



Fermi

Gamma-ray Space Telescope

Ricerca di anisotropie
nella direzione di arrivo
di elettroni e positroni
con il *Large Area
Telescope di Fermi*

Niccolò Di Lalla

niccolo.dilalla@pi.infn.it

Pisa, 13 Novembre 2015

Sommario

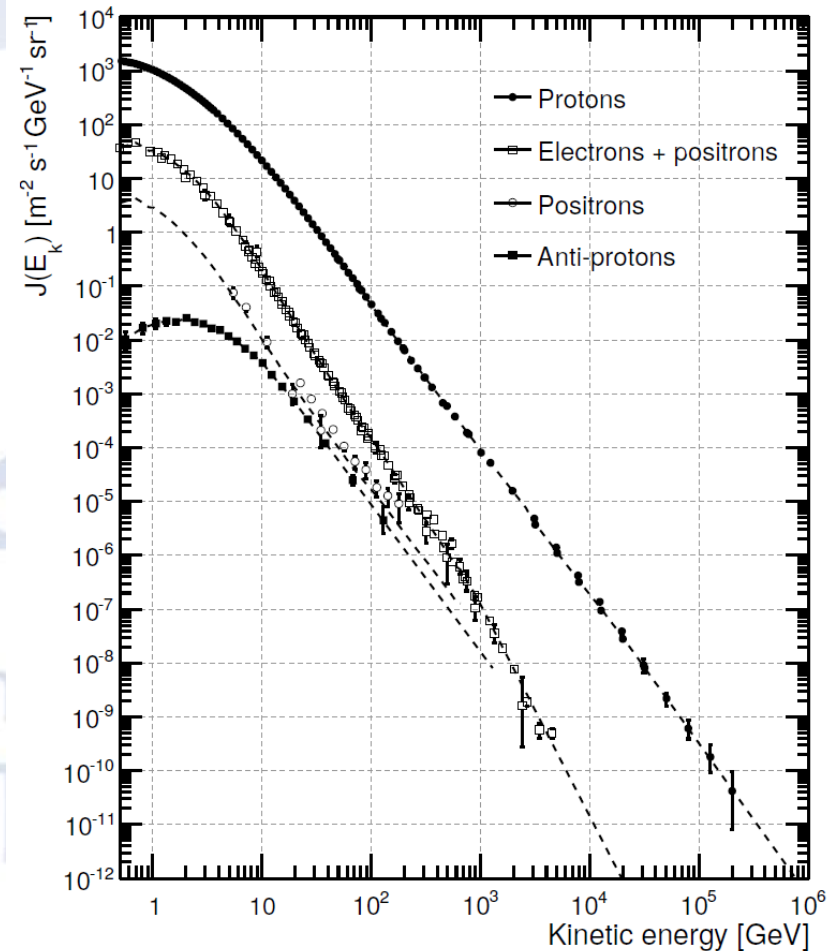
1. Motivazioni scientifiche per la ricerca di anisotropie
2. L'osservatorio *Fermi*
 - Descrizione dell'apparato sperimentale
 - La scienza di *Fermi*
3. Costruzione di un set di dati simulati
 - Test e sviluppo del *software*
 - Rimozione delle particelle secondarie
4. Analisi dati di volo (quattro mesi di presa dati)
 - Tagli di selezione degli eventi
 - Metodi di analisi
 - Confronto bin a bin
 - Sviluppo in armoniche sferiche
 - Analisi dei risultati
5. Studio della sensibilità prevista per *Fermi* con sette anni di dati

I raggi cosmici

- I raggi cosmici galattici sono accelerati prevalentemente in sorgenti come i resti di supernova (SNR)
- La composizione è largamente dominata da **protoni**, seguiti in abbondanza da **elio** (~10%) ed **elettroni** (~ 0.1 – 1%)
- Lo spettro energetico è rappresentato approssimativamente da una legge di potenza

$$\frac{dN}{dE} = A E^{-\Gamma}$$

con $\Gamma \sim 2.7$



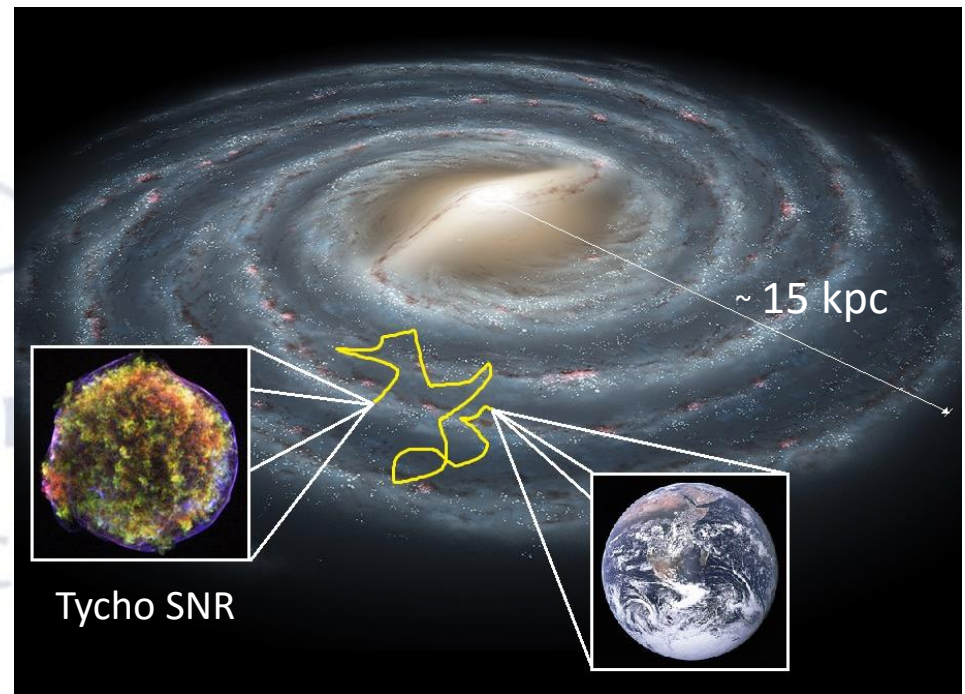
La diffusione dei raggi cosmici

- Una volta accelerati, i raggi cosmici si propagano nello spazio interstellare sotto l'influenza del campo magnetico galattico (GMF)
- Il GMF è la sovrapposizione di un campo a grande scala ($B_{\text{reg}} \sim 2 \mu\text{G}$), regolare e coerente con la distribuzione di materia nella galassia, e un campo a piccola scala ($B_{\text{turb}} \sim 4 \mu\text{G}$), di natura turbolenta e con scala di coerenza di $\sim 100 \text{ pc}$
- Il raggio di Larmor delle traiettorie delle particelle cariche è:

$$r_L[\text{m}] = \frac{|\mathbf{p}|c [\text{GeV}]}{0.3 |\mathbf{B}[\text{T}]|}$$

$$r_L \sim 10^{-5} \text{ pc} \quad (E \sim 100 \text{ GeV})$$

- Il moto dei raggi cosmici avviene in **modo diffusivo** (*random walk*) con tempo di propagazione nella galassia molto superiore a quello balistico

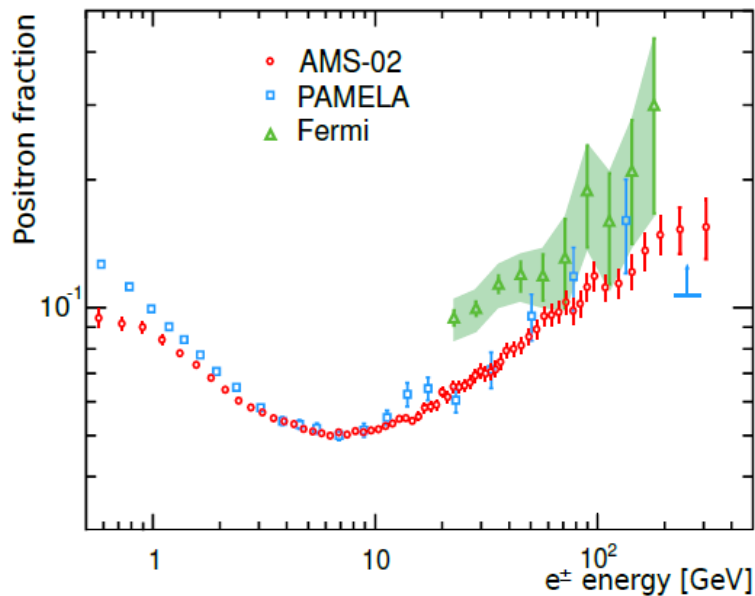


Elettroni e positroni nei raggi cosmici

- Contrariamente alla controparte adronica, **gli elettroni ed i positroni perdono rapidamente energia** attraverso l'emissione di radiazione di sincrotrone e per il processo di *scattering* Compton inverso
- Elettroni e positroni di alta energia (100 GeV – 1 TeV) devono necessariamente essere **originati da sorgenti relativamente vicine** alla Terra (\sim kpc) e potenzialmente distribuite in modo **fortemente anisotropo**
- Nonostante ciò, a causa del moto diffusivo dovuto alla componente turbolenta del GMF, la distribuzione attesa delle direzioni di arrivo a terra è \sim **isotropa**
- Si ricercano piccole deviazioni ($\sim 10^{-2}$ – 10^{-3}) rispetto all'isotropia che possono fornire informazioni molto importanti sulle **sorgenti in cui sono accelerati e sull'ambiente nel quale propagano**

Ricerca di anisotropie

- La rivelazione di un flusso in eccesso rispetto a quanto atteso in caso di isotropia potrebbe permettere **di identificare tali sorgenti** e **vincolare i modelli di propagazione diffusiva** nella galassia
- I risultati dello studio delle anisotropie potrebbero aiutare a **risolvere la questione sulla frazione di positroni, crescente sopra l'energia di ~ 10 GeV**



Se i positroni fossero secondari puri (creati in seguito alle collisioni dei protoni con la materia interstellare) ci aspetteremmo una frazione decrescente con l'energia

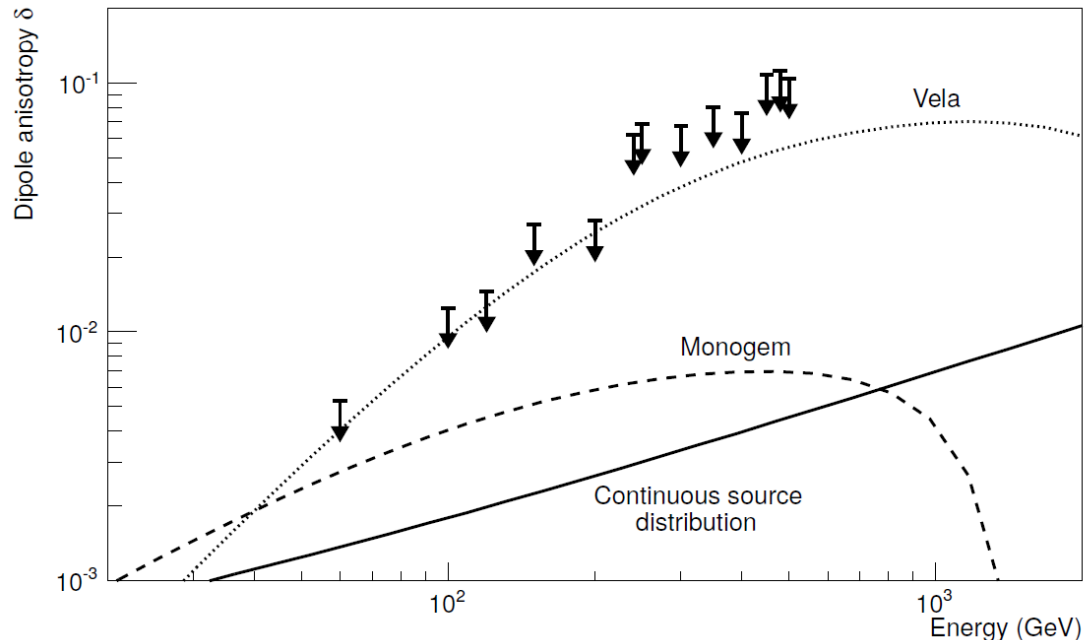
È necessario un contributo aggiuntivo:

- Spiegazione astrofisica (pulsar)
- Annichilazione – decadimento di materia oscura

Risultati analisi precedente *Fermi* (2010)

Il segnale ricercato è $\sim 10^{-2}$ – 10^{-3} (difficoltà nella misura) e, per questo motivo, è necessario un campione di eventi molto grande

Limiti superiori al grado di anisotropia di dipolo con un anno di dati¹



Grazie alla combinazione di **grande accettazione angolare** e **durata della missione**, *Fermi* ha prodotto un campione di dati con **statistica significativamente maggiore di qualsiasi esperimento in attività** ed è quindi lo strumento ottimale per questa tipologia di analisi

¹Phys. Rev. D, **82** (2010), 092003

L'osservatorio *Fermi*

Osservatorio internazionale su satellite lanciato dalla NASA l'11 giugno 2008 e dedicato alla misura della **radiazione gamma**

Parametri orbitali:

- Altezza nominale: 565 km
- Inclinazione: 26.5°
- Periodo: 96 min

Large Area Telescope (LAT)

- Telescopio a conversione di coppie
- Intervallo di energia: 20 MeV – > 300 GeV

Gamma-ray Burst Monitor (GBM)

- Studio fenomeni transienti
- 14 scintillatori: 12 di NaI(Tl) e 2 di BGO
- Intervallo di energia: 8 KeV – 40 MeV



Large Area Telescope (LAT)

Struttura modulare: matrice di 4×4 moduli (torri)

Dimensioni: $1.8 \text{ m} \times 1.8 \text{ m} \times 0.72 \text{ m}$

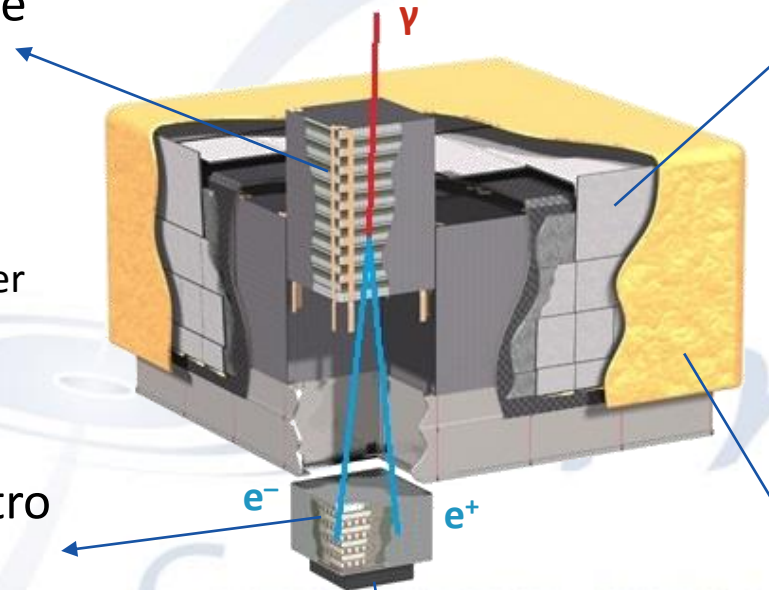
Modulo del tracciatore

– convertitore:

- 18 piani x-y traccianti di rivelatori a strisce al silicio
- 16 piani di tungsteno per favorire la conversione (1.6 R.L. *on axis*)

Modulo del calorimetro di CsI(Tl):

- 96 cristalli disposti in 8 piani (8.6. R.L. *on axis*)
- Misura dell'energia
- Immagine 3D dello sciame
- Reiezione del fondo



Rivelatore di anticoincidenza:

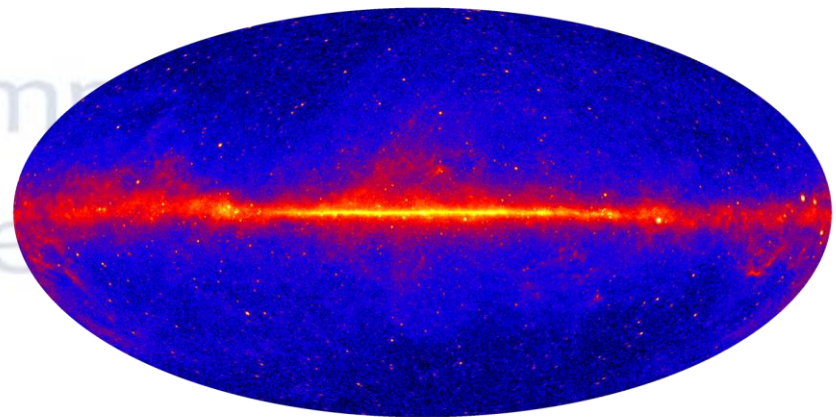
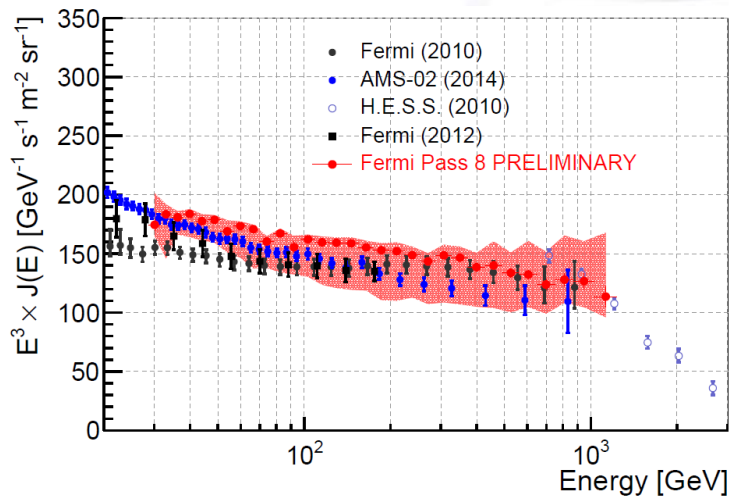
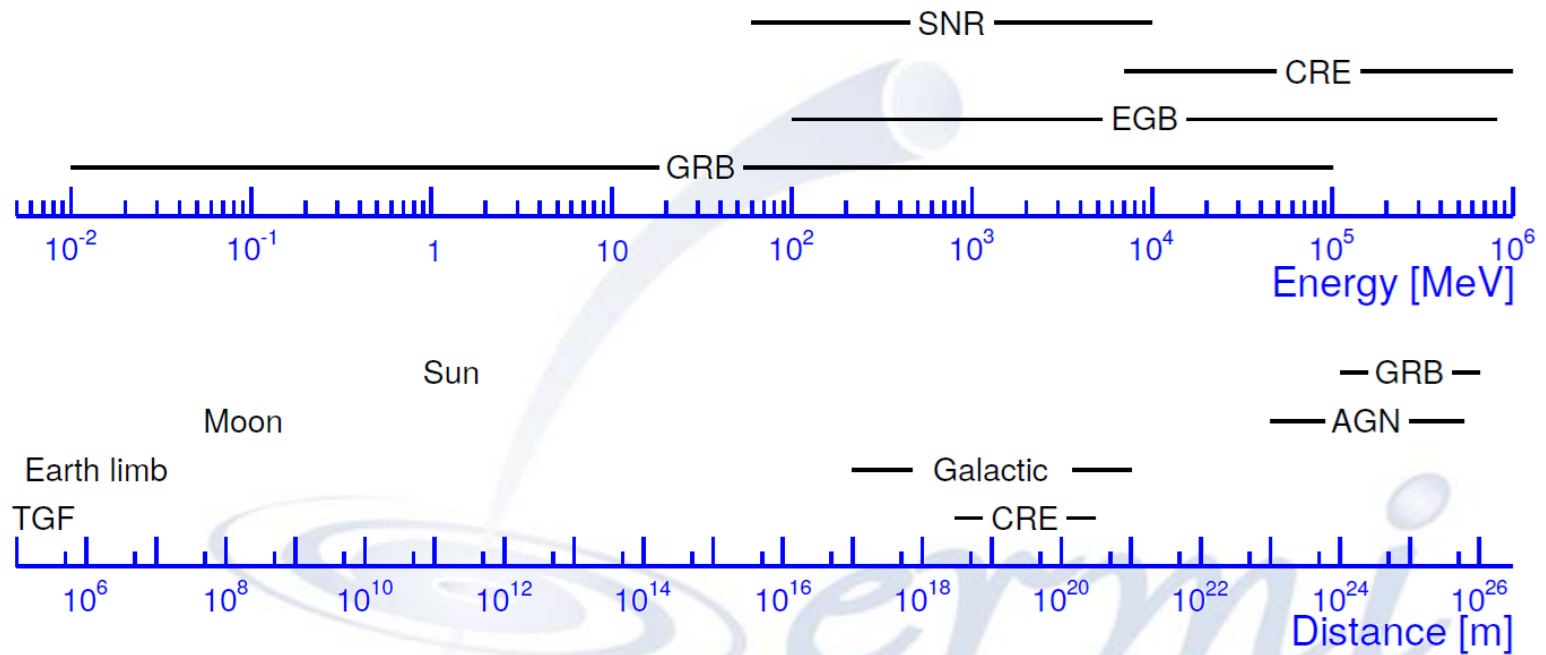
- 89 mattonelle di scintillatore plastico
- Efficienza media maggiore del 99.97% per MIP
- Separazione dei fotoni dalle particelle cariche

Scudo protettivo

Sistema elettronico di acquisizione dati

Il LAT è intrinsecamente anche un **rivelatore per elettroni**

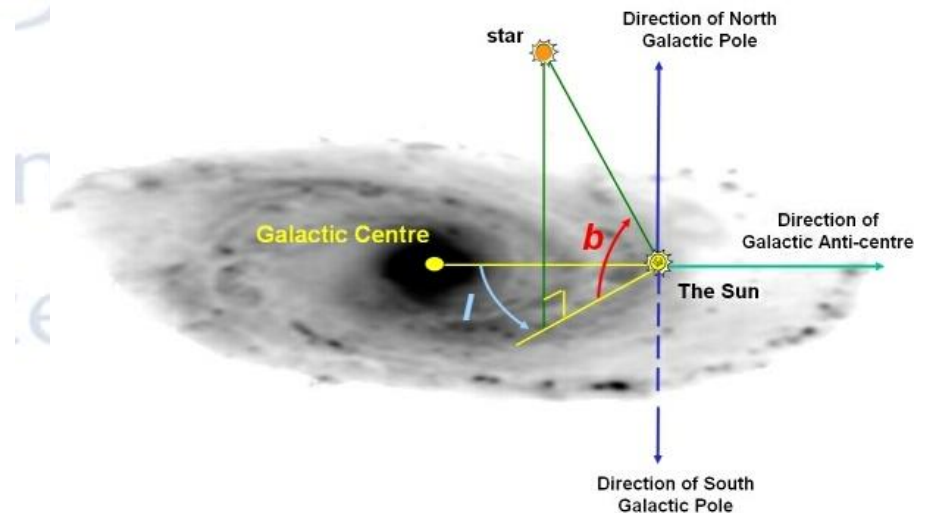
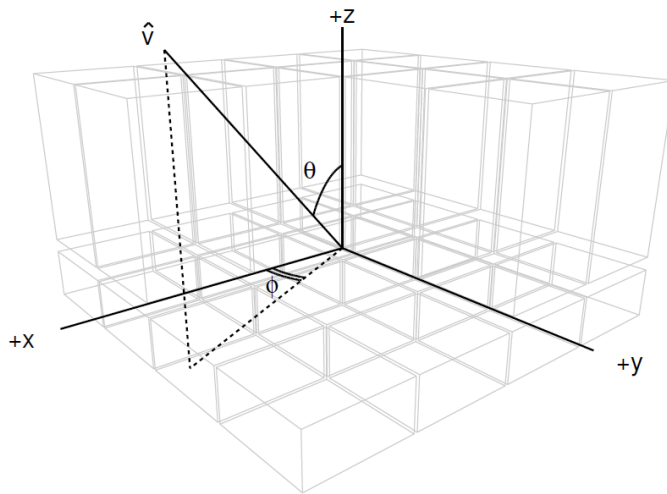
La scienza di *Fermi*



Costruzione di un set di dati simulato

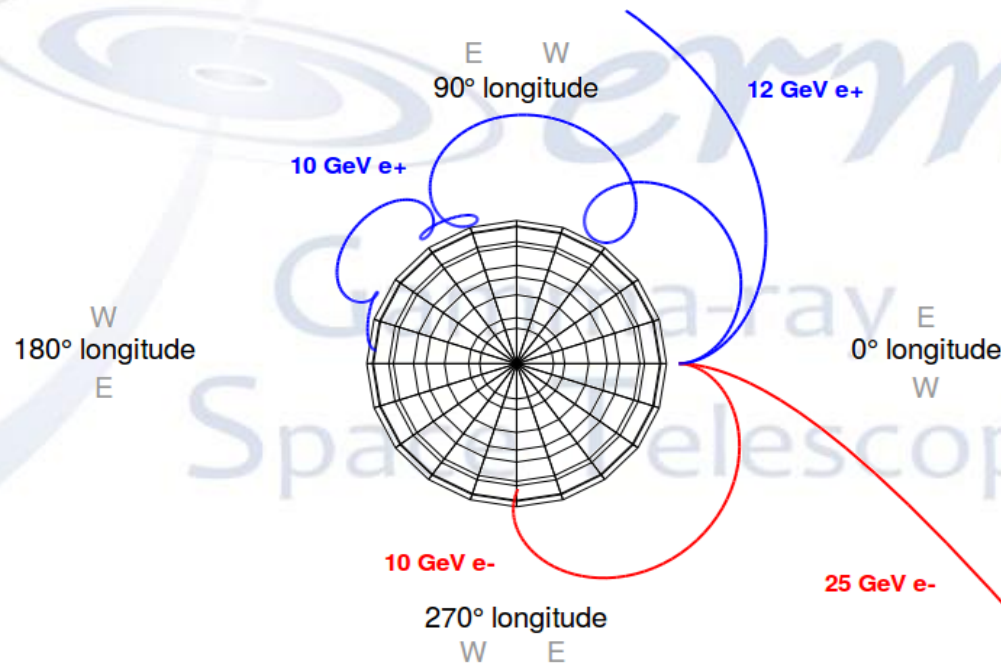
Per testare e ottimizzare le varie componenti della catena di analisi sviluppata per lo studio delle anisotropie si è costruito **un set di dati simulato**

- **Simulazione Monte Carlo di soli elettroni** distribuiti in modo uniforme nel LAT
- Per ogni evento si associa una **posizione realistica nell'orbita di Fermi**
- Conoscendo le coordinate locali (date dalla simulazione MC) e usando i dettagli orbitali così associati, per ogni particella è determinata con opportune trasformazioni la direzione di provenienza in **coordinate galattiche**



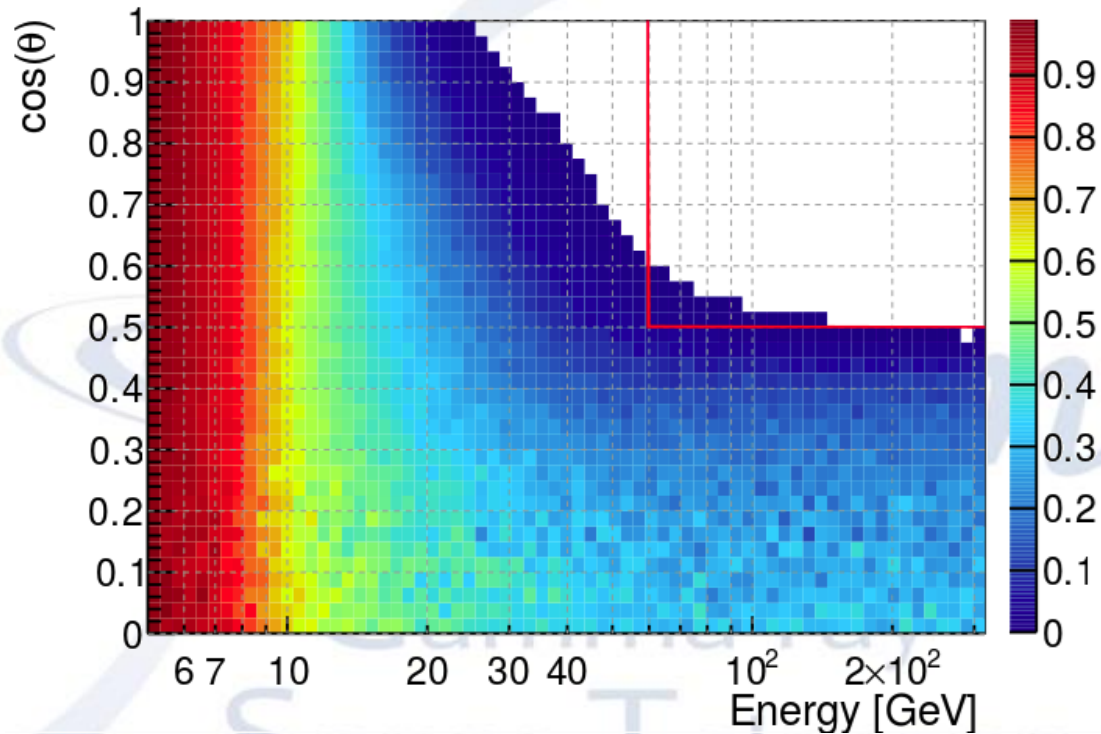
La tecnica del *ray-tracing*

- Un flusso isotropo di particelle che si propagano attraverso un campo magnetico rimane isotropo in **assenza di traiettorie associate a particelle secondarie**
- La tecnica del *ray-tracing* consiste nell'integrazione numerica della traiettoria di una particella carica in un modello dettagliato del campo magnetico terrestre (IGRF) e permette la **distinzione e rimozione delle particelle secondarie da quelle primarie**



Rimozione delle particelle secondarie

Frazione di particelle secondarie della simulazione MC in funzione dell'angolo θ (nel LAT) e dell'energia



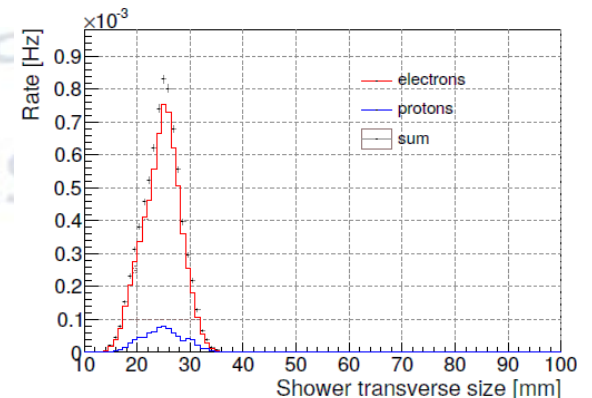
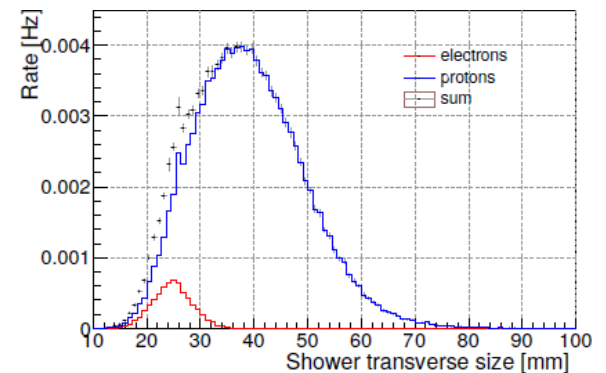
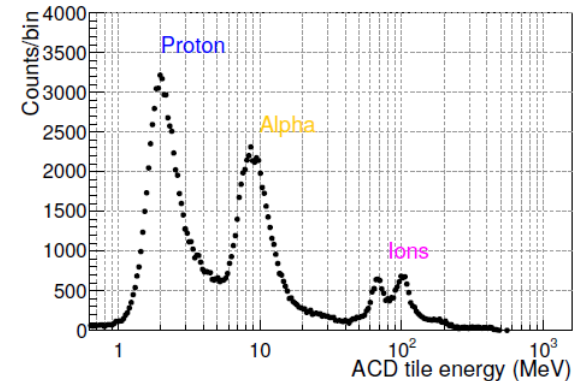
Con un taglio di selezione $\cos(\theta) > 0.5$ e $E > 60$ GeV la frazione di secondari è ridotta a ~ 0.1 % nell'intervallo 60 – 100 GeV

Selezione degli eventi

Rapporto tra il flusso degli elettroni e quello dei protoni $\sim 10^{-3} - 10^{-4}$

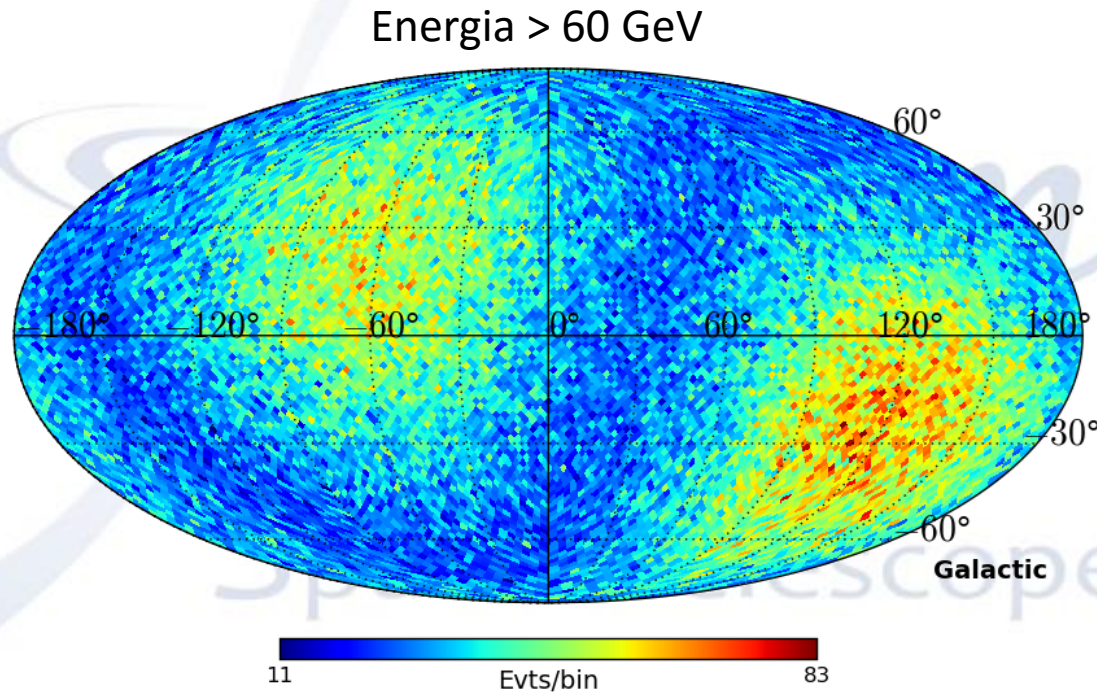
Per selezionare gli elettroni ed i positroni nei dati vengono richiesti

- Almeno una traccia ricostruita nel tracciatore
- Almeno 8 R.L. attraversati nel calorimetro
- Una qualità stimata per le misure di direzione ed energia superiore ad una soglia minima.
- Almeno 5 GeV di rilascio di energia nel calorimetro
- Un taglio per la rimozione delle particelle α e dei nuclei pesanti sfruttando la dipendenza dalla carica della perdita di energia per ionizzazione
- Un taglio per la rimozione dei protoni applicando alberi di classificazione prodotti dalle tecniche di analisi multivariata (preliminare) sfruttando la capacità del LAT di discriminare sciame elettromagnetici e adronici
- Il taglio su energia e campo di vista per la rimozione delle particelle secondarie



Mappa degli eventi

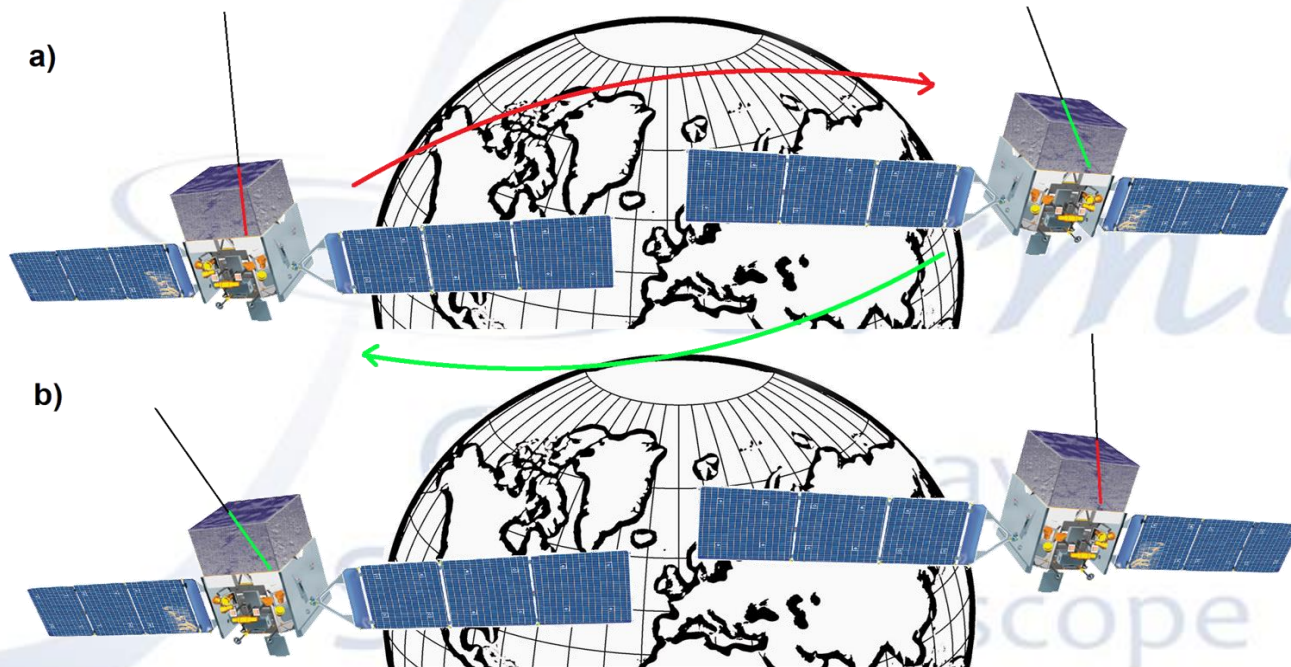
- **Quattro mesi** di presa dati (gennaio 2011 – aprile 2011)
 - Selezione preliminare in fase di sviluppo
 - Analisi *blind* futura con sette anni di dati
- Circa **455 mila eventi** dopo l'applicazione dei tagli di selezione
- **12288 pixel** di uguale area ($\sim 3 \text{ deg}^2$) secondo lo schema di HealPix²



²ApJ, **622** (2005), pp. 759-771

La tecnica dello *shuffling*

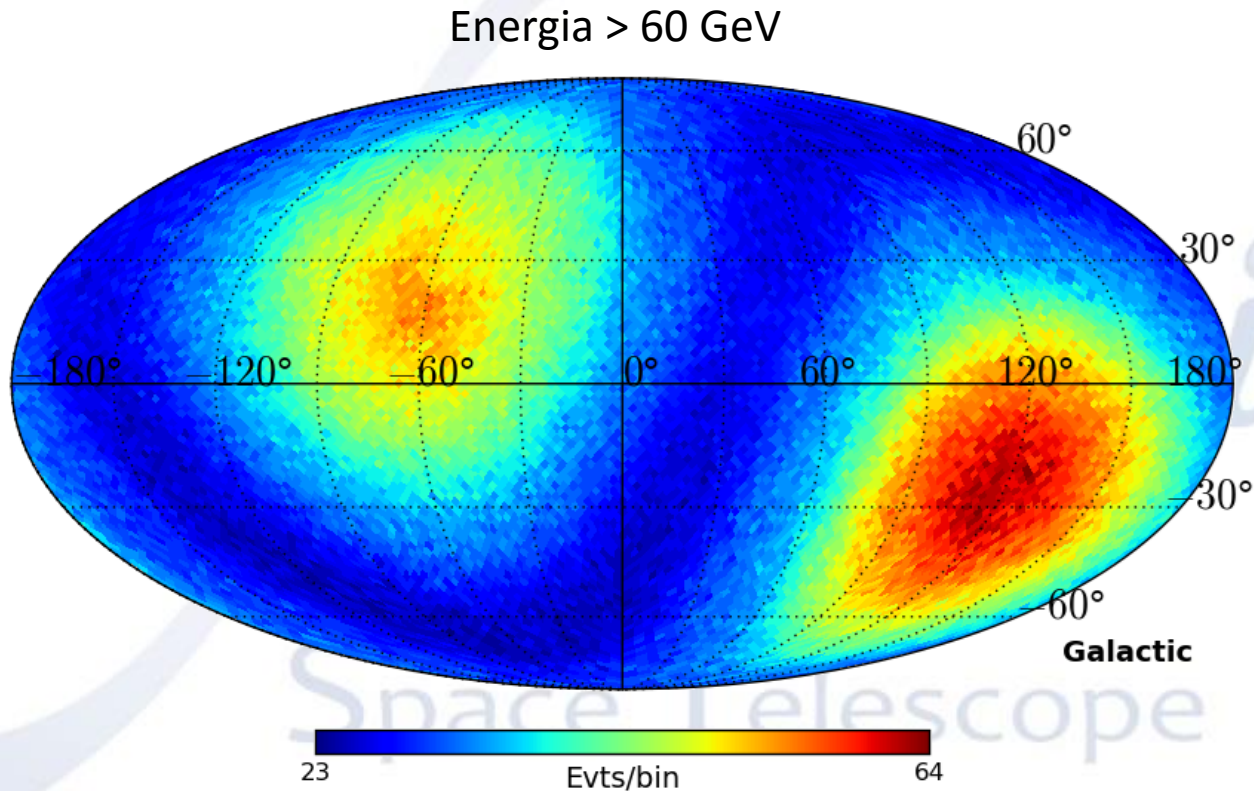
- L'esposizione del cielo **non è uniforme** (*rocking* nord-sud, SAA)
- La distribuzione delle direzioni di arrivo traccia l'esposizione
- È necessaria una mappa che mostri come apparirebbe in media il cielo visto da *Fermi* se la distribuzione degli elettroni fosse perfettamente isotropa (ipotesi nulla per l'esistenza di anisotropie)



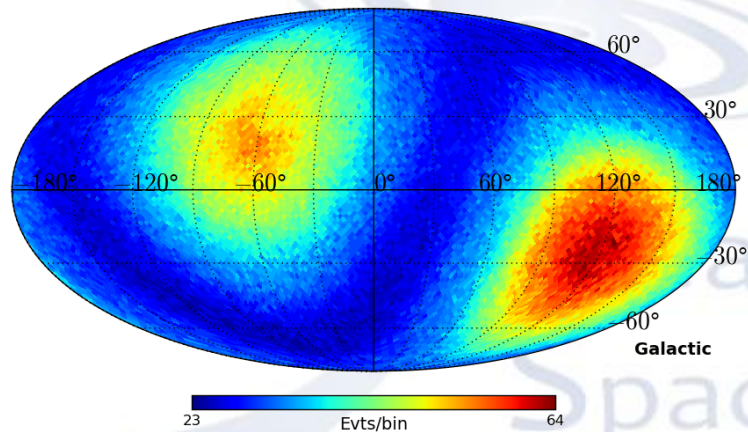
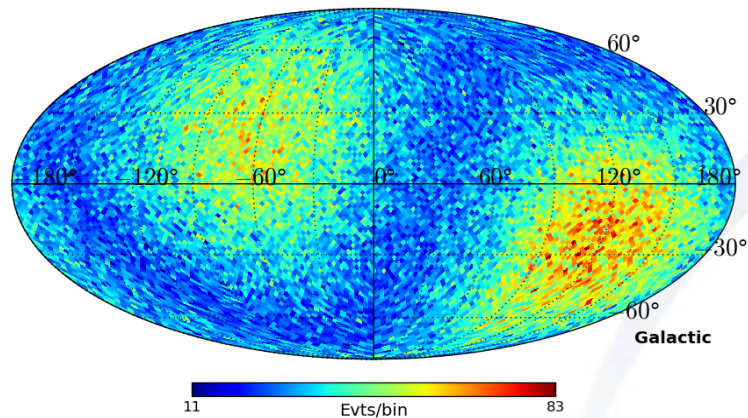
Mescolando molteplici volte le direzioni di arrivo delle particelle **ogni possibile anisotropia nei dati viene eliminata**

No-anisotropy sky map

Media di 40 mappe isotrope corrispondenti a 40 diversi *shuffling* degli stessi 4 mesi di dati



Metodi di analisi



Il confronto tra le due mappe permette di rivelare la presenza di anisotropie nei dati

Sono stati impiegati due diversi metodi di analisi:

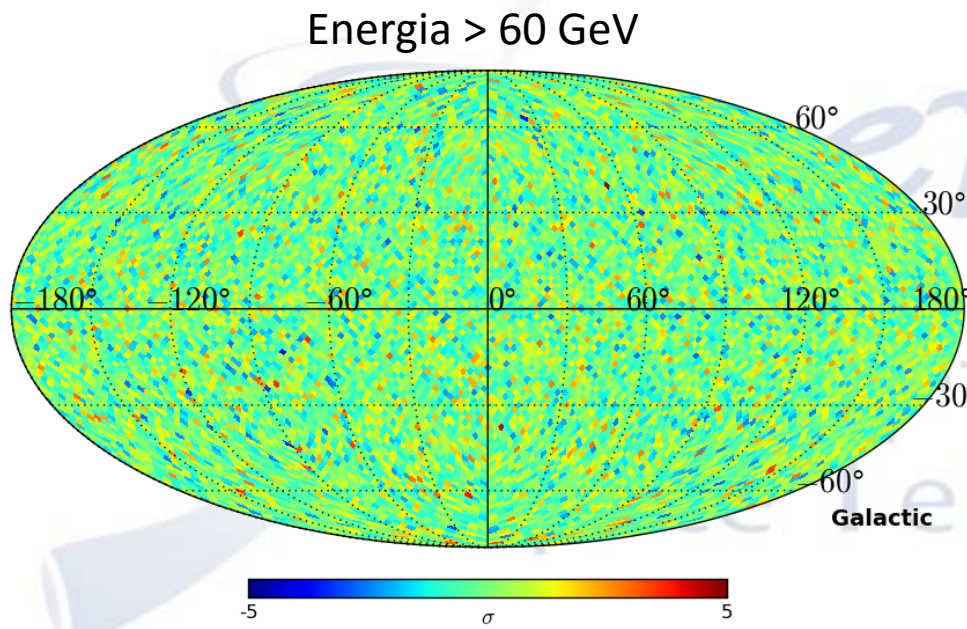
1. Confronto bin a bin

- **Bin indipendenti**, per scale angolari di pochi gradi (dimensione pixel)
- **Bin correlati**, per scale angolari medio-grandi

2. Decomposizione in **armoniche sferiche** per l'analisi dello spettro di potenza

Confronto a *bin* indipendenti

- Per ricercare anisotropie sulla scala angolare della dimensione del pixel si considerano le mappe composte di **bin indipendenti**
- Si ricerca una deviazione statisticamente significativa tra il numero di particelle atteso sotto l'assunzione di isotropia e quello effettivamente rivelato (prescrizione di Li-Ma³)



$$\sigma_i = \frac{E_i - \alpha S_i}{\sqrt{\alpha(E_i + S_i)}}$$

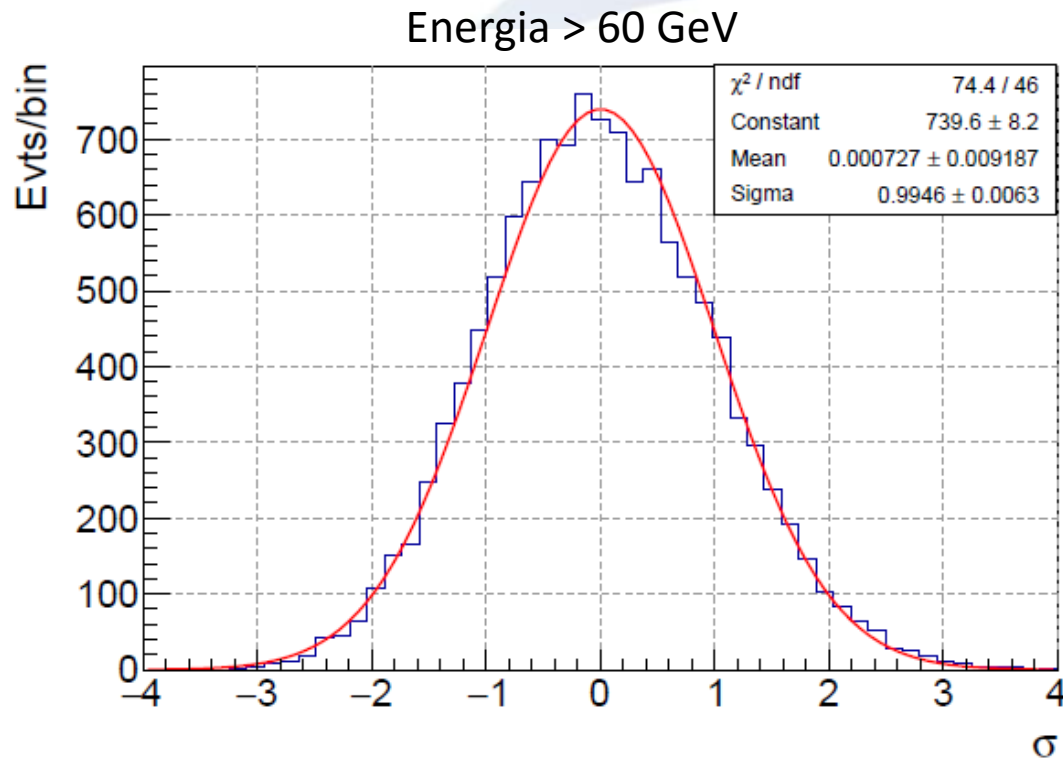
Con $\alpha \equiv \frac{1}{N_{\text{maps}}}$

E_i = numero di eventi rivelati nel pixel i
 S_i = somma sulle N_{maps} mappe isotrope prodotte degli eventi nel pixel i

³ApJ, **272** (1983), pp. 317-324

Distribuzione dei valori di significatività

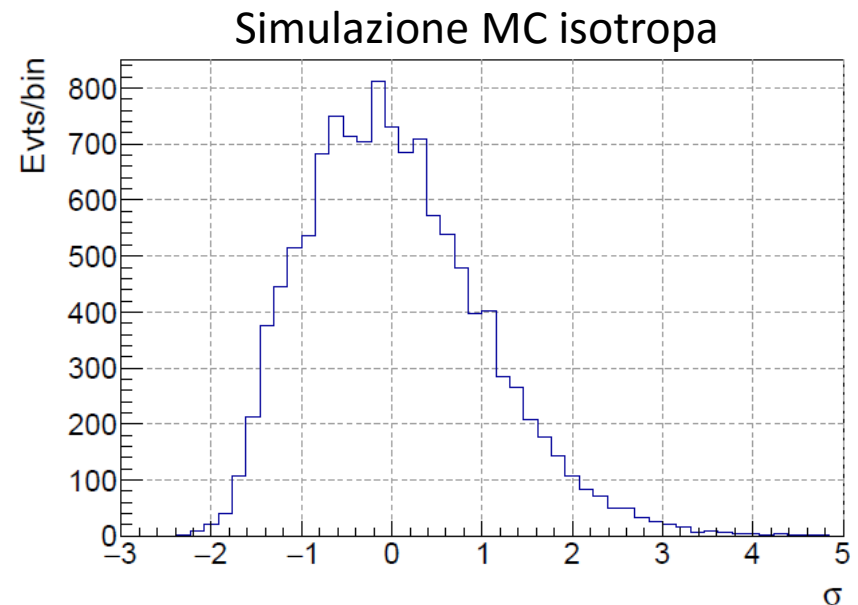
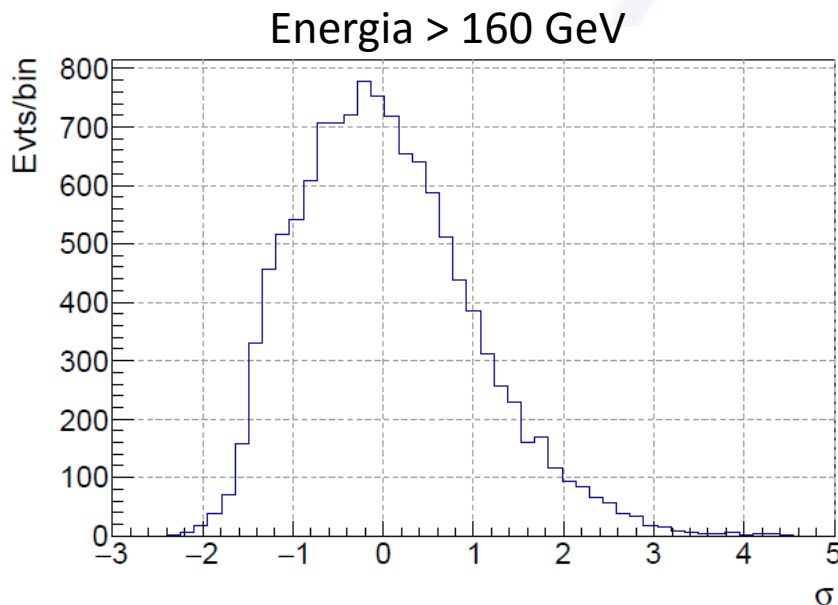
Si riportano in un istogramma i valori di significatività ottenuti nei singoli pixel della mappa



In presenza di un flusso isotropo e nel limite di numero medio di eventi per pixel sufficientemente elevato, la distribuzione è statisticamente compatibile con una **Gaussiana di media zero e varianza unitaria**

Distribuzione dei valori di significatività

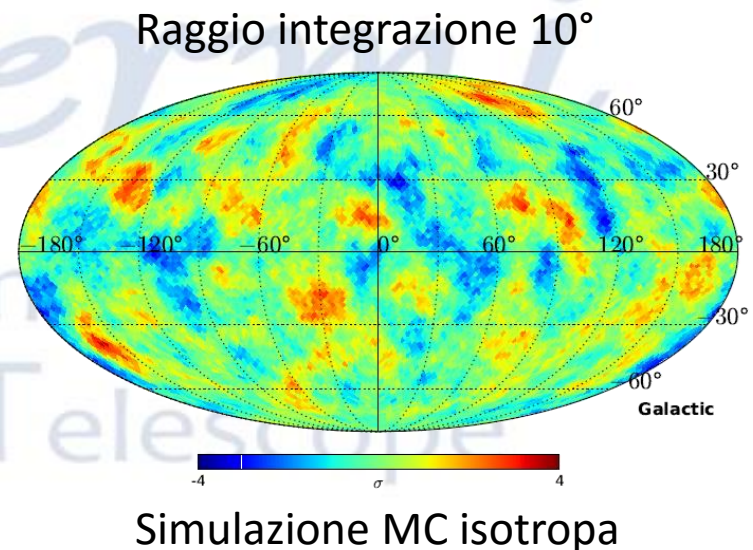
- Selezionando gli eventi con energia maggiore di 160 GeV (~ 51 mila, 3-4 eventi per pixel) la distribuzione dei valori di significatività risulta distorta
- **Numero medio di eventi per pixel non sufficientemente grande** da considerare valida l'approssimazione gaussiana



La distribuzione ottenuta per i dati è qualitativamente analoga a quella del MC simulato isotropo con lo stesso numero di eventi totali

Confronto a *bin* correlati

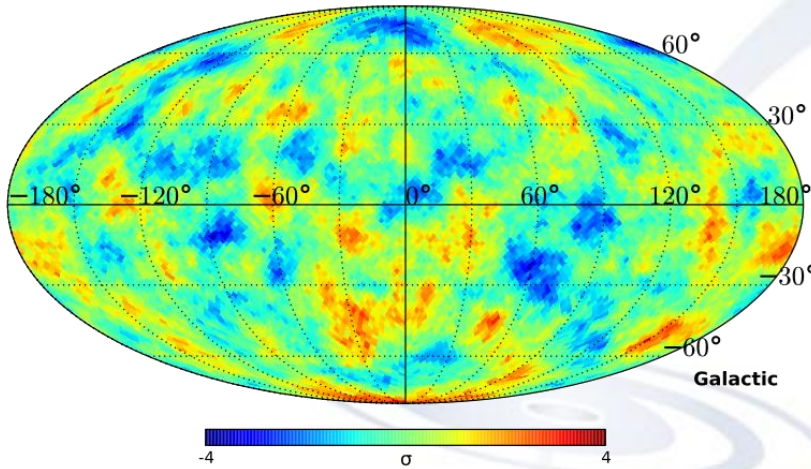
- A causa del processo di diffusione che caratterizza la propagazione dei raggi cosmici, **non sono attese anisotropie a scale angolari di pochi gradi** (dimensione del pixel)
- Per ricercare anisotropie a scale angolari diverse dalla dimensione del pixel si considerano **mappe a bin correlati**, in cui il contenuto di ogni bin è uguale al numero integrato di eventi su una regione circolare
- In questo modo è molto probabile che almeno un bin abbia il centro approssimativamente allineato con la direzione della potenziale anisotropia
- Variando il raggio di integrazione si ottimizza la ricerca per una diversa scala angolare



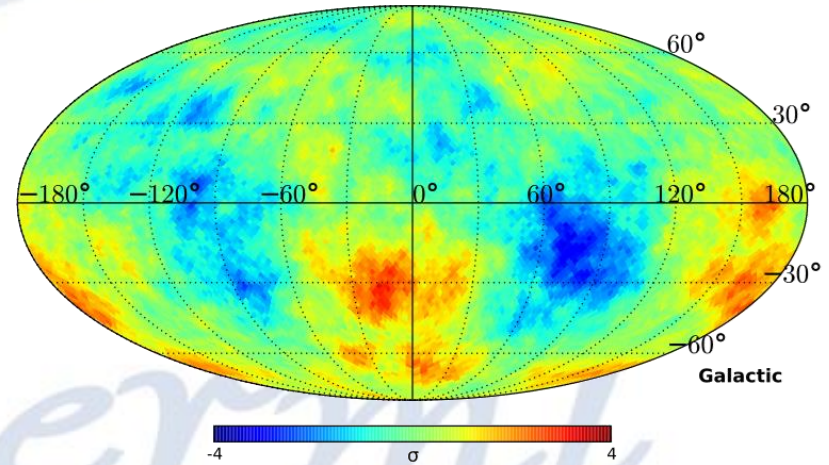
Mappe di significatività a *bin* correlati

Significatività *pre-trial* ed energia > 60 GeV

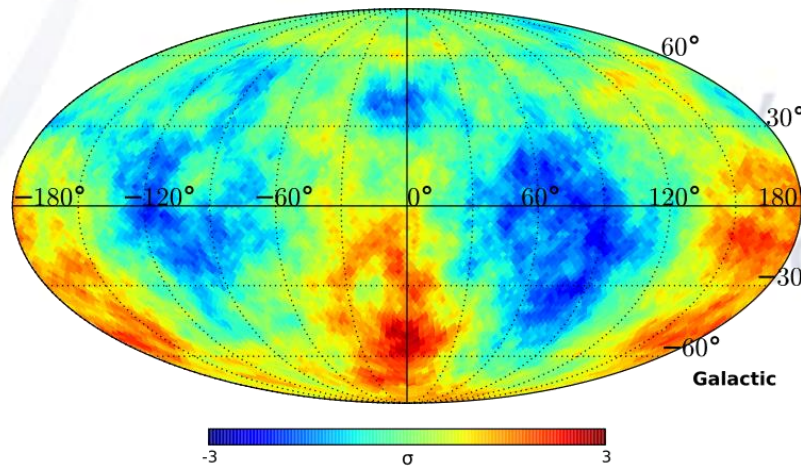
Raggio integrazione 10°



Raggio integrazione 30°

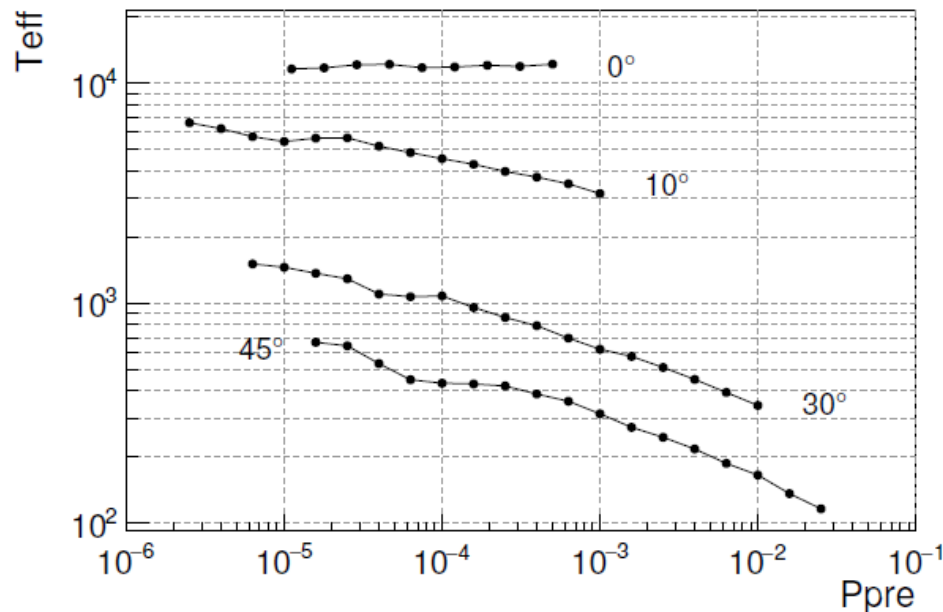


Raggio integrazione 45°



Numero di *trials* efficaci

- La ricerca delle anisotropie è eseguita in ogni direzione del cielo (pixel)
- Nel giudicare la rilevanza statistica di un risultato **dobbiamo tenere conto del grande numero di prove indipendenti eseguite**
 - Usando mappe composte di **bin indipendenti** il numero di prove (*trials*) è **uguale al numero di pixel**
 - Nelle mappe a **bin correlati** il numero di prove indipendenti eseguite è **minore del numero di pixel totali** e per la loro valutazione si fa ricorso ad una simulazione Monte Carlo (MC)



$$T_{\text{eff}} = \frac{\log(1-F)}{\log(1-P_{\text{pre}})}$$

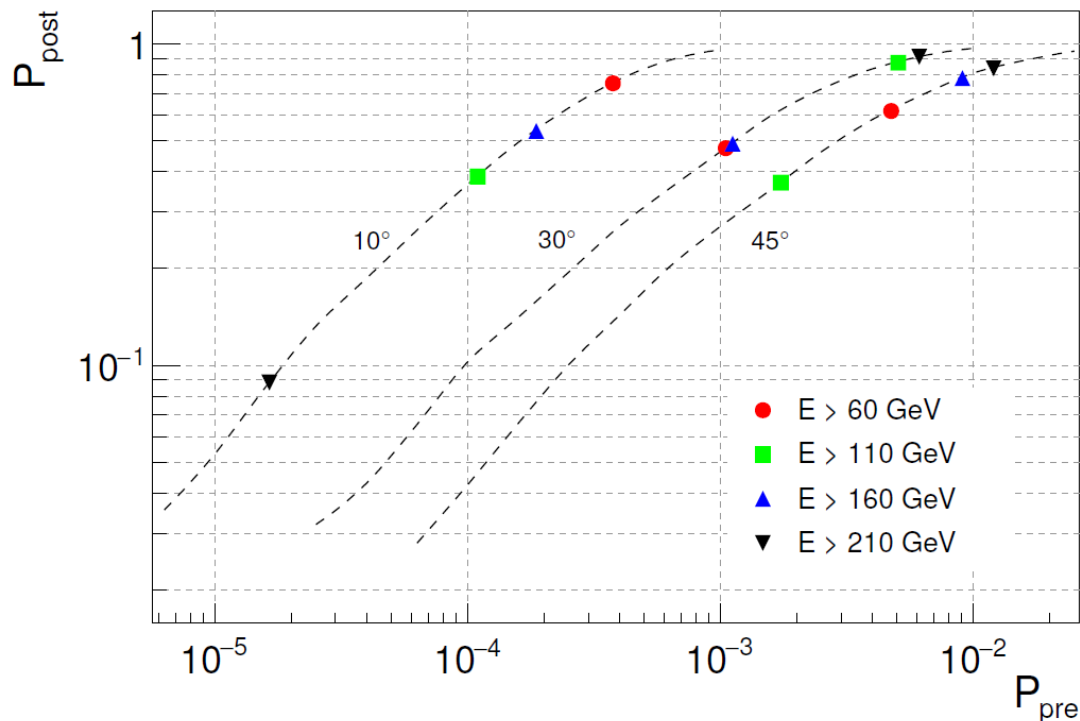
P_{pre} = *p-value* associato alla significatività pre-trial

F = frazione di mappe MC che mostra almeno un bin con significatività maggiore

Probabilità post-trials

Tenendo conto del numero di *trials* efficaci si può calcolare il *p-value* post-trials dei bin a significatività più alta di ciascuna mappa correlata

$$P_{\text{post}} = 1 - (1 - P_{\text{pre}})^{T_{\text{eff}}}$$



Tutte le **probabilità post-trials non sono significative** ($P_{\text{post}} \sim 0.1 - 1$)

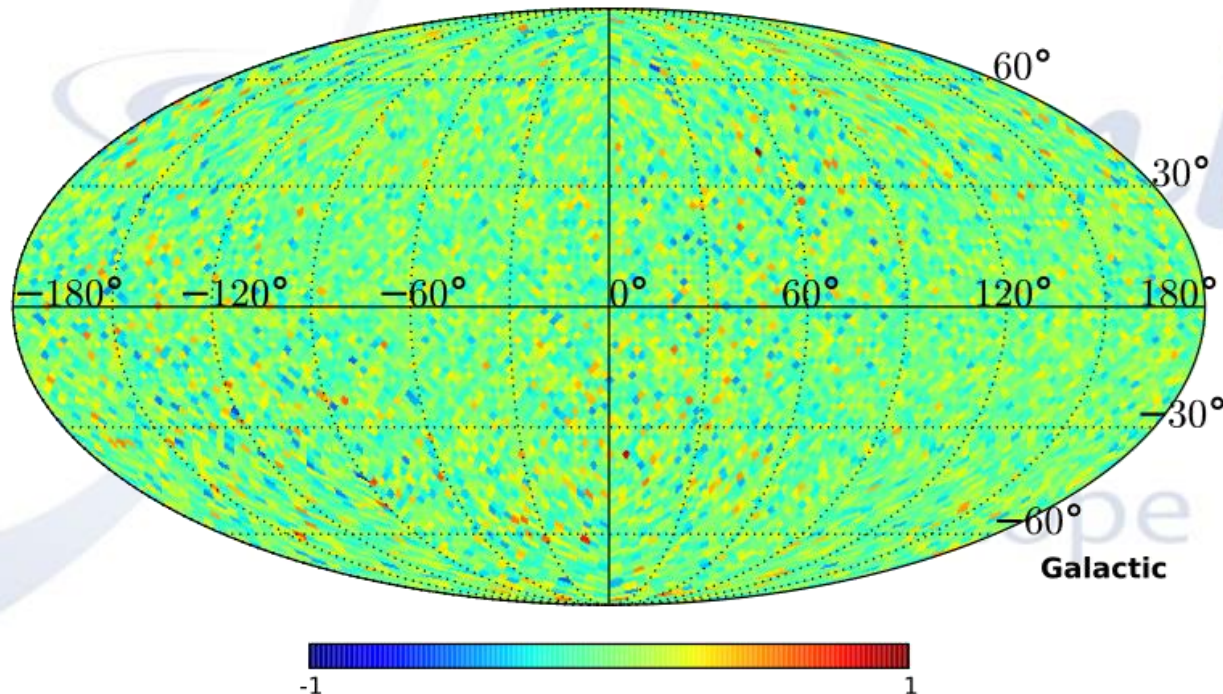
Mappa di fluttuazione

Il secondo metodo di analisi consiste nello **sviluppo in serie di armoniche sferiche della mappa di fluttuazione**

$$f_i = \frac{E_i}{\langle A_i \rangle} - 1$$

E_i = numero di eventi rivelati nel pixel i

$\langle A_i \rangle$ = numero di eventi attesi nel pixel i (media delle N_{maps} mappe isotrope prodotte)



Analisi in armoniche sferiche

- Le funzioni armoniche sferiche $Y_{\ell m}$ costituiscono un set completo e ortonormale sulla sfera unitaria. Ogni funzione quadrato-sommabile definita sulla sfera può essere espressa come serie di queste funzioni

$$f(\theta, \phi) = \sum_{-\infty}^{+\infty} \sum_{-\ell}^{+\ell} a_{\ell m} Y_{\ell m}(\theta, \phi)$$

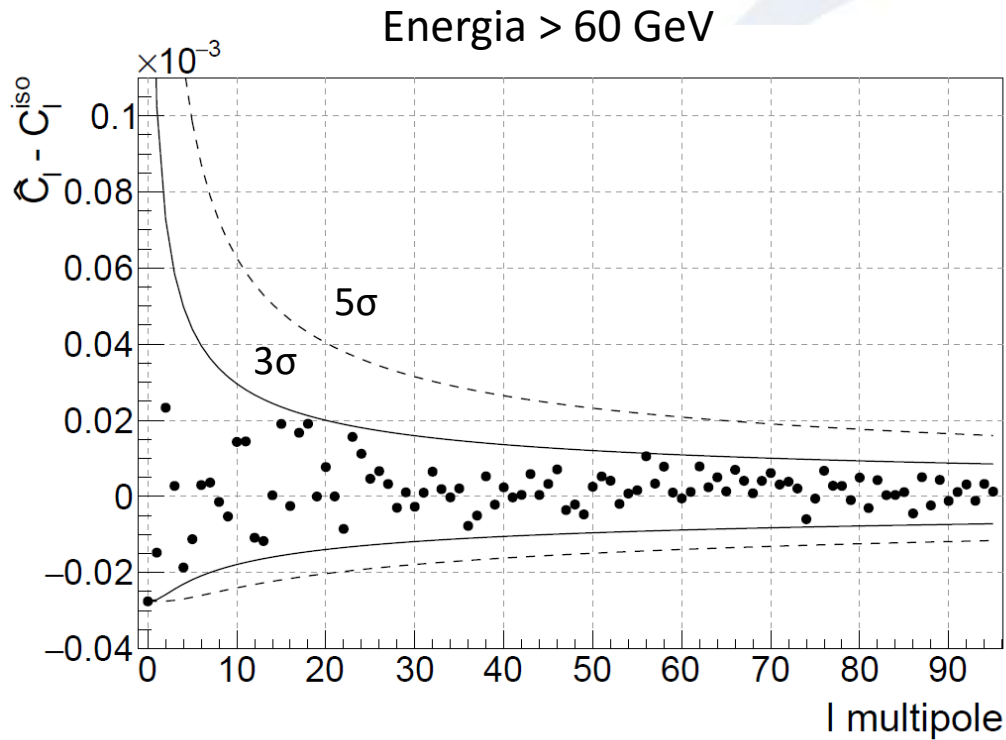
- I coefficienti $a_{\ell m}$ vengono combinati usati per valutare lo **spettro di potenza angolare**

$$\hat{C}_{\ell} = \frac{1}{2\ell + 1} \sum_m |\hat{a}_{\ell m}|^2$$

- Un incremento del coefficiente \hat{C}_{ℓ} rispetto al caso di isotropia corrisponde ad un'anisotropia alla **scala angolare di $180^{\circ}/\ell$**

Spettro di potenza angolare

L'analisi in armoniche sferiche è eseguita con il codice *anafast* fornito nel pacchetto HealPix



Sulle ordinate è stato sottratto il contributo dello spettro di potenza isotropo

$$C_l^{\text{iso}} = \frac{4\pi}{N_{\text{tot}}}$$

L'ipotesi da testare è la compatibilità con zero

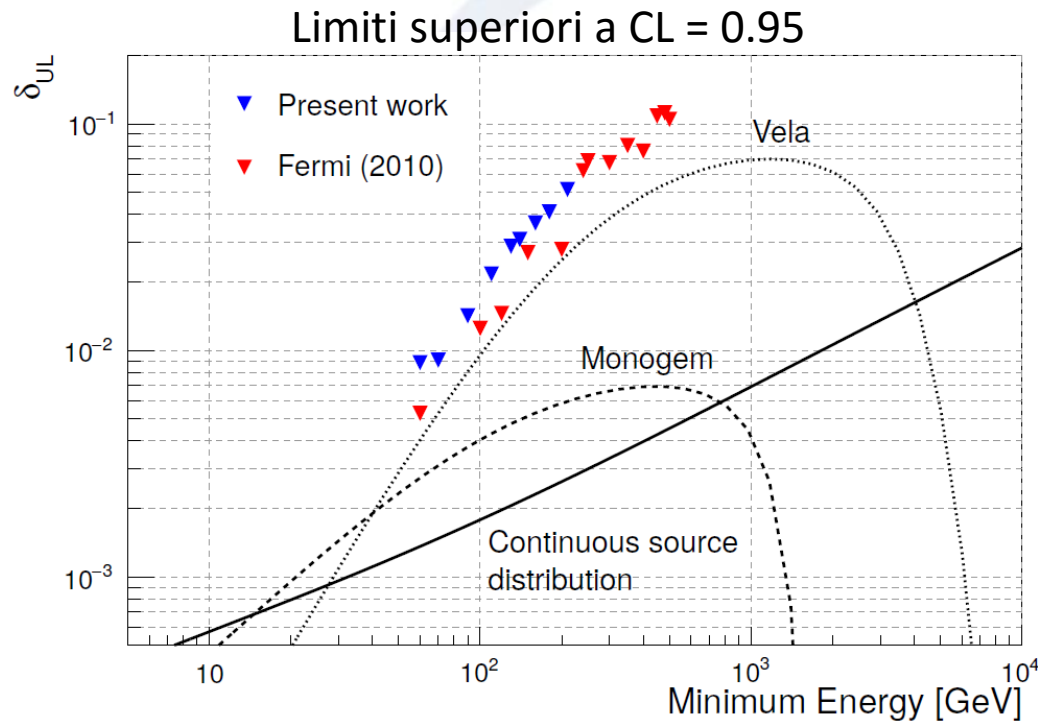
$$\hat{C}_l - C_l^{\text{iso}} = 0$$

Tutti i dati sono all'interno dell'intervallo di probabilità a 3 σ

I risultati sono consistenti con un **flusso di elettroni isotropo**

Limiti superiori sull'anisotropia di dipolo

Utilizzando il valore misurato del coefficiente dello spettro di potenza angolare \hat{C}_1 al variare dell'energia minima si possono porre dei **limiti superiori al grado di anisotropia di dipolo**



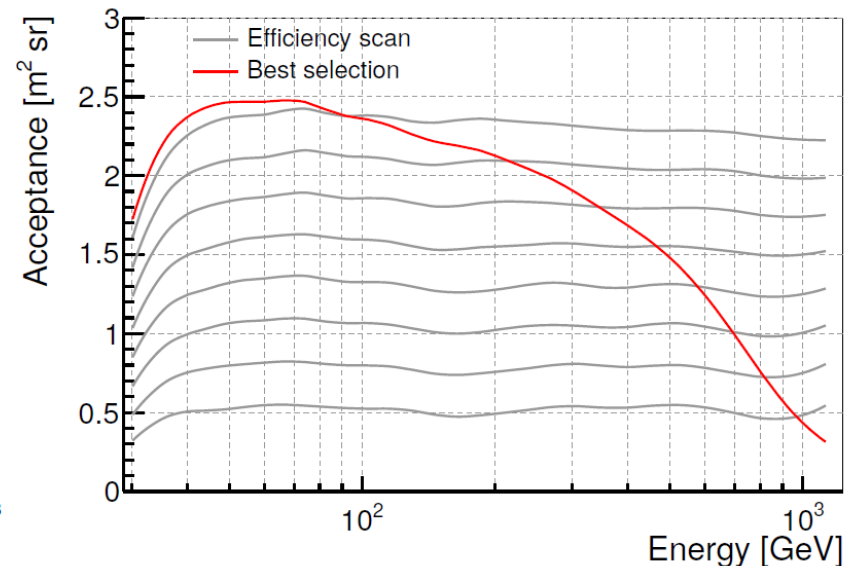
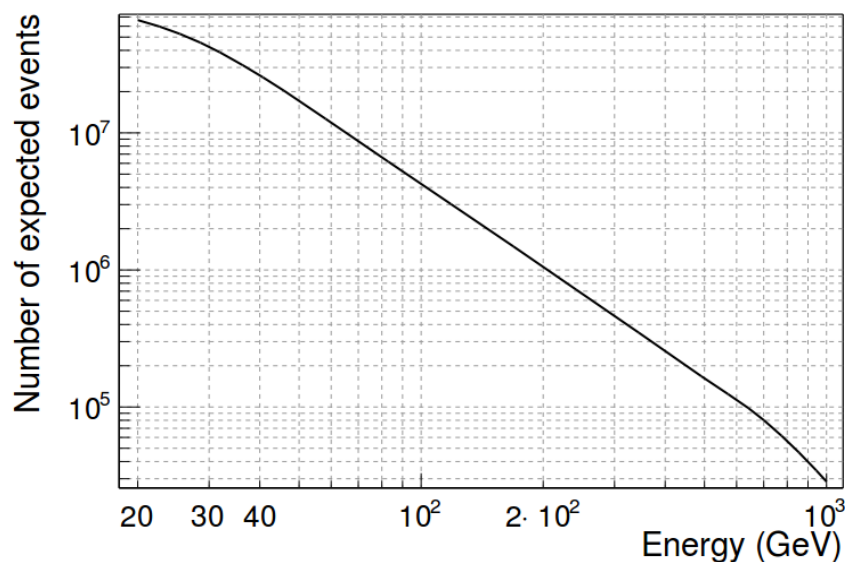
I risultati ottenuti con quattro mesi di dati sono in linea con quanto atteso riscaldando opportunamente i risultati precedenti (un anno di dati) in funzione della statistica

Studio di sensibilità prevista per *Fermi*

Per studiare il livello di sensibilità del telescopio *Fermi* previsto con sette anni di presa dati, occorre prima determinare il **numero totale di eventi** attesi in funzione dell'energia minima

Parametrizzazione del flusso di elettroni dato dal *fit* alle misure di *Fermi*

$$J(E) = 181 \left(\frac{E}{1 \text{ GeV}} \right)^{-3.05} \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ sr}^{-1}$$



In sette anni sono attesi **più di 10 milioni di elettroni sopra 60 GeV**

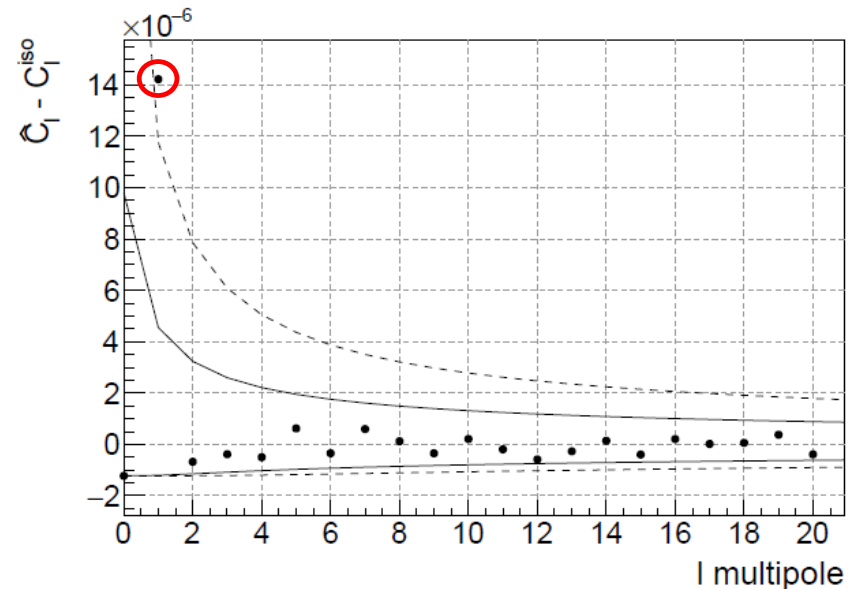
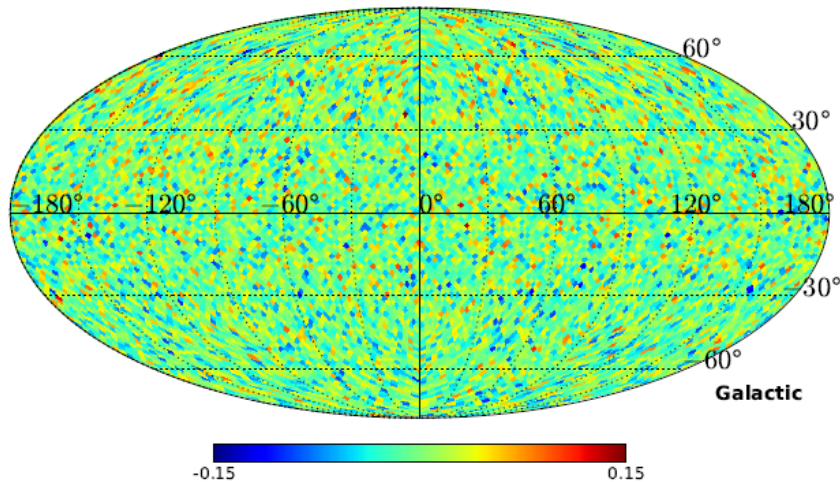
Simulazione mappe di fluttuazione

Per ogni energia minima di interesse, si generano e si analizzano **molteplici coppie di mappe di fluttuazione simulate** corrispondenti ad un flusso **isotropo** ed uno **dipolare**

Distribuzione dipolare $I(E) = \langle N(E) \rangle (1 + \delta(E) \cos \theta)$

Esempio

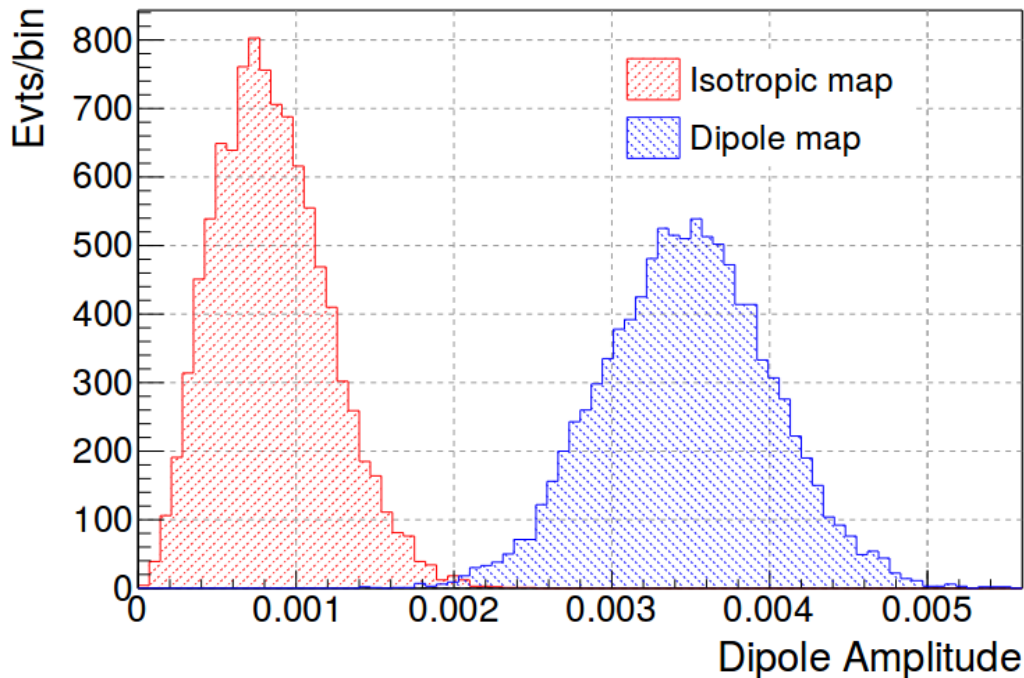
$\delta = 0.0034$ ed energia > 60 GeV



Distribuzioni dell'ampiezza di dipolo

Ad energia minima fissata, si riportano in un istogramma i valori di ampiezza di dipolo per le due serie di mappe

Energia > 60 GeV

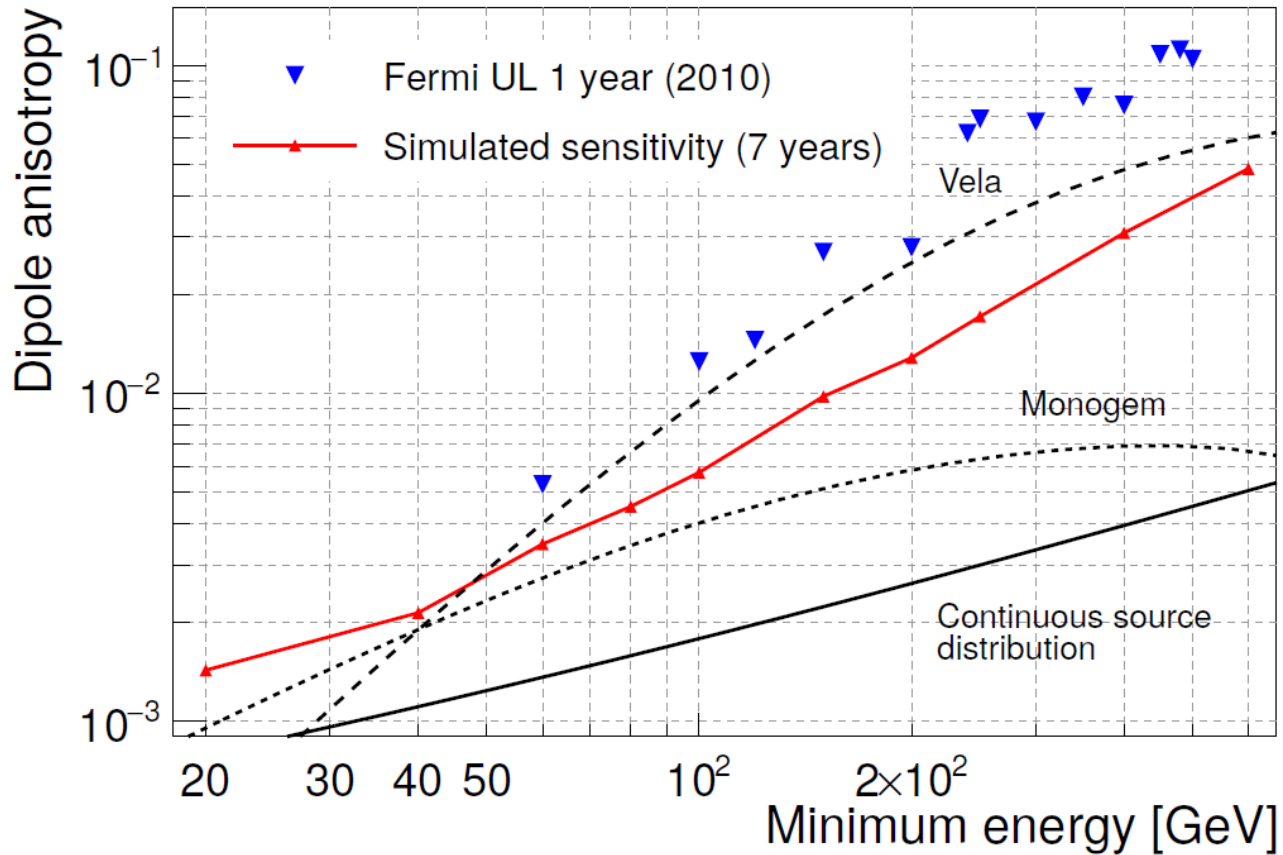


$$\hat{\delta} = 3 \sqrt{\frac{\hat{C}_1}{4\pi}}$$

Il valore di δ corrispondente alla sensibilità di *Fermi* è determinato in modo da soddisfare la condizione di osservabilità

$$\bar{\delta}_{\text{anis}}(E) > \bar{\delta}_{\text{iso}}(E) + 3 \sqrt{\sigma_{\text{iso}}^2(E) + \sigma_{\text{anis}}^2(E)}$$

Sensibilità prevista per *Fermi*



Con sette anni di presa dati **la sensibilità potrebbe essere sufficiente per osservare un'anisotropia di una sorgente come Vela**

Conclusioni

- Ho costruito un **set di dati simulato** con il quale testare le varie componenti della catena di analisi sviluppata per lo studio delle anisotropie
- L'utilizzo della **tecnica del *ray-tracing***, una delle differenze sostanziali rispetto all'analisi passata della collaborazione *Fermi*-LAT, ha permesso l'ottimizzazione di un taglio di selezione aggiuntivo per la **rimozione delle particelle secondarie**
- **I limiti al grado di anisotropia** ottenuti analizzando il campione di quattro mesi sono in linea con quanto atteso in base ai risultati precedenti (2010)
- Attraverso una simulazione Monte Carlo dedicata è stata valutata la **sensibilità prevista per Fermi con sette anni di presa dati**
- Il lavoro eseguito per questa tesi, insieme ai risultati dell'analisi finale sul *dataset* completo, saranno oggetto di una **pubblicazione da parte della collaborazione Fermi-LAT**, prevista nel corso del prossimo anno

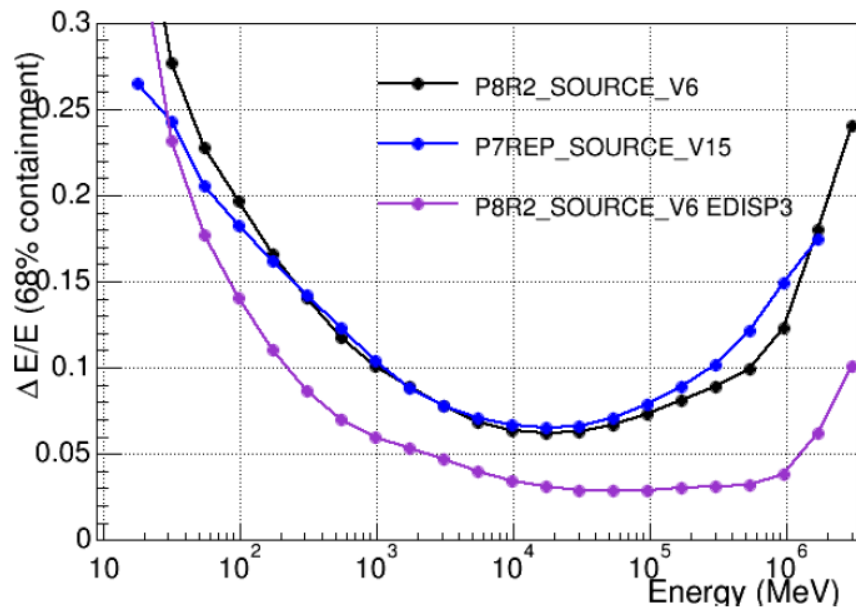


SLIDES DI BACKUP

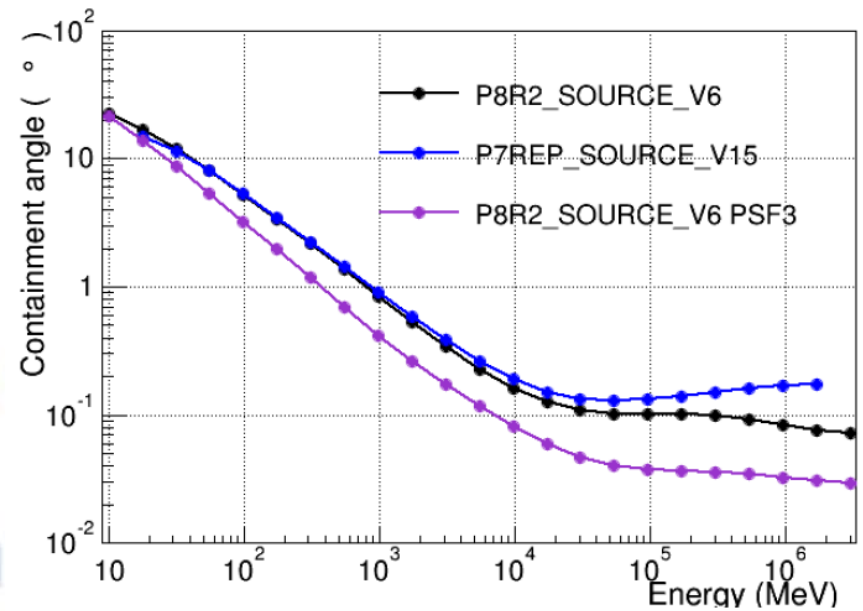
Gamma-ray
Space Telescope

Funzioni di risposta

Risoluzione in energia

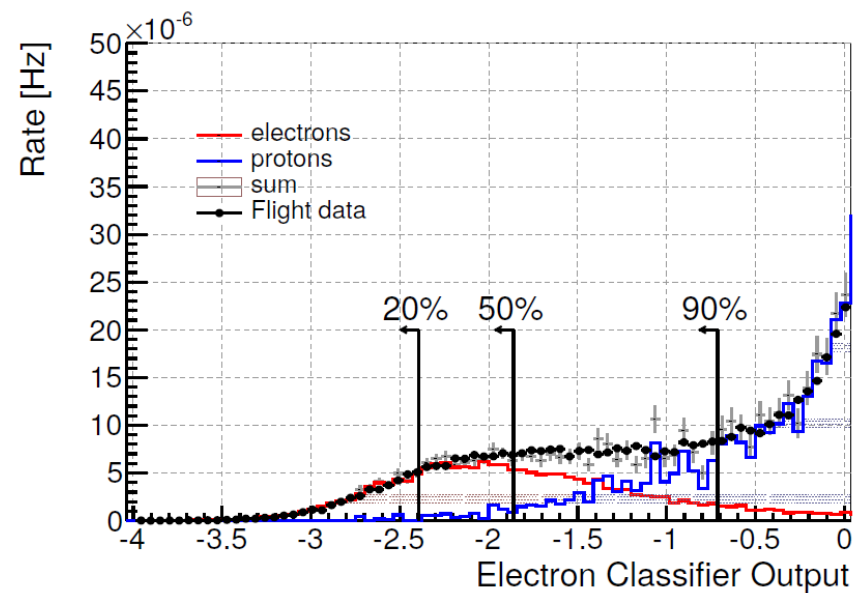
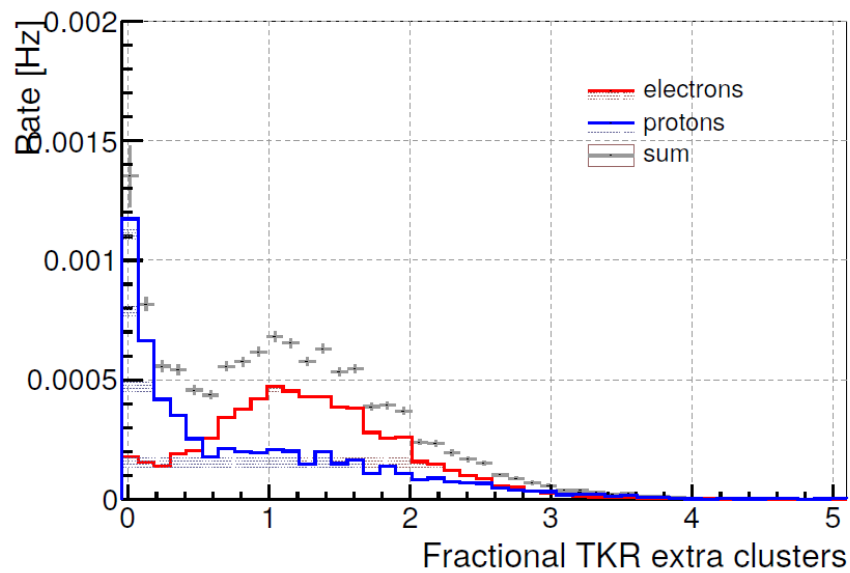
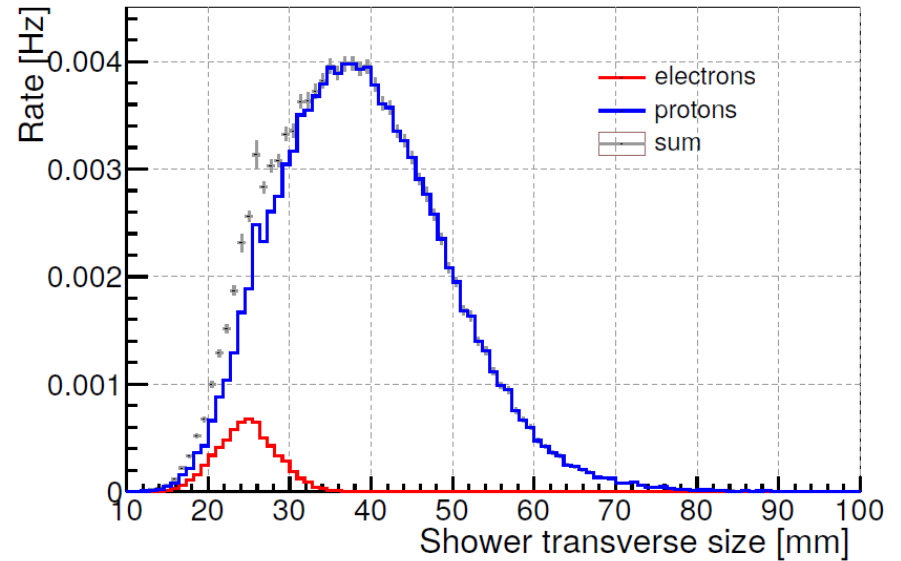
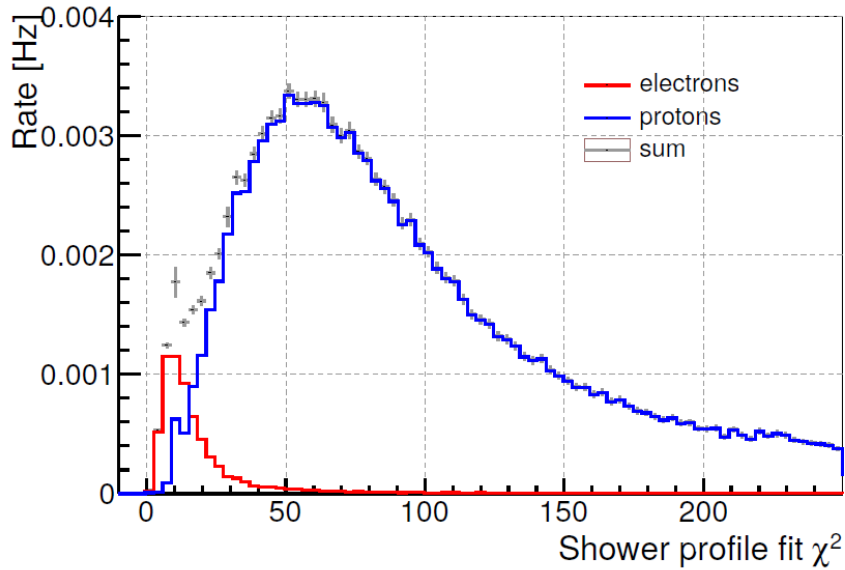


Risoluzione angolare

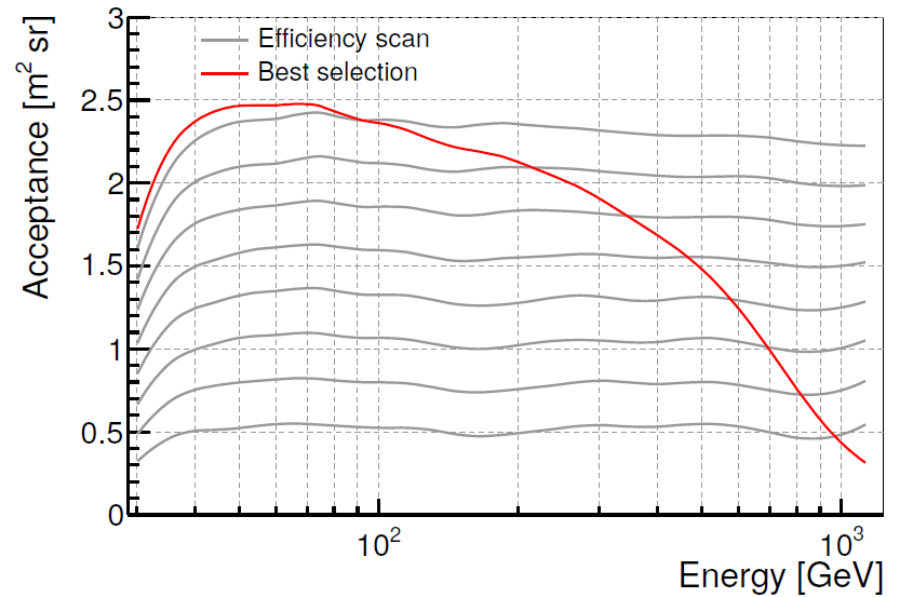
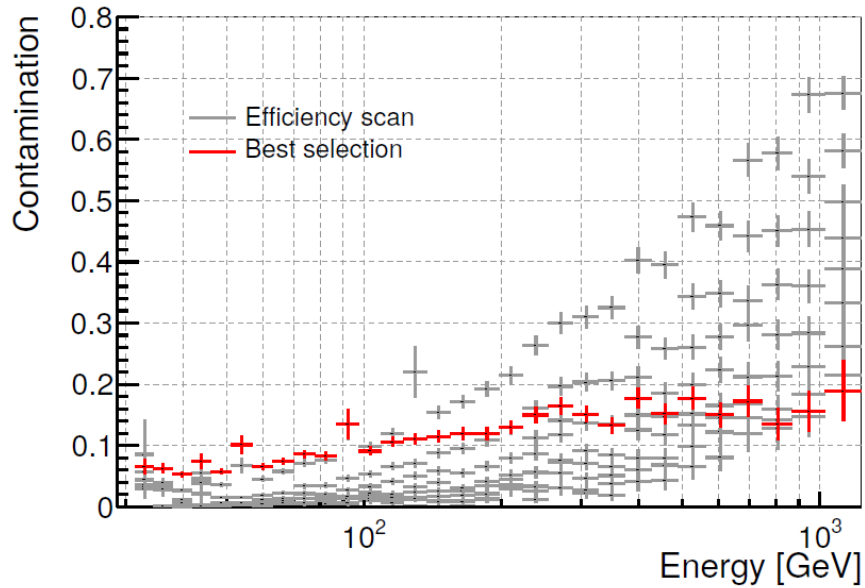


Space Telescope

Selezione degli eventi



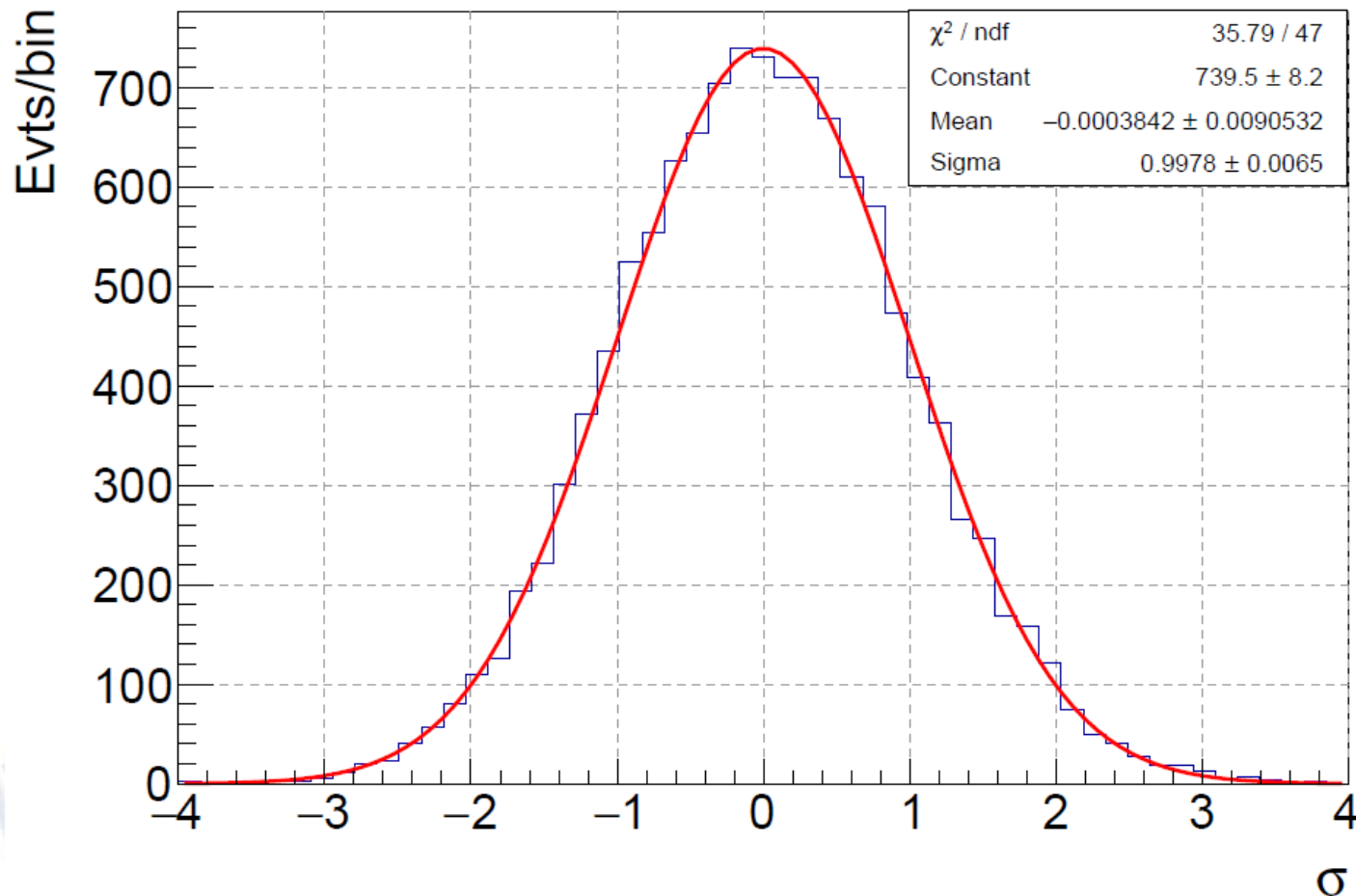
Accettanza e contaminazione



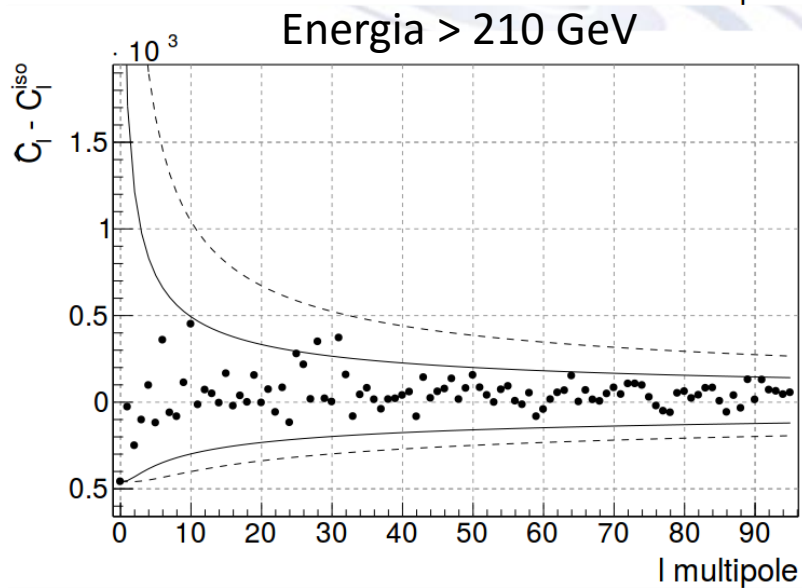
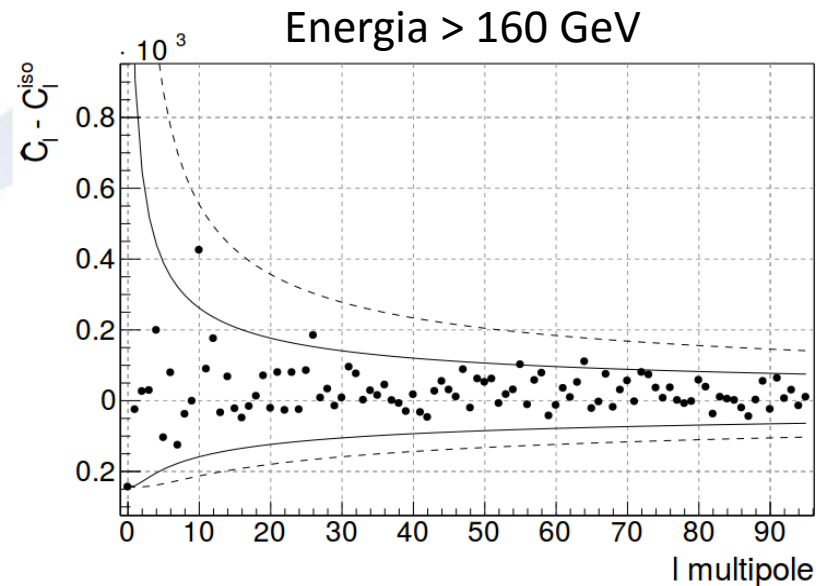
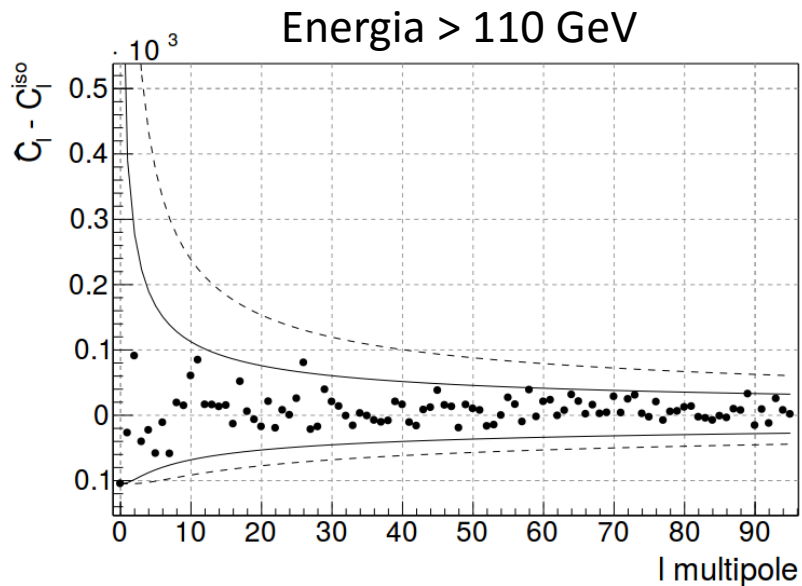
Space Telescope

Distribuzione valori significatività MC

Energia > 60 GeV, circa 2.6 milioni di eventi



Analisi in armoniche sferiche



- Le significatività non tengono conto del numero di prove effettuate nello sviluppo in multipoli
- Gli intervalli a 3σ e 5σ sono determinati in approssimazione gaussiana ma il numero di eventi per pixel non è sufficientemente elevato