

**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI ROMA “LA SAPIENZA”
FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI
Corso di Laurea in
“FISICA”**

MISURA CON AMS DI ELETTRONI E POSITRONI NEI RAGGI COSMICI

**CANDIDATA:
Valentina Zambrano**

**RELATORE:
Prof. Francesco Baffioni
Prof. Bruno Borgia**

ANNO ACCADEMICO 2003-2004

INDICE

INTRODUZIONE.....	pag. 3
1. Sorgenti di e^+ ed e^-.....	pag. 4
1.1 Raggi γ e RC.....	pag. 4
1.1.1 Spettro principale e spettro secondario.....	pag. 5
1.1.2 Abbondanze relative.....	pag. 7
1.2 Sorgenti note di e^+ ed e^-	pag. 9
1.3 Materia oscura: reazioni $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + X$	pag. 9
2. AMS.....	pag. 12
2.1 Scopi fisici e test effettuati.....	pag. 13
2.2 Breve descrizione generale.....	pag. 13
2.2.1 Il rivelatore a radiazione di transizione (TRD).....	pag. 14
2.2.2 Il sistema per la misura del tempo di volo (TOF).....	pag. 16
2.2.3 Il magnete superconduttore.....	pag. 17
2.2.4 Il tracciatore al Silicio (Silicon Tracker).....	pag. 18
2.2.5 I Contatori Anticoincidenza.....	pag. 18
2.2.6 Il rivelatore per la radiazione Cerenkov (RICH).....	pag. 19
2.2.7 Il calorimetro elettromagnetico (ECAL).....	pag. 20
3. Risultati sperimentali e previsioni teoriche.....	pag. 21
3.1 Identificazione di e^+ , e^- , p , \bar{p}	pag. 21
3.2 Cenni sui vari esperimenti effettuati.....	pag. 22
3.2.1 Dati generali ed analisi.....	pag. 22
3.3 Simulazione del processo $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + X$	pag. 23
CONCLUSIONI.....	pag. 23
APPENDICE.....	pag. 24
1. “Toy model” per lo sciame elettromagnetico.....	pag. 24
2. Particelle cariche vicino alla Terra.....	pag. 25
3. Calcolo delle energie di separazione per nucleone.....	pag. 26
4. Stabilità dei nuclei pari-pari.....	pag. 27
5. Considerazioni sull’evoluzione dell’Universo.....	pag. 28
BIBLIOGRAFIA.....	pag. 29

INTRODUZIONE

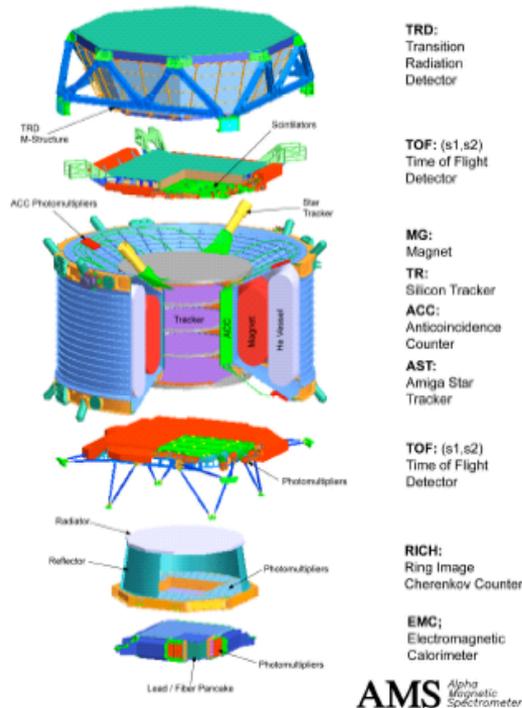
L'oggetto di questa dissertazione è una breve descrizione dell'esperimento AMS-2 e di alcuni dei suoi obiettivi in ricerca di fisica delle particelle ed astrofisica:

- La rivelazione di elettroni e positroni e lo studio delle relative sorgenti nello spazio.
- Lo studio della materia oscura nell'Universo attraverso la sua traccia tramite la misura di positroni presenti nei Raggi Cosmici.
Infatti un'ipotesi tra le più accreditate è che la materia oscura sia prevalentemente costituita da particelle supersimmetriche chiamate neutralini ($\tilde{\chi}$), le quali annichilandosi con le loro antiparticelle divengono una sorgente anche di positroni.

L'esperimento AMS-2 si avvale di uno spettrometro, che verrà montato sulla Stazione Spaziale Internazionale nel prossimo 2008.

Schematicamente esso è essenzialmente costituito da un magnete e da alcuni rivelatori, che sono descritti più in dettaglio nel seguito, tra i quali:

- Un rivelatore per la Radiazione di Transizione (TRD).
- Un Tracciatore al Silicio per la ricostruzione spaziale delle traiettorie delle particelle.
- Un rivelatore per la rivelazione della radiazione Cerenkov (RICH).
- Un Calorimetro Elettromagnetico (ECAL), per la rivelazione di e^+ , e^- , $\tilde{\chi}$ e delle rispettive direzioni del moto.



La dissertazione è così suddivisa:

- Una breve introduzione ai RC.
- Alcuni cenni sulle ipotesi delle particelle candidate a costituire la materia oscura.
- Descrizione dell'apparato sperimentale dell'esperimento AMS-2.
- Risultati ed analisi di alcuni esperimenti, tra questi AMS-2 (simulazioni Monte Carlo).

Segue una breve trattazione sulla composizione e la natura spettrale dei Raggi Cosmici (RC), con cenni sull'abbondanza relativa (nei RC) ed universale degli elementi chimici. A conclusione di questo paragrafo compaiono alcune considerazioni sulle ipotesi più accreditate riguardanti la materia oscura.

1. Sorgenti di e^+ ed e^- .

Gli studi e gli esperimenti di astrofisica ad alte energie, portano a concludere che gli elettroni presenti nei Raggi Cosmici siano prodotti in processi di accelerazione, specialmente nelle esplosioni delle Supernovae, mentre coppie e^+e^- provengono dalle collisioni di RC e raggi γ con il gas interstellare.

1.1 Raggi γ e RC.

La radiazione cosmica può essere divisa in due parti: primaria (RCP) e secondaria (RCS) [Gaisser], [Stanton].

La prima è costituita da particelle provenienti dall'esterno della magnetosfera terrestre. Essa ha in parte origine solare (RC di bassa energia), galattica ed in piccola parte anche extra-galattica (RC di altissima energia).

La radiazione cosmica primaria è costituita dai seguenti gruppi di atomi:

- p: protoni e deutoni
- α : elio ed isotopi
- L: elementi leggeri (Li, Be, B)
- M: elementi medi (C, N, O, F)
- H: elementi pesanti ($Z > 10$)

Per quanto riguarda invece la radiazione cosmica secondaria, si possono considerare diverse componenti:

- componente nucleare attiva (p, n, α)
- componente muonica (μ^+ , μ^-)
- componente elettrofotonica (e^+ , e^- , γ)¹

Queste particelle si formano direttamente nell'atmosfera terrestre, oppure nel Mezzo Interstellare (come prodotti di reazioni della RCP con il gas interstellare), ma avendo una bassa rigidità vengono intrappolate nel campo geomagnetico.

Esse perdono così la loro energia orbitando attorno alla Terra, precipitando infine nell'atmosfera terrestre.

Il numero di giri che esse compiono attorno all'equatore geomagnetico, prima di essere assorbite nell'atmosfera, diminuisce con l'energia.²

La RCS si può dividere in due gruppi:

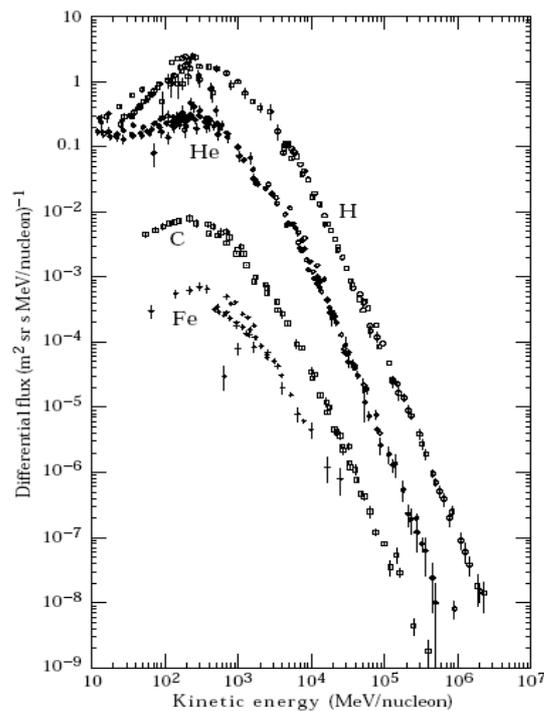
¹ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 1. "Toy model" per lo sciame elettromagnetico.

² Si veda in APPENDICE il paragrafo: 2. Particelle cariche vicino alla Terra.

- componente dura (in grado di attraversare uno spessore di 10 cm di Pb)
- componente molle (assorbita da 10 cm di Pb)

1.1.1 Spettro principale e spettro secondario.

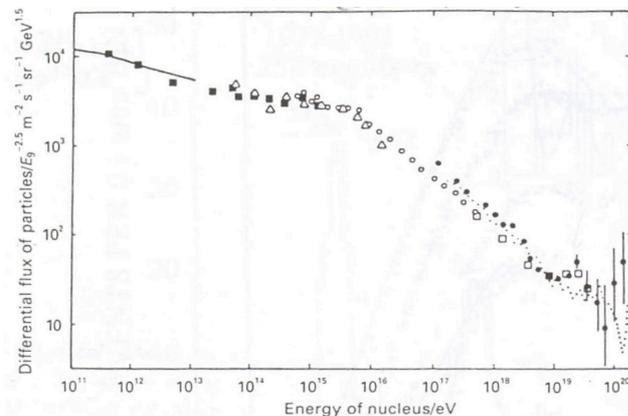
Lo spettro della RCP segue l'andamento indicato in figura:



Il picco si trova a 0.5 GeV e l'andamento tra 10²÷10³ MeV è dovuto agli effetti di modulazione solare; difatti il vento solare spazza via le particelle che arrivano vicino alla magnetosfera terrestre alterando le linee di forza del campo magnetico.³

Da energie di qualche GeV in poi scompare l'effetto della modulazione solare poiché aumenta la rigidità delle particelle; in questa zona energetica l'andamento segue una retta (in grafico logaritmico), con pendenza s (detta indice spettrale).

Nell'intervallo tra 10¹⁵÷10¹⁶ eV vi è il cosiddetto “ginocchio”, ovvero un cambiamento di indice spettrale:

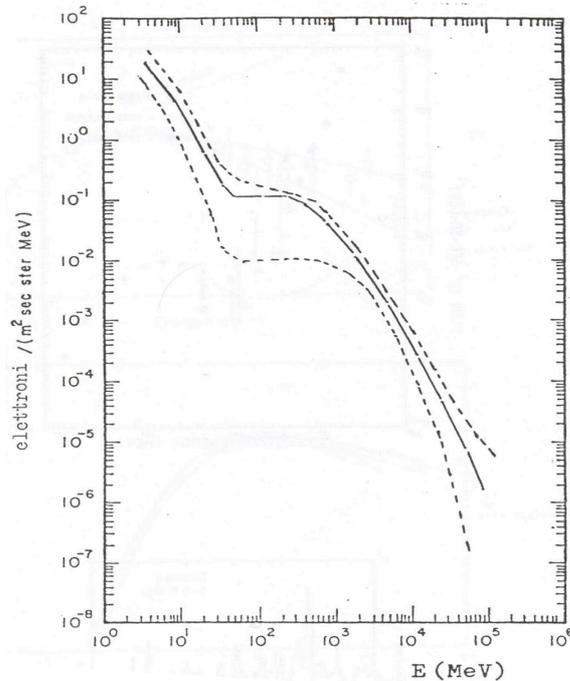


³ L'effetto è più evidente quando il Sole si trova nel periodo del ciclo più attivo.

Dal grafico si nota un'ulteriore variazione di s , detta "caviglia", in corrispondenza di energie pari a $10^{19} \div 10^{20}$ eV.

Al di sopra di questa soglia i dati raccolti sono molto incerti, pertanto non è possibile definire correttamente l'andamento dello spettro principale.

Per quanto riguarda la componente secondaria dei Raggi Cosmici, è interessante notare la distribuzione spettrale della componente elettronica (per quella positronica valgono le considerazioni analoghe).



In figura la linea continua in mezzo è il risultato di un'interpolazione, tra gli andamenti delle linee tratteggiate, effettuata a causa della grande incertezza dovuta agli effetti della modulazione solare.

Anche in questo caso lo spettro può essere diviso in tre zone:

- Per $E=(1 \div 50)$ MeV: intensità variabile, a causa di contaminazioni dovute a:
 - elettroni secondari prodotti nell'atmosfera terrestre o nel materiale rivelatore.
 - elettroni intrappolati nel campo magnetico terrestre che si riversano nell'atmosfera.
 - elettroni prodotti in atmosfera che fuoriescono, lungo le linee di forza geomagnetiche, per rientrare nel punto magnetico coniugato (cosiddetto albedo rientrante).
 - elettroni accelerati nel Sistema Solare.

L'indice spettrale medio in questa zona energetica è $s \sim 1.5 \div 2.0$.

- Per energie tra $E=50$ MeV ed $E=5$ GeV si vedono gli effetti della modulazione solare.
- Gli effetti della modulazione solare scompaiono ad energie $E > 5$ GeV, dove l'indice spettrale è $s \sim 3$.

1.1.2 Abbondanze relative.

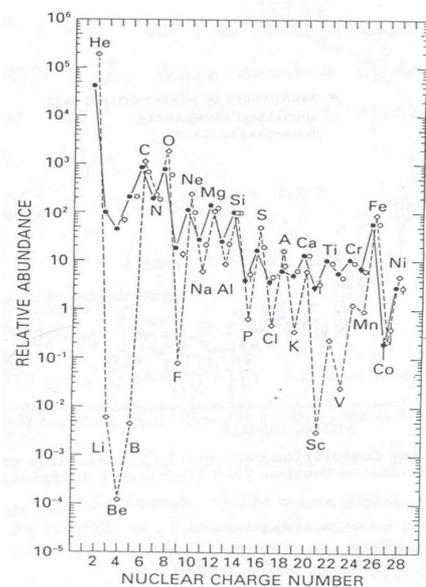
Per la determinazione delle abbondanze relative di isotopi leggeri e per la ricerca dell'antimateria nello spazio, è fondamentale avere uno strumento che permetta di misurare la massa delle particelle con grande precisione e che sia anche in grado di valutare le perdite di energia dE/dx e il numero atomico Z .

Le abbondanze possono essere di due tipi:

- abbondanza universale (da materiali terrestri ed extraterrestri)
- abbondanza RCP

L'andamento dell'abbondanza universale (punti bianchi) è riportato nel seguente grafico (le abbondanze sono normalizzate con quella del Silicio, la quale ha un valore intermedio; ottenendo così l'abbondanza relativa).

L'abbondanza della RCP presenta lo stesso andamento, ma con una maggiore abbondanza ($\sim 10^6$ volte maggiore) degli elementi L,⁴ causando quindi il cosiddetto "effetto ombra", evidenziato dal grafico (punti neri).



- essa diminuisce al crescere di Z
- presenta una lacuna per gli elementi del gruppo L (essi sono distrutti nelle reazioni nucleari delle stelle)
- presenta un picco sul Fe (ha la maggiore energia di separazione per nucleone)

⁴ Ciò indica che i RC provengono da lontano, dal momento che Li, Be, B sono prodotti dalle reazioni di spallazione (ovvero dalla disintegrazione di un nuclide in elementi leggeri con l'espulsione di nucleoni): si trova che il loro raggio di girazione deve essere almeno pari al raggio medio della galassia ($r_G \sim 30$ Kpc, con $1 \text{ pc} = 3.16 \cdot 10^{18} \text{ cm}$).

Questo risultato deriva da una stima della materia attraversata dai Raggi Cosmici lungo il loro percorso nel Mezzo Interstellare.

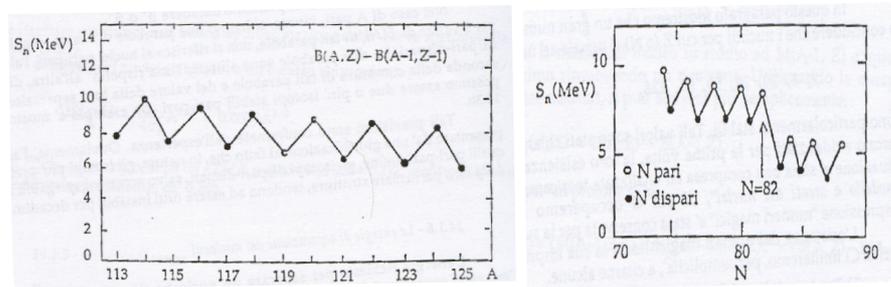
Poiché $\rho_{\text{ISM}} \sim 1 \text{ atomo cm}^{-3} \sim 2 \cdot 10^{-24} \text{ g cm}^{-3}$ (dove con ρ_{ISM} si indica la densità del Mezzo Interstellare) si ha

$$\text{che: } \langle x \rangle = \frac{6 \cdot 10^{24}}{2} \text{ cm} = 3 \cdot 10^{24} \text{ cm} \approx 10^6 \text{ pc} \quad \text{dove con } \langle x \rangle \text{ si intende la distanza media percorsa da}$$

un RC nel mezzo Interstellare.

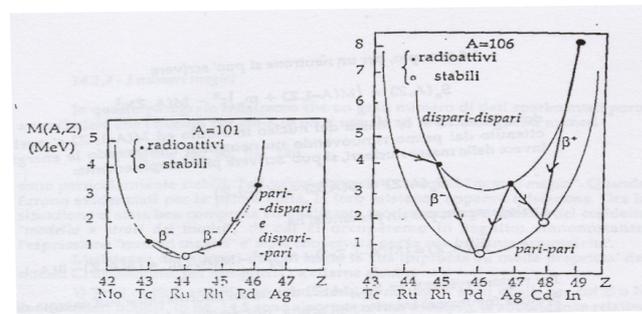
La stima fatta per ρ_{ISM} risulta però troppo piccola per spiegare la notevole abbondanza degli elementi leggeri nella RCP (è per questo che la curvatura della traiettoria delle particelle nella RCP deve essere maggiore delle distanze intergalattiche, o si deve introdurre la materia oscura).

- ha picchi in corrispondenza dei numeri magici: 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 (per i quali aumenta l'energia di separazione per nucleone).
L'andamento delle energie di separazione per nucleone⁵ [Eisenbud] è il seguente:



dove $A=N+Z$.

- vale l'effetto pari-dispari; per cui tra i nuclidi isobari (aventi lo stesso valore di $A=N+Z$) con N e Z di parità diversa vi è solo uno stabile. Questo effetto è messo in evidenza dalle parabole di massa:⁶ [Eisenbud]



si noti che per A dispari $\Delta(A)=0$ ed un solo isobaro (sono detti isobari i nuclidi con uguale valore di $A=N+Z$) può essere stabile; mentre per A pari le due parabole risultano separate da $2\Delta(A)$ e si nota che più di un isobaro pari-pari è stabile e nessuno dispari-dispari. Con il simbolo $\Delta(A)$ si indica la cosiddetta energia di appaiamento, ovvero il termine che nella formula semiempirica delle energie di legame⁷ tiene conto che i nuclei favoriti (più stabili) sono quelli pari-pari (come si nota anche dalle parabole di massa).

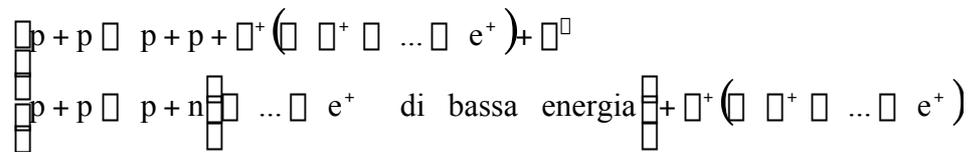
⁵ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 3. Calcolo delle energie di separazione per nucleone.

⁶ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 4. Stabilità dei nuclei pari-pari.

⁷ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 3. Calcolo delle energie di separazione per nucleone.

1.2 Sorgenti note di e^+ ed e^- .

Per quanto riguarda i positroni, essi possono essere originati nelle collisioni p-p nel Mezzo Interstellare:



Ad energie $E \sim (0.5 \div 5)$ GeV corrisponde un rapporto di carica $\bar{q}(E) = e^+ / (e^+ + e^-) \sim 0.1$.

1.3 Materia oscura: reazioni $\div + \div \rightarrow e^+ + X$.

Uno degli obiettivi più importanti dell'esperimento AMS-2 è quello della ricerca della materia oscura nello spazio.

Di seguito sono riportate alcune delle "prove" sull'esistenza della materia oscura.

Il calcolo della massa della nostra Galassia si può effettuare sommando quella di tutte le stelle e della materia interstellare presenti al suo interno, oppure tramite la misura della distanza e della velocità degli oggetti attorno al centro della Galassia: in quest'ultimo caso si eguaglia la forza centrifuga a quella di attrazione gravitazionale:

$$\frac{GM_G m}{R^2} = \frac{mv^2}{R}$$

dove m è la massa dell'oggetto ed R la sua distanza dal centro della Via Lattea.

Dalla formula precedente si ricava:

$$M_G = \frac{v^2 R}{G}$$

Si trova che la massa gravitazionale così calcolata è circa cinque volte maggiore rispetto a quella calcolata nel primo modo.

Ciò vuol dire che la maggior parte della materia nella Galassia si manifesta solo tramite i suoi effetti gravitazionali, e non emette radiazione elettromagnetica misurabile.

Lo stesso accade per le strutture più grandi, come ad esempio gli ammassi di Galassie.

Da tutte queste misure si conclude che nell'Universo circa il 90% della materia non è rivelabile tramite emissioni elettromagnetiche.

Si potrebbe supporre che nelle Galassie vi siano molte Stelle deboli o pianeti molto massivi (come Giove) ma che emettono pochissima radiazione elettromagnetica.

Tuttavia questa ipotesi non è sufficiente a spiegare il 90% della massa mancante in tutto l'Universo.

Si pensa perciò che la materia oscura possa esistere sotto forma di particelle.

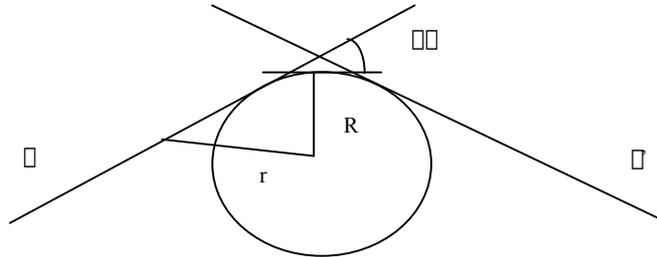
La materia oscura inoltre è anche importante per prevedere l'evoluzione dell'Universo.

Lo spostamento verso il rosso delle righe spettrali delle Galassie più lontane fornisce la prova dell'espansione dell'Universo, ma la massa delle particelle costituenti la materia

oscura potrebbe superare la densità critica dell'Universo rendendolo così un sistema destinato a collassare su se stesso.

Al contrario se la densità di massa fosse inferiore, allora l'Universo sarebbe in continua espansione.

Altre informazioni sulla materia oscura provengono da numerosi fenomeni, come ad esempio la cosiddetta "lente gravitazionale".



Quest'ultimo fenomeno consiste nella deflessione di un fotone da parte di un campo gravitazionale generato da una massa M.

Pertanto dalla curvatura della traiettoria della luce (ovvero dalla distanza tra l'oggetto reale e la sua immagine percepita dall'osservatore) si può risalire al valore della massa (di materia oscura) in questione:

$$\alpha = \frac{4GM}{c^2 R}$$

dove: R è il raggio della massa e α è l'angolo di deflessione.⁸

Alcune particelle candidate a costituire la materia oscura sono riportate qui di seguito [Perkins]:

- Il neutrino: ipotizzato da E. Fermi nel 1934 per spiegare la violazione della conservazione della quantità di moto, del momento angolare e del numero leptonico nei decadimenti β .

Dalle misure della Radiazione di fondo a microonde, corrispondente all'emissione di corpo nero a $T \sim 3$ K è stata calcolata una densità di neutrini pari ad $N = 56 \text{ cm}^{-3}$, da cui se $m_{\text{tot}} = m_e + m_\mu + m_\tau = 47 \text{ eV}/c^2$, ciò basterebbe a chiudere l'Universo.⁹

⁸ Classicamente il risultato differisce di un fattore due: usando infatti l'equazione di Binet:

$$\ddot{u} + u = \frac{GM}{H^2} \quad \text{con} \quad u(\varphi) = (r(\varphi))^{-1} \quad \text{e} \quad H = r^2 \dot{\varphi} = \text{cost.}$$

dove r è il modulo della distanza tra il fotone ed il punto di origine del campo gravitazionale, si ha:

$$\ddot{u} + u = \frac{GM}{c^2 R^2} \quad \text{con} \quad c = R \dot{\varphi} \quad \text{dal momento che vale} \quad H^2 = r^2 \dot{\varphi}^2 = R^2 c^2$$

se si considera $\frac{GM}{c^2 R^2} \varphi$ si ha come soluzione:

$$u = u_0 \sin \varphi + \frac{\sin \varphi}{R} + \frac{\varphi}{R} \quad \text{con} \quad \frac{|u|}{R} = \varphi$$

da cui:

$$\alpha = 2 \varphi R = \frac{2GM}{c^2 R}$$

⁹ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 5. Considerazioni sull'evoluzione dell'Universo.

L'ipotesi che sia la massa del neutrino a costituire la parte più importante nella materia oscura non è però confermata, dal momento che misure indirette della sua massa dimostrano che essa è di gran lunga inferiore ($\sim 5 \cdot 10^{-6} \text{ MeV}/c^2$) a quella necessaria per formare delle strutture.

Pertanto un Universo primordiale ricco quasi esclusivamente di queste particelle non si sarebbe evidentemente evoluto nel modo in cui oggi lo conosciamo.

- Il WIMP: è una particella neutra, stabile e supersimmetrica che interagisce debolmente.

È un fermione ed è creata in coppia con la sua antiparticella (con la quale si annichila).

Essa può essere identificata con il neutralino (simbolo $\tilde{\chi}$), sovrapposizione di stati di particelle neutre supersimmetriche.

La massa del neutralino è inferiore alle masse delle altre particelle supersimmetriche.

Di conseguenza a causa della conservazione della R parità, il neutralino è stabile e può annichilirsi solo con un antineutralino.

Le annichilazioni $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$ possono essere osservate indirettamente, rivelando i prodotti di

queste reazioni ($\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow e^+, \mu, \tau, \dots$).

La reazione che interessa maggiormente l'esperimento AMS-2, e che permette di studiare tali particelle è la seguente:

$$\tilde{\chi}\tilde{\chi} \rightarrow e^+ + X;$$

essa è dunque una sorgente non convenzionale di e^+ .

Gli eccessi di positroni possono quindi provenire da annichilazioni $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$, dovuti ad addensamenti di queste particelle supersimmetriche negli aloni galattici.

Questo tipo di reazione produce un eccesso di positroni maggiore di ogni altro tipo di sorgente di e^+ fino ad ora conosciuta.

Occorre però rivelare correttamente i positroni, dal momento che i relativi segnali possono essere confusi con quelli di altre particelle molto più abbondanti nei Raggi Cosmici.

I protoni infatti sono le particelle più abbondanti di carica positiva presenti nei Raggi Cosmici (per energie maggiori di 10 GeV il rapporto p/e^+ vale $\sim 10^4$, quindi per poter osservare il contributo di $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$ nello spettro dei positroni si deve eliminare il fondo di protoni per un fattore $\sim 10^6$).¹⁰

L'esperimento AMS si propone di rivelare e^- ed e^+ ; p e \bar{p} provenienti dai Raggi Cosmici.

Per la ricerca delle annichilazioni $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$ è più conveniente studiare lo spettro dei positroni piuttosto che quello degli elettroni, visto che il rapporto degli elettroni (in cui compare

ovviamente il contributo degli elettroni di background) con i positroni è circa $\frac{N_{e^-}}{N_{e^+}} \sim 10$,

e quindi il rapporto segnale/fondo è più favorevole nel caso dei positroni

Qui di seguito è riportata una descrizione dell'esperimento AMS-2 e dei test effettuati.

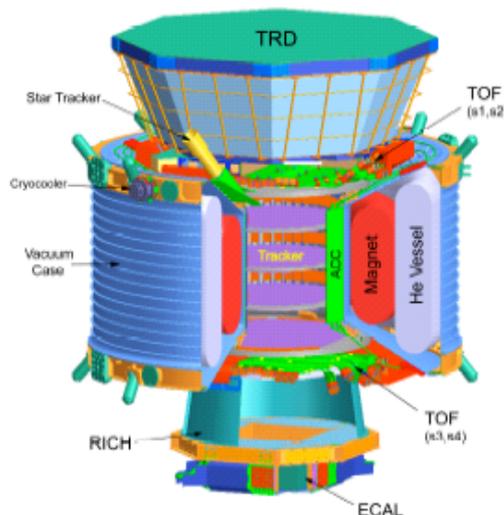
¹⁰ Per l'AMS-2 ciò è possibile grazie al Calorimetro Elettromagnetico (ECAL) ed al Transition Radiation Detector (TRD).

2. AMS.

La Stazione Spaziale Internazionale, su cui verrà montato l'esperimento Alpha Magnetic Spectrometer, AMS-2, si trova ad una quota pari a $h=500$ Km e pertanto risente dei campi magnetici terrestre e solare.

L'esperimento Alpha Magnetic Spectrometer-2 [AMS], [Barao], [Borgia], [De Boer], [Gentile], [Vialle] utilizza uno spettrometro costituito, schematicamente da:

- Un rivelatore per la Radiazione di Transizione (TRD).
- Due rivelatori per la rivelazione del tempo di volo delle particelle (TOF System).
- Un magnete superconduttore.
- Un Tracciatore al Silicio per la ricostruzione spaziale delle traiettorie delle particelle.
- Alcuni Contatori Anticoincidenza.
- Un rivelatore per la radiazione Cerenkov (RICH).
- Un Calorimetro Elettromagnetico (ECAL), per la rivelazione di e^+ , e^- , μ e delle rispettive direzioni del moto.



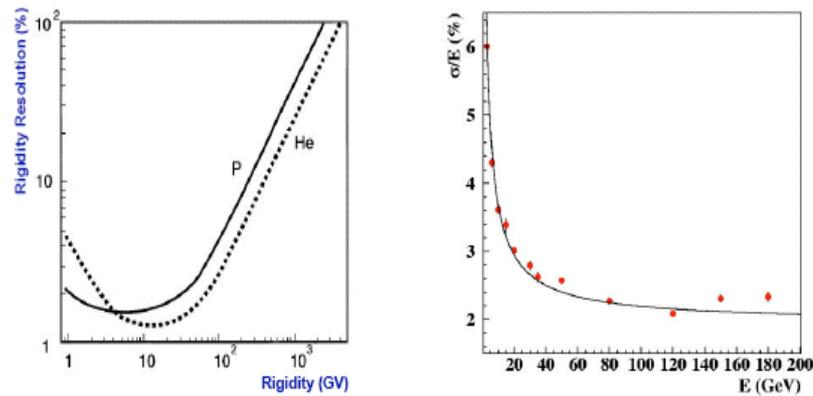
2.1 Scopi fisici e test effettuati.

L'esperimento AMS-2 intende estendere il campo di ricerca a particelle di alte energie (fino alla regione dei TeV) ed ha, come detto in precedenza, anche il fine di identificare la materia oscura nello spazio.

Esso è costituito da vari rivelatori, ognuno dei quali ha un compito ben determinato nella rivelazione delle particelle.

Prima di effettuare il lancio dell'esperimento AMS-2 (che avverrà nel 2008) sulla Stazione Spaziale Internazionale, sono stati effettuati alcuni test di funzionamento e calibrazione delle sue componenti.

Il Silicon Tracker e l'ECAL hanno fornito i seguenti risultati, rispettivamente riguardanti le misure di rigidità ed energia:



Il magnete superconduttore è stato invece sottoposto a test:¹¹ quali stress meccanici e ad una simulazione delle condizioni al lancio in orbita (centrifuge test).

2.2 Breve descrizione generale.

Lo strumento ha un'accettanza di $\sim 0.5 \text{ m}^2 \text{ sr}$ e, rispetto all'esperimento AMS-1, presenta un miglioramento di circa un ordine di grandezza sulla risoluzione del momento delle particelle (l'esperimento AMS-1 permetteva di misurare il momento di una particella con una precisione dell'1% fino a 30 GeV).

Per la rivelazione e l'accettazione degli elettroni si misura la carica (con un'efficienza pari al 75%), e si richiede che la velocità sia compatibile con quella della luce.

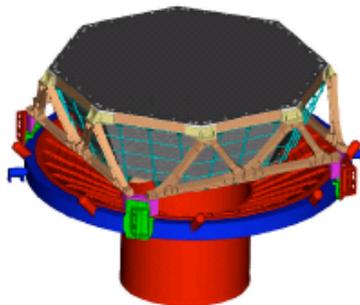
Eventi spuri provengono da protoni e pioni π secondari prodotti nel materiale del rivelatore e nell'apparato nel suo complesso.

È stata calcolata la probabilità di rivelare un protone al posto di un elettrone, mediante una simulazione Monte Carlo, ottenendo: $P(p) \approx 10^{-5}$.

Per quanto riguarda i positroni la carica richiesta è $q=+1$ e la velocità deve essere anch'essa compatibile con quella della luce.

Qui di seguito sono analizzate singolarmente le componenti di AMS-2.

2.2.1 Il rivelatore a radiazione di transizione (TRD).



Il TRD è utilizzato per distinguere elettroni o positroni dai protoni.

¹¹ Naturalmente sono stati costruiti due magneti identici: uno per l'AMS e l'altro per i test.

Esso permette di separare particelle con rapporto E/m differente a parità di energia [Burger].

Il TRD è posizionato in una scatola montata sul magnete superconduttore, presenta una struttura multistrato, ed ogni strato è composto da 20 mm di materiale radiatore¹² e 6 mm di tubi proporzionali, i quali rivelano i fotoni emessi dalle particelle cariche.¹³

I tubi sono riempiti di gas, una miscela di Xe¹⁴ e CO₂, nella proporzione di: 80% e 20%. La sequenza precedentemente descritta: “radiatore + tubi proporzionali”, è ripetuta per venti volte (struttura “multilayer” [Artru], [Leo]) e disposta a formare una struttura ottagonale: quattro piani di tubi sono posti sia in cima che in fondo alla struttura e sono orientati parallelamente al campo magnetico; mentre i dodici rimanenti sono ad esso ortogonali.

La struttura del TRD è tronco-conica: la lunghezza dei tubi varia con l’altezza a cui essi si trovano: l=2.0 m in cima, fino ad arrivare a l=0.8 m.

Il funzionamento del TRD nella rivelazione delle particelle e nella misura delle corrispettive masse è descritto qui di seguito.

Una particella carica che attraversa il TRD produce radiazione elettromagnetica (detta radiazione di transizione) con caratteristiche che dipendono dalla sua massa e dalla velocità.

La radiazione di transizione si genera ogni qual volta una particella carica attraversa la superficie di separazione tra due mezzi aventi indici di rifrazione (e quindi costanti dielettriche) diversi.

La sua perdita di energia, per unità di angolo solido Ω e per unità di frequenza ω (relativa alla radiazione incidente), si scrive nel modo che segue.

$$\frac{d^2 W}{d\Omega d\omega} = \frac{\omega^2}{\omega_p^2} \frac{\sin^2 \theta}{\omega^2 + \omega_p^2 + \omega_i^2} \left[\frac{\omega^2}{\omega^2 + \omega_p^2 + \omega_2^2} \right]^2$$

valida nel limite in cui $\omega \gg 1$; $\omega, \omega_i^2 \ll 1$, e dove

$$\omega_i^2 = \frac{\omega_{pi}^2}{\epsilon^2} \text{ dove l'indice } i \text{ si riferisce al materiale.}$$

(ω_p è la frequenza di plasma del materiale $\omega_p^2 = 4\pi n_e / m_e$ ed n_e è la densità elettronica); mentre θ è l’angolo formato dalla direzione di osservazione con quella del moto della particella carica.

In questi limiti la radiazione emessa (per unità di angolo solido e di frequenza) è confinata in un cono di apertura θ .

Dal momento che il segnale rivelato dal TRD è proporzionale a ω è possibile scrivere:

$$E = \left[(mc^2)^2 + (pc)^2 \right]^{0.5} = \left[(mc^2)^2 + \left(\frac{Ev}{c} \right)^2 \right]^{0.5} = \left[(mc^2)^2 + E^2 \left(\frac{v}{c} \right)^2 \right]^{0.5}$$

da cui:

¹²Nell’esperimento AMS-2 esso è composto da fibre di polietilene/polipropilene (esso funziona bene anche quando la particella si muove obliquamente rispetto alla direzione delle fibre).

¹³ La valanga di elettroni che si crea per effetto della radiazione di transizione viene accumulata sui fili (posti lungo l’asse dei tubi proporzionali), da cui viene ricavata l’intensità del segnale.

¹⁴ Lo Xenon, avendo molti elettroni, consente di abbassare la soglia dell’effetto fotoelettrico.

In questo modo la funzione di lavoro (per l’estrazione di un elettrone) è piccola, e anche con ω poco energetici si riesce ad avere un’elevata efficienza di estrazione degli elettroni.

$$mc^2 = \frac{E}{\beta} = E \left(\frac{L}{c \text{TOF}} \right)^{0.5}$$

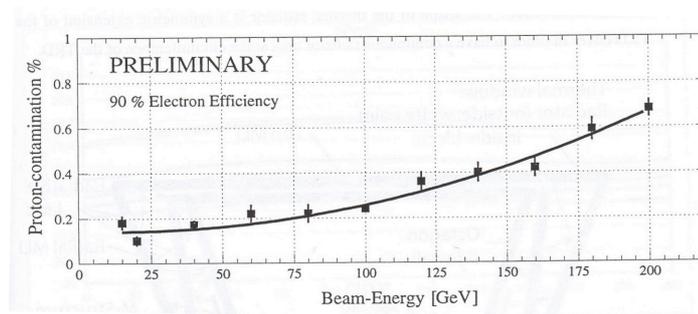
si otterrebbe quindi così la massa delle particelle in esame.

Sfortunatamente la probabilità di emettere radiazione di transizione nell'attraversare un'unica superficie di discontinuità è bassa: 10^{-2} , ed è per questo che si preferisce utilizzare una struttura a multistrati dielettrici, (struttura "multilayer").

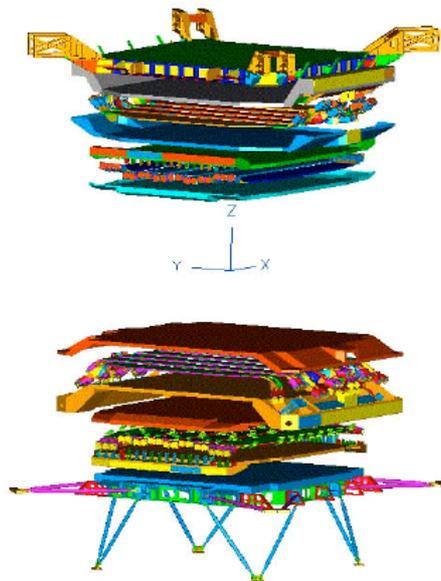
In questo modo la probabilità di emissione di radiazione di transizione sale al 50% ad ogni strato attraversato.

Con un prototipo del TRD, nell'estate 2000 al CERN, sono stati effettuati dei test sulla misura dei segnali generati da protoni ed elettroni aventi energie tra i 5 GeV ed i 250 GeV. Il TRD riesce a selezionare il 90% degli eventi elettronici ed a rigettare il 99% dei protoni fino ad energie pari a 200 GeV.

Il grafico del potere di reiezione del TRD è riportato qui di seguito.¹⁵



2.2.2 Il sistema per la misura del tempo di volo (TOF).



Il TOF System è costituito da due piani paralleli, situati alle estremità del magnete, parallelamente al campo.

Esso permette di misurare il tempo di volo, definito come il tempo che impiega una particella a passare da un piano scintillatore (posto sui piani del TOF system) all'altro.

¹⁵ Senza considerare la contaminazione dei segnali dovuta ai π^0 .

Mediante il TOF System si può dunque distinguere un elettrone proveniente dall'alto da un positrone proveniente dalla direzione opposta.

Il tempo di volo è dato da:

$$t = \frac{L}{v}$$

Dal TOF è possibile risalire alla velocità delle particelle rivelate:

$$v = L / \text{TOF}$$

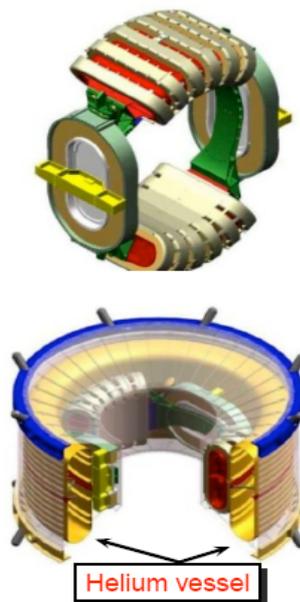
Inoltre è possibile ricavare la differenza di TOF tra due particelle con stesso impulso ($P = mv$) e masse differenti:

$$\Delta \text{TOF} = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right) = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} + \frac{m_1^2 c^2}{P^2 \beta_1^3} - \frac{1}{\beta_2} - \frac{m_2^2 c^2}{P^2 \beta_2^3} \right) \approx \frac{Lc}{2P^2} (m_1^2 - m_2^2)$$

Da cui si ricava, in funzione della velocità e dell'energia:

$$\Delta \text{TOF} \approx \frac{Lc^5 (m_1^2 - m_2^2)}{2v^2 E^2}$$

2.2.3 Il magnete superconduttore.



Il magnete ha un ruolo molto importante per la distinzione delle particelle, in quanto la curvatura delle traiettorie di particelle soggette a campo magnetico dipende dalle caratteristiche delle particelle stesse:

$$\Delta = \frac{Pc}{|q|B}$$

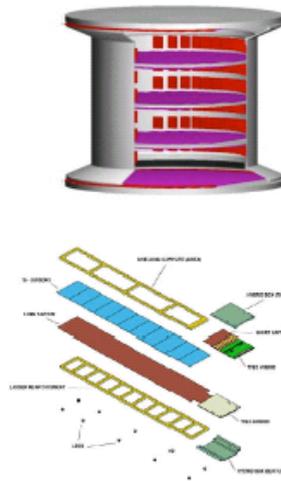
Il magnete di AMS-2 (a simmetria cilindrica) ha un diametro interno $L=1$ m (e diametro esterno $D=2.7$ m, con un'altezza pari a $H=1.5$ m), da cui $BL^2=0.86$ T m² (per l'AMS-1 $BL^2=0.14$ T m², circa sei volte più piccolo).

Alle due estremità, parallelamente al campo magnetico, sono posti (come visto nel paragrafo 2.2.2) i due piani del TOF System.

Sulla parete interna del magnete, invece sono situati alcuni Contatori Anticoincidenza, la cui descrizione segue nel paragrafo 2.2.5.

Infine, perpendicolarmente all'asse del magnete vi sono otto strati di tracciatore al Silicio (Silicon Tracker, ad alta risoluzione spaziale per la misura delle traiettorie delle particelle, ed avente una superficie di ~ 6.5 m²), descritto nel paragrafo seguente.

2.2.4 Il tracciatore al Silicio (Silicon Tracker).



Il Silicon Tracker serve a misurare la traiettoria (curva) delle particelle attraverso un campo magnetico [Cecchi].

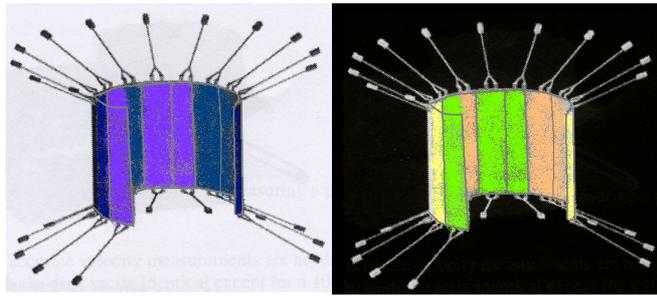
Esso presenta una maggiore precisione nella determinazione del momento di una particella rispetto al primo esperimento AMS, dovuta all'aumento dei piani di tracciatore, i quali sono passati da sei ad otto.

Su ogni strato di Silicio vi sono delle sottili strisce di Alluminio sulle quali si produce un segnale elettrico al passaggio di una particella.

La ricostruzione della traiettoria della particella avviene dunque attraverso i segnali elettrici provenienti dalle strisce posizionate sui diversi strati del tracciatore.

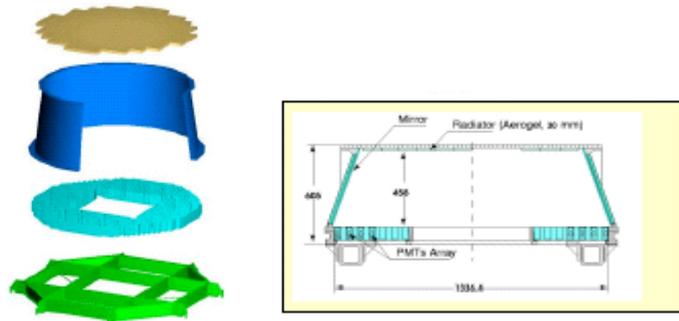
Per avere un'elevata precisione sulla misura del momento di una particella, occorre conoscere però la posizione dei singoli piani del Tracker con un'accuratezza di pochi μ m, ciò è possibile utilizzando come strumento un fascio laser che colpisce i sensori al Silicio. In questo modo si determina con la precisione di pochi μ m la posizione di una particella che attraversa ognuna delle superfici interne del Tracker.

2.2.5 I Contatori Anticoincidenza.



I Contatori Anticoincidenza sono situati sulla parete interna del magnete superconduttore e garantiscono il rigetto degli eventi che interessano le pareti del rivelatore. Essi consistono di sedici moduli (a simmetria cilindrica) di materiale scintillatore, aventi un'altezza pari a $h=832$ mm, uno spessore $l=10$ mm e hanno area interna pari a quella del magnete superconduttore (il diametro interno è $d=1091$ mm).

2.2.6 Il rivelatore per la radiazione Cerenkov (RICH).



Il RICH (Ring Image CHERenkov detector), ha la forma di una superficie conica troncata, avente raggio superiore $r=60$ cm, raggio inferiore $R=70$ cm ed un'altezza $h=60$ cm. All'ingresso del RICH è posizionato un pannello coperto da 3 cm di materiale radiatore con indice di rifrazione $n=1.03$.

Il pannello inferiore presenta un buco quadrato (con area $A = 63 \times 63 \text{ cm}^2$), in modo tale da far passare le particelle direttamente nel Calorimetro Elettromagnetico, ed è dotato di fotomoltiplicatori.

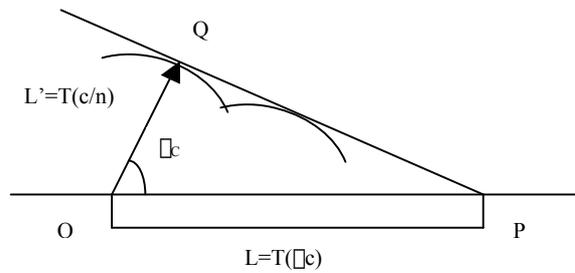
Quando una particella carica attraversa il materiale radiatore produce radiazione Cerenkov, che viene rivelata dai fotomoltiplicatori [Buénerd], [Leo].

Conoscendo le posizioni dei fotomoltiplicatori è possibile determinarne la velocità e la traiettoria ricostruendo l'immagine dell'anello di Cerenkov per cui vale:

$$\cos \theta_C = \frac{L'}{L} = \frac{1}{n} \quad .^{16}$$

¹⁶ Nell'effetto Cerenkov se la velocità della particella è tale che: $v < c/n$ (velocità della luce nel mezzo con indice di rifrazione n) i dipoli degli atomi, che si diseccitano irraggiando dopo il passaggio della particella, si orientano in modo da avere contributo nullo.

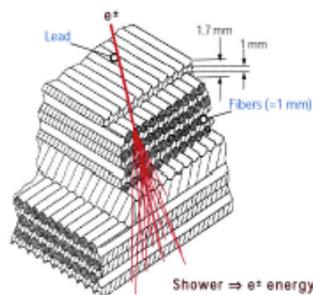
Se al contrario accade che: $v > c/n$, allora l'emissione atomica è coerente e forma un angolo θ_C con \vec{v} (come mostrato in figura).



dove  è il fronte dell'onda emessa nel percorso OP .

2.2.7 Il calorimetro elettromagnetico (ECAL).

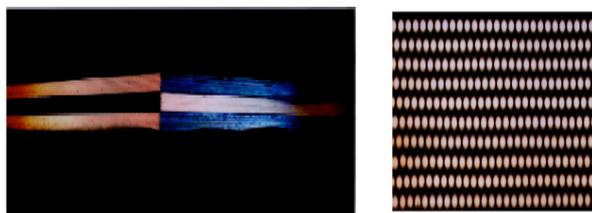
L'ECAL si presenta come segue.



Esso è costituito da lastre di Piombo alternate a lastre di materiale scintillatore di area quadrata ($658 \times 658 \text{ mm}^2$) e spessore di 166.5 mm (la sua altezza è suddivisa in nove strati, ognuno spesso 18.5 mm) ed un peso complessivo di 492 Kg.

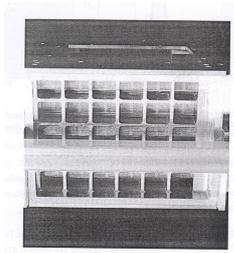
I nove strati in cui è suddiviso l'ECAL, sono disposti in modo tale che le fibre di scintillatore siano tra loro ortogonali.

Lo spessore totale in lunghezze di radiazione è pari a $16 \lambda_0$.



Le fibre di scintillatore sono collegate a fotomoltiplicatori mediante apposite guide di luce. Ogni fotomoltiplicatore copre quattro regioni quadrate dell'ECAL, aventi un'area pari a $9 \times 9 \text{ mm}^2$ (in totale l'area del calorimetro è suddivisa in 1296 regioni, e presenta quindi 324 fotomoltiplicatori).

Anche per quanto riguarda l'ECAL sono stati effettuati i test di calibrazione dello strumento (su prototipo).



Dai test effettuati si è trovato che la risoluzione energetica risulta essere:

$\frac{\sigma(E)}{E} \approx 12\%/\sqrt{E} + 5\%$ GeV, che provvede ad un rigetto di protoni pari a $\sim 10^4$ (fino ad energie di centinaia di GeV).

Il potere di reiezione di ECAL moltiplicato per quello del TRD (maggiore di 10^2) dà un fattore complessivo proprio: $\epsilon_{ECAL}\epsilon_{TRD} \sim 10^4 10^2 = 10^6$.

Nel seguente paragrafo sono stati riportati alcuni risultati importanti ottenuti da AMS (dalle simulazioni Monte Carlo) e da altri esperimenti.

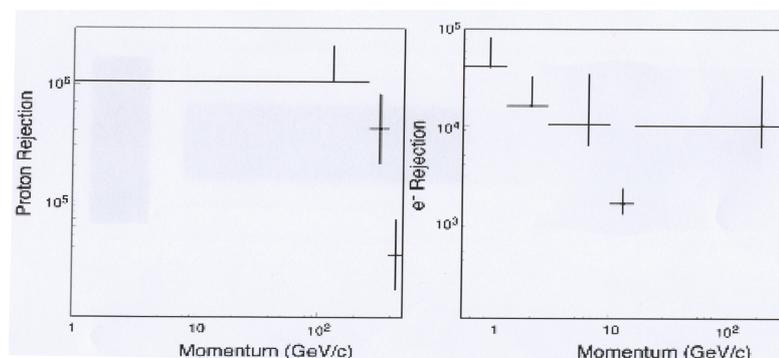
3. Risultati sperimentali e previsioni teoriche.

In questo paragrafo sono riportati i risultati più importanti ottenuti dai vari esperimenti fino ad ora effettuati, e risultati ottenuti mediante simulazioni statistiche di tipo Monte Carlo.

3.1 Identificazione di e^+ , e^- , p , \bar{p} .

L'esperimento AMS-2 si serve del calorimetro elettromagnetico e del TRD per quanto riguarda la discriminazione degli elettroni dai protoni.

I dati simulati per AMS-2 sulla reiezione di protoni ed elettroni sono i seguenti.



Si nota che la reiezione dei protoni è $\sim 10^6$ per particelle aventi impulsi fino a ~ 100 GeV/c (come descritto nel paragrafo 2.2.7).

Per quanto riguarda invece gli elettroni, il potere di reiezione scende ad un valore di $\sim 10^4$ in un range di momenti che vanno da qualche GeV/c in poi [Bertucci].
 Ciò permette di rigettare gli eventi spuri provenienti dal background di protoni e, contemporaneamente, di distinguere i positroni presenti nei RC dagli elettroni (presenti in maggiore quantità).
 Mediante delle simulazioni di tipo Monte Carlo di rivelamento con AMS-2 è stato possibile prevedere gli spettri di p , \bar{p} , e^+ , e^- (riportati nel paragrafo 3.2.1).

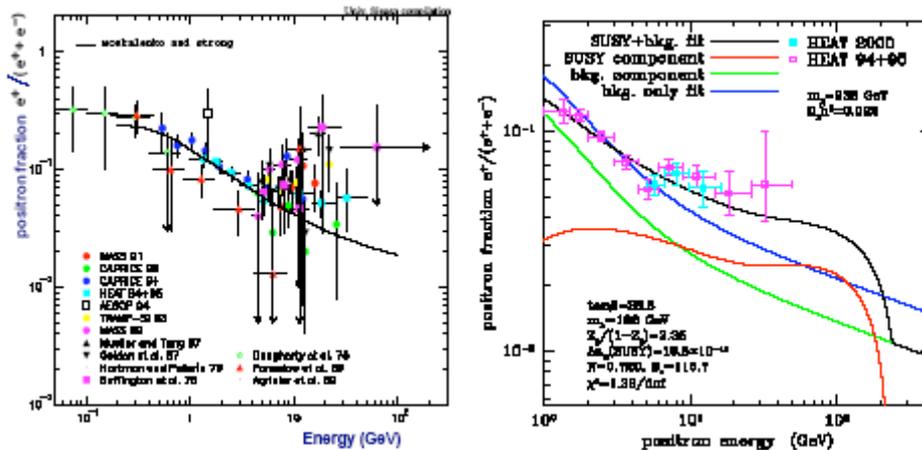
3.2 Cenni sui vari esperimenti effettuati.

È possibile controllare l'accuratezza delle misure che verranno effettuate con l'AMS-2, mediante un confronto con i risultati dell'esperimento AMS-1 e di altri esperimenti simili. Tra i vari esperimenti effettuati, sicuramente l'AMS-2 è quello che presenta un tracciatore al Silicio più efficiente.
 Alcuni tra i più importanti esperimenti sono [Barao]:

- CAPRICE 94
- HEAT 94
- HEAT 95
- HEAT 2000
- Osservazioni da pallone: i risultati ottenuti da questi esperimenti sono pochi ed incerti in quanto le apparecchiature trasportabili su pallone hanno dimensioni e pesi necessariamente molto ridotti.

3.2.1 Dati generali ed analisi.

I dati ottenuti da altri esperimenti sugli studi di e^+ ed e^- sono illustrati nelle seguenti figure:

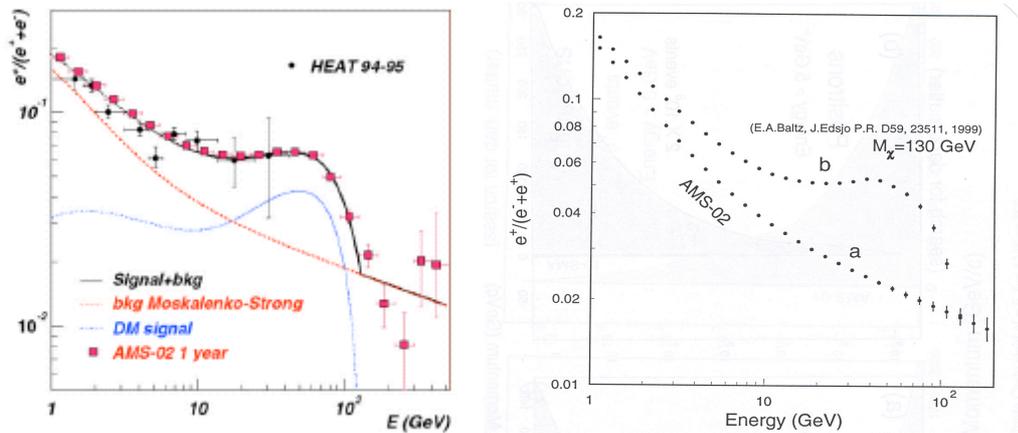


Dal primo grafico si nota che i dati del 1969 di Fanelow (triangoli arancioni) sebbene siano compatibili entro 3% con la curva del fit, sono molto più bassi degli altri ottenuti dai diversi esperimenti.

Questo effetto è probabilmente dovuto a campi magnetici, oppure ad una sovrastima dell'accettazione dello strumento utilizzato.

3.3 Simulazione del processo $\tilde{\chi}^0 + \tilde{\chi}^0 \rightarrow e^+ + X$.

Prima di lanciare in orbita l'esperimento AMS-2 è stato necessario effettuare dei test di tipo Monte Carlo, simulando l'interazione tra la strumentazione dell'AMS ed i leptoni e^- ed e^+ (prodotti dall'annichilazione di due neutralini), ottenendo, in funzione del rapporto $e^+/(e^++e^-)$, il seguente andamento:



dove, nel secondo grafico, la curva “a” rappresenta il contributo al rapporto non considerando l'annichilazione $\tilde{\chi}\tilde{\chi}$, mentre per l'andamento “b” $\tilde{\chi}$ è stato posto avere una massa $m_{\tilde{\chi}}=130$ GeV [Borgia], [Maestro].

CONCLUSIONI

I Raggi Cosmici sono composti sia da materia che da antimateria (sebbene in misure diverse).

Non è stata mai osservata, però, in essi la presenza di nuclei antialfa (nei RC non vi è sufficiente energia per produrli).

Materia e antimateria non sono presenti nelle stesse quantità nell'Universo attuale.

Si ipotizza dunque che nell'Universo primordiale vi fosse un piccolo eccesso di materia sull'antimateria (circa una particella in più per ogni miliardo di antiparticelle).

Le particelle di materia si sono annichilate con le rispettive antiparticelle producendo fotoni; dalle particelle rimaste si sono invece formate le strutture che oggi conosciamo.

Tale ipotesi è confermata indirettamente dal fatto che nell'Universo attuale la densità dei fotoni è circa un miliardo di volte quella della materia.

Se quindi le previsioni effettuate tramite metodi statistici, quali le simulazioni Monte Carlo, saranno verificate significa che rivelando i positroni presenti nei Raggi Cosmici si potrà testare la veridicità della teoria del neutralino, per cui vale la reazione:

$$\tilde{\chi}^0 + \tilde{\chi}^0 \rightarrow e^+ + X.$$

In questo modo, dall'analisi dello spettro di e^+ , ed in particolare dal rapporto $R = e^+/(e^++e^-)$ si potrà risalire direttamente alla massa dei neutralini, e da quest'ultima conoscere quindi l'evoluzione dell'Universo.¹⁷

¹⁷ Si veda in APPENDICE il paragrafo: 5. Considerazioni sull'evoluzione dell'Universo.

APPENDICE

1. "Toy model" per lo sciame elettromagnetico.

Questa componente della RC genera nella materia la cosiddetta cascata elettrofotonica (o sciame elettromagnetico).

Un modello semplificato dello sciame elettromagnetico è il seguente:

$\square\square e^+ (\square e^+ (\square e^+ (\dots) + \square(\dots)) + \square\square e^+ (\dots) + e^{\square}(\dots)) + e^{\square}(\square e^{\square}(\square e^{\square}(\dots) + \square(\dots)) + \square\square e^+ (\dots) + e^{\square}(\dots))$
dove in unità di lunghezza di radiazione \square_0 (distanza per cui, in un dato materiale, l'energia si dimezza) si ha:

$$t = \frac{x}{\square_0 \ln(2)} \quad \begin{matrix} 18 & \text{numero di particelle} & E \\ 0 & 1 & E_0 \\ 1 & 2 & E_0/2 \\ 2 & 4 & E_0/4 \\ & \dots & \end{matrix}$$

per cui vale:

$N(t) = 2^t = e^{\ln(2)t}$ è il numero di particelle in funzione dello spessore t espresso in lunghezza di radiazione.

$$E(t) = \frac{E_0}{N(t)} = E_0 2^{-t} = E_0 e^{-\ln(2)t} \quad \text{è la variazione di energia in funzione di } t.$$

Lo sciame non aumenta più per $E = E_{\text{critica}} = E(t_{\text{max}})$:

$$t_{\text{max}} = \frac{\ln\left(\frac{E_0}{E_{\text{critica}}}\right)}{\ln(2)}$$

¹⁸ Ottenuto da:

$$\frac{dE}{dx} = -\frac{E}{\square_0}$$

per cui (integrando tra E_0 ed E e tra 0 ed x):

$$E = E_0 e^{-x/\square_0}$$

Inoltre da:

$$N(t) = 2^t = e^{t \ln(2)}$$

si trova:

$$E(t) = \frac{E_0}{N(t)} = E_0 e^{-t \ln(2)} = E_0 e^{-x/\square_0}$$

da cui:

$$t = \frac{x}{\square_0 \ln(2)} \quad \text{dove } x \text{ è la lunghezza percorsa nel mezzo dallo sciame.}$$

con un numero di particelle finale:

$$N_{\max} = N(t_{\max}) = \frac{E_0}{E_{\text{critica}}}$$

2. Particelle cariche vicino alla Terra.

Per una particella carica vicino alla Terra valgono le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} E = mc^2 \\ \vec{p} = m\vec{v} \end{cases} \quad \text{con} \quad \frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{Ze}{c} \vec{v} \times \vec{B} \quad (\text{Forza di Lorentz})$$

in coordinate curvilinee:

$$\begin{cases} \vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \frac{d\vec{r}}{dl} \frac{dl}{dt} = v \frac{d\vec{r}}{dl} \\ \vec{p} = P \frac{d\vec{r}}{dl} \end{cases} \quad \text{da cui:}$$

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = \frac{d\vec{p}}{dl} \frac{dl}{dt} = v \frac{d}{dl} \left[P \frac{d\vec{r}}{dl} \right] = Pv \frac{d^2\vec{r}}{dl^2}$$

Dove naturalmente l è l'ascissa curvilinea, ovvero la proiezione della posizione lungo la direzione del moto.

Eguagliando alla forza di Lorentz, che tiene in orbita le particelle si ha:

$$\frac{d^2\vec{r}}{dl^2} = \frac{Ze}{Pc} \frac{d\vec{r}}{dl} \times \vec{B} \quad \text{dove} \quad \frac{Ze}{Pc} = \frac{1}{R} \quad \text{definisce la rigidità.}$$

L'ultima equazione indica che particelle con uguale rigidità percorrono le stesse traiettorie. La rigidità è inoltre legata al raggio di girazione, che indica la curvatura della traiettoria:

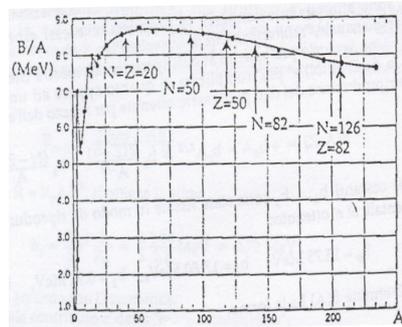
$$R_g = \frac{R}{B_{\perp}},$$

dove B_{\perp} è la componente del campo magnetico normale alla traiettoria (quello che effettivamente compare nella forza di Lorentz).

3. Calcolo delle energie di separazione per nucleone.

Per la determinazione delle energie di separazione per nucleone ($S_{n,p}$) si definisce l'energia di legame di un nucleo ${}^A_Z X$ come:

$$B(A,Z) = -E(A,Z),$$



Dove con $E(A,Z)$ si indica l'energia di interazione tra i nucleoni. La formula empirica delle energie di legame è la seguente:

$$B(A, Z) = [M(A, Z) - Zm_p - (A - Z)m_n] c^2 > 0$$

essa è definita positiva dal momento che la massa totale del nucleo risulta minore della somma delle masse dei nucleoni che lo costituiscono; si trova che essa è proprio pari al difetto di massa.

Dal momento che si trova che al crescere di A il rapporto B/A tende ad una costante b_0 , si deduce che le forze nucleari hanno un corto raggio d'azione.

Se infatti i nucleoni interagissero tra loro a coppie con $E_{int} = -V$, essendoci $A(A-1)/2$ coppie, si avrebbe:

$$B = -E \sim A(A-1)V/2, \text{ ovvero } \lim_{A \rightarrow \infty} B/A^2.$$

Se invece i nucleoni interagiscono solo con quelli confinati entro un raggio r_0 si ha:

$$B \sim A \cdot N \frac{4}{3} \pi r_0^3 V, \text{ ovvero } \lim_{A \rightarrow \infty} B/A.$$

In realtà il risultato è molto più complesso di quanto sembra e pertanto è stata introdotta la formula semiempirica delle energie di legame:

$$B(A, Z) = b_0 A - b_1 A^{2/3} - b_2 \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - b_3 \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(A)$$

Dove i termini con b_0 e b_1 sono detti: termine di energia di volume e di superficie.

Il termine con b_2 è quello che tiene conto della repulsione coulombiana tra i protoni.

Il termine con b_3 è l'energia di simmetria: indica che i nuclei più stabili sono quelli con $N=Z$.

La curva dei nuclei stabili segue infatti l'andamento di una bisettrice nel piano (Z, N) , ma per valori di A molto grandi, si nota che in realtà il rapporto N/Z cresce con A : a parità di A sono più legati (e quindi più stabili) i sistemi con pochi protoni, per i quali è meno rilevante la repulsione coulombiana p-p.

I nuclei al di sopra della bisettrice possono rientrare nell'andamento aspettato decadendo β^- trasformando un neutrone in un protone, viceversa quelli al di sotto della retta dei nuclei stabili possono decadere β^+ .

I decadimenti α comportano invece uno spostamento lungo una parallela alla bisettrice dal momento che vengono espulsi dal nucleo un egual numero di protoni e neutroni ($2n+2p$). Il termine $\delta(A)$ è infine l'energia di appaiamento e tiene conto che i nuclei pari-pari (con N e Z pari) sono quelli più favoriti in natura; essa è definita come:

$$\delta(A) = \begin{cases} 0 & \text{per } A \text{ dispari} \\ b_4 A^{-1/2} & \text{per } N \text{ e } Z \text{ dispari} \\ -b_4 A^{-1/2} & \text{per } N \text{ e } Z \text{ pari} \end{cases}$$

Sperimentalmente si trovano i seguenti valori per le costanti:

$$b_0 \sim 15.75 \text{ MeV}; b_1 \sim 17.80 \text{ MeV}; b_2 \sim 0.71 \text{ MeV}; b_3 \sim 23.7 \text{ MeV}; b_4 \sim 12 \text{ MeV}.$$

Una volta trovata l'espressione per $B(A, Z)$ si può dunque scrivere:

$$\begin{aligned} S_n(A, Z) &= B(A, Z) - B(A-1, Z) \\ S_p(A, Z) &= B(A, Z) - B(A-1, Z-1) \end{aligned}$$

4. Stabilità dei nuclei pari-pari.

Questo effetto evidenzia quanto già accennato precedentemente, ovvero che i nuclei con N e Z pari sono i più stabili.

Ciò lo si vede dalla formula empirica delle energie di legame, ricavando $M(A, Z)$ si ottiene:

$$M(A, Z) = Zm_p + (A-Z)m_n - B(A, Z)/c^2$$

Sostituendo a $B(A, Z)$ la sua espressione semiempirica ed imponendo la condizione di stabilità:

$$\frac{\partial M(A, Z)}{\partial Z} = (m_p - m_n) + \frac{1}{c^2} \left[2 \frac{Z-1}{A} b_2 - \frac{2Z-1}{A^{1/3}} b_3 - 4b_3 \frac{A-2Z}{A} \right] = 0$$

dalla cui soluzione si ricavano le parabole di massa.

5. Considerazioni sull'evoluzione dell'Universo.

Se si pensa ad un Universo costituito da un ammasso di Galassie, contenute in una sfera di raggio R si ha:

$$M = \frac{4\pi R^3}{3} \rho$$

per ogni Galassia di massa m si ha:

$$E_p = -\frac{mMG}{R} = -\frac{4\pi mR^2 \rho G}{3} \quad \text{energia potenziale.}$$

Dalla legge di Hubble

$$v = HR$$

si ha:

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 = mH^2R^2/2 \quad \text{energia cinetica}$$

per cui l'energia totale:

$$E = mR^2 \left(\frac{H^2}{2} - \frac{4\pi\rho G}{3} \right) = \text{cost.} \quad \text{durante l'espansione dell'Universo.}$$

- Se $E < 0$ l'Universo non andrà all'infinito, quindi collasserà, poiché per distanze grandi $E_p \sim 0$ e $E \sim E_c > 0$.
- Se $E > 0$ l'Universo si espanderà all'infinito con $E \sim E_c > 0$.
- Se $E = 0$ l'Universo può avere la velocità di fuga:

$$E=0 \quad \text{e} \quad \frac{H^2}{2} = \frac{4\pi\rho G}{3}$$

Da cui si ricava la densità critica ρ_c (al di sopra della quale l'Universo è chiuso e viceversa).

BIBLIOGRAFIA

- AMS, “*The Alpha Magnetic Spectrometer AMS*”. 2001.
- X. Artru, G.B. Yodh, “*Practical theory of the multilayered transition radiation detector*” (“Physical review d” volume 12, numero 5). 1/9/1975.
- F. Barao, “*AMS a magnetic spectrometer on the International Space Station*”. Vienna conference. 15-22/2/2004.
- B. Bertucci, “*Review of precision measurements of high energy electrons*” (“International journal of modern physics a” volume 17, numeri 12 e 13). World Scientific Publishing Company. 20/5/2002.
- B. Borgia, “*The Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*”. 1/11/2004.
- M. Buénerd; P. Aguayo, M. Aguilar Benitez, L. Arruda, F. Barao, A. Barrau, B. Baret, E. Belmont, J. Berdugo, G. Boudoul, J. Borges, D. Casadei, J. Casaus, C. Delgado, C. Diaz, L. Derome, L. Eraud, L. Gallin-Martel, F. Giovacchini, P. Gonclaves, E. Lanciotti, G. Laurenti, A. Malinine, C. Mana, J. Marin, G. Martinez, A. Menchaca-Rocha, C. Palomares, M. Pimenta, K. Protasov, E. Sanchez, E-S. Seo, I. Sevilla, A. Torrento, M. Vargas-Trevino, “*The AMS 02 RICH image prototype in beam tests with 20 GeV/c per nucleon ions*”. The 28th international cosmic ray conference. 2003.
- J. Burger, S. Gentile, “*The performance of the AMS-02 TRD*”. Universal Academy Press, Inc.; The 28th international cosmic ray conference. 2003.
- C. Cecchi, “*The AMS-02 Tracker*”. Universal Academy Press, Inc.; The 28th international cosmic ray conference. 2003.
- W. De Boer, “*AMS - a particle spectrometer in space*”. 2003.
- L. Eisenbud, E. P. Wigner, “*La struttura del nucleo*”. Edizioni Universitarie, Boringhieri-Torino. 1960.
- T. K. Gaisser, T. Stanev, “*Cosmic rays*”. 14/6/2000.
- S. Gentile, “*The Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*”. Universal Academy Press, Inc.; The 28th international cosmic ray conference. 2003.
- W. R. Leo, “*Techniques for Nuclear and particle Physics Experiments; A How-to Approach*”. Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo. 1994.
- P. Maestro, “*Indirect search for dark matter by measurements of the cosmic ray positron spectrum with the AMS 02 experiment*”. (Dottorato di ricerca in fisica sperimentale, relatore: prof. Pier Simone Marrocchesi). Siena. Settembre 2003.
- B. Monreal, “*The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS)*”. 2002.
- D. Perkins, “*Particle Astrophysics*”. Oxford University Press. 2003.
- N. Stanton, “*Introduction to cosmic rays*”. 9/7/2003.
- J.-P. Vialle, “*AMS: an imaging detector on the International Space Station*”. Stockholm, Imaging 2003.