

Misurazione dei raggi cosmici

Lo spessore dell'atmosfera terrestre è pari a circa 10 lunghezze di interazione per i protoni

- le particelle che arrivano sulla Terra hanno in media energia pari a meno di un millesimo di quella della particella iniziale
- lo sciame è distribuito su un'ampia superficie



E' certamente piu' conveniente misurare i raggi cosmici sopra l'atmosfera

per questo si usano esperimenti su

- palloni aereostatici
- satelliti
- (base spaziale)

Esperimenti su pallone

Svantaggi: volano al di sotto di alcuni g/cm^2 di atmosfera

Vantaggi: sono molto più economici degli esperimenti su satellite o base spaziale

CARATTERISTICHE:

1. durata del volo: alcuni giorni
2. altitudine: 30 km
3. peso: 4 tonnellate

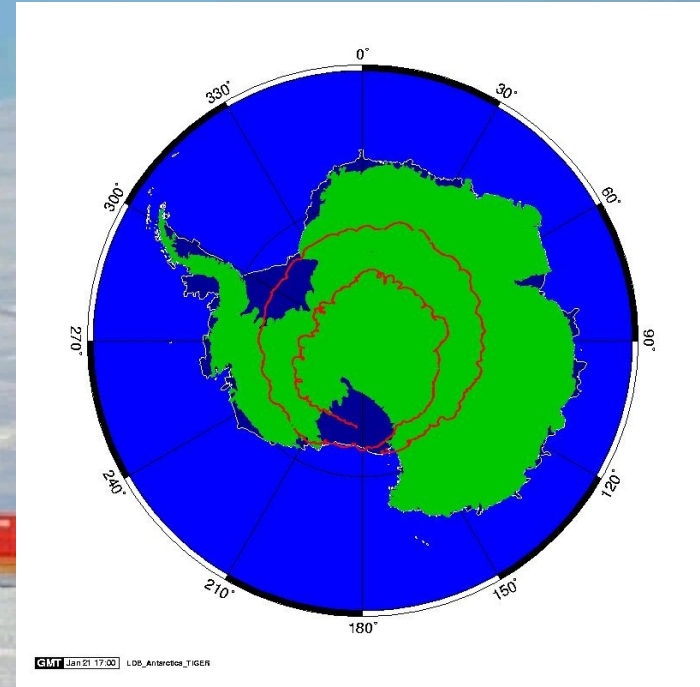


Per “spostare” i palloni si usano i venti di alta quota; sfruttando particolari inversioni di corrente, si può anche fare in modo che il pallone ritorni verso il luogo dal quale è stato lanciato.

Con voli della durata di una settimana si può far andare il pallone dall'Australia al Sud America, ma i voli di durata maggiore si ottengono in Antartide: in due settimane i palloni compiono l'intero giro della costa antartica.

I voli in Antartide presentano un importante vantaggio: l'altitudine è costante durante tutto il volo, in quanto non ci sono fluttuazioni giornaliere di temperatura e pressione.

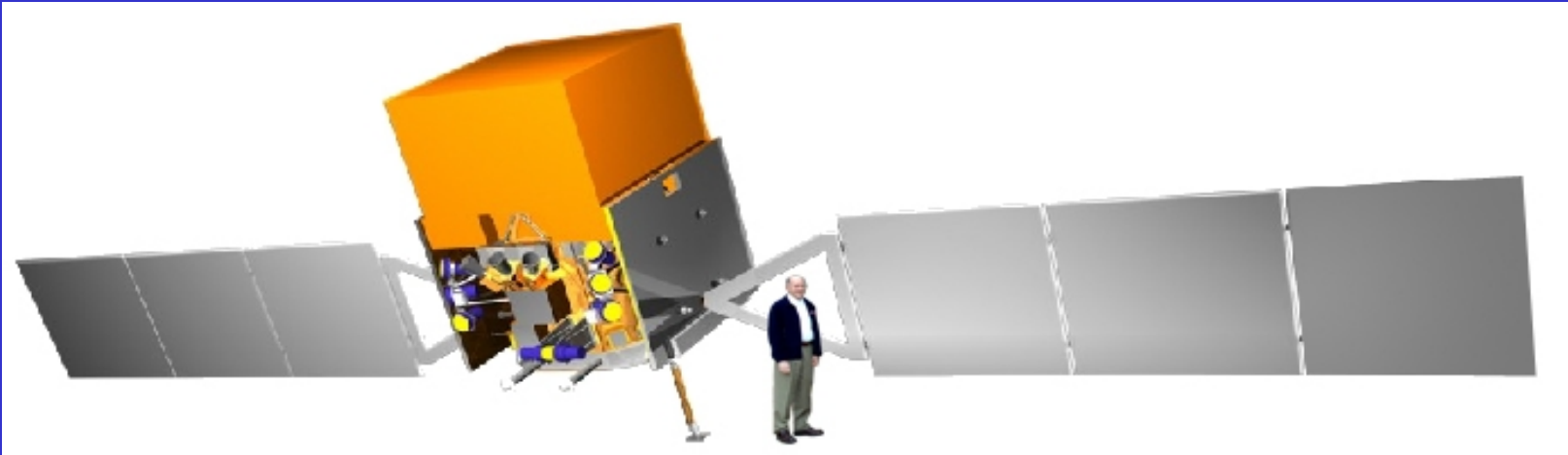
Esperimenti su pallone



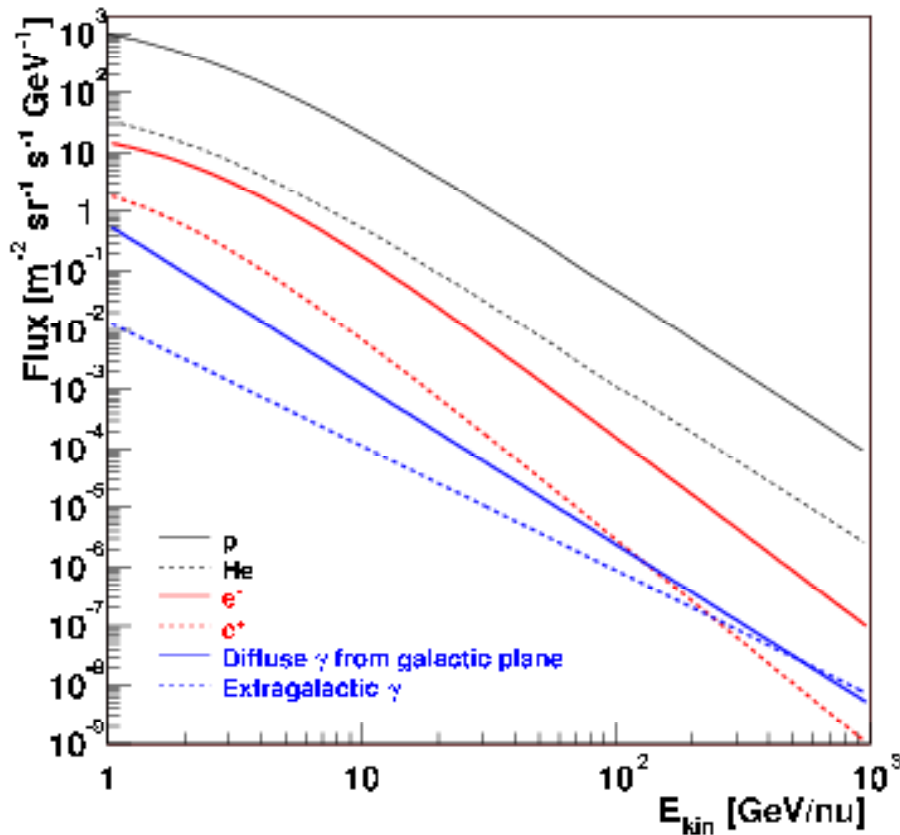
Esperimenti su satellite e base spaziale

CARATTERISTICHE:

1. durata del volo: fino ad alcuni anni
2. altitudine: 500 km
3. peso: 4 tonnellate
4. potenza: 500 – 2000 W !!!!!



I raggi cosmici



Differenti componenti nei raggi cosmici in un intervallo di energia accessibile ai futuri esperimenti su pallone e su satellite

- 1 elettrone ogni 100 protoni
- 1 positrone ogni 1.000 – 10.000 protoni
- 1 nucleo di He ogni 10 – 100 protoni
- 1 fotone ogni 1000 protoni

I raggi cosmici

LO SPETTRO DEGLI ELETTRONI E POSITRONI

Il flusso degli elettroni al top dell'atmosfera è stato misurato fino ad energie di qualche decina di GeV, mentre quello di positroni fino a 10 GeV.

Gli elettroni dei raggi cosmici sono particelle primarie, mentre i positroni derivano dalle interazioni degli elettroni primari coi nuclei durante la propagazione nella galassia.

I processi di perdita di energia di elettroni e positroni sono molto differenti da quelli dei nuclei; essi perdono energia per

- radiazione di sincrotrone nel campo magnetico galattico
- scattering Compton inverso nei campi di radiazione
- bremsstrahlung sulla materia interstellare

⇒ La forma dello spettro e il flusso di elettroni e positroni fornisce quindi informazioni nuove e complementari sullo spazio interstellare.

Il cut-off geomagnetico

IL CAMPO MAGNETICO TERRESTRE, curvando la traiettoria delle particelle, impedisce a quelle con bassa energia di raggiungere l'atmosfera terrestre.

Il flusso di raggi cosmici al top dell'atmosfera è quindi non isotropo e dipende dalla posizione del detector.

Per particelle che incidono radialmente verso il centro del dipolo magnetico, il valore minimo di rigidità necessario a raggiungere una distanza r dal centro del dipolo è:

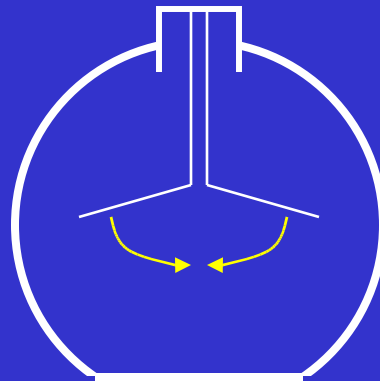
$$R_{\min} = 59.4 \text{ GV} \times \left(\frac{r_{\oplus}}{r} \right) \cos^4(\lambda_B/4)$$

dove λ_B è la latitudine magnetica, $59.4 \text{ GV} \times M / (2r_{\oplus}^2)$ è la rigidità di una particella in orbita circolare di raggio $r_{\oplus}$ nel piano equatoriale del campo di dipolo, ed M è il momento di dipolo terrestre ($M = 8.1 \cdot 10^{25} \text{ G cm}^3$).

La rigidità minima per permettere ad una particella di penetrare la superficie terrestre è di 14.9 GV all'equatore magnetico, e di 0.93 GV ad una latitudine magnetica di 60° .

Rivelatori di raggi cosmici

Il PRIM O rivelatore per raggi cosmici che e' "volato", e' stato l'elettroscopio usato da Hess proprio durante la scoperta dei raggi cosmici:



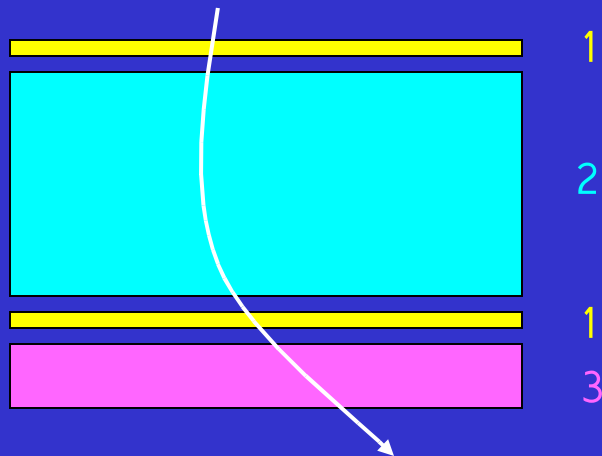
egli scoprì che, a differenza di quanto atteso, le foglioline d'oro del suo strumento si riavvicinavano molto più rapidamente quando era ad una grande altezza rispetto a terra

⇒ se il livello di ionizzazione cresce con l'altitudine, i raggi cosmici (che non si chiamavano ancora così) devono necessariamente venire da sopra l'atmosfera.

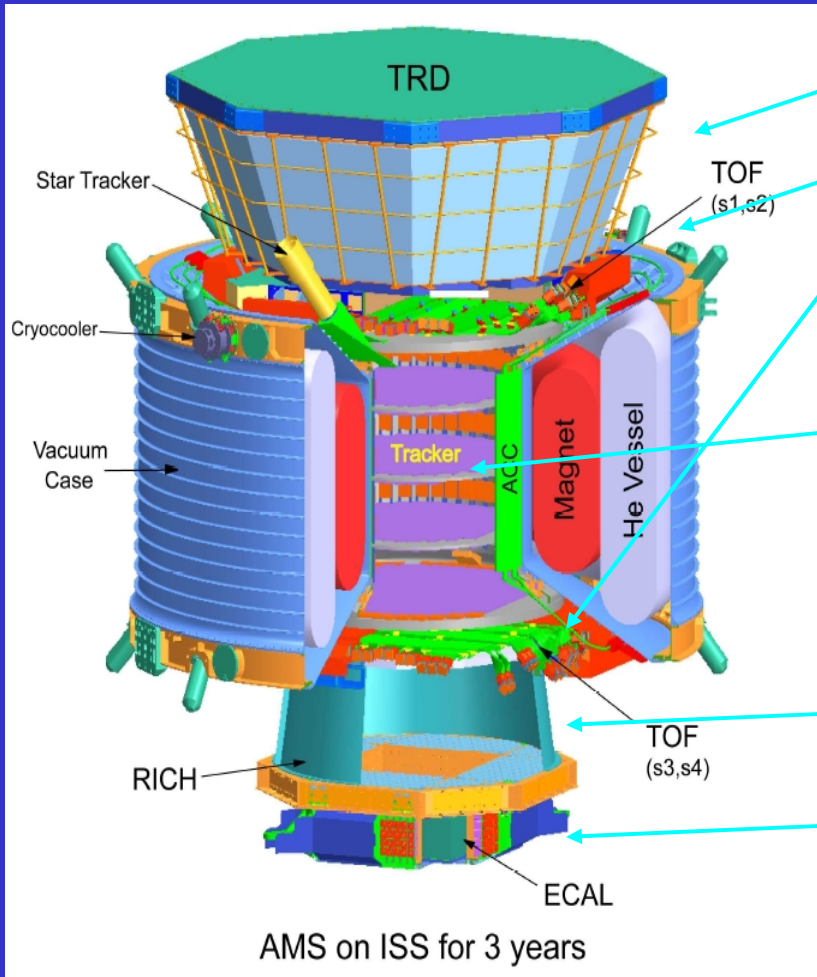
Rivelatori di raggi cosmici

Tutti i rivelatori di raggi cosmici sono costruiti seguendo uno schema generale comune; generalmente sono composti dai seguenti sotto-rivelatori:

1. un rivelatore costituito da due piani “distanti” che misura la posizione ed il tempo del passaggio della particella $\Rightarrow$ misura della **velocita`**;
2. un rivelatore in campo magnetico che traccia la traiettoria curva della particella $\Rightarrow$ misura della **rigidita`**;
3. un rivelatore ad alto Z nel quale le particelle depositano la loro energia $\Rightarrow$ misura dell'**energia**.



Rivelatori di raggi cosmici



rivelatore a radiazione di transizione

misuratore del tempo di volo

tracciatore in campo magnetico

rivelatore di luce Cherenkov

calorimetro elettromagnetico

Rivelatori di raggi cosmici

MISURA DELL'IMPULSO

La traiettoria di una particella carica che attraversa un campo magnetico è incurvata proporzionalmente al rapporto tra la carica e il suo impulso. In un campo uniforme la dinamica è determinata dalla RIGIDITÀ $R = pc/ze$

R ha le dimensioni di un'energia diviso una carica elettrica e solitamente si misura in GV.

Se ϑ è l'angolo formato dal vettore velocità della particella incidente col campo magnetico $\mathbf{B}$, il raggio di curvatura della traiettoria percorsa dalla particella è

$$r = (R \sin \vartheta) / (B c) = (\gamma m_0 v) / (ze) \cdot (\sin \vartheta / B)$$

Cio' che si misura in genere è la sagitta S della linea curva che rappresenta la traiettoria della particella (L è la lunghezza della traiettoria). Nell'approssimazione $S \ll r$ si può scrivere:

$$S = r \left(1 - \sqrt{1 - (L/2r)^2} \right) \cong \frac{L^2}{8r}$$

Rivelatori di raggi cosmici

poichè vale la relazione $pc = 0.3 Br$, dove p è l'impulso relativistico espresso in GeV /c, B è l'intensità del campo magnetico espressa in Tesla, ed r è il raggio di curvatura in metri, troviamo

$$S \propto \frac{BL^2}{pc}$$

$$\Rightarrow R = r \frac{Bc}{\sin \theta} \cong \frac{L^2}{8S} \frac{Bc}{\sin \theta} \quad \Rightarrow \quad \frac{p}{ze} \cong \frac{1}{8} \frac{BL^2}{S \sin \theta}$$

per cui vediamo che, a parità di risoluzione spaziale nella misura della sagitta, più è alto il potere di analisi BL^2 , maggiore è l'impulso massimo che si può misurare.

Rivelatori di raggi cosmici

MISURA DELLA CARICA

Il valore della carica elettrica dei nuclei viene misurata dall'energia persa per unita` di percorso, infatti per le particelle molto pesanti l'espressione dell'energia persa in media per ionizzazione e` data dalla formula di Bethe-Bloch, quindi

$$\frac{dE}{dx} \propto Z^2$$

dunque per particelle al minimo di ionizzazione (o ancora piu` energetiche) la misura della perdita di energia e` essenzialmente una misura del valore assoluto della carica elettrica.

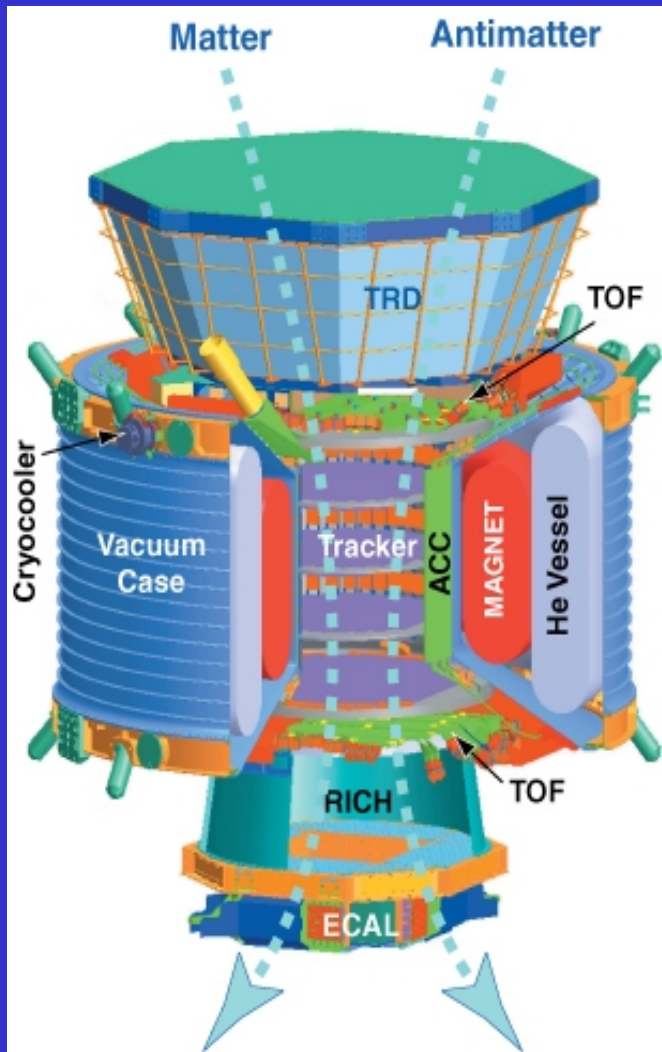
Rivelatori di raggi cosmici

MISURA DELLA MASSA

Conoscendo $dE/dx(z, \beta)$ e $R(m_0, z, \beta)$ rimane come sola incognita m_0 che può venire ricavata con una misura di β con il sistema del tempo di volo.

Il sistema di riconoscimento della particella è così completo.

Rivelatori di raggi cosmici



300,000 channels of electronics $\Delta t = 100 \text{ ps}$, $\Delta x = 10 \mu$

0.3 TeV	e^-	e^+	P	$\bar{\text{He}}$	γ
TRD					
TOF					
Tracker					
RICH					
Calorimeter					

L'esperimento EGRET

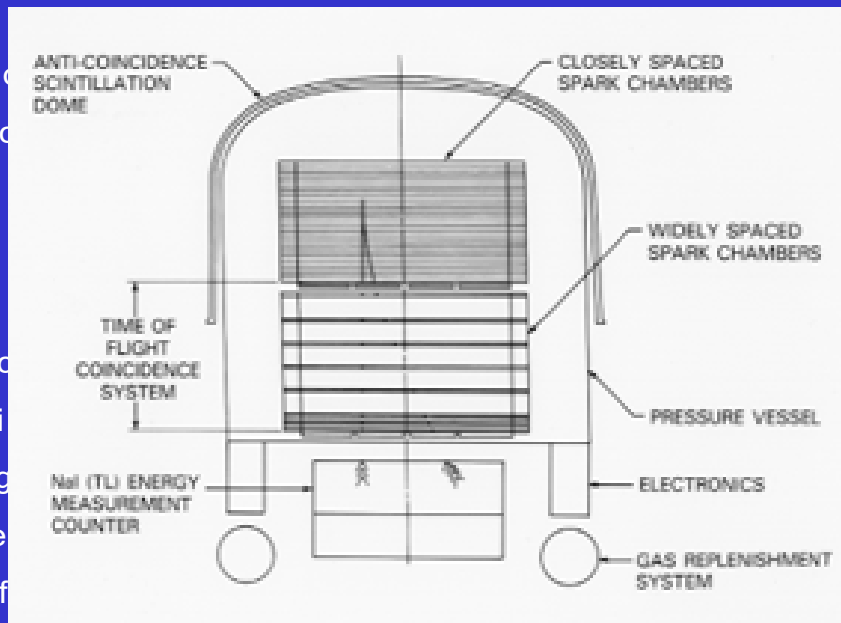
Energetic Gamma-Ray Experiment Telescope

Obiettivi scientifici e Scoperte

I principali obiettivi scientifici di EGRET sono:
gamma in tutto il cielo
alta energia.

Le maggiori scoperte di EGRET sono:
attive classificate da
gamma. EGRET ha ri
flares nella scala dei g
EGRET ha rivelato le
cui sono stati emessi f

Grazie alla sua efficiente reiezione del fondo, EGRET ha ottenuto la prima mappa di emissione diffusa di raggi gamma della Via Lattea, emissione che è associata con l'interazione dei raggi cosmici con il gas interstellare, e fornisce una misura realistica dell'emissione isotropica diffusa extragalattica.



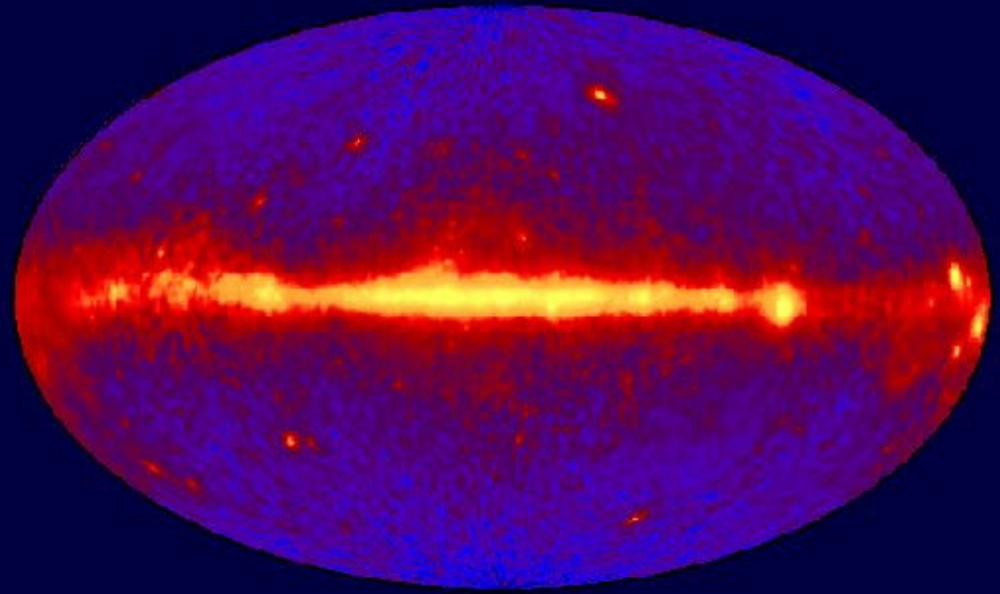
are le emissioni di raggi
missione di raggi gamma di

ZA Rs, un tipo di galassie
evoli emettitori di raggi
variazione nei flussi, con

ys-bursts, incluso un caso in
un burst a bassa energia.

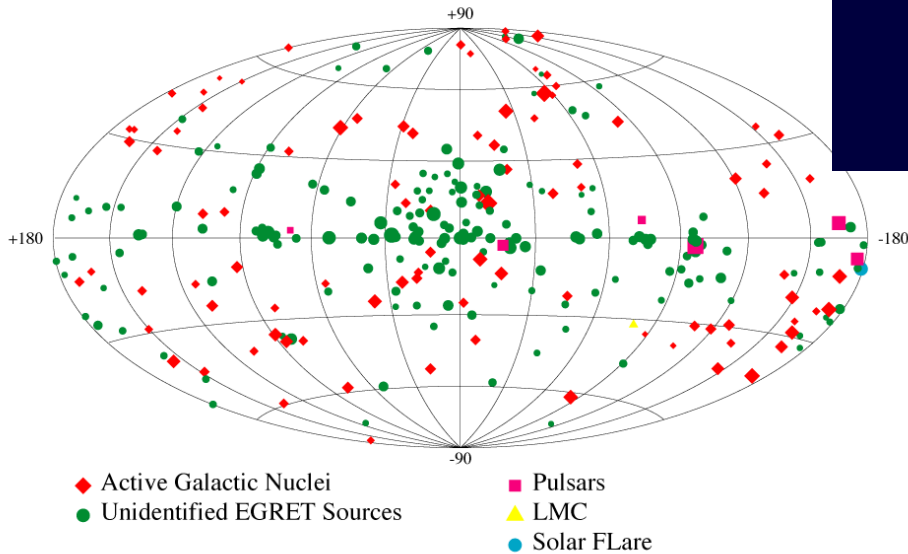
L'esperimento EGRET

EGRET All-Sky Gamma-Ray Survey Above 100 MeV



Third EGRET Catalog

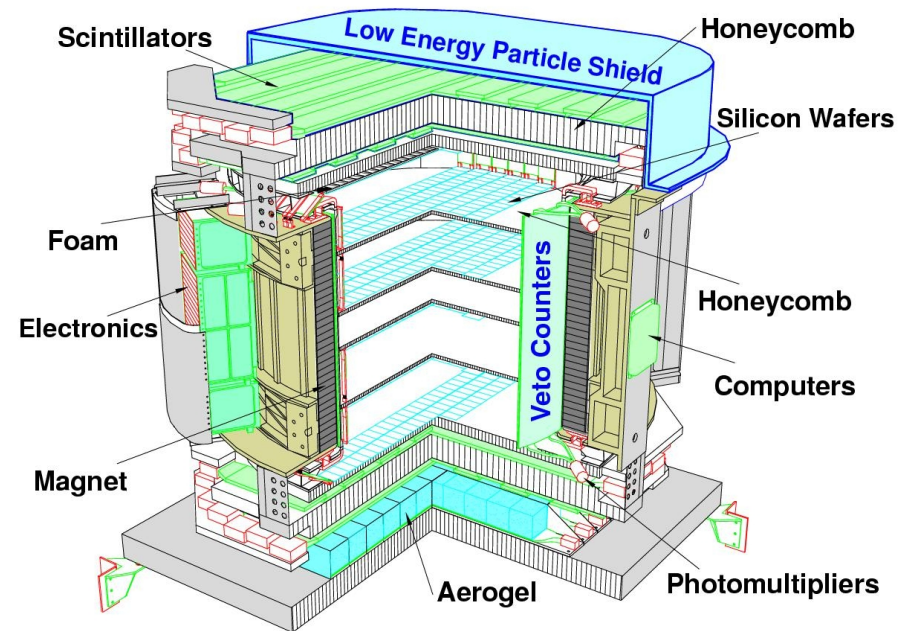
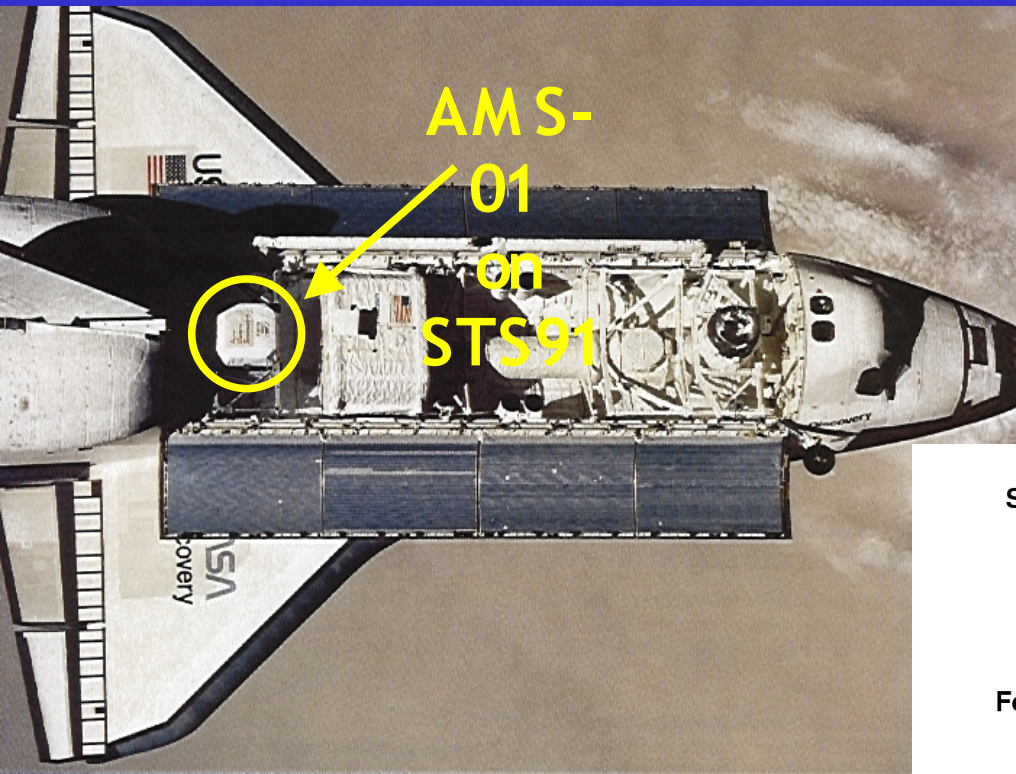
$E > 100$ MeV



L'esperimento AMS-01

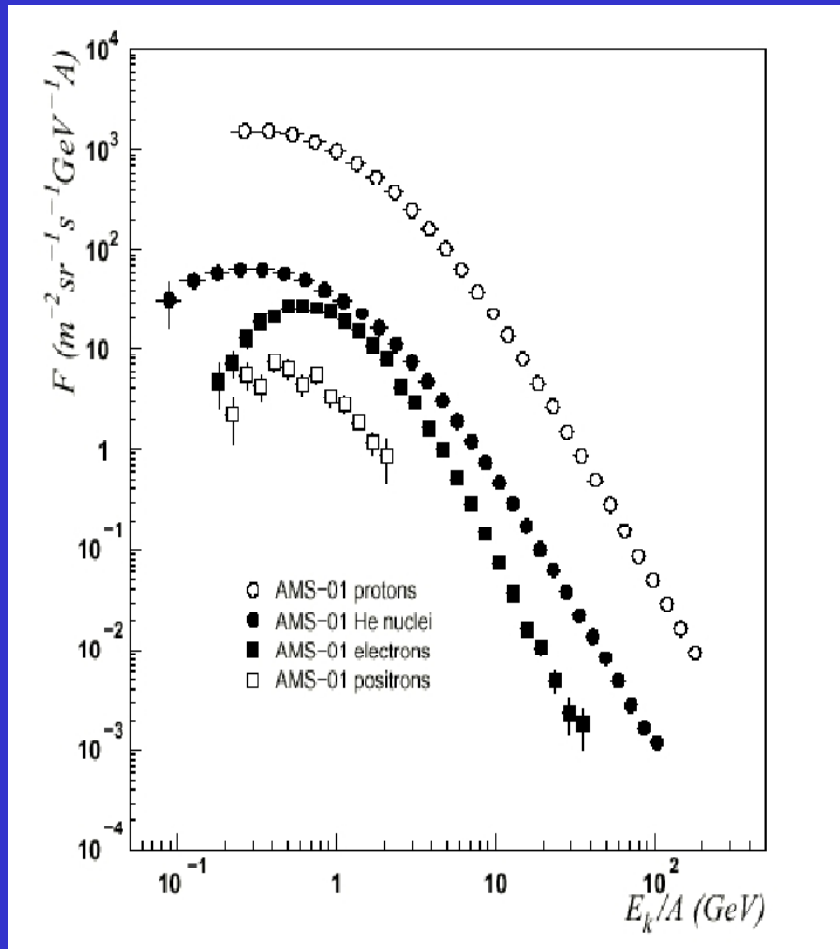
- AMS-01 è stato a bordo dello shuttle Discovery durante un volo di dieci giorni nel Giugno 1998
- L'orbita dello shuttle era ad una altitudine di circa 380 km, ha coperto tutte le longitudini e le latitudini in un intervallo tra -51.7 e 51.7 gradi
- I suoi strumenti sono stati operativi per 180 ore, ed hanno collezionato oltre 100 milioni di eventi nell'intervallo di energia tra 0.1 e 200 GeV
- Questa missione ha permesso di fare un'accurata misura dei flussi di tutte le particelle leggere (fino all'elio) nei raggi cosmici; i risultati pubblicati sono suddivisi in:
 - antimateria cosmologica
 - flussi di protoni
 - flussi di elettroni e positroni
 - flussi di He

L'esperimento AMS-01



Risultati di AMS-01

Spettri di raggi cosmici primari



Lo spettro differenziale dei **protoni** e' stato fittato con una legge di potenza in rigidita' per $R > 10$ GV :

$$\Phi(R) = \Phi_0 R^{-\gamma}$$

con

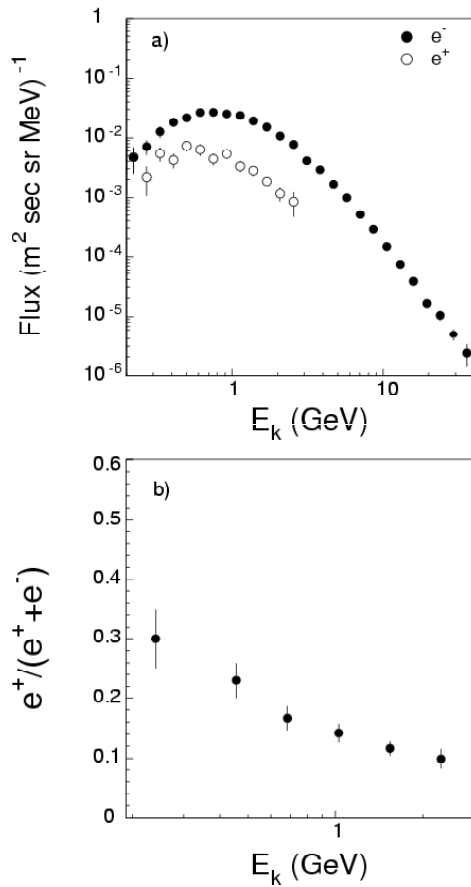
$$\gamma = 2.79 \pm 0.012 \text{ (fit)} \pm 0.019 \text{ (sys)}$$

Lo spettro differenziale dei **nuclei di He** e' stato fittato per $20 < R < 200$ GV con

$$\gamma = 2.74 \pm 0.010 \text{ (stat)} \pm 0.016$$

(sys)

Risultati di AMS-01



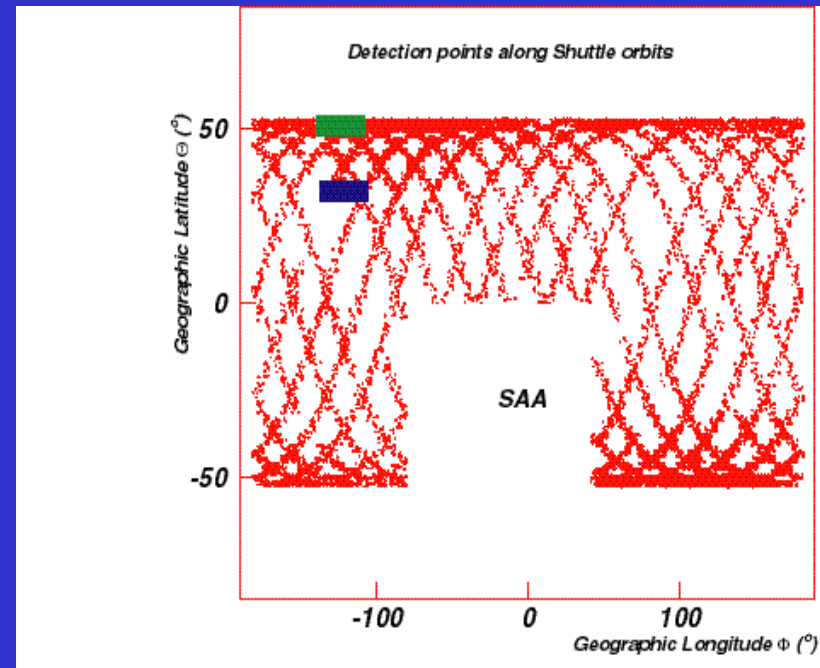
Flussi misurati di elettroni e positroni primari

Frazione di positroni:
e' evidente che gli elettroni sono
predominanti rispetto ai positroni

Risultati di AMS-01

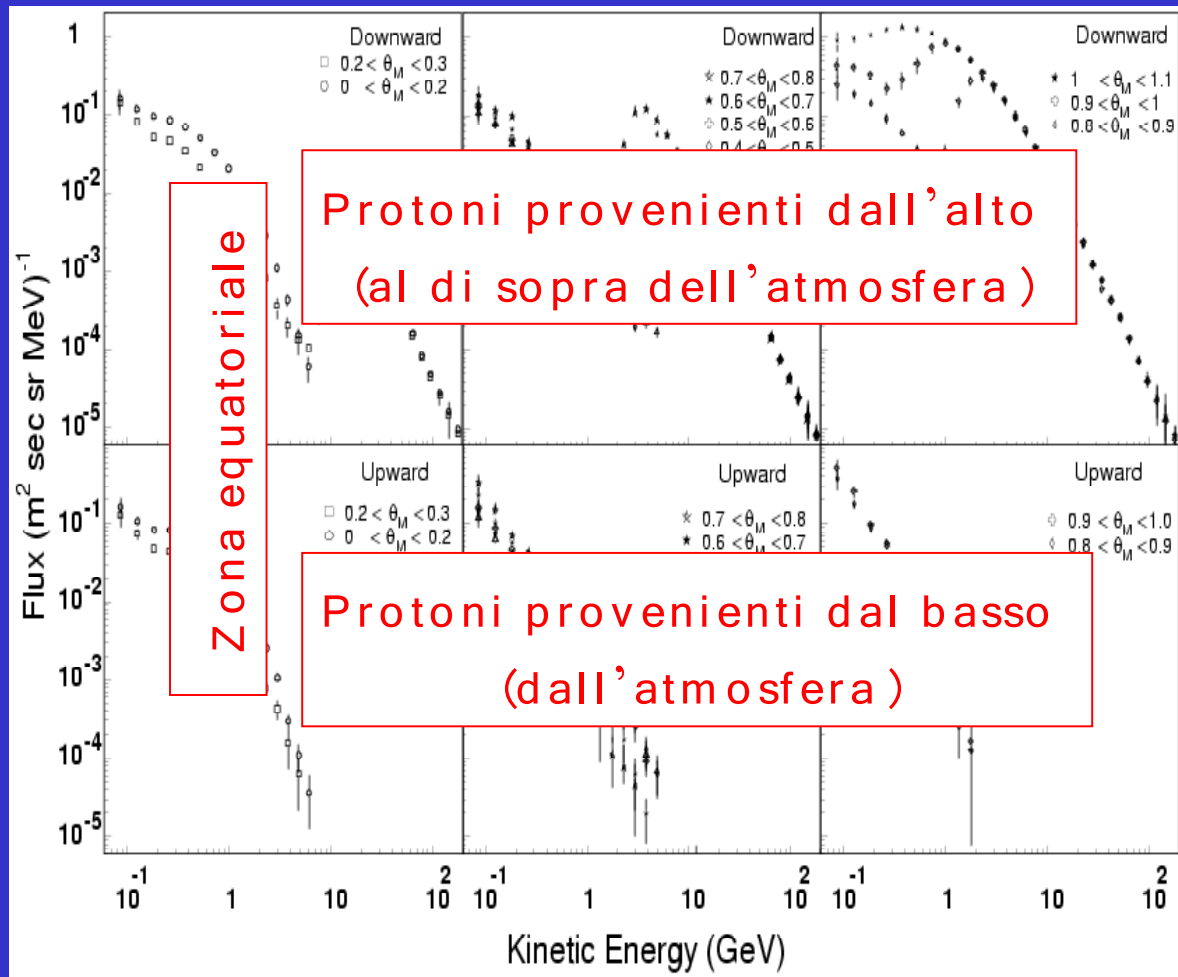
L'ampio intervallo di coordinate geomagnetiche raggiunte da AMS-01 ha permesso una precisa misura della dipendenza della componente secondaria nei raggi cosmici dal campo geomagnetico:

- Il campo geomagnetico costituisce una sorta di “filtro” per le particelle primarie di bassa energia: esse possono penetrare solo nelle regioni permesse dalla loro carica, dall'impulso e dalla direzione d'incidenza.
- D'altro canto il campo geomagnetico può rappresentare una “trappola” per le particelle secondarie prodotte nell'atmosfera.



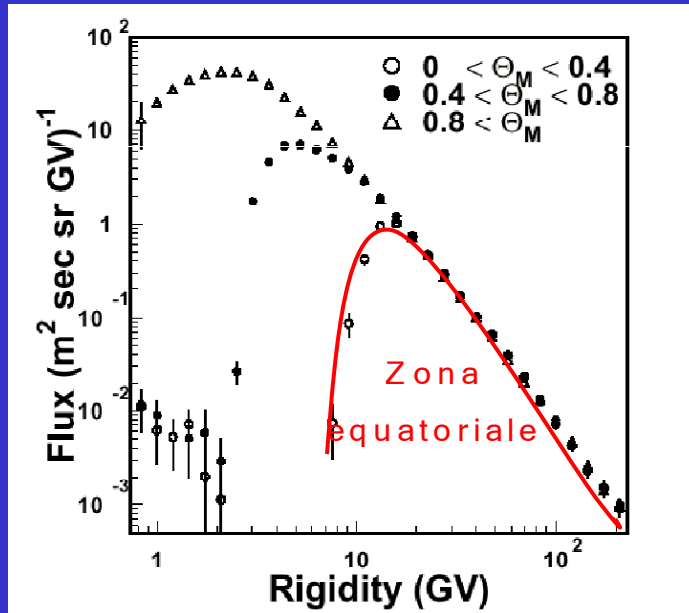
Risultati di AMS-01

Flussi di protoni provenienti dall'alto e dal basso a diverse latitudini geomagnetiche:



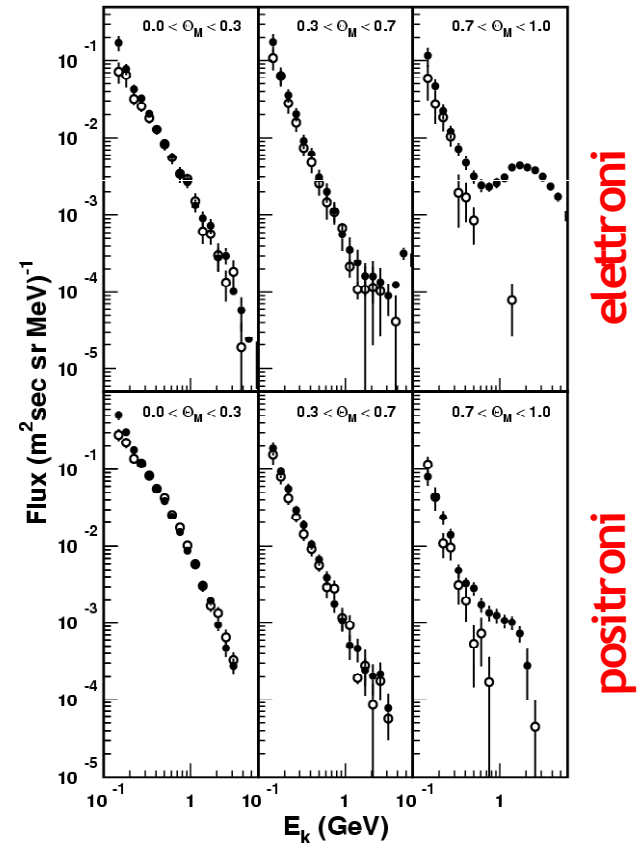
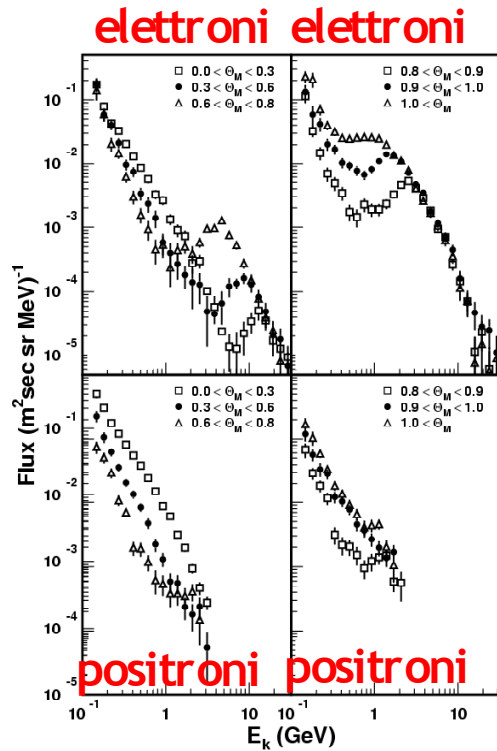
- per piccoli valori della latitudine (cioè nella regione equatoriale) la componente primaria è attenuata a basse energie ($R < 10 \text{ GV}$) a causa del campo magnetico terrestre
- il valore del cut-off geomagnetico diminuisce all'aumentare della latitudine
- la parte di spettro sotto al cut-off geomagnetico è uguale per protoni provenienti dall'alto e dal basso; si tratta di particelle intrappolate nel campo magnetico

Risultati di AMS-01



Flussi di nuclei di He per
diverse latitudini
geomagnetiche

Risultati di AMS-01



Risultati di AMS-01

La ricerca dei **nuclei di anti-He** è stata fatta ricostruendo gli eventi grazie alle misure di:

2. rigidità, ottenuta dalla misura della deflessione della traiettoria in campo magnetico,
3. velocità e direzione, ottenute dal TOF,
4. carica, ricavata sia dall'energia persa nei contatori del TOF, che nei piani del Tracker.



Non è stato trovato alcun evento di anti-He, contro 2.86 milioni di eventi di He

Supponendo che lo spettro di anti-He sia uguale a quello di He nell'intervallo di rigidità tra 1 e 140 GV, si può porre un limite superiore pari a $1.1 \cdot 10^6$

