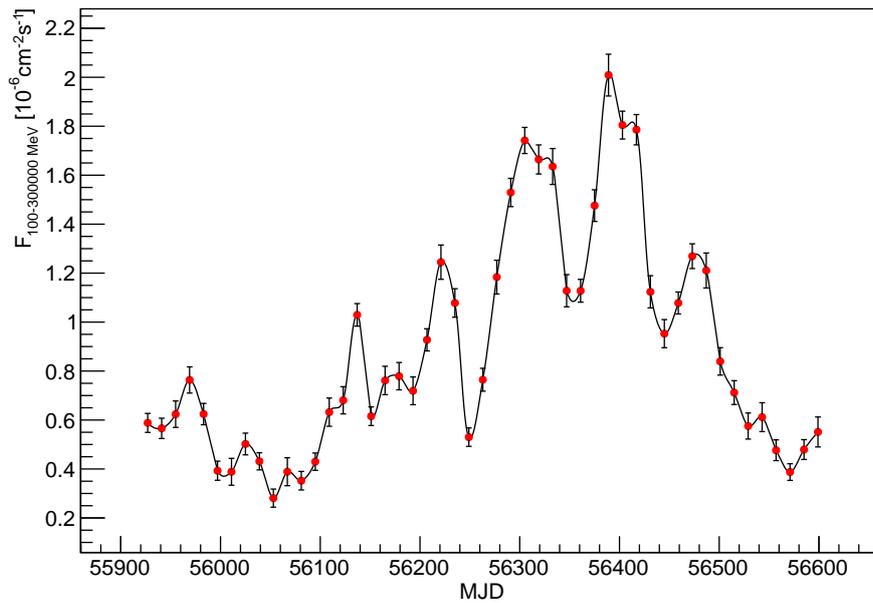


Figura 3.2: Curva di luce di PKS B1424-418 in un periodo compreso tra l'1 Gennaio 2012 ed il 3 Novembre 2013. Da un confronto con la curva di luce in figura 3.1 è possibile notare come i risultati siano tra loro compatibili. I discostamenti dei valori possono essere causati da una diversa combinazione di input durante l'utilizzo dei Fermi Science tools.

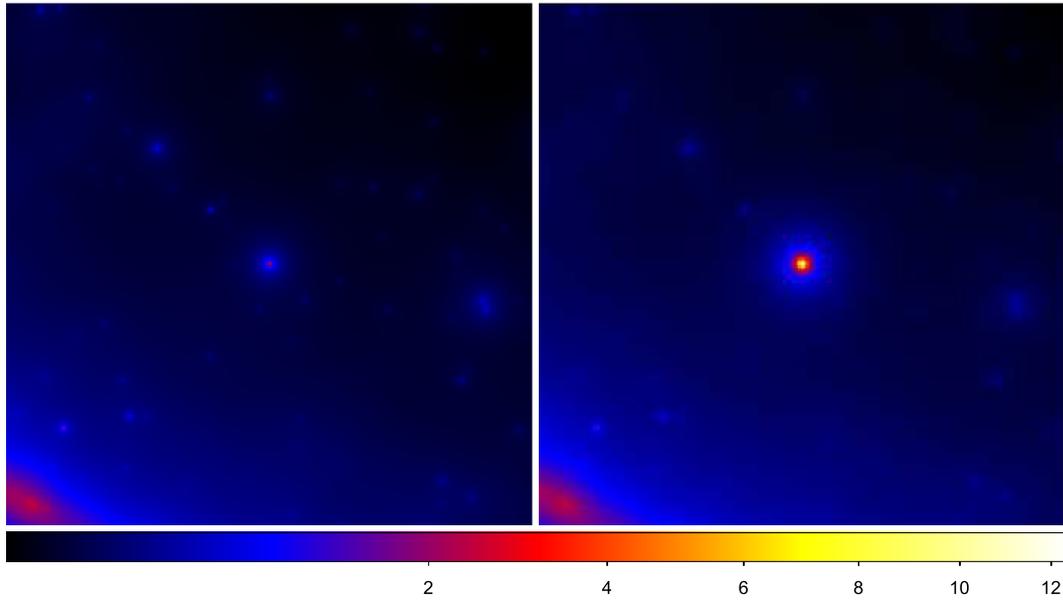


Figura 3.3: Confronto tra le count maps della regione di interesse attorno a PKS B1424-418 durante (destra) e dopo (sinistra) l'aumento di emissioni del 2012

Light Curve

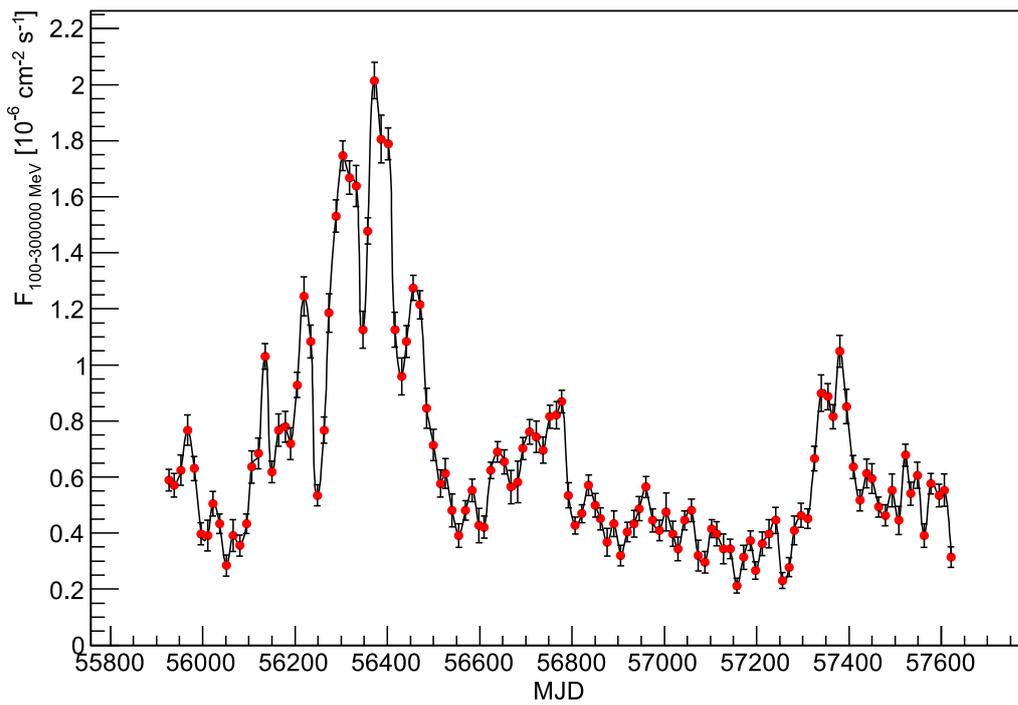


Figura 3.4: Curva di luce di PKS B1424-418. I dati sono mostrati con bin da 14 giorni. Sulla sinistra è evidente il picco di emissioni ipotizzato essere la causa dell'evento BigBird del rivelatore IceCube; a seguire sono riportati i dati ricavati nell'analisi, che dovranno poi essere incrociati con quelli di altri esperimenti.

Conclusioni

Lo scopo di questo lavoro è l'analisi del flusso di raggi gamma del blazar PKS B1424-418 in un periodo compreso tra l'1 Gennaio 2012 ed il 4 Settembre 2016.

Per contestualizzare l'analisi è stata fornita una descrizione degli esperimenti che hanno rivelato i neutrini generati, secondo alcuni modelli, da PKS B1424-418. È stata poi fornita una descrizione del funzionamento del Fermi Large Area Telescope, il satellite che ha fornito i dati analizzati.

I risultati sono riassunti nelle figure 3.2 e 3.4: la prima mostra, confrontandola con la figura 3.1, che i risultati ottenuti sono corretti, in quanto comparabili con quelli ottenuti da altri team di ricerca; in figura 3.4 è invece mostrato il flusso complessivo del blazar fino al 4 Settembre 2016. Sulla base di questi dati sarà possibile poi cercare corrispondenze con altri esperimenti, per confermare, o smentire, i modelli sull'emissione di UHECR e neutrini di PKS B1424-418.

Appendice A

Utilizzo dei Fermi Science Tools

In questa appendice è trattato nel dettaglio il procedimento seguito per l'analisi dei dati del FermiLAT. È spiegato quindi il ruolo e le modalità d'uso di ogni tool utilizzato per il calcolo del flusso di ogni bin; i tools in questione sono i seguenti:

- gtselect;
- gtmktime;
- gtbins;
- make3FGLxml.py;
- gtlcube;
- gtexpcube2;
- gtsrcmaps
- gtlike;

gtselect

Il tool gtselect crea un file FITS filtrato basandosi su tagli imposti dall'utente. I parametri più comunemente usati per il filtraggio sono quelli riguardanti il range di tempo e di energia e la classe dell'evento. Nell'analisi descritta nella sezione 3.2.2 sono stati effettuati i seguenti tagli:

evclass	128
evtype	3
RA	216.985
Dec	-42.1054
Emin	100 MeV
Emax	300 GeV

Dove evclass=128 indica una selezione di tipo Source degli eventi, come suggerito dalla pagina ufficiale del tool, ed evtype=3 indica una selezione degli eventi front e back in contemporanea. Il tutto è stato eseguito tramite il seguente comando:

```
prompt> gtselect evclass=128 evtype=3
Input FT1 file [] @events.txt
Output FT1 file [] filtered.fits
RA for new search center (degrees) (0:360) [] INDEF
Dec for new search center (degrees) (-90:90) [] INDEF
radius of new search region (degrees) (0:180) [] INDEF
start time (MET in s) (0:) [] 482263478
end time (MET in s) (0:) [] 483473078
lower energy limit (MeV) (0:) [] 100
upper energy limit (MeV) (0:) [] 300000
maximum zenith angle value (degrees) (0:180) [] 90
Done.
```

gtmktime

Il tool gtmktime è stato usato per effettuare un ulteriore taglio ai dati, in modo tale da selezionare solo i dati compresi in intervalli di tempo in cui il satellite ha lavorato in condizioni standard e in cui la qualità dei dati era di buona qualità. Per effettuare un taglio di questo tipo, il tool usa le informazioni contenute in un file spacecraft, che contiene i dati riguardanti posizione e puntamento del satellite. I parametri in input sono quelli suggeriti nella pagina di riferimento del tool.

```
prompt>gtmktime
Spacecraft data file [] L15062322331167651F7F53_SC00.fits
Filter expression [] (DATA_QUAL>0)&&(LAT_CONFIG==1)
Apply ROI-based zenith angle cut [] no
Event data file [] filtered.fits
Output event file name [] gti.fits
```

gtbin

Una volta selezionati i dati interessati con i due tool precedenti è necessario prepararli per l'analisi. I dati in input in un'analisi binned likelihood sono composti da una serie di count map per diversi valori di energia. Utilizzando questo tool è presa in considerazione una regione leggermente maggiore di quella iniziale, poiché le mappe sono quadrate, e rischierebbero di far perdere informazioni in alcune zone. Sono riportate di seguito le 37 count map (figura A.1) generate per un singolo bin, insieme ad un esempio di esecuzione del tool:

```
prompt> gtbin
This is gtbin version ScienceTools-v10r0p5-fssc-20150518
Type of output file (CCUBE|CMAP|LC|PHA1|PHA2|HEALPIX) [CMAP] CCUBE
Event data file name[] gti.fits
Output file name[] ccube.fits
Spacecraft data file name[] NONE
Size of the X axis in pixels [] 140
Size of the Y axis in pixels [] 140
Image scale (in degrees/pixel) [] 0.1
Coordinate system (CEL - celestial, GAL -galactic) (CEL|$GAL) [] CEL
First coordinate of image center in degrees (RA or galactic l) []
216.985
Second coordinate of image center in degrees (DEC or galactic b) []
-42.1054
Rotation angle of image axis, in degrees [] 0.0
Projection method Projection method e.g. AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|
STG|TAN:[] AIT
Algorithm for defining energy bins (FILE|LIN|LOG) [] LOG
Start value for first energy bin in MeV[] 100
Stop value for last energy bin in MeV[] 300000
Number of logarithmically uniform energy bins [] 37
gtbin: WARNING: No spacecraft file: EXPOSURE keyword will be set
equal to ontime.
```

make3FGLxl.py

Per effettuare un'analisi binned likelihood è necessario avere un modello che contenga tutte le sorgenti luminose all'interno della regioni di interesse. Lo script `make3FGLxml.py` è uno script che genera automaticamente tale modello basandosi sul catalogo 3FGL di FermiLAT.

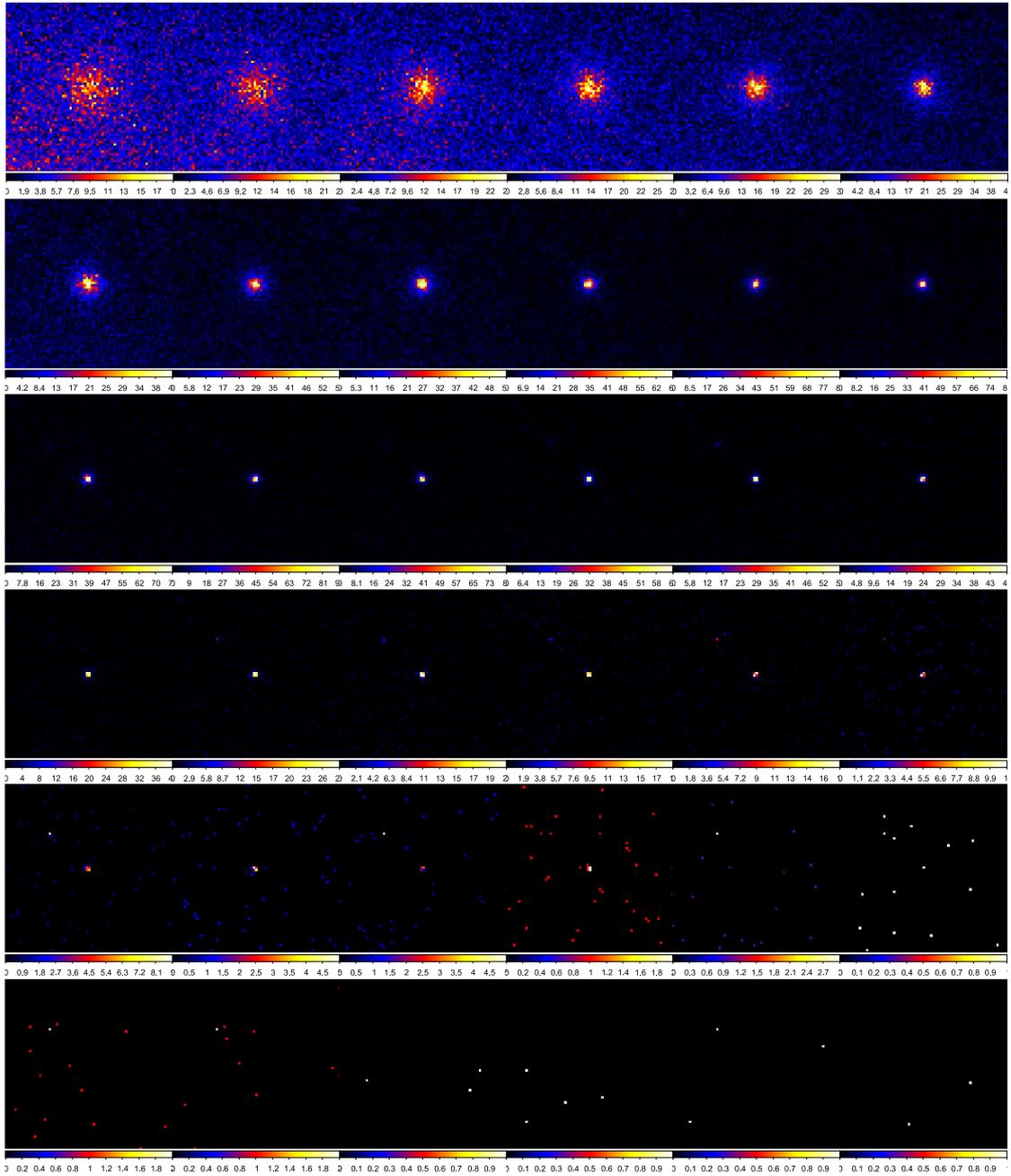


Figura A.1: Risultato dell'esecuzione del tool gtbin. È stata esclusa l'immagine 37 perché priva di valori interessanti. Immagini non in scala.

```

prompt> make3FGLxml.py gll_psc_v16.fit gti.fits -o input_model.xml -G
    $FERMI_DIR/refdata/fermi/galdiffuse/gll_iem_v06.fits -g
    gll_iem_v06 -I /$FERMI_DIR/refdata/fermi/galdiffuse/
    iso_P8R2_SOURCE_V6_v06.txt
-i iso_P8R2_SOURCE_V6_v06 -s 120 -p TRUE -v TRUE
This is make3FGLxml version 01r0.
The default diffuse model files and names are for pass 8
and assume you have v10r00p05 of the Fermi Science Tools or higher.
Creating file and adding sources from 3FGL
Added 312 point sources , note that any extended sources in ROI were
    modeled
as point sources because psForce option was set to True

```

gtlcube

Per velocizzare il processo è utile calcolare preventivamente la livetime, il tempo in cui il LAT ha osservato una certa posizione del cielo con una certa inclinazione. Gtlcube genera un livetime cube, l'insieme cioè delle livetime di ogni punto del cielo.

```

prompt> gtlcube zmax=90
Event data file [] gti.fits
Spacecraft data file [] L15062322331167651F7F53_SC00.fits
Output file [] ltcube.fits
Step size in cos(theta) (0.:1.) [] 0.025
Pixel size (degrees) [] 1
Working on file L15062322331167651F7F53$\_$SC00.fits
.....!

```

gtexcube2

L'exposure map è l'esposizione totale, area moltiplicata per il tempo, per una certa posizione del cielo e fornisce quindi il conteggio nella regione di interesse. Il tool gtexcube, sfruttando il livetime cube generato da gtlcube e le informazioni contenute nel file spacecraft, genera questa mappa.

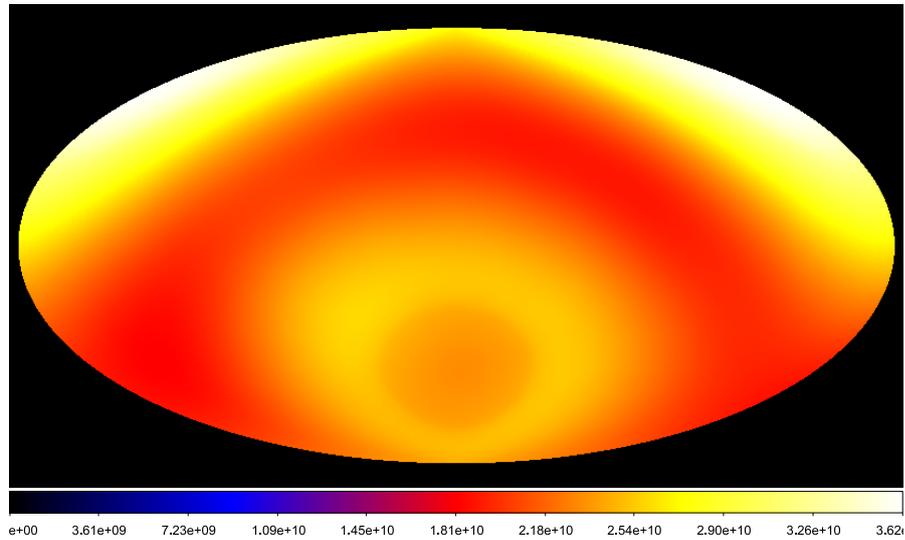


Figura A.2: Risultato dell'esecuzione del tool gtexpcube2.

```

prompt> gtexpcube2
Livetime cube file [] ltcube.fits
Counts map file [] none
Output file name[] allsky.fits
Response functions to use[] P8R2_SOURCE_V6
Size of the X axis in pixels [] 1800
Size of the Y axis in pixels [] 900
Image scale (in degrees/pixel) [] .2
Coordinate system (CEL - celestial, GAL -galactic) (CEL$|GAL) [] CEL
First coordinate of image center in degrees (RA or galactic l) []
    216.985
Second coordinate of image center in degrees (DEC or galactic b) []
    -42.1054
Rotation angle of image axis, in degrees [] 0
Projection method e.g. AIT|ARC|CAR|GLS|MER|NCP|SIN|STG|TAN [] AIT
Start energy (MeV) of first bin [] 100
Stop energy (MeV) of last bin [] 300000
Number of logarithmically-spaced energy bins [] 37
Computing binned exposure map.....!

```

gtsrcmaps

Sfruttando l'exposure map e il modello generato con `make3FGLxml.py`, il tool `gtsrcmaps` genera una count maps modellizzata da usare nell'analisi binned likelihood.

```
prompt> gtsrcmaps
Exposure hypercube file [] ltcube.fits
Counts map file [] ccube.fits
Source model file [] input$\_model.xml
Binned exposure map[] allsky.fits
Source maps output file [] srcmaps.fits
Response functions [CALDB]

>Much Output Suppressed<

Generating SourceMap for 3FGL J1520.8 - 0348.....!
Generating SourceMap for 3FGL J1525.8 - 0834.....!
Generating SourceMap for 3FGL J1532.7 - 1319.....!
Generating SourceMap for CenA Lobes.....!
Generating SourceMap for gll_iem_v06.....!
Generating SourceMap for iso_P8R2_SOURCE_V6_v06.....!
```

gtlike

Il tool `gtlike` esegue l'analisi binned likelihood dei dati. Questa statistica fornisce la probabilità di ottenere dati osservabili dato un modello di input. Nel caso di questa analisi il modello di input è la distribuzione di raggi gamma della sorgente nel cielo, inclusi la loro intensità e spettro, ed ha come obiettivo quello di trovare il fit migliore dei parametri del modello, come spettro, posizione ed intensità della sorgente.

```
prompt> gtlike sfile=binned_output.xml

Statistic to use (BINNED|UNBINNED) [] BINNED
Counts map file [] srcmaps.fits
Binned exposure map[] allsky.fits
Exposure hypercube file [] ltcube.fits
Source model file [] input_model.xml
Response functions to use [] CALDB
Optimizer (DRMNFB|NEWMINUIT|MINUIT|DRMNGB|LBFGS) [] NEWMINUIT
```


Bibliografia

- [1] S. Braibant, M. Spurio, G. Giacomelli, - *Particelle ed interazioni fondamentali*, 2^a edizione, Springer (2012);
- [2] T. Chiarusi, M. Spurio, - *High-Energy Astrophysics with Neutrino Telescopes*, The European Physical Journal 65:649-701 (2010)
- [3] M. Spurio, - *Particles and Astrphysics - A Multi-Messenger Approach*, Springer (2015)
- [4] <https://icecube.wisc.edu/science/icecube/detector>
- [5] A. Karle - IceCube - status and recent results (2014)
- [6] G. Giacomelli - Recent Result from the ANTARES Neutrino Telescopes, Journal of Communication and Computers (2012)
- [7] The ANTARES Collaboration - The ANTARES Optical Module
- [8] The ANTARES Collaboration - Search for Cosmic Neutrino Point Source with Four Years of Data from the ANTARES Telescopes (2012)
- [9] <https://www-glast.stanford.edu/>
- [10] http://www.nasa.gov/mission_pages/GLAST/spacecraft/index.html
- [11] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/observations/types/allsky/>
- [12] W.B. Atwood et al. - Design and initial tests of the Tracker-converter of the Gamma-ray Large Area Space Telescope, Astroparticle Physics Volume 28 (2007)
- [13] M. Kadler et al. - Coincidence of high-fluence blazar outburst with PeV-energy neutrino event (2016)
- [14] <http://fermi.gsfc.nasa.gov/ssc/data/analysis/scitools/overview.html>