

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PERUGIA

Dipartimento di Fisica e Geologia

Corso di Laurea Triennale in

FISICA



Tesi di Laurea

**Identificazione di elettroni e positroni con il
rivelatore AMS-02 a bordo della ISS**

Laureando:

Giovanni Bartolini

Relatori:

Dott. Matteo Duranti

Dott. Valerio Vagelli

Anno Accademico 2014/2015

*Alla mia famiglia,
che mi ha sostenuto
e ha reso possibile questo traguardo*

Indice

Introduzione	1
1 Raggi Cosmici	2
1.1 Spettro energetico e composizione dei Raggi Cosmici	3
1.2 Sorgenti dei Raggi Cosmici	4
1.3 Propagazione dei Raggi Cosmici	7
1.3.1 Raggi Cosmici nell'eliosfera	7
1.3.2 Raggi Cosmici nella magnetosfera	9
2 AMS-02	11
2.1 Il Rivelatore AMS-02	13
2.2 Il Magnete Permanente	14
2.3 Il Tracciatore al silicio	14
2.4 Il Rivelatore a Radiazione di Transizione	17
2.5 Il Calorimetro Elettromagnetico	18
3 Identificazione di elettroni/positroni	22
3.1 Discriminazione e/p	24
3.1.1 Discriminazione e/p nel TRD	24
3.1.2 Discriminazione e/p nell'ECAL	26
3.1.3 Discriminazione e/p mediante il rapporto energia/impulso	28
3.2 Combinazione dei metodi di discriminazione	29

3.3	Risultati	33
3.3.1	Ottimizzazione del Template Fit	35
3.3.2	Ottimizzazione dell'errore	36
	Conclusioni	39
	Bibliografia	41

Introduzione

La fisica dei raggi cosmici nasce nel 1912, dopo che il fisico austriaco Victor Franz Hess ne ipotizzò l'esistenza per spiegare la ionizzazione dell'atmosfera a grandi altitudini. Dopo oltre un secolo in cui sono stati ampiamente studiati, sono molte le domande ancora aperte sulle loro origini e sulle dinamiche che gli permettono di raggiungere il nostro pianeta. Quello che però attualmente suscita il maggior interesse è il possibile legame tra le rare particelle di antimateria osservate nel flusso cosmico, positroni ed anti-protoni, e l'annichilazione di materia oscura nel nostro universo, interesse che ha contribuito allo sviluppo di esperimenti dedicati alla misura di precisione delle componenti più rare della radiazione cosmica. Un'ampia collaborazione internazionale ha quindi progettato e costruito tra il 1997 ed il 2011 il rivelatore AMS-02, uno spettrometro magnetico di grande accettazione concepito per effettuare dallo spazio misure di precisione delle caratteristiche spettrali dei raggi cosmici. Il rivelatore è stato poi lanciato nello spazio con lo Space Shuttle il 16 Maggio 2011 e installato a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, ISS) il 19 Maggio 2011.

In questo lavoro di tesi sono stati analizzati i dati raccolti da questo rivelatore, con la finalità di studiare una metodologia di analisi per identificare la componente di elettroni e positroni e separarla dal più abbondante fondo (principalmente protoni). Nelle seguenti pagine, andremo quindi a descrivere brevemente le caratteristiche dei raggi cosmici e del rivelatore AMS (Capitoli 1 e 2) e successivamente verrà discusso il metodo di analisi adottato e le incertezze, statistiche e sistematiche, ad esso associate (Capitolo 3).

Capitolo 1

Raggi Cosmici

I raggi cosmici (RC) sono particelle che dallo spazio raggiungono l'atmosfera terrestre da ogni direzione. Il loro studio è stato importante fin dagli anni immediatamente successivi alla loro scoperta nel 1912, in quanto ha portato alla scoperta di un gran numero di particelle (positrone, pioni, muoni...) aprendo la strada alla fisica subnucleare. Con l'avvento degli acceleratori, la possibilità di poter studiare le particelle in laboratorio ha portato a spostare l'interesse per i raggi cosmici sul problema della loro origine e propagazione. Tuttavia lo studio dei raggi cosmici resta importante per la possibilità di studiare le particelle ad energie ancora inaccessibili per gli acceleratori, per lo studio dei meccanismi di produzione, accelerazione e propagazione in atto nell'universo e per lo studio delle componenti di antimateria. Inoltre negli ultimi anni il legame tra fisica delle particelle e raggi cosmici è riemerso a causa della possibile connessione con la materia oscura, una forma di materia che rappresenta un'importante frazione dell'energia del nostro universo e che non può essere attualmente attribuita a nessuna delle particelle finora osservate negli acceleratori.

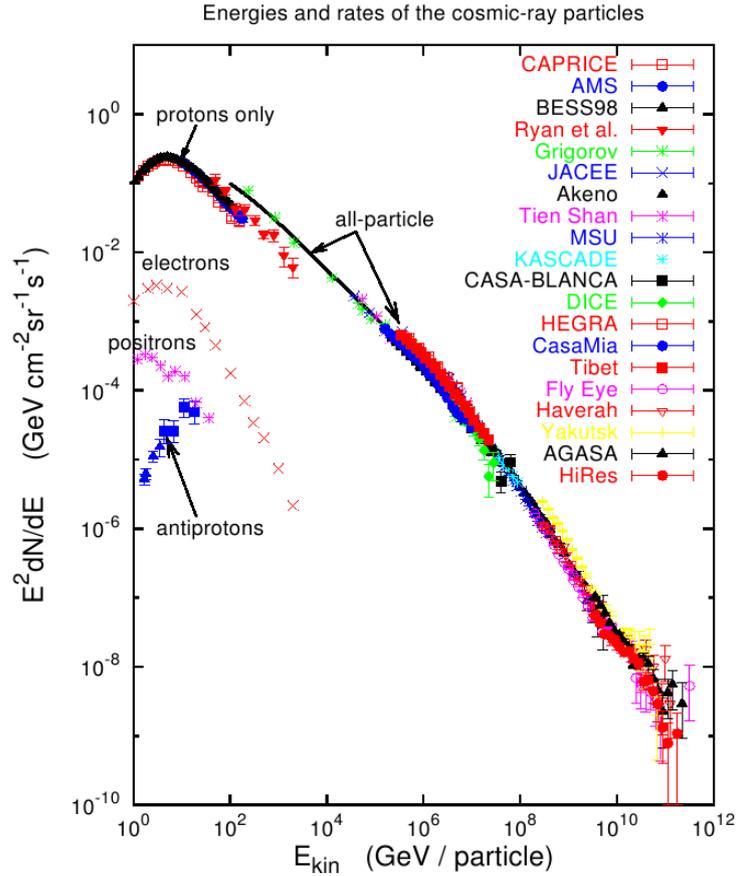


Figura 1.1: *Flusso differenziale dei raggi cosmici in funzione dell'energia cinetica per particella, mostrato in tutto l'intervallo di energia in cui sono stati osservati sperimentalmente; il flusso è ben descrivibile con una legge di potenza con indice pari a ~ 2.7 .*

1.1 Spettro energetico e composizione dei Raggi Cosmici

Le particelle che raggiungono l'atmosfera terrestre hanno una energia variabile su una scala molto ampia, che va dall'ordine degli eV fino ai 10^{20} eV. Quelle con basse energie, fino al GeV, sono di origine solare e vanno a costituire il così detto vento solare, mentre quelle con energia superiore al GeV provengono dall'esterno del nostro sistema solare e vengono detti raggi cosmici galattici.

In figura 1.1 si vede come il flusso di particelle diminuisca in maniera molto significativa all'aumentare dell'energia, infatti presenta un andamento descrivibile in prima approssimazione come una legge di potenza del tipo:

$$\Phi = \Phi_0 E^{-\gamma}$$

dove γ vale approssimativamente ~ 2.7 . A causa dell'enorme variazione del flusso al variare dell'energia, per poter studiare le proprietà dei raggi cosmici alle differenti energie sono necessarie diverse tecniche di misura e strumentazioni con differenti aree di raccolta. Ad energie minori dei 10^{14} eV si usa la rivelazione *diretta*, ovvero effettuando la misura prima dell'interazione con l'atmosfera, mediante strumenti di dimensioni relativamente ridotte (in modo da poter essere trasportati), posti su satelliti in orbita o su palloni aerostatici. Ad energie superiori invece si usa la misura *indiretta*, che consiste nella rilevazione dei prodotti secondari dell'interazione con l'atmosfera, mediante rivelatori al suolo disposti su ampie aree geografiche, per poi risalire alle caratteristiche iniziali della particella.

Nell'intervallo di energia in cui si può effettuare la misurazione diretta, si è ottenuto un quadro accurato dell'andamento energetico e della composizione dei raggi cosmici: essi sono composti prevalentemente da protoni per circa l' 85%, da elio per circa il 12% e da circa il 2% di nuclei pesanti; il restante $\sim 1\%$ è composto per la maggior parte di elettroni con una piccola componente di antimateria, ovvero positroni e anti-protoni. In figura 1.2 vediamo che le abbondanze relative delle varie specie nucleari non presentano variazioni significative al variare dell'energia.

1.2 Sorgenti dei Raggi Cosmici

L'origine dei raggi cosmici è ad oggi uno dei temi più dibattuti dell'astrofisica. Tuttavia la somiglianza tra le abbondanze relative dei nuclei osservate nei raggi cosmici con quelle osservate nel sistema solare (figura 1.3) ha portato alla conferma della teoria che sostiene abbiano una origine galattica.

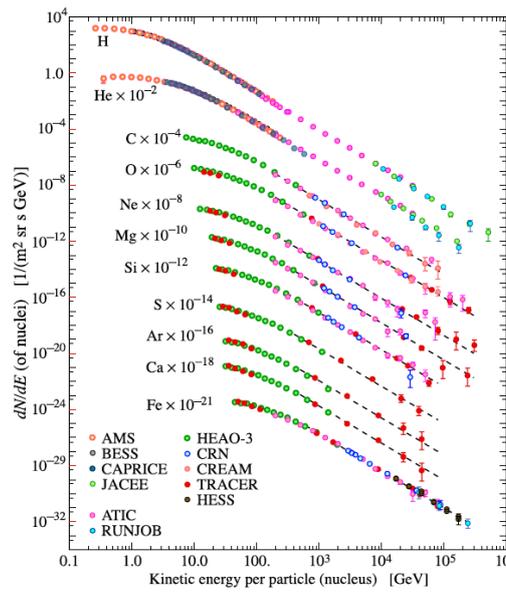


Figura 1.2: *Flusso differenziale delle diverse specie nucleari nei raggi cosmici in funzione dell'energia cinetica per nucleone, determinato da misure dirette; le abbondanze relative delle varie specie nucleari sono approssimativamente costanti al variare dell'energia.*

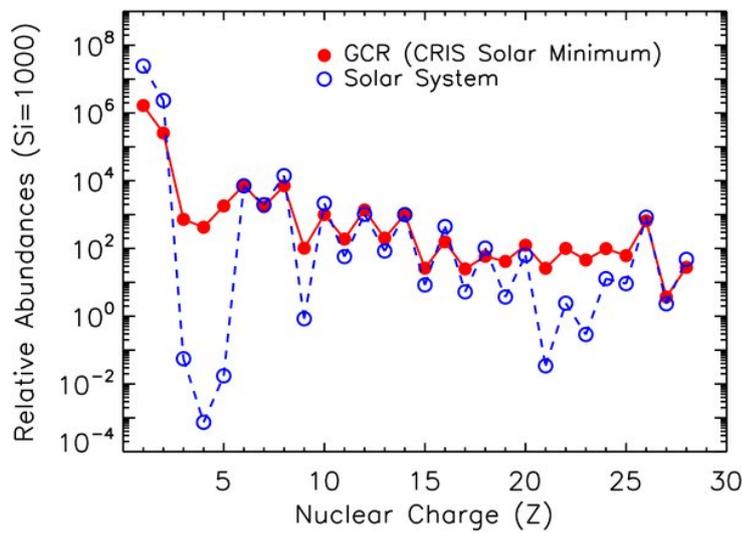


Figura 1.3: *Abbondanze chimiche relative nei raggi cosmici, in rosso, e nel sistema solare, in blu, con normalizzazione a Si = 1000; la notevole somiglianza delle abbondanze chimiche relative nei due sistemi è una conferma dell'origine galattica dei raggi cosmici.*

Rimane però da spiegare il meccanismo che permette alle particelle di raggiungere tali energie. Il modello attualmente più accreditato vede i resti di supernova (SuperNova Remnants, SNRs) come migliori candidati sia per l'origine che per l'accelerazione dei raggi cosmici, attraverso un meccanismo ideato da Fermi detto *diffusive shock acceleration* (DSA), secondo il quale le particelle acquistano energia interagendo con l'onda d'urto generata dall'esplosione della supernova [5]. Infatti l'onda d'urto è sede di intensi campi elettrici e magnetici: una particella che attraversa il fronte dell'onda viene accelerata dai campi elettrici e, dopo essere stata diffusa dai turbolenti campi magnetici, essa ha una certa probabilità di ritornare al fronte d'onda e subire così un'ulteriore accelerazione, in un meccanismo che ricorda quello degli odierni acceleratori.

Il risultato di tale processo è uno spettro che ha la stessa forma di quello osservato nei raggi cosmici, seppur con un $\gamma \sim 2.1 - 2.4$ che tuttavia risulta in accordo con quello osservato dopo aver considerato gli effetti di propagazione [5]. Inoltre questo modello spiega anche la densità di energia dei raggi cosmici: la potenza misurata per il flusso di raggi cosmici è dell'ordine di $\sim 10^{40}$ erg/s e assumendo l'esplosione di una supernova ogni 50 anni e di un rilascio di $\sim 10^{51}$ erg per ogni esplosione, si ottiene una potenza media emessa di circa $\sim 10^{41}$ erg/s, che è del tutto compatibile con quella misurata.

Nonostante ciò, questo meccanismo spiega bene solo la parte di spettro fino ai 10^{15-16} eV, mentre non è capace di spiegare la presenza di particelle con energie superiori a questa soglia. Inoltre proprio a queste energie è presente una pesante diminuzione del flusso, indicata con il termine ginocchio (*knee*), con l'indice di pendenza γ che passa da ~ 2.7 a ~ 3.1 . Questa variazione ci conferma che tali sorgenti non riescono ad accelerare le particelle oltre questa energia ed è quindi necessario considerare altre sorgenti per spiegare la presenza di particelle ad energie più elevate: queste avranno probabilmente un'origine extragalattica, infatti le sorgenti astrofisiche attualmente più accreditate per la loro accelerazione sono i nuclei galattici attivi (Active Galactic Nuclei, AGN).

1.3 Propagazione dei Raggi Cosmici

Una volta lasciata la loro sorgente, i raggi cosmici si disperdono nella galassia e si propagano nel mezzo interstellare (InterStellar Medium, ISM). La propagazione è dominata prevalentemente dalle interazioni con il mezzo e con il campo magnetico galattico e viene descritta con un modello basato sulla propagazione diffusiva. I vari fattori presi in considerazione dal modello sono:

- le *sorgenti*, che come visto producono uno spettro energetico descrivibile come una legge di potenza;
- il *campo magnetico galattico*, il cui effetto principale è quello di deviare le particelle disperdendole, facendo perdere al flusso la direzionalità della sorgente e rendendolo dunque isotropo;
- il *vento galattico*, un flusso di particelle che esce dalla galassia che tende a spingere i raggi cosmici verso l'esterno e a fargli perdere energia;
- i *processi nucleari*, come i decadimenti di nuclei instabili e i processi di spallazione dovuti all'interazione con il mezzo interstellare, che tendono quindi a modificare le abbondanze relative dei vari elementi e a produrre raggi cosmici di seconda specie (secondari);
- le *perdite di energia* dovute alle interazioni con il mezzo interstellare, come i processi di ionizzazione per i nuclei o processi di scattering Compton inverso e radiazione di sincrotrone per elettroni e positroni.

Tuttavia i maggiori ostacoli che i raggi cosmici devono attraversare prima di poter essere rilevati da un rivelatore in orbita intorno alla terra sono l'eliosfera e la magnetosfera [4].

1.3.1 Raggi Cosmici nell'eliosfera

Con vento solare si indica il flusso, di particelle, uscente dall'atmosfera del sole. Esso è composto da un plasma di protoni ed elettroni poco energetici ($\lesssim 0.5$ MeV)

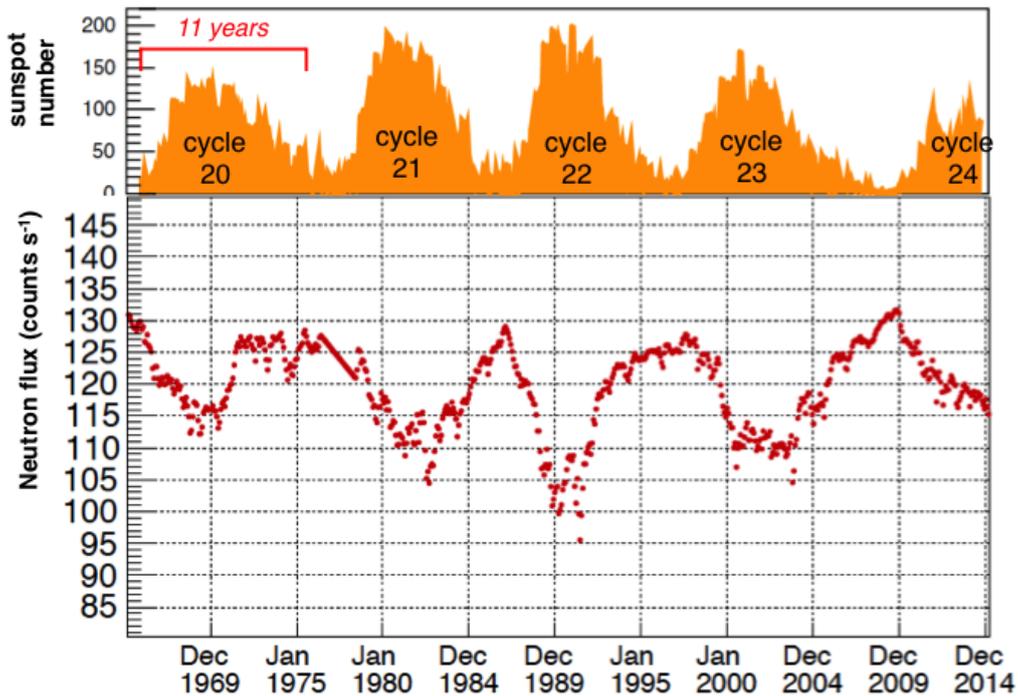


Figura 1.4: *Flusso di neutroni a terra, misurato dal neutron monitor Thule [7], in basso, e numero di macchie solari [6], in alto, in funzione del tempo: è evidente la depressione del flusso in corrispondenza dei massimi di attività solare.*

e si estende fino ad una distanza variabile di circa 100 unità astronomiche dal Sole, distanza alla quale viene frenato dal vento interstellare e che identifica il limite della regione chiamata eliosfera.

I raggi cosmici che arrivano in questa zona interagiscono con il campo magnetico trasportato dal vento solare, che opera quindi un'azione di schermo nei confronti delle particelle meno energetiche, deprimendone il flusso alle energie più basse (fino a ~ 10 GeV). Infatti c'è una stretta correlazione tra l'attività solare e il flusso di raggi cosmici che arriva fino alla Terra: infatti nei periodi di intensa attività solare, il vento solare diventa più intenso e si osserva una significativa riduzione del flusso di raggi cosmici alle basse energie. In figura 1.4, ad esempio, si può osservare il flusso di neutroni registrato a terra dalle stazioni di *neutron monitor* e il numero di macchie solari, in funzione del tempo. Il flusso di neutroni è creato dall'interazione

dei protoni primari con l'atmosfera terrestre e quindi la sua intensità è direttamente proporzionale al flusso dei protoni cosmici. L'anti-correlazione con il numero di macchie solari conferma proprio l'effetto di modulazione, sui raggi cosmici, dell'attività solare. In corrispondenza di eventi solari particolarmente violenti si possono osservare depressioni del flusso dei raggi cosmici fino anche ad energie di 100 GeV.

1.3.2 Raggi Cosmici nella magnetosfera

L'ultima barriera che i raggi cosmici devono attraversare prima di raggiungere l'atmosfera terrestre è la magnetosfera, ovvero la regione di effetto del campo magnetico terrestre. Questo viene generato dal movimento di cariche nel fluido di ferro e nichel che costituisce la parte esterna del nucleo della terra. In prima approssimazione può essere schematizzato come un campo di dipolo con momento $M = 8.1 \cdot 10^{25} \text{ G cm}^3$, con l'asse inclinato di $\sim 11^\circ$ rispetto all'asse di rotazione terrestre e con centro spostato di $\sim 400 \text{ Km}$ rispetto al centro della Terra.

Essendo particelle cariche, i raggi cosmici che entrano nella magnetosfera subiscono una deviazione a causa della forza di Lorenz, tuttavia più una particella è energetica e meno risente di questa deviazione. Formalmente si introduce il concetto di *rigidità magnetica*:

$$R = \frac{pc}{q} = \text{sign}(q) \frac{pc}{Ze} \text{ (Volt)}.$$

Un'alta rigidità caratterizza particelle che sono meno sensibili al campo magnetico e possono arrivare più facilmente a terra.

Oltre che dalla rigidità, la capacità di penetrazione di una particella dipende dalla latitudine geomagnetica, ovvero dalla posizione di arrivo rispetto all'asse del dipolo magnetico: infatti a basse latitudini le linee di campo sono trasversali al moto delle particelle incidenti e quindi la deviazione di Lorenz è massima, invece vicino ai poli le linee di campo sono pressoché parallele alla direzione di incidenza delle particelle e la deviazione è quindi minore.

Fissato un determinato valore della latitudine si definisce *cut-off geomagnetico* il valore di soglia della rigidità al di sotto della quale la particella non riesce a pene-

trare nell'atmosfera terrestre. Nell'approssimazione di dipolo, la rigidità di cut-off è stata formulata analiticamente da Störmer e nel caso di particelle che incidono verticalmente vale:

$$R_{cv} = 14.5 \frac{\cos^4 \lambda}{r^2}$$

dove λ è la latitudine geomagnetica e r è la distanza in cm dal centro del dipolo [8].

All'equatore magnetico arriva anche a ~ 15 GV.

Dunque il principale effetto del campo magnetico terrestre sui raggi cosmici è quello di modularne l'intensità in funzione della latitudine, impedendo alle particelle meno energetiche di raggiungere l'atmosfera.

Capitolo 2

AMS-02

Il lavoro di questa tesi, come già accennato, è incentrato su una tecnica di analisi per l'identificazione di elettroni e positroni nei raggi cosmici. I dati da analizzare sono quelli raccolti dall'esperimento AMS-02, che descriveremo in questo capitolo.

AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*) è uno spettrometro magnetico operante sulla ISS (*International Spatial Station*) dal Maggio del 2011 per lo studio di precisione della radiazione cosmica. È stato progettato e costruito utilizzando le stesse tecno-



Figura 2.1: *Disegno CAD del rivelatore AMS-02 completo della struttura di supporto per l'installazione sulla ISS.*



Figura 2.2: *Il rivelatore AMS-02 installato sulla stazione spaziale internazionale.*

logie degli esperimenti di fisica delle particelle ad alta energia, ma con un disegno che rispettasse le richieste per operare nello spazio. L'esperimento è stato proposto nel 1995 [9] ed ha avuto un prototipo, denominato AMS-01, che consisteva in una versione semplificata del rivelatore che è stata lanciata nello spazio nel 1998 a bordo di uno Space Shuttle e che ha mostrato che nello spazio questo tipo di rivelatore funzionava [10]. Dopo il volo del prototipo, lo sviluppo del sistema di ricerca completo coinvolse il lavoro di 500 scienziati provenienti da 56 istituzioni e 16 paesi per oltre 10 anni, fino al lancio del rivelatore nello spazio con uno Space Shuttle il 16 Maggio 2011, cui è seguita l'installazione a bordo della Stazione Spaziale Internazionale (International Space Station, ISS) il 19 Maggio 2011.

Nel resto del capitolo verranno descritte brevemente le componenti del rivelatore, dedicando uno spazio maggiore alle componenti più rilevanti per l'identificazione e l'analisi delle componenti di elettroni e positroni.

2.1 Il Rivelatore AMS-02

In Fig. 2.3 è mostrato uno schema della struttura del rivelatore. Al centro è situato lo spettrometro magnetico, composto da nove strati di rivelatori a microstrip di silicio, che vanno a formare il Tracker, e da un magnete permanente che produce un campo di ~ 0.14 T. Ai due estremi del magnete sono poste due coppie di piani di scintillatori (TOF), che permettono di ricostruire la velocità e la direzione di arrivo delle particelle e fungono da *trigger* principale del rivelatore. Sulla parte superiore della struttura è situato un rivelatore a radiazione di transizione (TRD) che permette di discriminare le componenti leggere (elettroni, positroni) da quelle più pesanti (protoni, nuclei) della stessa energia, mentre sulla parte inferiore sono situati un rivelatore a radiazione Cherenkov (RICH), che permette di misurare con precisione la velocità delle particelle incidenti, e un calorimetro elettromagnetico (ECAL) di piombo e fibre scintillanti, che permette di effettuare una misura di precisione dell'energia delle componenti elettromagnetiche (elettroni, positroni e fotoni) e ne

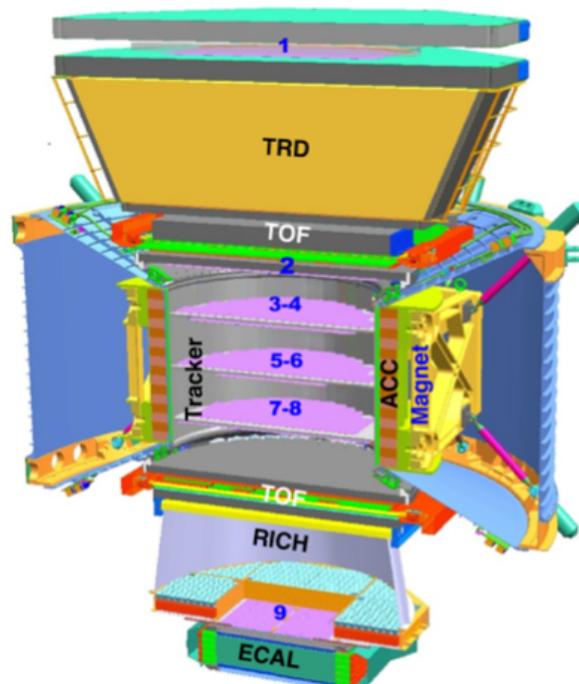


Figura 2.3: *Struttura del rivelatore AMS-02.*

fornisce un'ulteriore distinzione rispetto alle altre componenti grazie alle differenti caratteristiche degli sciami.

L'apparato ha una dimensione di circa $3 \times 4 \times 5 \text{ m}^3$ e un peso complessivo di ~ 7 tonnellate. L'intero apparato è stato disegnato e costruito in modo tale da poter operare nello spazio, in presenza del vuoto e di importanti escursioni termiche, e anche per poter sopportare le sollecitazioni meccaniche del lancio con lo Shuttle.

2.2 Il Magnete Permanente

Il magnete permanente è costituito da 6400 blocchi di Nd-Fe-B di dimensioni $5 \times 5 \times 2.5 \text{ cm}^3$. I blocchi sono assemblati in modo da formare 100 anelli (di 64 blocchi ciascuno), in modo da aver un cilindro cavo di altezza 800 mm, raggio interno $r_1 = 111.5 \text{ cm}$ e raggio esterno $r_2 = 129.9 \text{ cm}$.

La configurazione dei blocchi è stata progettata in modo da ottenere all'interno del magnete un campo uniforme di dipolo $B = 0.14 \text{ T}$, e contemporaneamente avere all'esterno un campo inferiore ai $2 \cdot 10^{-2} \text{ T}$ per ridurre al minimo le interferenze con l'elettronica e per evitare di sollecitare l'ambiente esterno della stazione spaziale. In figura 2.4 è rappresentato uno schema della disposizione dei blocchi e delle linee del campo risultante [9].

Il sistema di riferimento cartesiano associato ad AMS è centrato al centro del magnete, con l'asse di simmetria del cilindro che da la direzione all'asse z , orientato dal calorimetro verso il TRD, mentre l'asse x è orientato secondo la direzione ed il verso del campo magnetico; infine per completare la terna ortogonale destrorsa l'asse y è univocamente determinato.

2.3 Il Tracciatore al silicio

Il tracciatore al silicio di AMS-02 ha lo scopo di tracciare la traiettoria delle particelle all'interno del campo magnetico, campionandone la posizione di attraversamento a diverse altezze, per poi ricostruirne la Rigidità.

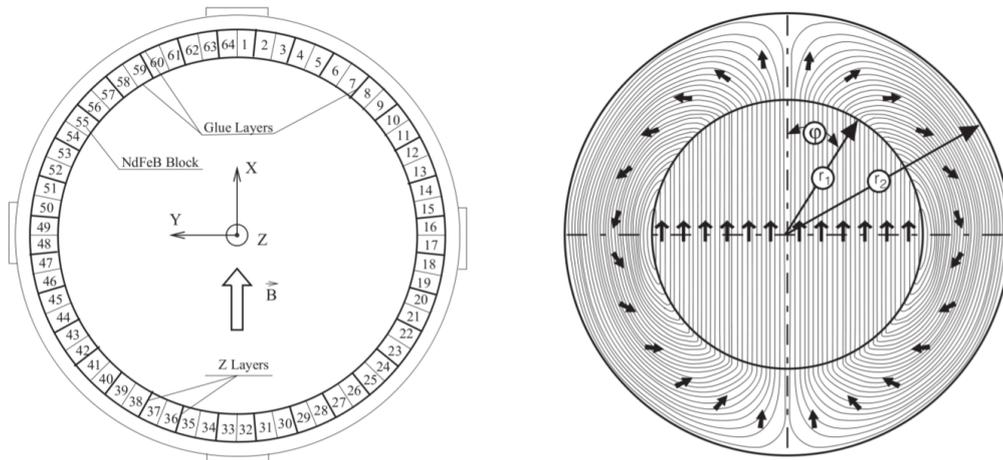


Figura 2.4: *Struttura del magnete permanente e del campo magnetico: i 64 blocchi di Nd-Fe-B di ciascun anello, sono disposti in modo da avere all'interno dell'anello stesso un campo uniforme di 0.14 T.*

L'elemento base del sistema di tracciamento sono i 2264 sensori di silicio di dimensioni $72 \times 41 \times 0.3 \text{ mm}^3$. Sulle due facce dei sensori sono disposte delle impiantazioni di microstrisce (*strip*) a formare un reticolo ortogonale che permette di misurare contemporaneamente le coordinate x e y di passaggio della particella. Le particelle, all'attraversamento dei sensori, perdono energia per ionizzazione generando coppie elettrone-lacuna che vengono raccolte in superficie dalle strip più vicine grazie all'azione del campo elettrico mantenuto all'interno del silicio da una d.d.p. applicata esternamente. A partire dalle informazioni delle microstrip, un sistema di lettura analogico permette di ottenere una precisione di $\sim 10 \mu\text{m}$ per la coordinata y e di $\sim 30 \mu\text{m}$ per la coordinata x . Inoltre, poiché l'ampiezza del segnale raccolto è proporzionale al quadrato della carica, Z , della particella incidente, ciascun strato del tracciatore fornisce una stima della Z della particella che lo attraversa.

I sensori sono organizzati in 192 unità di lettura chiamate *ladder*, a loro volta raggruppate in 9 *layer* alloggiati in sei piani disposti a diverse altezze lungo l'interno apparato. La disposizione dei piani e dei layer del tracciatore è rappresentata schematicamente in Fig. 2.5. La configurazione scelta, con gli strati più esterni del

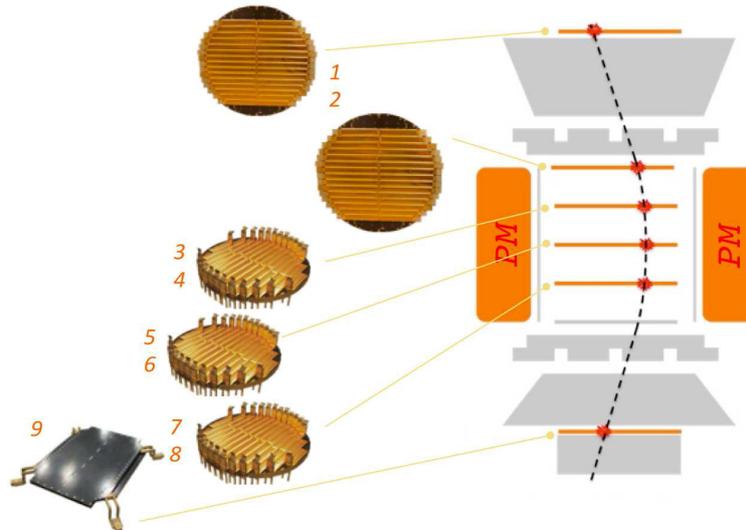


Figura 2.5: *Disposizione dei layer del tracciatore all'interno di AMS-02.*

tracciatore disposti ai due estremi dell'apparato distanti ~ 3 m, permette di massimizzare la lunghezza L di misura della traiettoria, andando a diminuire la minima curvatura apprezzabile dallo strumento e quindi ad aumentare la massima rigidità misurabile (Maximum Detectable Rigidity, MDR¹). La misura della rigidità viene infatti calcolata a partire dalla curvatura della particella all'interno del campo magnetico e l'accuratezza di tale misura dipende, tra i vari parametri, dal braccio di leva.

L'elevato numero di canali di lettura produce circa ~ 200 W di calore: per evitare che un eccessivo riscaldamento vada a danneggiare il rivelatore è necessario disperdere questo calore all'esterno. Ciò viene eseguito da un sistema di raffreddamento bifase a CO₂ che trasporta il calore verso dei radiatori esterni ad AMS mantenendo il tracciatore ad una temperatura di $\sim 1^\circ$ C. È inoltre presente un sistema laser per la verifica del posizionamento dei layer interni al magnete, che permette di monitorare la stabilità meccanica del tracciatore e correggere a posteriori eventuali disallineamenti meccanici legati agli stress termici lungo l'orbita.

¹La MDR è definita come il valore della rigidità R per cui l'incertezza relativa sulla misura, $\frac{\delta R}{R}$, è pari a 1.

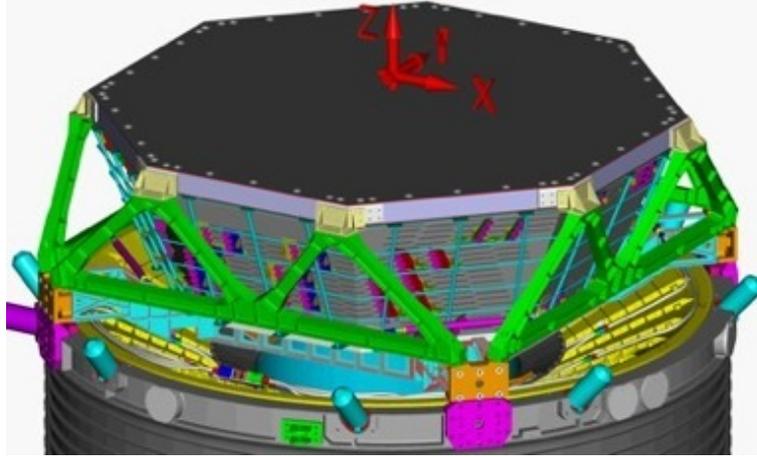


Figura 2.6: *Disegno CAD del rivelatore a radiazione di transizione.*

2.4 Il Rivelatore a Radiazione di Transizione

Quando una particella attraversa una superficie di separazione tra due materiali, o più in generale tra due zone con indice di rifrazione diverso, ha una certa probabilità di emettere radiazione, detta *radiazione di transizione*. La probabilità di emissione è proporzionale al fattore di Lorentz $\gamma = E/m$, dove E è l'energia della particella e m è la sua massa. Il rivelatore a radiazione di transizione (Transition Radiation Detector, TRD) sfrutta questo fenomeno per distinguere particelle leggere, come elettroni e positroni, che a parità di energia avranno un fattore di Lorentz più alto e quindi una più alta probabilità di emissione, da particelle più pesanti, come protoni e nuclei [11].

Il TRD si trova nella parte superiore di AMS, fra il primo piano del tracciatore e i primi due piani del TOF; è formato da 328 moduli, raggruppati in 20 piani supportati da una struttura conica ottagonale con pareti in alluminio con struttura a nido d'ape. Esso ha anche capacità di tracciamento, con una risoluzione a livello del mm; nei primi e negli ultimi 4 piani i tubi proporzionali sono orientati parallelamente al campo magnetico (lungo l'asse x), mentre nei 12 piani centrali sono perpendicolari ad esso (asse y), in modo da poter ricostruire la traccia in 3D (come mostrato in figura 2.6).

Ogni modulo è composto da:

- un *radiatore*: 22 mm di fibre di polipropilene/polietilene con una densità di 0.06 g/cm^3 , disposte in modo da massimizzare il numero di interfacce così da aumentare la probabilità di produrre radiazione di transizione;
- una *camera proporzionale*: 6 mm di tubi a cannuccia (straw tubes), riempiti con una miscela di Xe e CO_2 (in proporzione $\sim 90:10$), intorno ad un filo che si trova ad una tensione di $\sim 1500 \text{ V}$.

Nello strato di polietilene le particelle producono fotoni per radiazione di transizione, questi raggiungono i tubi dove innescano una cascata di ioni ed elettroni nella miscela di Xe e CO_2 , provocando un cambiamento di corrente sul filo che induce quindi un segnale elettrico registrato dall'elettronica posta ai capi.

2.5 Il Calorimetro Elettromagnetico

Il calorimetro elettromagnetico (Electomagnetic CALorimeter, ECAL) è un calorimetro a campionamento a forma di parallelepipedo, che compie una misura di tipo *distruttivo* in quanto la particella viene assorbita parzialmente o integralmente dall'apparato, per questo motivo è posizionato in fondo al rivelatore [12]. Le particelle che ne attraversano il volume attivo rilasciano la loro energia producendo degli *sciame* che saranno di tipo diverso a seconda della particella incidente, di conseguenza l'apparato è in grado di discriminare le particelle a seconda del tipo di sciame rilasciato.

Il calorimetro è costituito da 18 strati o *layer* di dimensioni $648 \times 648 \times 9 \text{ mm}^3$, ognuno dei quali è formato da lamine di piombo spesse 1 mm, il materiale passivo dove avviene la produzione delle particelle secondarie che compongono lo sciame, intervallate da fibre scintillanti di diametro 1 mm, il materiale attivo che rivela le particelle cariche dello sciame. I layer sono accoppiati a formare 9 *superlayer*, in ognuno dei quali le fibre sono posizionate lungo una sola direzione. Per permettere

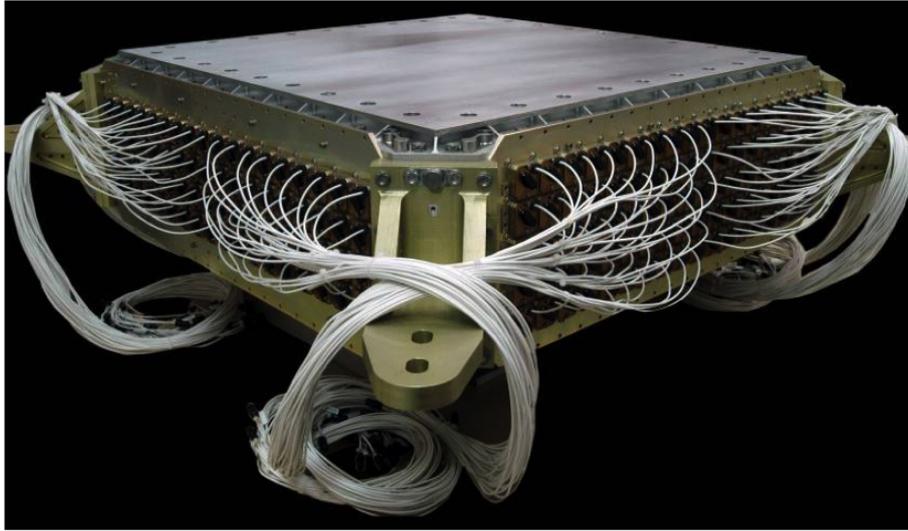


Figura 2.7: *Calorimetro elettromagnetico (ECAL) del rivelatore AMS-02; è composto da 18 strati di piombo intervallati da fibre scintillanti; nell'immagine è visibile il primo strato, la struttura di supporto ed i cavi dei fotomoltiplicatori utilizzati per la sua lettura.*

una ricostruzione tridimensionale dello sciame, sono stati sovrapposti 5 superlayer in *vista-Y*, cioè con le fibre disposte parallelamente all'asse x , e 4 superlayer in *vista-X*, cioè con le fibre disposte parallelamente all'asse y . L'apparato ha inoltre una capacità di tracciamento con una risoluzione angolare di $\sim 1^\circ$.

I due principali tipi di sciame che le particelle possono produrre sono lo sciame *elettromagnetico* e lo sciame *adronico*. Le particelle che producono sciame elettromagnetici sono elettroni, positroni e fotoni molto energetici (anche se questi ultimi sono facilmente distinguibili dai primi due), mentre protoni e nuclei producono sciame di tipo adronico. Le misure ottenute da ECAL danno informazioni complete sulla forma longitudinale e trasversale dello sciame e permettono così di distinguere sciame adronici da quelli elettromagnetici. La scelta dei materiali e delle proporzioni relative dell'apparato sono finalizzate a minimizzare la probabilità di interazione degli adroni e contemporaneamente a massimizzare quella di elettroni e positroni, così da migliorare la separazione fra sciame adronici ed elettromagnetici, tuttavia in alcuni casi uno sciame adronico può assomigliare molto ad uno elettromagnetico, quindi la

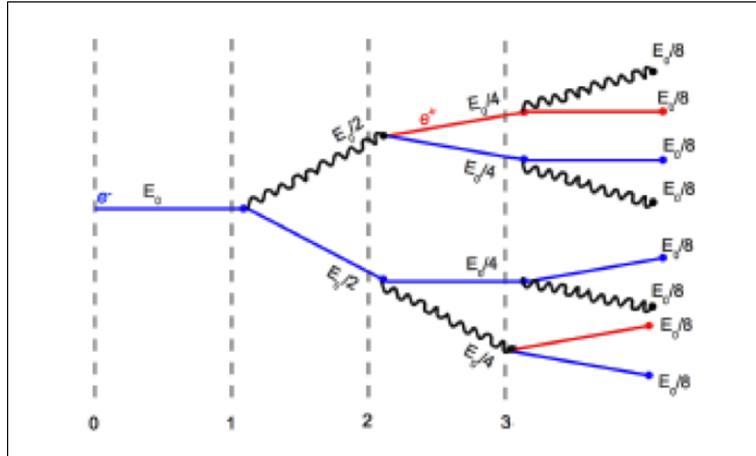


Figura 2.8: *Rappresentazione schematica dello sviluppo longitudinale di uno sciame elettromagnetico; le linee blu rappresentano gli elettroni mentre quelle rosse i positroni, le linee ondulate invece schematizzano i fotoni.*

distinzione tra protoni ed elettroni non è sempre evidente.

Elettroni (o positroni) con energie superiori al GeV interagiscono con la materia elettromagneticamente ed emettono radiazione di frenamento (*bremstrahlung*). L'interazione con il materiale comporta infatti una decelerazione della particella, che quindi perde energia ed emette fotoni. Se l'energia della particella era elevata, il fotone emesso avrà abbastanza energia per produrre una coppia e^+e^- , e queste particelle a loro volta produrranno altri fotoni mediante lo stesso processo, producendo quindi lo sciame. Il processo a catena continua finché le particelle cariche non scendono sotto l'energia critica E_C (di circa ~ 100 MeV), al di sotto della quale le particelle non perdono più energia tramite *bremstrahlung* ma tramite ionizzazione.

Protoni e nuclei invece interagiscono con la materia prevalentemente tramite processi di interazione forte, che producono sciami adronici. Questi hanno generalmente uno sviluppo molto diverso da quelli elettromagnetici: gli sciami adronici sono generalmente più larghi, a parità di materiale, non presentano la simmetria cilindrica degli sciami elettromagnetici e necessitano di una quantità di materiale molto maggiore per essere contenuti longitudinalmente. Tuttavia in alcuni casi uno sciame adronico può dar vita ad uno sciame elettromagnetico in quanto, per esempio, i pioni neutri

generano una coppia di fotoni, dunque in questi casi la distinzione fra i due tipi di sciame risulta più complessa.

Capitolo 3

Identificazione di elettroni/positroni

Il rivelatore AMS-02 è stato disegnato e costruito per poter studiare con precisione la componente più rara dei raggi cosmici, ovvero elettroni e antimateria (prevalentemente positroni). Per fare questo, è necessario compiere una analisi sui dati raccolti dal rivelatore in modo da poter distinguere le particelle interessate ed escludere il più possibile le altre, molto più abbondanti. L'analisi è stata eseguita con l'utilizzo del software ROOT [13].

Inizialmente è stata fatta una selezione preliminare sugli eventi da considerare: tra la totalità degli eventi a disposizione sono infatti stati scartati alcuni in base alle condizioni della stazione spaziale e dell'elettronica di acquisizione o per non aver lasciato sufficienti informazioni nel TRD, inoltre sono stati presi in considerazione solo quelli con una carica unitaria e che presentavano una singola traccia nel tracciatore. Sono stati anche rimossi eventi che avessero attraversato il sistema a tempo di volo in direzione opposta, cioè dal basso verso l'alto. Per una particella positiva (negativa) che proviene dal basso, infatti, il segno della rigidità viene ricostruito, nello spettrometro, come negativo (positivo).

Il diagramma in figura 3.1 mostra indicativamente il risultato di questa selezione preliminare. Gli eventi, con energie nell'intervallo [10-1500] GeV, sono graficati in

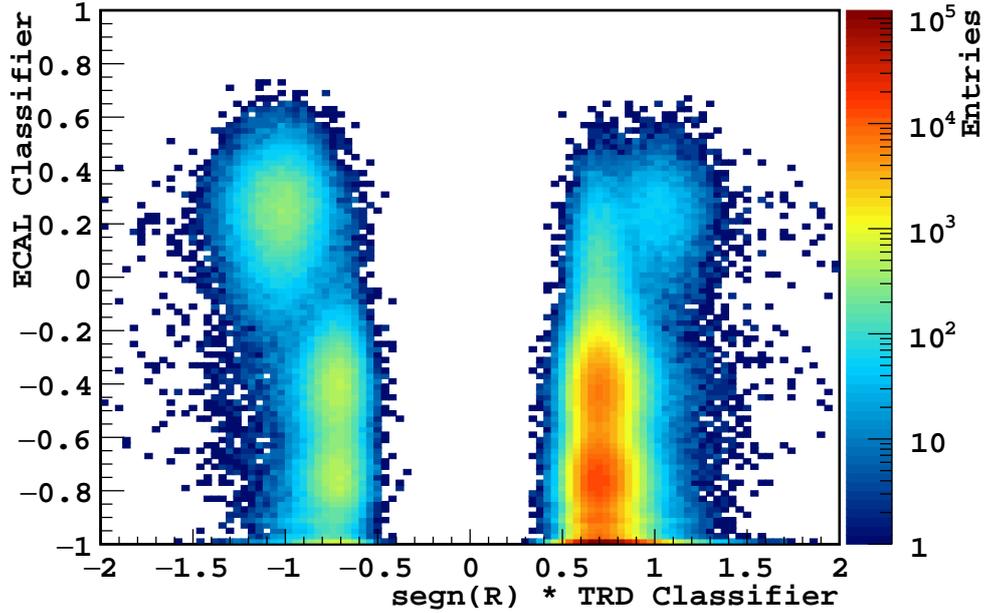


Figura 3.1: *Distribuzione degli eventi raccolti dal rivelatore AMS-02 nell'intervallo di energia [10-1500] GeV, in funzione del classificatore ottenuto dai segnali in ECAL, sulle y, e del classificatore ottenuto dai segnali nel TRD moltiplicato per il segno della rigidità, sulle x.*

funzione di variabili ottenute dall'analisi dei segnali raccolti dai singoli rivelatori: classificatore ECAL (cfr. Sez. 3.1.2) per l'asse y e $\text{segno}(R)$ moltiplicato per il classificatore TRD (cfr. Sez. 3.1.1) per l'asse x . Nella distribuzione ottenuta si possono osservare quattro popolazioni, due nel lato con carica positiva e due nel lato con carica negativa: in basso a destra troviamo la popolazione più abbondante, costituita da protoni, mentre in alto a sinistra si trova la popolazione degli elettroni; in alto a destra si può osservare una popolazione con distribuzione simile a quella degli elettroni ma con carica positiva e sarà dunque costituita da positroni, infine l'ultima popolazione in basso a sinistra è una popolazione di protoni con carica negativa, quindi antiprotoni. In realtà c'è una piccola probabilità che il tracciatore possa sbagliare il segno della carica quindi la maggior parte delle particelle classificate come antiprotoni saranno in realtà protoni con il segno della carica errato.

3.1 Discriminazione e/p

La selezione preliminare ci ha permesso di rimanere con particelle di carica unitaria, eliminando quindi la componente adronica composta dai nuclei più pesanti, ma ci ha comunque lasciato una grande quantità di protoni. In questo paragrafo discuteremo dei metodi di riconoscimento e analisi che ci permettono di eliminare gran parte del fondo di protoni così da permettere una misura della quantità di elettroni e positroni rilevati dal rivelatore. Questo è uno degli ingredienti fondamentali per le misure di fisica di queste componenti, come la *positron fraction* e i flussi assoluti [14–17].

Come già visto nel precedente capitolo, alcune componenti del rivelatore AMS-02 sono state pensate proprio per rendere possibile la distinzione tra queste particelle, in particolare il TRD e l'ECAL. Comunque un primo metodo per separare gli elettroni dai protoni ci è dato dal segno della rigidità. Prendendo solo i positivi, infatti, si ottiene un campione considerabile come composto da soli protoni, in quanto il numero di positroni presenti è pressoché irrilevante; allo stesso modo prendendo solo i negativi si ottiene un campione composto praticamente da soli elettroni, in quanto il numero di antiprotoni (e protoni con il segno sbagliato) è decisamente minore.

3.1.1 Discriminazione e/p nel TRD

Nel paragrafo 2.4 abbiamo visto che particelle con diverso fattore di Lorentz γ hanno una diversa probabilità di emettere un fotone come radiazione di transizione. Questa proprietà ci permette dunque di poter distinguere tra loro particelle con massa diversa.

Un classificatore statistico, basato sulla combinazione delle informazioni provenienti dai 20 piani del TRD, viene utilizzato per assegnare ad ogni evento una probabilità di essere un elettrone o un'altra particella. In base al valore di questo classificatore, il campione di elettroni può quindi essere selezionato mediante una richiesta (*taglio*) sul valore di questa quantità o su base statistica mediante un fit alle distribuzioni

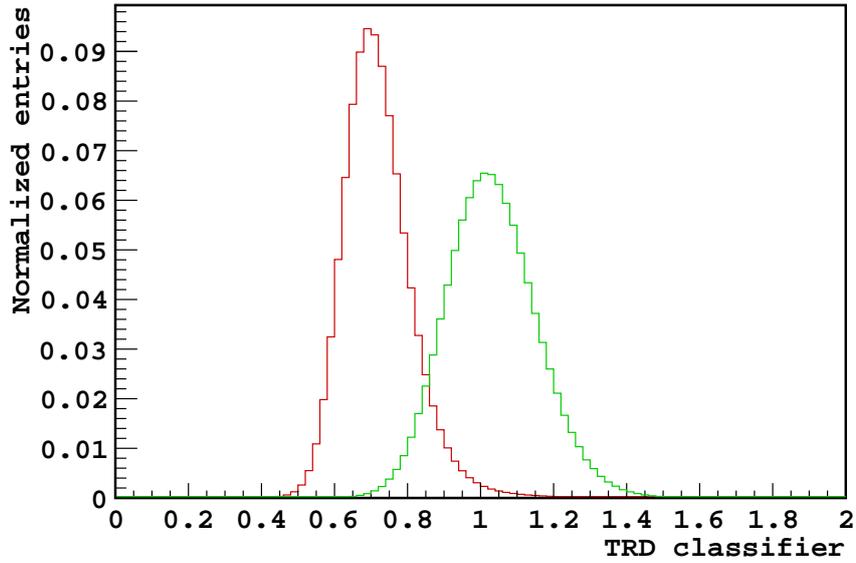


Figura 3.2: *Distribuzioni del classificatore TRD di eventi con energie da 10 a 150 GeV; in rosso la distribuzione di un campione di protoni, in verde di un campione di elettroni.*

di riferimento (*template fit*, vedi Sez. 3.2).

Il primo passo per la definizione del classificatore è la costruzione della distribuzione normalizzata di probabilità - la PDF (*Probability Density Function*) - che descrive la probabilità per ciascun tipo di particella avente una determinata energia di rilasciare un certo segnale in uno strato del TRD. In ogni evento, viene definita la probabilità del segnale registrato in ogni strato del TRD di appartenere alla distribuzione di un elettrone (e), protone (p) o altro. Queste probabilità, indicate come *trdlikelihood* ($trdlk_x$, $x = e, p, \dots$), vengono utilizzate per costruire dei *discriminatori* che racchiudono in una singola variabile l'informazione proveniente da tutti gli strati del rivelatore. In questo lavoro è stata utilizzata la likelihood di elettrone, $trdlk_e$, definendo come *classificatore TRD* (TRD classifier) il valore di $-\log_{10}(trdlk_e) + 2$. La figura 3.2 mostra le distribuzioni dei valori del classificatore TRD per due sottogruppi preselezionati di eventi con energie da 10 a 150 GeV: in rosso protoni e in verde elettroni. La separazione tra le due distribuzioni è un indice del potere

risolutivo del classificatore.

Tuttavia il potere di separazione del TRD si riduce con il crescere dell'energia della particella, infatti al crescere dell'energia anche i protoni diventano altamente relativistici ed il loro deposito di energia diventa sempre più simile a quello degli elettroni.

3.1.2 Discriminazione e/p nell'ECAL

La separazione e/p nel calorimetro elettromagnetico sfrutta le diverse caratteristiche di sviluppo longitudinale e trasversale degli sciame di protoni ed elettroni. L'apparato segue lo sviluppo trasversale e longitudinale dello sciame con alta precisione e ottiene delle informazioni sulle sue caratteristiche (come il numero di celle colpite, la frazione di energia nei vari strati, etc...) che vengono poi usate per discriminare le particelle. L'approccio scelto dalla collaborazione AMS per combinare in maniera ottimale le informazioni raccolte lungo lo sviluppo dello sciame è basato su un'analisi multivariata degli sciame di protoni ed elettroni mediante la tecnica del *Boosted Decision Tree* (BDT) [18]. Questa tecnica è basata sulla costruzione di un albero di decisione o classificazione (figura 3.3), dove i nodi foglia rappresentano le classificazioni, mentre le ramificazioni rappresentano l'insieme delle proprietà che portano a quelle classificazioni. In uscita al processo viene quindi resa disponibile un'unica variabile discriminante, indicata come *classificatore ECAL* (ECAL classifier) o anche come *BDT*, la cui distribuzione è significativamente differente per elettroni e protoni.

La figura 3.4 mostra le distribuzioni dei valori del classificatore ECAL per due sottogruppi preselezionati di eventi con energie da 10 a 150 GeV: in rosso protoni e in verde elettroni. L'elevata separazione dei due picchi mostra come la BDT sia uno strumento molto potente per la selezione del campione di elettroni.

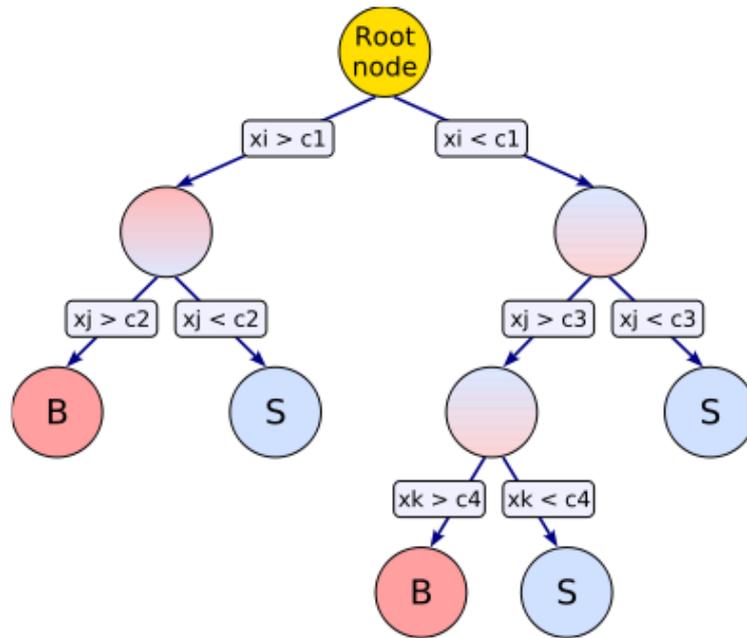


Figura 3.3: Schema di un albero decisionale (BDT); *S* (Signal) indica il segnale mentre *B* (Background) rappresenta il fondo.

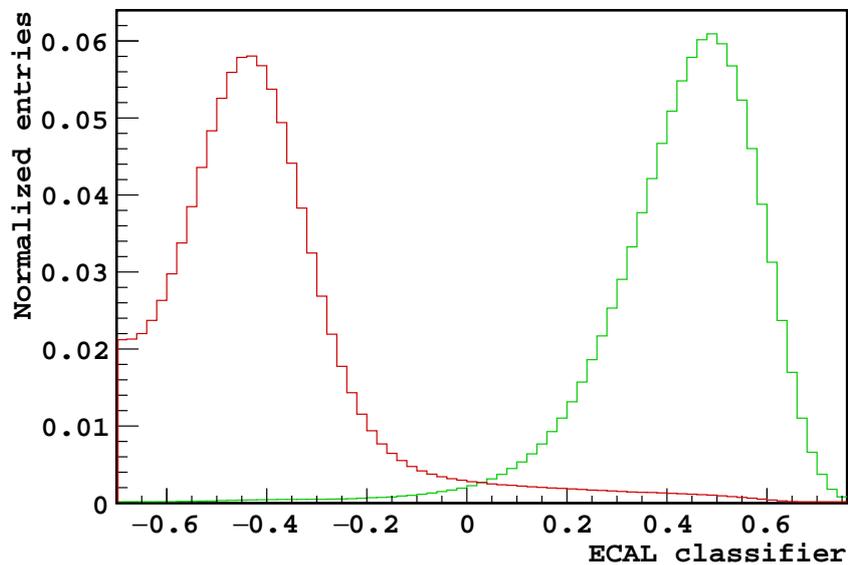


Figura 3.4: Distribuzioni del classificatore ECAL negli eventi con energie da 10 a 150 GeV; in rosso la distribuzione di un campione di protoni, in verde di un campione di elettroni; la distanza dei picchi delle due distribuzioni, anche confrontata con la larghezza delle stesse, è indicativa del potere di separazione del classificatore.

3.1.3 Discriminazione e/p mediante il rapporto energia/impulso

L'ultimo metodo di discriminazione usato per distinguere gli elettroni dai protoni consiste nello sfruttamento del rapporto tra l'energia rilasciata nel calorimetro dalla particella e l'impulso misurato dal tracciatore. In realtà al posto dell'impulso si usa la rigidità della particella (definita nel paragrafo 1.3.2), in quanto, poiché stiamo considerando solo particelle di carica unitaria, essa risulta essere pari all'impulso. Inoltre, dato che le particelle sono ad energie relativistiche, i valori dell'energia e dell'impulso sono praticamente uguali.

Per discriminare le particelle si sfrutta il fatto che il calorimetro è pensato per misurare con precisione l'energia degli sciami elettromagnetici e quindi degli elettroni, mentre per gli sciami adronici compie un errore sistematico in quanto andrà a misurare solo l'energia della componente elettromagnetica dello sciame, ottenendo una misura sottostimata. Inoltre, come detto nel paragrafo 2.5, per contenere completa-

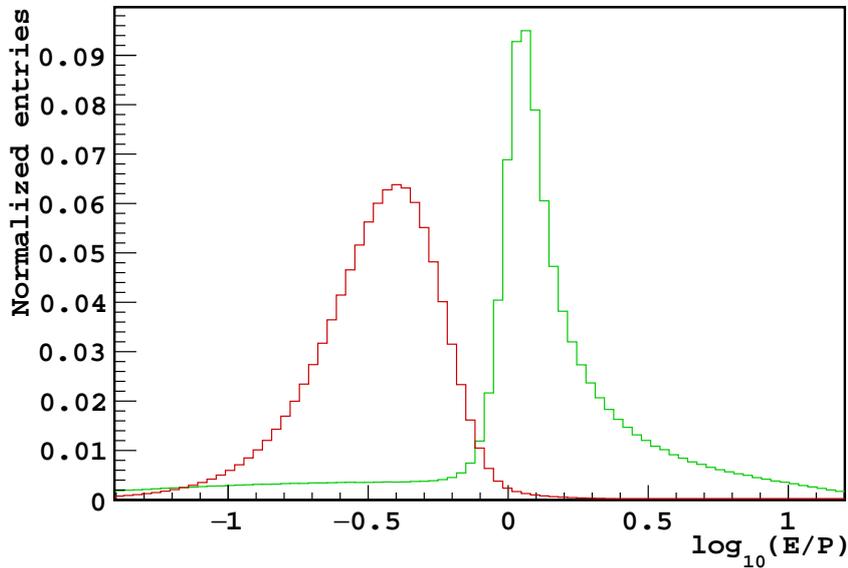


Figura 3.5: *Distribuzioni del rapporto energia/impulso negli eventi con energie da 10 a 150 GeV; in rosso la distribuzione di un campione di protoni, in verde di un campione di elettroni.*

mente uno sciame adronico servirebbe, a parità di tipo di materiale, una profondità molto maggiore. Di conseguenza il rapporto fra l'energia misurata e l'impulso misurato sarà prossimo a 1, come aspettato teoricamente, solo per gli elettroni, mentre per i protoni sarà molto più basso.

La figura 3.5 mostra le distribuzioni dei valori di questo rapporto (generalmente si utilizza il logaritmo del rapporto per evitare un intervallo di variabilità troppo grande) per due sottogruppi preselezionati di eventi con energie da 10 a 150 GeV: in rosso protoni e in verde elettroni.

3.2 Combinazione dei metodi di discriminazione

I metodi di discriminazione discussi nel precedente paragrafo possono essere combinati per poter ottenere una separazione maggiore tra le due specie di particelle, così da poter effettuare le misure di fisica con livelli di fondo ben sotto controllo. Ad esempio combinandoli a due a due si ottengono i grafici mostrati in figura 3.6, in cui in ognuno di essi sono ben distinguibili le due popolazioni: quella più abbondante di protoni e quella meno abbondante di elettroni.

Il metodo più semplice di sfruttamento del potere di reiezione di una variabile è quello del *taglio*. Se segnale e fondo sono distribuiti, nella variabile sotto studio, con un certo livello di separazione, si può pensare di dividere il campione in due parti rispettivamente per valori maggiori o minori del cosiddetto valore di taglio. Da una parte si avrà la maggior parte del segnale, con una certa contaminazione di fondo, mentre dall'altra parte il viceversa. La scelta del valore di taglio va effettuata con attenzione, in quanto il taglio per poter essere efficace deve avere una alta *reiezione*, ovvero deve poter eliminare la quasi totalità delle particelle non interessate, ma allo stesso tempo deve avere una buona *efficienza*, ovvero deve contenere la maggior parte delle particelle cui è rivolto lo studio.

Un metodo statisticamente più avanzato è invece l'utilizzo della tecnica del *template fit*, che consiste nel ricostruire la distribuzione data mediante un algoritmo

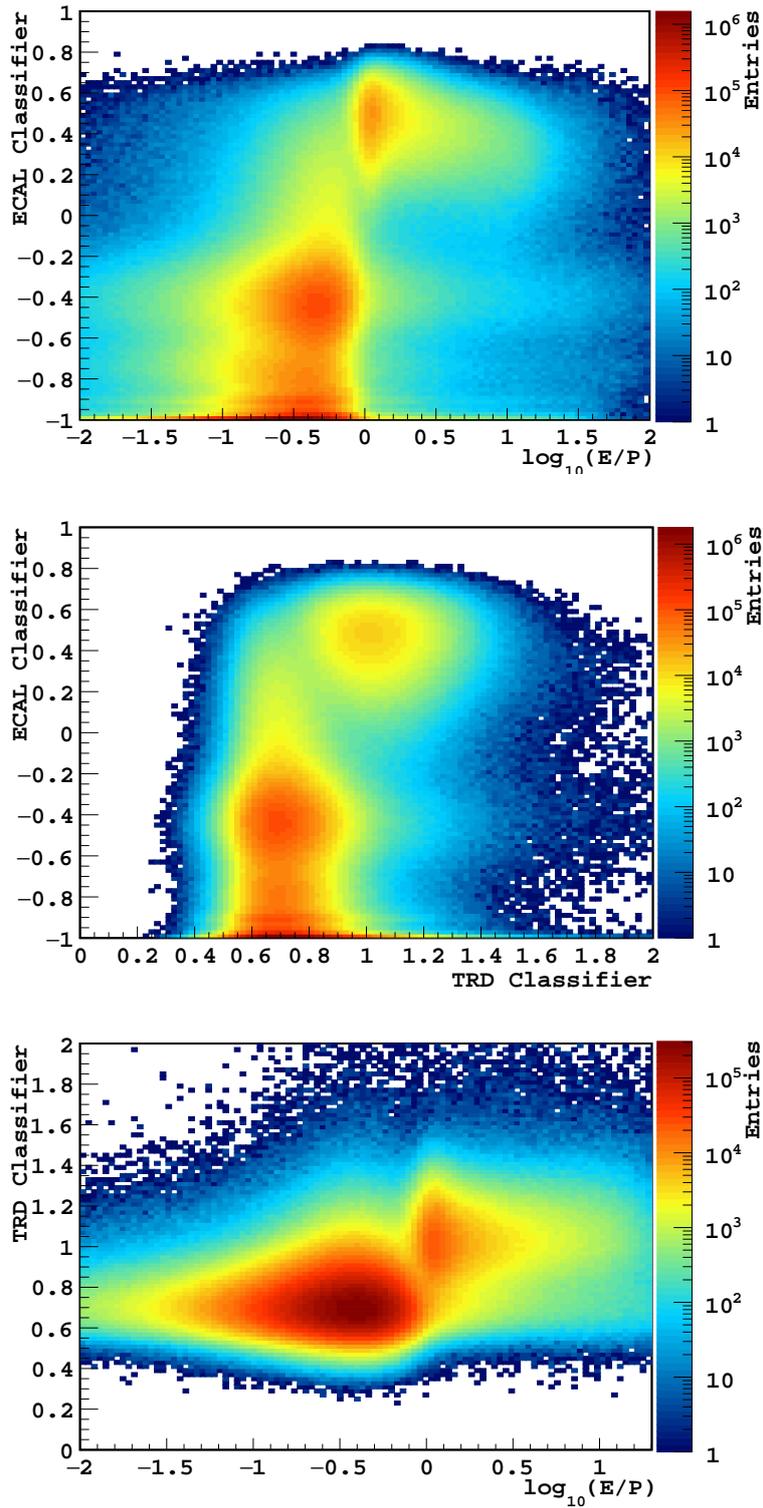


Figura 3.6: Combinando i metodi di discriminazione si ottiene una separazione visibile a occhio; in alto classificatore ECAL contro $\log_{10}(E/P)$, al centro classificatore ECAL contro classificatore TRD, in basso classificatore TRD contro $\log_{10}(E/P)$; tutti i grafici contengono gli eventi con energia compresa tra 10 e 1500 GeV.

che prende due (o più) distribuzioni di riferimento (template) note e ne modula le altezze fino a che la loro somma non risulti il più simile possibile alla distribuzione data, ovvero fino a che la distribuzione somma ottenuta e la distribuzione data non massimizzano una variabile di likelihood¹.

Per questo lavoro di tesi si è scelto di combinare ed utilizzare i vari metodi di discriminazione nel seguente modo:

- effettuare un template fit sulla distribuzione del classificatore TRD, per misurare, statisticamente, il numero di elettroni di segnale e di protoni di fondo
- effettuare dei tagli, prediligendo la reiezione all'efficienza, sulla BDT, sul rapporto energia/impulso e sul segno della rigidità, per la creazione, direttamente dai dati, delle distribuzioni di riferimento per le due specie di elettroni e protoni, nella variabile scelta per il template fit, il classificatore TRD
- considerare un campione di dati ottenuto con solo un taglio, volto a ridurre il fondo di protoni, sulla variabile BDT, in quanto tra i metodi di discriminazione essa è quella in cui i picchi di elettroni e protoni sono più separati e quindi è l'unica che ci permette di ottenere un taglio che presenta contemporaneamente una elevata reiezione e una alta efficienza

La scelta di effettuare il template fit con il classificatore TRD è dovuta al fatto che esso è il meno adatto per poter effettuare dei tagli mantenendo un'alta efficienza, in quanto come si può vedere in figura 3.2 le distribuzioni di elettroni e protoni sono troppo sovrapposte, e allo stesso tempo è il più adatto per il template in quanto presenta distribuzioni più regolari rispetto agli altri classificatori.

In figura 3.7 sono mostrate le distribuzioni del classificatore TRD al variare dell'energia per i due sottocampioni di elettroni e protoni. Si nota che per gli elettroni essa è indipendente dall'energia fino a ~ 100 GeV, come evidenziato nella figura 3.8 a sinistra. Ad energie più alte, però, è sempre più difficile determinare dai dati

¹La massimizzazione della likelihood è del tutto equivalente alla minimizzazione del χ^2 .

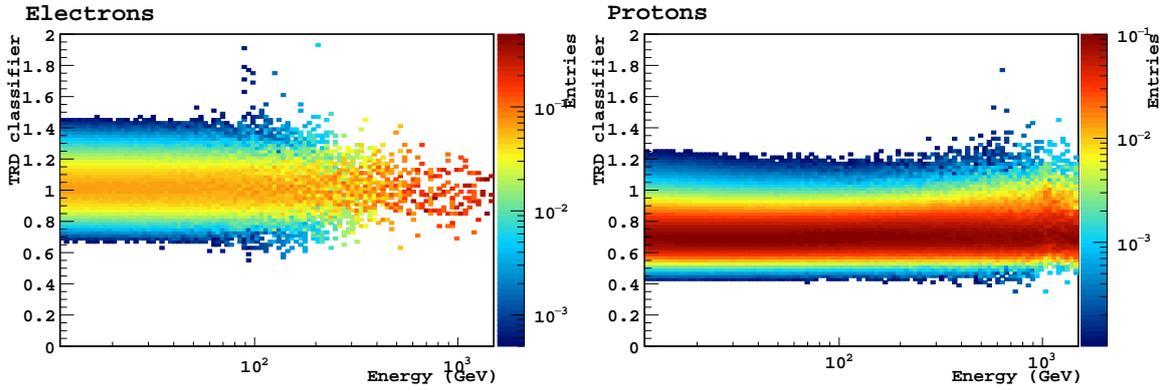


Figura 3.7: Le distribuzioni del classificatore *TRD* al variare dell'energia per i due sottocampioni: a sinistra per gli elettroni e a destra per i protoni; i due istogrammi sono normalizzati rispetto all'asse *X*.

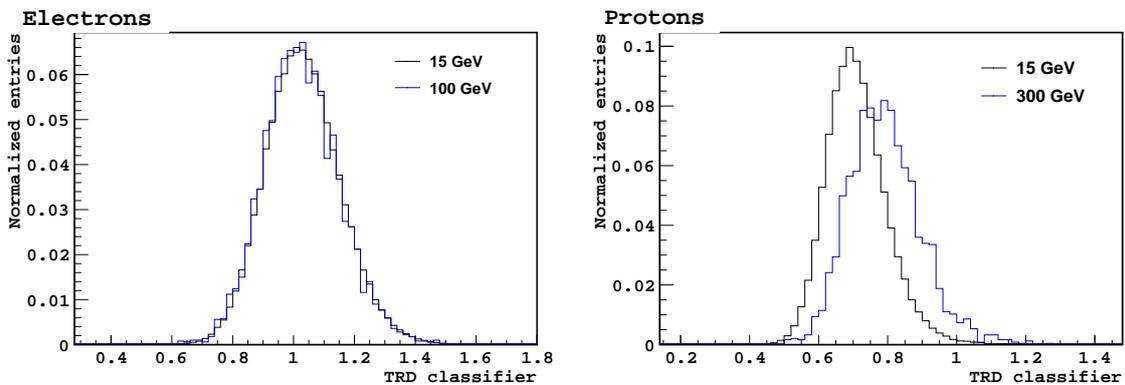


Figura 3.8: Le distribuzioni del classificatore *TRD* ad alcune energie per i due sottocampioni: a sinistra per gli elettroni e a destra per i protoni; come si vede per gli elettroni la forma della distribuzione è indipendente dall'energia e quindi è possibile determinare la distribuzione di riferimento nell'intervallo di energie nel quale è possibile fare una selezione molto pulita e poi utilizzarlo in tutto l'intervallo; per i protoni invece è necessario determinare la distribuzione di riferimento esattamente all'energia sotto esame.

un campione di eventi che sia puro. Anche la quantità di eventi, inoltre, si riduce drasticamente all'aumentare dell'energia e la poca statistica rende ancora più difficile l'estrazione, direttamente dai dati, di una distribuzione di riferimento utile. Tuttavia poiché nell'intervallo di energie minori 100 GeV la distribuzione non varia, possiamo considerarla come *universale*, il che ci permette di determinare la distribuzione di riferimento nell'intervallo di energie nel quale è possibile fare una selezione molto pulita e poi utilizzarlo in tutto l'intervallo. Per i protoni invece la distribuzione presenta una dipendenza significativa dall'energia, infatti come accennato nel paragrafo 3.1.1 i protoni all'aumentare dell'energia diventano sempre più relativistici e quindi rilasciano nel TRD un segnale sempre più simile a quello degli elettroni, comportando uno spostamento della distribuzione, come evidenziato nella figura 3.8 a destra. Quindi per i protoni è necessario determinare la distribuzione di riferimento esattamente all'energia sotto esame

3.3 Risultati

Come già detto nel precedente paragrafo, per questo lavoro si è scelto di effettuare un template fit al classificatore TRD avendo ridotto il fondo di protoni con un taglio molto efficiente in BDT. In figura 3.9 si osserva la distribuzione del classificatore TRD, dopo un taglio $BDT > 0$: il picco di protoni è decisamente ridotto tanto da essere più basso del picco di elettroni nonostante in natura i protoni siano ~ 100 volte più abbondanti degli elettroni.

La distribuzione in figura 3.9 è infatti la somma della distribuzione dei protoni con quella degli elettroni, quindi, usando come distribuzioni di riferimento le distribuzioni trovate per le specie in esame (ottenute con tagli in BDT, rapporto energia/impulso e segno della rigidità studiati nel paragrafo precedente), possiamo mediante il metodo del template fit risalire alle due distribuzioni separatamente, e quindi a quella dei soli elettroni e positroni, mantenendo l'efficienza del solo taglio sulla BDT.

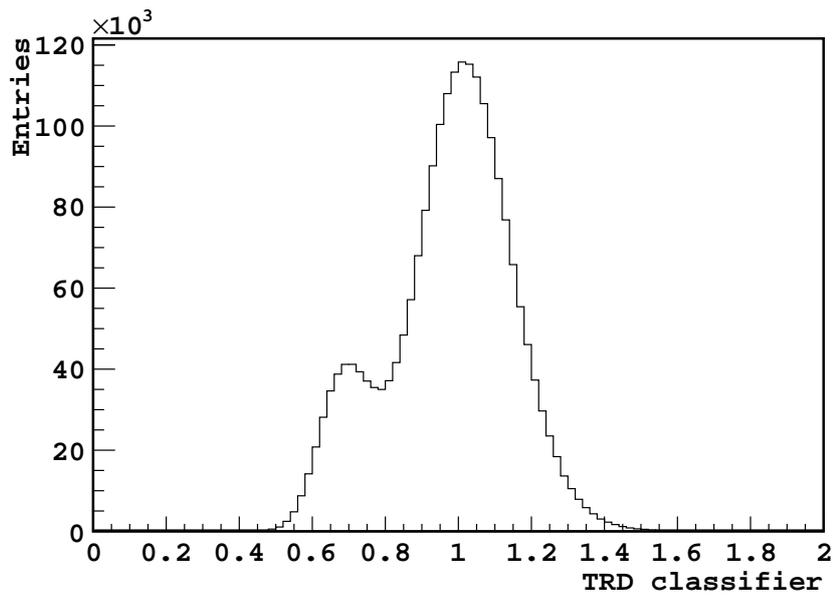


Figura 3.9: La distribuzione del classificatore TRD dopo il taglio in BDT per eventi con energie comprese tra 15 e 80 GeV; i due picchi sono ben distinguibili e il picco dei protoni, a sinistra, risulta più basso di quello degli elettroni nonostante in natura i protoni siano circa 100 volte più abbondanti degli elettroni.

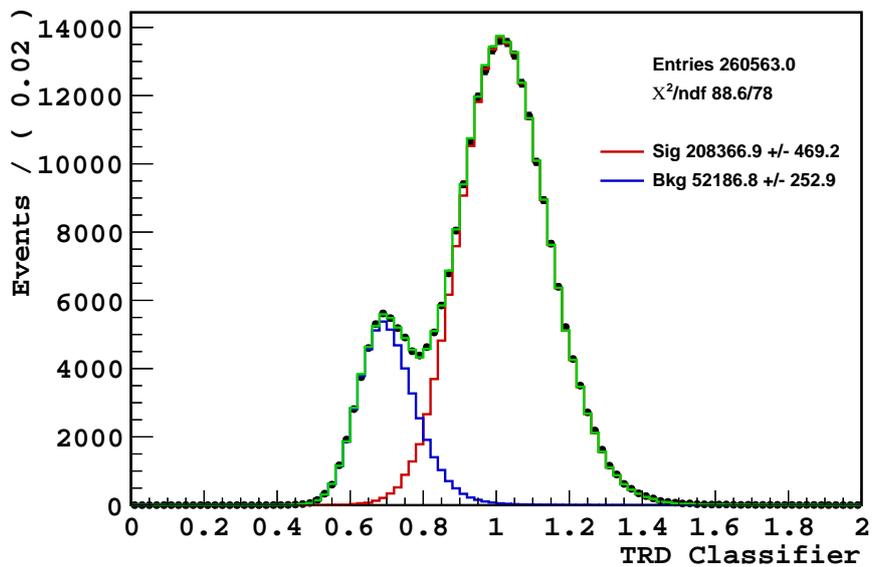


Figura 3.10: Esempio di utilizzo del template fit per eventi con energie comprese tra 30 e 40 GeV.

Un esempio dell'utilizzo di questo metodo è illustrato in figura 3.10, in cui è stato applicato alla distribuzione ottenuta per eventi con energie comprese tra 30 e 40 GeV: si può notare come la distribuzione somma, disegnata in verde, descriva molto bene i punti sperimentali, disegnati in nero; inoltre sono state disegnate anche le due distribuzioni separate ottenute dopo la modulazione: in rosso quella di elettroni e positroni, in blu quella dei protoni. A questo punto, per ottenere il conteggio di elettroni e positroni è sufficiente integrare la distribuzione in rosso: il risultato è visibile nella legenda della figura, a fianco alla linea rossa.

3.3.1 Ottimizzazione del Template Fit

Le distribuzioni di riferimento usate per il template fit sono state ricavate da uno studio sui dati stessi, di conseguenza la scelta del campione usato, e quindi dei tagli usati per selezionarlo, può influire sulla forma della distribuzione e quindi sul risultato finale. Per usare al meglio questo metodo, si può studiare il variare delle distribuzioni al variare dei tagli, per poi vedere come varia a sua volta il χ^2 del template fit.

In generale si osserva che la distribuzione degli elettroni risulta abbastanza stabile, mentre quella dei protoni presenta variazioni più significative al variare dei tagli (figura 3.11). Per ottimizzare il risultato si sceglierà la distribuzione che risulta con

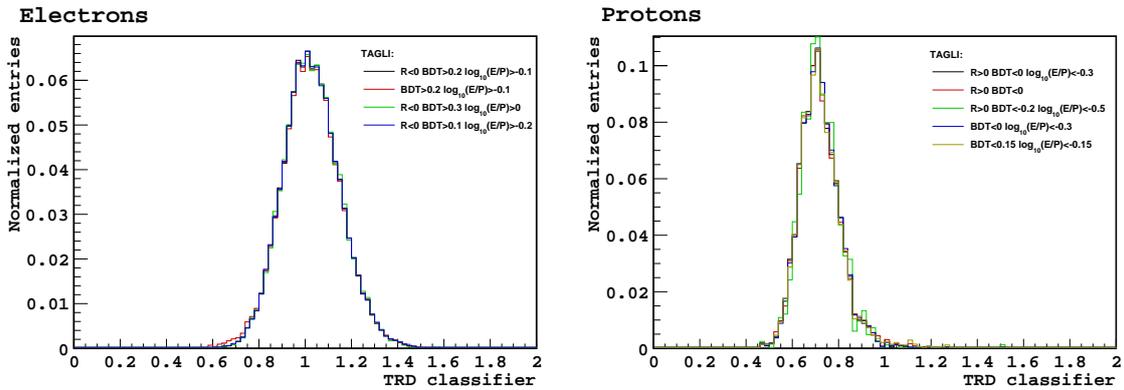


Figura 3.11: Confronto tra diverse distribuzioni di riferimento, ottenute per diversi set di taglio; a sinistra elettroni a 30 GeV, a destra protoni a 100 GeV.

un χ^2 minore, ovvero quella per la quale si ottiene la migliore aderenza fra punti sperimentali e fit.

3.3.2 Ottimizzazione dell'errore

Infine si può studiare la variazione dell'errore al variare del taglio sulla BDT con cui si ottiene la distribuzione su cui poi viene effettuata la misura. Infatti, al variare del valore scelto per il taglio, variano la reiezione e l'efficienza del taglio stesso, e di conseguenza varia l'errore sulla misura: aumentando l'efficienza si evita di perdere eventi e quindi l'errore indicato come *statistico*² diminuisce, mentre aumentando la reiezione si va a diminuire il fondo di protoni e quindi il template fit risulterà più accurato, andando a diminuire l'errore indicato come *sistematico*³. Poiché i due meccanismi di errore hanno andamenti contrastanti, come si può vedere in figura 3.13, l'errore totale presenta un punto di minimo, evidenziato in figura. Per ottimizzare il risultato si dovrà quindi effettuare la misura applicando il taglio corrispondente al minimo trovato.

²Qui con il termine *statistico* indichiamo semplicemente l'errore poissoniano, $\sqrt{N_e}$, sul numero di elettroni fittati, N_e .

³In questo lavoro abbiamo indicato questo errore come sistematico nonostante sia comunque una componente dell'errore ottenuto dal fit. L'idea è quella di separare la componente dovuta puramente alla statistica degli elettroni di segnale, da quella dovuta al potere di separazione del classificatore TRD e dall'abbondanza dei protoni di fondo.

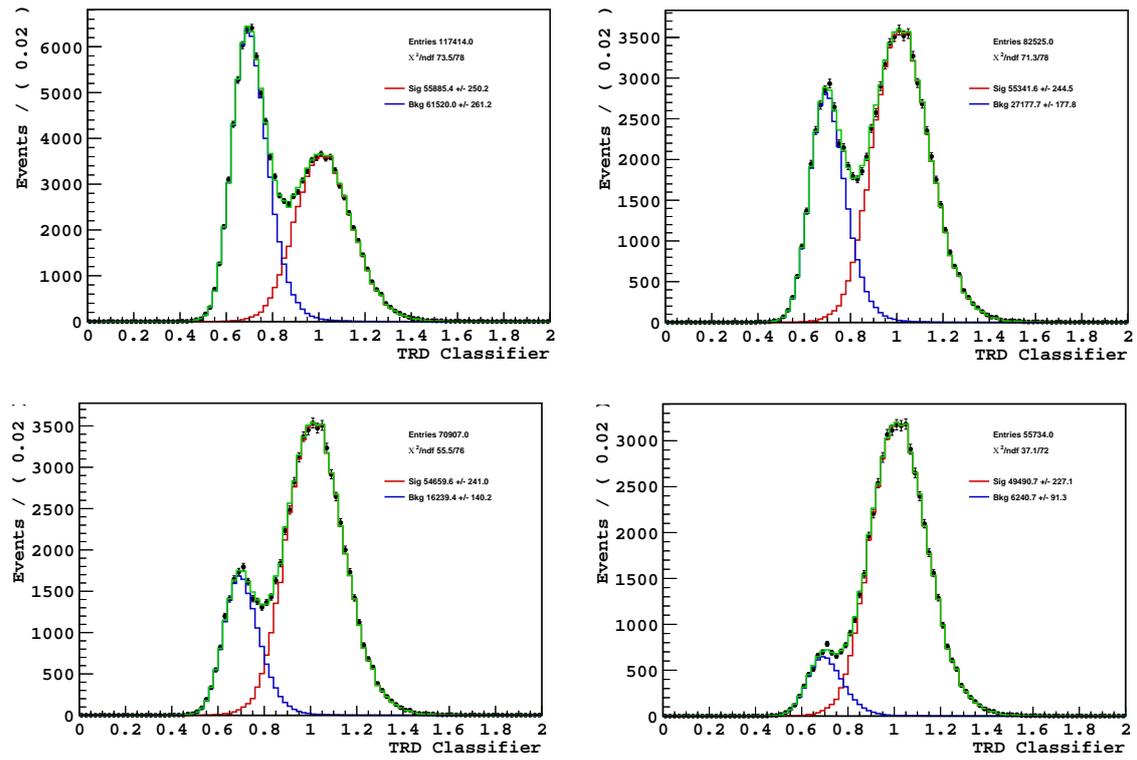


Figura 3.12: Esempi di template fit per diversi tagli sulla BDT per eventi con energie comprese tra 50 e 60 GeV; in alto a sinistra $BDT > -0.2$, in alto a destra $BDT > -0.1$, in basso a sinistra $BDT > 0$, in basso a destra $BDT > 0.2$; come si vede, all'indurirsi del taglio la componente di protoni risulta sempre più depressa con conseguente miglioramento dell'affidabilità del risultato del fit; viceversa diminuisce leggermente anche la componente di elettroni con conseguente peggioramento dell'errore statistico.

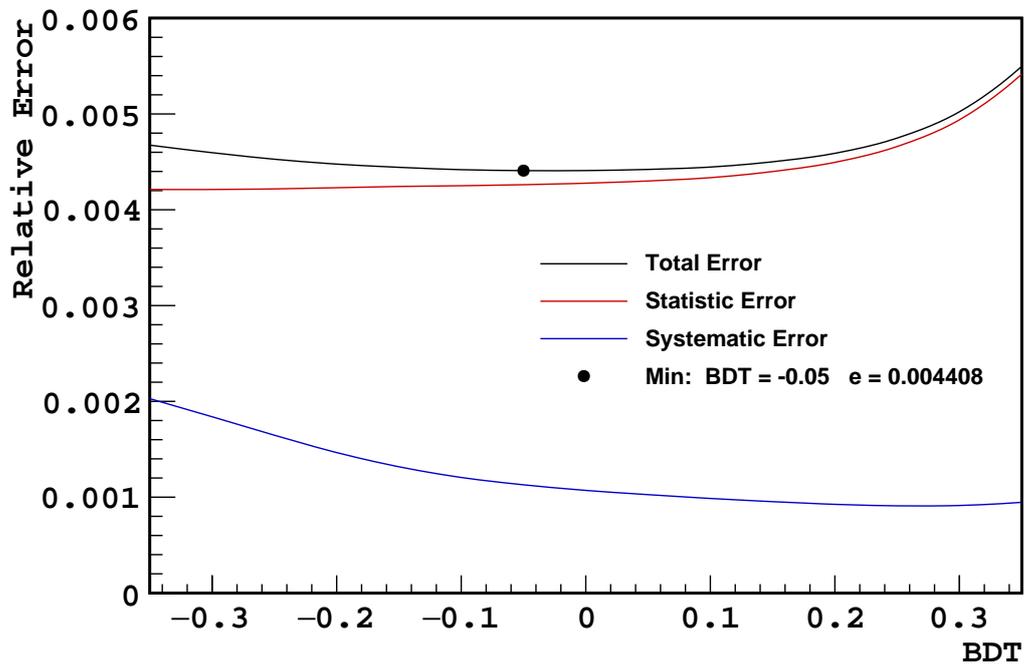


Figura 3.13: *Studio della variazione dell'errore al variare del taglio sulla BDT per eventi con energie comprese tra 50 e 60 GeV; come aspettato, all'indurirsi del taglio in BDT l'errore statistico aumenta mentre l'errore sistematico diminuisce.*

Conclusioni

In questo lavoro di tesi abbiamo inizialmente parlato dei raggi cosmici, spiegando i motivi per cui è importante studiarli e riportando le principali nozioni riguardo la loro attuale conoscenza, come lo spettro energetico, la composizione e le principali ipotesi sulla loro origine e propagazione.

Successivamente abbiamo parlato dell'esperimento AMS-02, un rivelatore di particelle montato sulla stazione spaziale internazionale dal Maggio 2011 e finalizzato allo studio di precisione dei raggi cosmici. Di questo rivelatore ne abbiamo descritto la struttura, soffermandoci in particolare sulle componenti più rilevanti per la misura delle componenti di elettroni e positroni, come il rivelatore a radiazione di transizione (TRD), il tracciatore al silicio e il calorimetro elettromagnetico (ECAL). Infine abbiamo parlato del lavoro di analisi svolto sui dati raccolti da AMS. Innanzitutto abbiamo spiegato come l'analisi dei segnali dei singoli sotto-rivelatori ci permetta di creare dei classificatori mediante il quale è possibile discriminare le particelle. Quindi abbiamo visto come l'utilizzo combinato di questi classificatori ci possa permettere di selezionare, dai dati, due sottocampioni di eventi ognuno costituito praticamente da un solo tipo di particella: un campione di elettroni e un campione di protoni. Successivamente abbiamo preso le distribuzioni del classificatore TRD per i campioni di elettroni e protoni ottenuti usando gli altri classificatori e le abbiamo usate come distribuzioni di riferimento per il metodo del template fit. Il template fit è stato eseguito sul classificatore TRD di un campione di dati ottenuto mediante un taglio sul solo classificatore ECAL, in quanto questo è l'unico che ci permette di avere allo stesso tempo una elevata efficienza nel mantenere elettro-

ni e positroni e contemporaneamente una drastica riduzione del fondo di protoni, permettendo quindi di ottenere un conteggio molto preciso della componente interessata, ovvero elettroni e positroni, che era l'obiettivo della tesi. Infine abbiamo riportato uno studio sulla variazione del risultato del template fit al variare delle distribuzioni usate come distribuzioni di riferimento e uno studio sulla variazione dell'errore nel conteggio al variare del taglio del classificatore ECAL usato, entrambi rivolti a massimizzare l'efficacia del metodo.

Bibliografia

- [1] M. Duranti, Tesi PhD: *Measurement of the Atmospheric Muon Flux on Ground with the AMS-02 Detector*, 2010-2011
- [2] V. Vagelli, Tesi PhD: *Measurement of the cosmic $e^+ + e^-$ Flux from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer (AMS-02) on the International Space Station*, 2014
- [3] M. Crispoltoni, Tesi magistrale: *Misura del flusso differenziale di elettroni e positroni con l' esperimento AMS-02*, 2013
- [4] K. Nakamura et al. (Particle Data Group), 2010: *The Review of Particle Physics*. J. Phys. G, 37, URL <http://pdg.lbl.gov>
- [5] E. Fermi. *On the origin of the cosmic radiation*. Physical Review 75 (1949) 1169-1174
- [6] Source: WDC-SILSO, Royal Observatory of Belgium, Brussels, URL <http://www.sidc.be/silso/datafiles>
- [7] University of Delaware, Bartol Research Institute, Neutron Monitor Program, URL <http://neutronm.bartol.udel.edu/Welcome.html>
- [8] D.F. Smart, M.A. Shea, 2004, *A review of geomagnetic cutoff rigidities for earth-orbiting spacecraft*, Advances in Space Research 36 (2005) 2012–2020

- [9] Ahlen, S., et al., 1994: *An antimatter spectrometer in space*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 350 (1-2), 351 – 367
- [10] Aguilar, M., et al., 2002: *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the International Space Station: Part I – results from the test flight on the space shuttle*. Physics Reports, 366 (6), 331 – 405
- [11] Von Doetinchem, P., et al., 2006: *Performance of the AMS-02 transition radiation detector*. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 558 (2), 526 – 535
- [12] Cadoux, F., et al., 2002: *The AMS-02 electromagnetic calorimeter*. Nuclear Physics B - Proceedings Supplements, 113 (1-3), 159 – 165
- [13] Brun, R. and F. Rademakers, 1997: ROOT - An object oriented data analysis framework. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 389 (1-2), 81 – 86
- [14] Aguilar, et al. *Precision Measurement of the $e^+ + e^-$ Flux in Primary Cosmic Rays from 0.5 GeV to 1 TeV with the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station*. Physical Review Letters 113, no. 22 (November 2014)
- [15] M. Aguilar et al., Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013)
- [16] L. Accardo et al., Phys. Rev. Lett. 113, 121101 (2014)
- [17] M. Aguilar et al., Phys. Rev. Lett. 113, 121102 (2014)
- [18] A. Hoecker et al. *TMVA: Toolkit for Multivariate Data Analysis*. In: PoS ACAT (2007), p. 40