

---

# Osservazione dei raggi cosmici dallo spazio

**Mirko Boezio**

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Trieste, I-34149 Trieste, Italy*

**Riccardo Munini**

*Institute for Fundamental Physics of the Universe, I-34014 Trieste, Italy*

*Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sez. di Trieste, I-34149 Trieste, Italy*

*Institute for Fundamental Physics of the Universe, I-34014 Trieste, Italy*

---

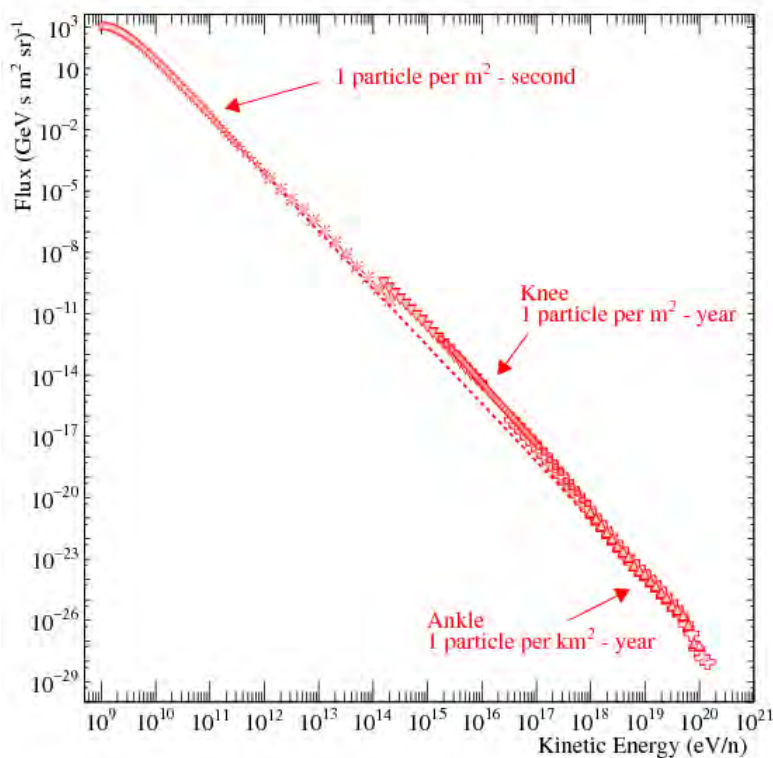
**I** raggi cosmici sono particelle energetiche con origine sia nel nostro sistema solare e galassia ma anche fuori della galassia. I raggi cosmici sono in gran parte protoni e nuclei di elio ma sono presenti tutti i nuclei della tavola periodica oltre ad elettroni ed antiparticelle. La loro origine, i processi di accelerazione ad alte energie come pure la propagazione verso la terra sono argomenti che stanno impegnando gli scienziati dalla loro scoperta da parte di Victor Hess nel 1912. Per studiarli adeguatamente è necessario misurarne con precisione lo spettro energetico e la composizione. Queste ricerche sono state, ed è, affrontate sperimentalmente sia con strumentazione a terra che con apparati al sommo dell'atmosfera installati su palloni stratosferici o in satelliti o stazioni spaziali. Quest'ultimo campo ha visto una significativa attività negli ultimi decenni con molti apparati equipaggiati con strumentazione all'avanguardia che hanno prodotto importanti risultati rivoluzionando la comprensione della fisica dei raggi cosmici.

## Cosa sono i raggi cosmici

La scoperta dei raggi cosmici avvenne nel 1912 grazie ad un volo in mongolfiera di Victor Hess, successivamente premiato con il premio Nobel nel 1936, durante il quale egli misurò il livello di ionizzazione "della radiazione ionizzante" a diverse altitudini. Hess notò che questo livello di ionizzazione, dopo aver raggiunto un minimo poco sopra il livello del terreno, aumentava considerevolmente man mano che la mongolfiera si allontanava dal terreno, raggiungendo, ad una altezza di 5200 metri, un valore del 100% maggiore rispetto a quello osservato a terra.

I meticolosi esperimenti di Hess erano stati preceduti da quelli condotti sulla cima della torre Eiffel da Theodor Wulf, a bordo di palloni aerostatici da Albert Gockel e sott'acqua dall'italiano Domenico Pacini. Tutti questi dati portavano alla conclusione che una parte non trascurabile della radiazione misurata non era correlata con la naturale radioattività proveniente dalle sostanze radioattive presenti negli strati superficiali della crosta terrestre ma doveva venire dallo spazio.

Oggi sappiamo che i raggi cosmici sono particelle energetiche che includono i nuclei di tutti gli elementi, compresi i loro isotopi, oltre ad elettroni, positroni e antiprotoni. Queste particelle si propagano attraverso la galassia e sono accelerate dai sistemi più energetici dell'universo come esplosione di supernove, pulsars, getti



**Figura 1:** Lo spettro in energia dei raggi cosmici: fino a circa  $10^{14}$  eV si tratta di flussi di protoni da misure dirette. Ad energie superiori viene mostrato lo spettro di tutte le componenti misurato da osservatori a terra. La linea tratteggiata rappresenta una legge di potenza di indice spettrale  $-2.7$ .

relativistici e nuclei galattici attivi.

Per una discussione più approfondita sulla storia dello studio dei raggi cosmici si veda l'articolo di Alessandro De Angelis in questo numero di **Ithaca** e la referenza [1].

Storicamente, la scoperta dei raggi cosmici gettò le basi per la nascita della fisica delle particelle che si sviluppò per molti anni studiando i raggi cosmici nell'atmosfera terrestre. I positroni, i muoni, i pioni e le cosiddette particelle strane furono rilevate per la prima volta grazie ai raggi cosmici ed ai prodotti delle loro interazioni. Ci vollero quaranta anni di innovazione tecnologica prima di riprodurre parzialmente con gli acceleratori in laboratorio le energie dei raggi cosmici.

Lo studio della radiazione cosmica dallo spazio o nell'alta atmosfera è iniziata negli anni sessanta con la serie di pionieristici satelliti Proton di Grigorov e con la rivelazione di elettroni di Earl, Meyer e Vogt tramite apparati su palloni stratosferici. Gli anni ottanta e novanta vedono una forte accelerazione dello studio della radiazione cosmica con campagne di voli in pallone o piccoli satelliti. Questo contribuì a completare la transizione dalle iniziali osservazioni dei rag-

gi cosmici come laboratorio per la produzione e la rivelazione di nuove particelle allo studio dei meccanismi di produzione, accelerazione e propagazione dei raggi cosmici nella galassia e del loro ruolo nel cosmo.

Nella figura 1 sono mostrati i flussi dei raggi cosmici in funzione della loro energia; il cosiddetto spettro energetico. Esso rappresenta uno dei più impressionanti risultati della ricerca sperimentale astroparticellare, estendendosi per più di 32 ordini di grandezza sulla scala dell'intensità del flusso e per oltre 10 ordini di grandezza sulla scala delle energie. In questo spettro energetico sono nascoste le risposte alle principali domande della ricerca sui raggi cosmici. Da dove vengono queste particelle? Come sono accelerate? Come si propagano attraverso il mezzo interstellare e quali sono le loro interazioni? A che energia il contributo extra galattico diventa dominante? I raggi cosmici possono darci indizi sull'esistenza di particelle esotiche, residui di un universo primordiale, come l'antimateria o la materia oscura? Nel corso dei prossimi paragrafi si discuterà come si sono e si stanno affrontando sperimentalmente questi quesiti.

## Equazione di diffusione

La diffusione nello spazio e nel tempo di una specie  $i$  di raggi cosmici viene descritta considerando le variazioni della sua densità  $\psi_i \equiv \psi_i(\mathbf{x}, p, t)$  definita al tempo  $t$  nella posizione  $\mathbf{x}$  e con modulo dell'impulso  $p$ . L'equazione che descrive queste variazioni è

$$\frac{\partial \psi_i}{\partial t} = q_i(\mathbf{x}, p, t) + \nabla \cdot (D \nabla \psi_i - \mathbf{u} \psi_i) + \frac{\partial}{\partial p} p^2 D_p \frac{\partial}{\partial p} \frac{1}{p^2} \psi_i - \left[ \frac{\partial}{\partial p} \dot{p} \psi_i - \frac{p}{3} (\nabla \cdot \mathbf{u}) \psi_i \right] - \frac{\psi_i}{(\tau_f)_i} - \frac{\psi_i}{(\tau_r)_i},$$

dove  $q(\mathbf{x}, p, t)$  indica il contributo delle sorgenti sia della componente primaria che secondaria da interazione o decadimento,  $D$  è il coefficiente di diffusione spaziale,  $\mathbf{u}$  la velocità di convezione,  $D_p$  è il coefficiente di diffusione nello spazio degli impulsi,  $p = |\mathbf{p}|$ ,  $\dot{p} = dp/dt$  è la frequenza dei guadagni o perdite di impulso,  $\tau_f$  rappresenta la scala dei tempi per la frammentazione e  $\tau_r$  per il decadimento radioattivo.

## Il paradigma dei raggi cosmici

Il paradigma dei raggi cosmici afferma che i raggi cosmici fino alle energie del ginocchio,  $10^{15} - 10^{17}$  eV ("Knee" in figura 1), sono primariamente accelerati nei resti di supernova (SNR) che si trovano nel disco galattico. Le SNR hanno l'energetica giusta ed attraverso meccanismi di accelerazione diffusiva (*diffusive shock acceleration*) accelerano e iniettano particelle nel mezzo interstellare con uno spettro energetico che segue approssimativamente una legge di potenza, come si vede in figura 1, e simile per tutte le specie di particelle con indice spettrale di circa -2.7 (linea tratteggiata in figura).

Dopo aver lasciato i siti di accelerazione, queste particelle, diventate ora raggi cosmici, si diffondono nella galassia interagendo col mezzo interstellare e coi campi magnetici galattici. La propagazione di ogni componente è solitamente descritta da un'equazione di diffusione che ne descrive il trasporto nel campo magnetico galattico. Da questa diffusione ne consegue una isotropizzazione della distribuzione spaziale degli stessi. Per raggi cosmici primari come protoni e nuclei di elio i guadagni e le perdite di energia si possono trascurare ad alta energia e l'equazione di diffusione in condizione stazionaria si semplifica:

$$0 = q_i(\mathbf{x}, p, t) + \nabla \cdot (D \nabla \psi_i), \quad (1)$$

assumendo uno spettro di iniezione dato da  $q \propto p^{-\gamma}$ , la soluzione diventa

$$\psi_i \sim p^{-\gamma-\delta}.$$

Ovvero, secondo il paradigma dei raggi cosmici il processo di propagazione produce un indebolimento degli spettri energetici osservati nella galassia. Questo spiega come mai lo spettro dei raggi cosmici di figura 1 è più ripido di quanto atteso per la sola accelerazione (per una discussione più approfondita si può vedere [2]).

Nello spettro di figura 1 c'è un ulteriore effetto particolarmente significativo a bassa energia (sotto alcune decine di GeV) legato al fatto che la quasi totalità delle osservazioni sono state condotte nella vicinanza della terra. I raggi cosmici galattici per raggiungere la Terra devono propagarsi nell'eliosfera dove interagiscono col campo magnetico congelato nel vento solare. Da questa interazione risulta la così detta modulazione solare dei raggi cosmici che ha la stessa ciclicità undecennale dell'attività solare.

Il vento solare è un flusso continuo di gas magnetizzato emesso radialmente dal Sole a velocità comprese tra i 300 e gli 800 km/s. Attraverso un meccanismo noto come congelamento del flusso, il vento solare trasporta il campo magnetico del Sole nel sistema solare. A distanze dal Sole tra 80 e 90 AU (1 AU: distanza tra terra e sole) la pressione del vento solare eguaglia la pressione del mezzo interstellare ed il vento solare rallenta

a velocità subsoniche formando un fronte d'urto chiamato *termination shock*. La regione contenuta all'interno del *termination shock* si chiama eliosfera e definisce la regione di spazio dominata dal vento solare.

Da secoli è noto che l'attività solare ha una ciclicità di periodo 11 anni in cui passa da una fase di minima attività ad una di massima. In aggiunta a questo effetto, ogni 11 anni la polarità del campo magnetico solare cambia introducendo una seconda ciclicità di 22 anni. Il campo magnetico solare come pure la velocità del vento solare sono significativamente minori durante un periodo di minima attività solare, influenzando conseguentemente di meno i raggi cosmici. Inoltre cicli a polarità opposta impattano i raggi cosmici in maniera diversa a seconda del segno della carica dei raggi cosmici.

Da queste brevi considerazioni si può capire che le misure precise degli spettri in energia e della loro variabilità nel tempo e della composizione della radiazione cosmica forniscono informazioni fondamentali per spiegare la vita dei raggi cosmici.

## Misure di raggi cosmici

Come si può intuire dall'andamento dello spettro in energia dei raggi cosmici mostrato in figura 1 un singolo approccio sperimentale non è una soluzione praticabile. Quindi nel corso degli anni sono stati adottati molti approcci diversi per misurare la radiazione cosmica. La distinzione più significativa è tra misure dirette ed indirette. La presenza dell'atmosfera terrestre impone che le misure dirette siano condotte al sommo dell'atmosfera o tramite pallone stratosferici, con residui di frazioni del percento di atmosfera, o nello spazio. La realizzazione di apparati per tali misure è, però, temperata sia dai costi di messa in opera, particolarmente importanti soprattutto per missioni spaziali, sia dall'andamento a legge di potenza negativa dello spettro dei raggi cosmici che comporta che più alte siano l'energia delle particelle da misurare maggiori diventino l'accettanza sperimentale ed il tempo di acquisizione richiesti. Per esempio nella regione del ginocchio la frequenza attesa di particelle è di 1 particella per m<sup>2</sup> per anno. Appare ovvio che a queste ed ad energie più elevate misure dirette

non sono praticabili. Nel corso degli anni varie tecniche sono state utilizzate per misurare la radiazione cosmica alle più alte energie, tutte basate sulla misura dei prodotti dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera terrestre, da cui la definizione di misure indirette. La quasi totalità di queste misure sono state condotte da terra. Comunque, recentemente si sono cominciate a sperimentare tecniche di osservazione dal sommo dell'atmosfera tramite palloni stratosferici e dallo spazio.

Nel seguito vengono brevemente presentati gli esperimenti spaziali più recenti nel campo delle misure dirette dei raggi cosmici assieme ai risultati più rilevanti che sono stati ottenuti.

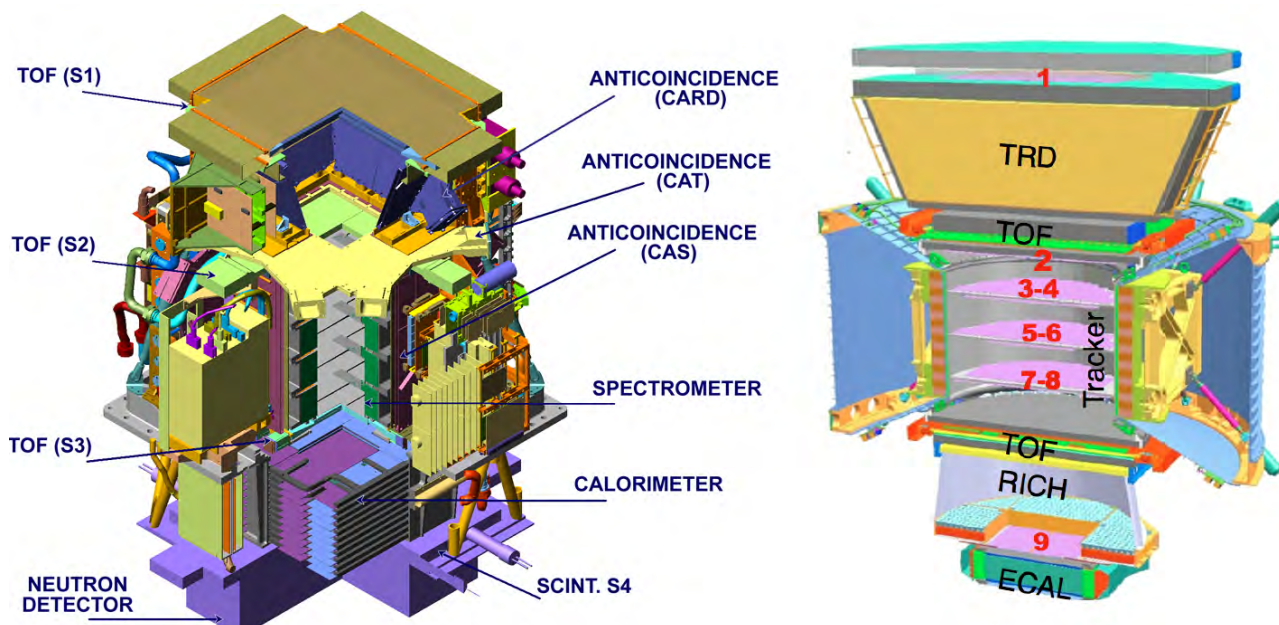
## Esperimenti dallo spazio

Come discusso in precedenza per comprendere l'origine dei raggi cosmici è necessario misurarne con molto dettaglio lo spettro in energia e la composizione per poter capire se ci sono strutture negli andamenti spettrali e se queste dipendono dal tipo di particelle. Quindi gli esperimenti devono essere equipaggiati con apparati in grado di identificare le particelle e misurarne l'energia. Nel corso dei decenni molti approcci diversi sono stati utilizzati per queste misure di rivelazione diretta.

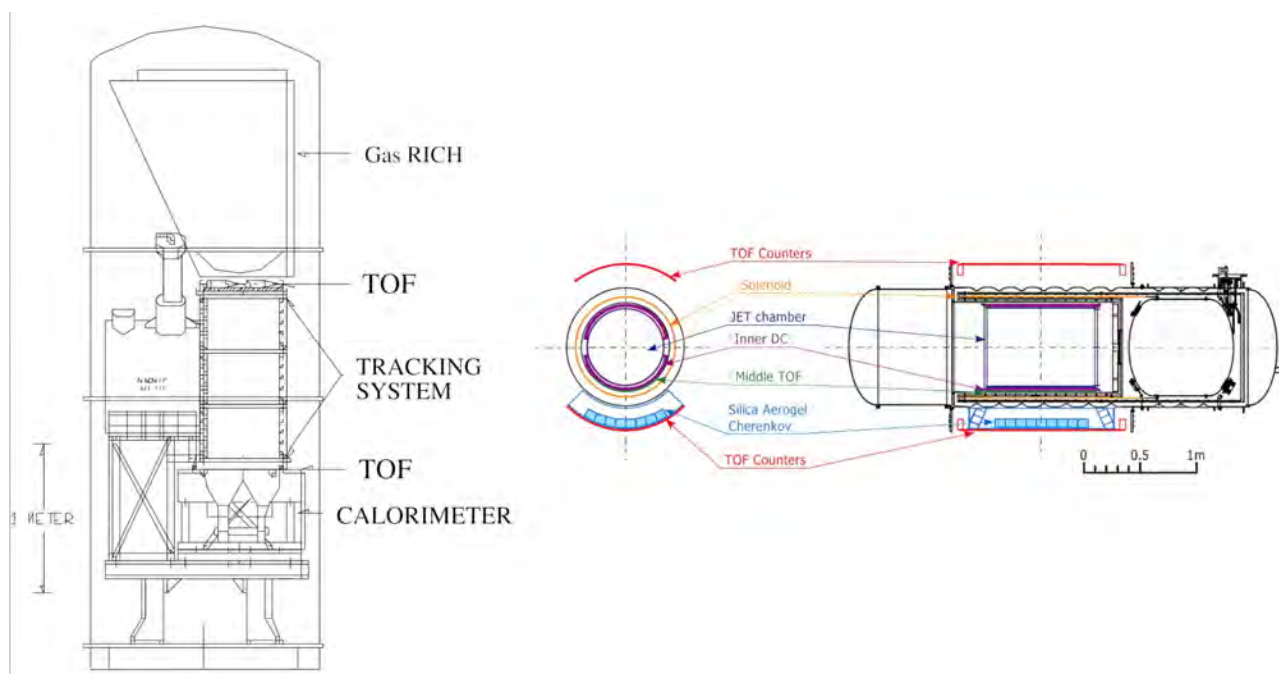
Per quanto riguarda le misure di energie le due tecniche principalmente usate sono stati spettrometri magnetici con cui ricavare la rigidità<sup>1</sup> e, quindi, l'impulso e l'energia delle particelle e calorimetri con cui misurare direttamente l'energia delle particelle. Dai primi spettrometri magnetici equipaggiati con magneti superconduttori e lanciati con voli in pallone negli anni '70 del secolo scorso, si è passati in anni più recenti a magneti permanenti installati su satelliti come l'apparato PAMELA [3] o, sulla stazione spaziale ISS, come l'apparato AMS-02 [4]. La figura 2 mostra gli apparati PAMELA ed AMS-02. PAMELA, lanciato il 15 giugno del 2006 dalla base di Baikonur in Kazakistan, ha preso dati a circa 600 km di altitudine fino a gennaio 2016. L'apparato PAMELA (figura 2 sinistra), presenta, attorno al magnete permanente per la misura della rigidità

<sup>1</sup>La rigidità  $R$  è definita come  $R = pc/(Ze)$ , dove  $c$  è la velocità della luce,  $p$  l'impulso e  $Ze$  la carica della particella.





**Figura 2:** A sinistra: l'apparato PAMELA. A destra: l'apparato AMS-02.



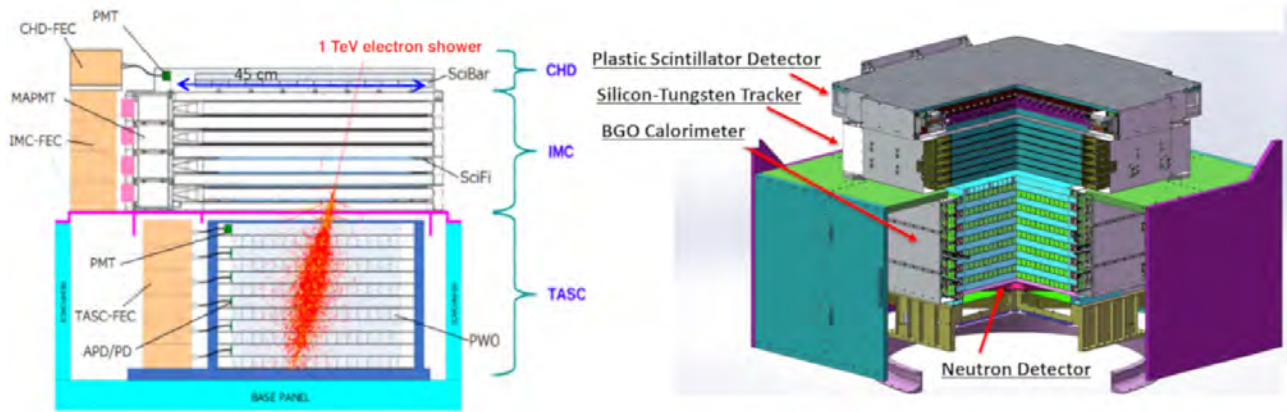
**Figura 3:** Sinistra: l'apparato CAPRICE98. Destra: l'apparato BESS-Polar.

delle particelle, un sistema di tempo di volo per il *trigger*, misura di velocità e perdite di energia per ionizzazione, un calorimetro elettromagnetico ed un rivelatore a neutroni per la separazione tra particelle elettromagnetiche e particelle adroniche.

L'apparato AMS-02 (figura 2 destra), installato sulla ISS il 19 maggio 2011, consiste, oltre che ad un magnete permanente per la misura della rigidità delle particelle, di un sistema di tempo

di volo per il trigger, misura di velocità e perdite di energia per ionizzazione, di un calorimetro elettromagnetico per la separazione tra particelle elettromagnetiche e particelle adroniche e di un rivelatore di radiazione di transizione ed un *Ring Imaging Čerenkov* (RICH) per ulteriore potere di separazione tra particelle veloci, come elettroni e positroni, e lente, come protoni e nuclei più pesanti.

Questo approccio segue la strada indicata dai precedenti esperimenti su palloni stratosferici



**Figura 4:** Sinistra: l'apparato CALET. Destra: l'apparato DAMPE.

come l'apparato equipaggiato con un magnete superconduttore con cui il compianto Robert Golden misurò nel 1979 per la prima volta antiprotoni nei raggi cosmici galattici [5]. O come gli apparati che negli anni 1990 e 2000 hanno affiancato a magneti superconduttori avanzati rivelatori per l'identificazione delle particelle sviluppati per esperimenti ad acceleratori. La figura 3 mostra due di questi apparati: l'esperimento CAPRICE98 [6], a sinistra, dotato di calorimetro elettromagnetico simile a quello di PAMELA e di un RICH, l'esperimento BESS-Polar [7], a destra, dotato di rivelatore Čerenkov e sistema di tempo di volo ad alta risoluzione.

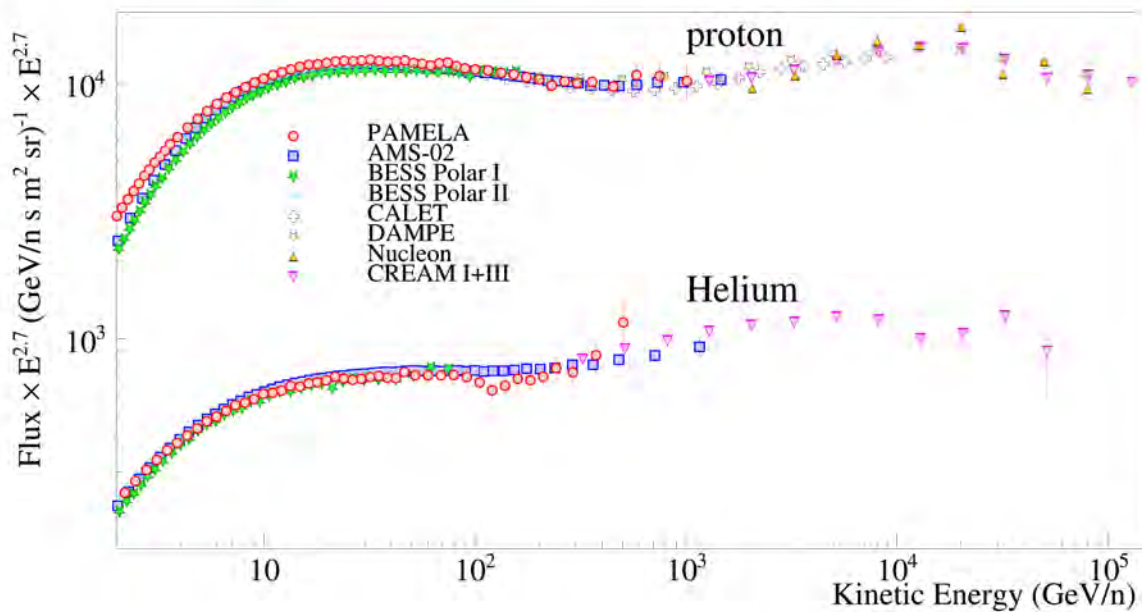
Accanto all'utilizzo di magneti, permanenti o superconduttori, l'altra tecnica ampiamente usata per misurare l'energia dei raggi cosmici è stata quella di utilizzare dei calorimetri. Questo è evidenziato in figura 4 che mostra due recenti missioni spaziali: CALET, a sinistra, e DAMPE a destra. CALET [8] è stato lanciato il 19 agosto 2015 e poi installato a bordo della stazione spaziale internazionale ISS da dove sta raccogliendo ininterrottamente dati. Oltre ad un calorimetro omogeneo di tustanato di piombo per misurare l'energia delle particelle e separare particelle elettromagnetiche da adroniche, l'apparato include degli scintillatori plastici per la misurazione della carica delle particelle e un calorimetro ad immagine che funziona sia come tracciante che come *preshower*. DAMPE [9] è stato installato a bordo di un satellite cinese e lanciato il 17 dicembre 2015. In maniera analoga a CALET, è dotato di un calorimetro di barre di BGO per la misura di energia e per l'identificazione delle particelle, di un misuratore di carica, di un tracciante e

di un rivelatore di neutroni per fornire ulteriore capacità di identificazione. Il vantaggio dell'approccio calorimetro è la compattezza degli apparati che permette di ottenere accettanze più grandi a parità di peso e dimensioni, ovvero di costi per missioni spaziali. Un immediato svantaggio è l'assenza di strumentazione in grado di misurare il segno della carica e, quindi, di studiare, per esempio, la componente antiparticellare della radiazione cosmica che ha un grande interesse scientifico per le sue ricadute nella ricerca di nuova fisica, come materia oscura.

### La componente primaria

I raggi cosmici sono normalmente definiti essere primari, cioè accelerati alle sorgenti (di qualunque tipo queste possano essere), o secondari, cioè prodotti dall'interazione dei raggi cosmici col mezzo interstellare. Protoni, nuclei di elio, carbonio ed ossigeno sono un esempio di componente primaria mentre i nuclei di litio, berillio e boro sono tra le più abbondanti componenti secondarie. Vale la pena rimarcare che, con l'eccezione di una piccola componente di raggi cosmici di bassa energia (da poche decine a qualche centinaio di MeV) originati nell'eliosfera, i raggi cosmici misurati nelle vicinanze della terra sono nuclei in quanto gli elettroni atomici sono stati strappati durante la fase di accelerazione.

Protoni e nuclei di elio sono la componente più abbondante dei raggi cosmici galattici rappresentando oltre il 95% del flusso totale di raggi cosmici. Non deve quindi sorprendere che sono anche le componenti più studiate e meglio misurate. La figura 5 mostra un insieme di misure



**Figura 5:** Misure dirette recenti dei flussi di protoni e nuclei di elio. I flussi sono moltiplicati per  $E^{2.7}$ , con  $E$  energia cinetica in GeV per nucleone.

recenti dei flussi di protoni e di nuclei<sup>2</sup> di elio ottenute con esperimenti su palloni stratosferici o nello spazio. In figura i flussi sono moltiplicati per una potenza dell'energia ( $E^{2.7}$ ), questo viene comunemente fatto per visualizzare meglio le forme di spettri che seguono delle leggi di potenza.

La prima cosa che si può notare è l'eccellente accordo tra le varie misure tenendo conto che, come discusso precedentemente, le più basse energie ( $< 30$  GeV) sono affette dalla modulazione solare che era diversa per esperimenti che si sono svolti in periodi diversi. Poi si può notare che sopra alla regione di influenza della modulazione solare, accanto all'andamento approssimativamente a legge di potenza previsto dallo scenario standard dei raggi cosmici, l'eccellente precisione di queste recenti misure indica chiaramente un inatteso indurimento dello spettro<sup>3</sup> ad alcune centinaia di GeV. Questo effetto fu chiaramente evidenziato per la prima volta dall'esperimento PAMELA e successivamente confermato, con un significativo miglioramento della precisione statistica, dall'esperimento AMS-02, poi ulteriormente verificato, con sistematiche diverse, dagli esperimenti DAMPE e CALET.

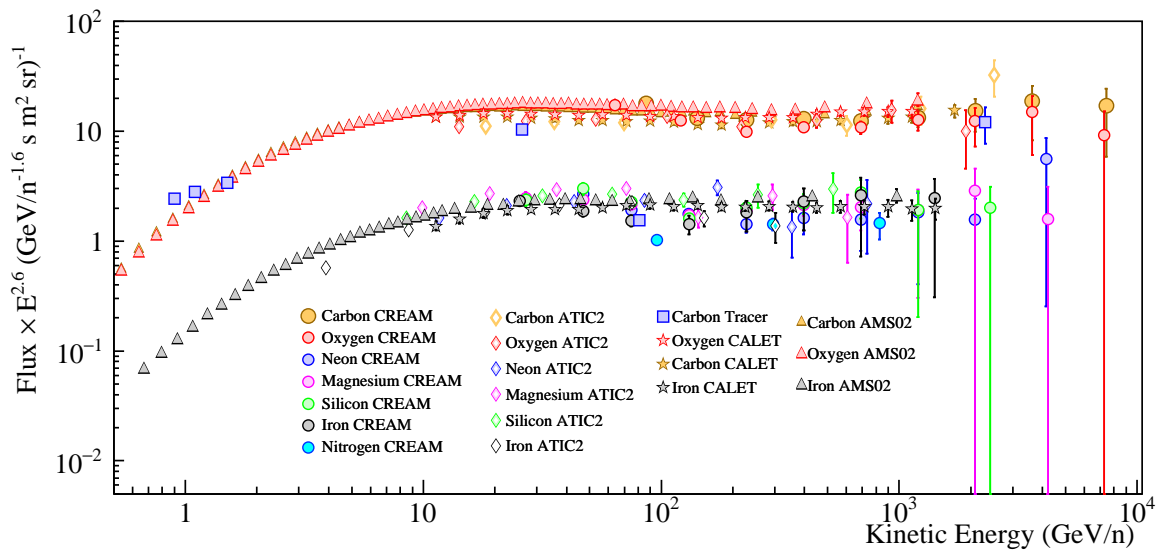
<sup>2</sup>I nuclei di elio sono per oltre l'80%  $^4\text{He}$ .

<sup>3</sup>In inglese si usa il termine *hardening*, ovvero l'indice spettrale  $\gamma$  della legge di potenza  $E^{-\gamma}$  diminuisce.

Molte idee sono state presentate per spiegare quest'indurimento dello spettro, idee che vanno dal contributo di altre sorgenti astrofisiche oltre alle SNR, tipo stelle nova, che ad effetti dovuti alla propagazione, spiegazione che sta diventando la più accettata (per una rassegna di queste discussioni si veda [10]). Si può anche notare che ci sono indicazioni di un ulteriore cambio di pendenza dello spettro a  $\approx 10 - 20$  TeV che, però, necessita di maggiori conferme sperimentali. Come predetto dal modello standard dei raggi cosmici i cambi spettrali osservati nei protoni si dovrebbero osservare anche nelle altre componenti nucleari, ed effettivamente questo è quanto si osserva nei nuclei di elio, figura 5. Però si può anche notare che protoni e nuclei di elio hanno forme spettrali diverse (chiaramente evidenti facendo il rapporto dei due flussi). Al momento non c'è ancora una spiegazione condivisa per questa differenza. Sono state fatte varie ipotesi (per una rassegna di queste si veda [11]): effetti dovuti ai processi di interazione tra raggi cosmici di specie diverse ed il mezzo interstellare; sorgenti diverse; e, forse la spiegazione più intrigante, differenti spettri di iniezione alla sorgente causati dai diversi rapporti di carica su massa.

La figura 6 mostra una raccolta di spettri in rigidità di nuclei più pesanti dell'elio. Come si può notare soprattutto nelle recenti misure di





**Figura 6:** Misure dirette recenti degli spettri in energia di nuclei primari più pesanti dell'elio. I flussi sono moltiplicati per  $E^{2.6}$ , con  $E$  energia cinetica in  $\text{GeV}/n$ .

AMS-02 e CALET l'indurimento nello spettro è chiaramente visibile.

Molto interessanti sono anche state le misure di nuclei pesanti ad energie tra alcune decine di  $\text{MeV}/n$  ad alcune centinaia di  $\text{MeV}/n$  o qualche  $\text{GeV}/n$  a seconda del nucleo e dell'esperimento. Infatti, grazie soprattutto alle misure degli esperimenti su pallone TIGER e SUPER-TIGER ed all'esperimento CRIS della missione spaziale ACE, si è osservata un'abbondanza maggiore di metalli con alta temperatura di condensazione, rispetto a quella di elementi chimici con bassa temperatura di condensazione come idrogeno, non metalli e gas nobili. Questa differenza è stata spiegata col fatto che la gran parte dell'accelerazione di raggi cosmici avvenga nelle cosiddette associazioni di stelle del tipo OB supermassive e che il materiale accelerato sia preferibilmente polvere interstellare. Un altro interessante risultato ottenuto dall'esperimento ACE-CRIS è stata la scoperta che la maggior parte dei raggi cosmici origina da materia che è rimasta a lungo nel mezzo interstellare prima di essere accelerata dal fronte d'urto di esplosioni di supernova. Questo risultato è stato ottenuto misurando l'abbondanza di isotopi di nickel e cobalto. Dato che uno di questi isotopi, il  $^{59}\text{Ni}$ , è radioattivo e decade soltanto per cattura elettronica con tempo di dimezzamento di  $0.76 \times 10^5$  s, e visto che il processo di accelerazione strappa tutti gli elettroni dagli atomi, quindi impedendo il processo di de-

cadimento, la misurata assenza di questo isotopo nella radiazione cosmica implica che il processo di accelerazione è avvenuto ben oltre  $10^5$  anni dopo la nucleo-sintesi da parte della stella degli isotopi di nickel.

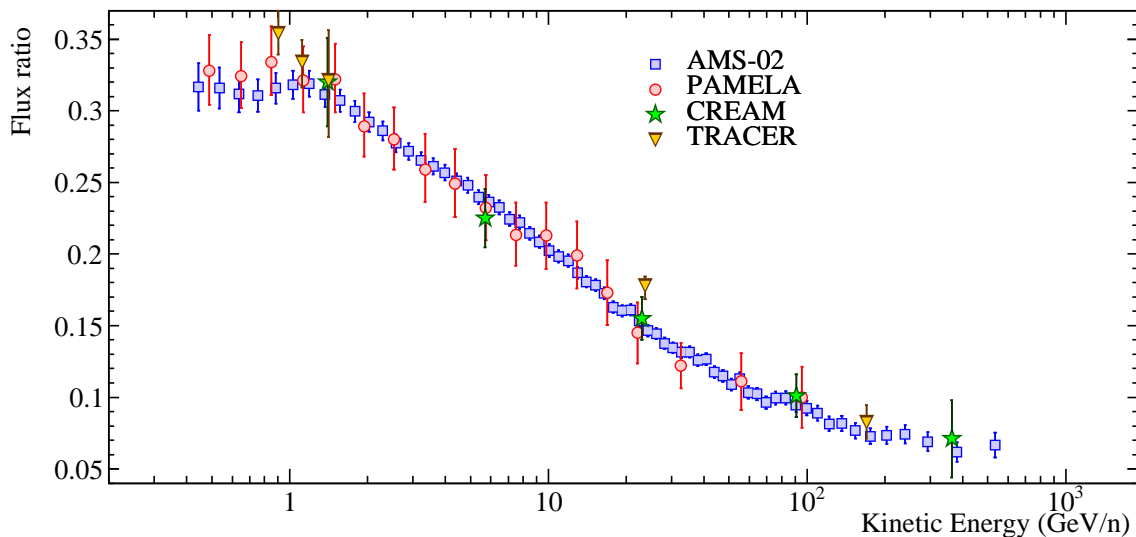
### La componente secondaria

Come si diceva elementi secondari come, per esempio, i nuclei di boro sono prodotti dall'interazione dei raggi cosmici col mezzo interstellare. Conseguentemente, misurarne lo spettro e la composizione fornisce importanti informazioni sulla propagazione dei raggi cosmici nella galassia e sui processi fisici che li condizionano, come pure sul mezzo interstellare.<sup>4</sup>

Per questi studi è particolarmente interessante osservare il rapporto dei flussi tra secondari e primari in quanto è strettamente legato ai processi di diffusione ed alla quantità di materiale attraversato dai raggi cosmici. Dei vari rapporti che si possono studiare, quello che ha avuto la maggior attenzione è stato il rapporto tra il flusso del boro e quello del carbonio, essendo il boro la componente secondaria più abbondante nella radiazione cosmica. La figura 7 mostra questo rapporto misurato da recenti esperimenti su

<sup>4</sup>Il boro non è prodotto nei processi di combustione stellare, e quindi è relativamente meno abbondante rispetto, ad esempio, al  $^{12}\text{C}$  che, invece, si produce nelle stelle con un processo chiamato  $3\alpha$ .





**Figura 7:** Il rapporto tra i flussi di boro e carbonio misurato da recenti esperimenti su palloni stratosferici e spaziali.

palloni stratosferici e spaziali. L'andamento del rapporto in funzione dell'energia è sostanzialmente consistente con quanto ci si aspetterebbe teoricamente ed il suo valore permette di stimare il coefficiente di diffusione nella galassia (il termine  $D$  dell'equazione (1)). Inoltre, mostra che anche per i nuclei di boro vi è un indurimento dello spettro consistente con l'ipotesi che siano effetti nella diffusione dei raggi cosmici che causano i cambi spettrali nei flussi dei nuclei di raggi cosmici.

Anche per i secondari è molto interessante studiare le componenti isotopiche dei nuclei, in particolare quelle instabili come  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$  e  $^{36}\text{Cl}$ . Infatti, siccome questi isotopi hanno vite medie di milioni di anni, studiarne la frazione rispetto agli isotopi stabili nella radiazione cosmica dà informazioni sul tempo di permanenza, ora stimato  $\sim 15$  milioni anni, dei raggi cosmici nella galassia e sulla loro propagazione. La maggior parte delle misure disponibili sono limitate ad energie inferiori ad alcune centinaia di MeV per nucleone. È in previsione un esperimento, HELIX, su un volo in pallone di lunga durata dall'Antartide che dovrebbe estendere queste misure sopra il GeV/n.

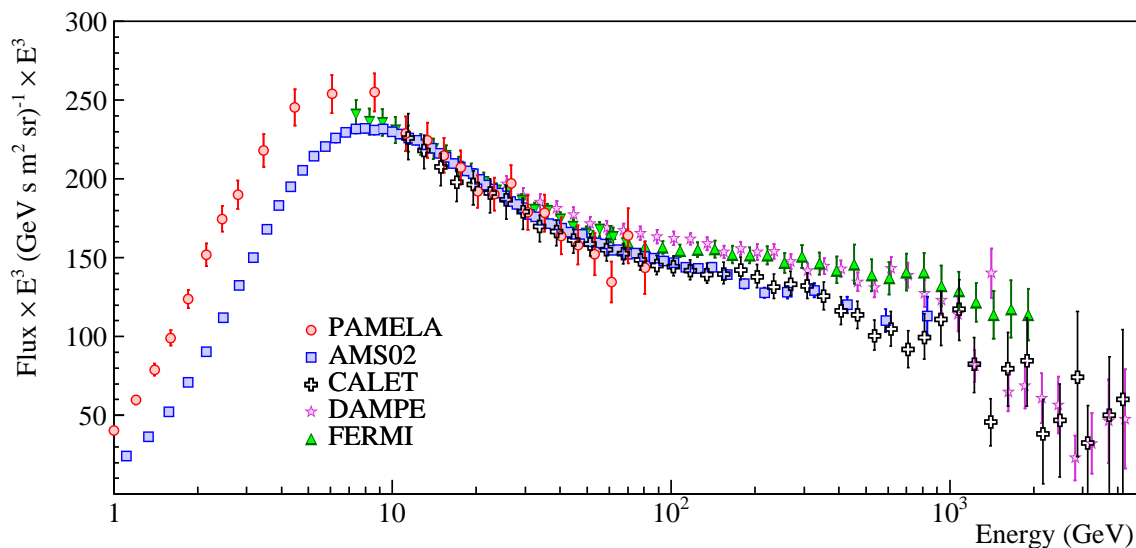
### Componenti rare

Accanto agli elementi più abbondanti come protoni ed elio, nella radiazione cosmica è presente anche una componente di elettroni ed una, mol-

to più rara, di antiparticelle. Per motivi diversi lo studio di queste componenti, benché rare, è particolarmente interessante e foriero di risultati potenzialmente molto importanti.

### Elettroni

Gli elettroni sono la componente di carica negativa più abbondante della radiazione cosmica ma rappresentano solo l'1% del flusso totale dei raggi cosmici. Tuttavia, a causa della loro piccola massa risentono di processi di perdita di energia diversi dagli elementi di massa maggiore fornendo, quindi, informazioni sulla propagazione nella galassia diversi da quelli ottenibili con la componente adronica. Infatti gli elettroni perdono frazioni consistenti della loro energia per radiazione di sincrotrone interagendo col campo magnetico galattico, e, mediante un processo Compton inverso, interagendo coi fotoni ambientali. Le perdite di energia sono talmente significative che gli elettroni di alta energia ( $\gg 100$  GeV) possono raggiungere il sistema solare solo se le loro sorgenti sono relativamente vicine su scala galattica. Gli elettroni sono principalmente di origine primaria accelerati da sorgenti astrofisiche come gli altri raggi cosmici ma vi è anche una importante, dell'ordine del 10%, componente secondaria risultante dalle interazioni dei raggi cosmici col mezzo interstellare.



**Figura 8:** Lo spettro in energia di tutti gli elettroni misurato da recenti esperimenti spaziali. I flussi sono moltiplicati per  $E^3$ , con  $E$  l'energia cinetica in GeV.

La figura 8 mostra le più recenti misure dirette di elettroni ottenute da esperimenti spaziali. È da notare che questi risultati riguardano la somma del flusso di elettroni con quello dei positroni (l'antiparticella degli elettroni rappresenta circa il 10% di questo flusso) in quanto diversi dei risultati presentati in figura sono stati ottenuti da apparati privi di magneti, quindi non in grado di separare le particelle in base al segno della loro carica.

Alcune considerazioni interessanti che si possono trarre da questi dati sono le seguenti:

- l'andamento dello spettro cambia significativamente sopra ad 1 TeV. Questo potrebbe essere dovuto al fatto che elettroni di alte energie siano primariamente prodotti da una singola sorgente, probabilmente localizzata a poche centinaia di parsec dal sistema solare. Oppure potrebbe essere il risultato della combinazione degli effetti di accelerazione presso sorgenti distribuite su scala galattica e delle perdite di energia dovute alla propagazione nella galassia;
- ad energie intermedie, inferiori al TeV ma superiori a quelle per cui la modulazione solare ha un'influenza significativa, lo spettro è una legge di potenza con indice spettrale  $\sim -3.1 \div -3.2$ , consistente con quanto atteso dai modelli standard di propagazione dei raggi cosmici;

- ci sono delle evidenti differenze tra le varie misure, non ancora capite ma probabilmente imputabili ad effetti sistematici degli apparati non ancora identificati.

### Elettroni e positroni

Le misure di figura 8 si riferiscono alla somma di elettroni e positroni, che il modello standard dei raggi cosmici assume avere origini parzialmente diverse. Ovvero, la maggior parte degli elettroni sono di origine primaria accelerati in SNR con una piccola frazione di origine secondaria comparabile alla componente di positroni, totalmente di origine secondaria. Si capisce, quindi, che la misura separata delle due componenti assume una notevole valenza nello studio dei raggi cosmici. La figura 9 a sinistra mostra le misure più recenti dei flussi separati di elettroni e positroni ottenute dagli esperimenti spaziali Fermi, PAMELA ed AMS-02. È degno di nota il fatto che l'esperimento Fermi, benché non dotato di magneti, sia riuscito ad ottenere dati sulle due componenti utilizzando il campo magnetico terrestre osservando la diversa direzione di arrivo che questo induceva nelle particelle elettromagnetiche identificate dall'apparato. Escludendo le energie più basse affette dal vento solare, un eccellente accordo si osserva tra i tre gruppi di misura con l'unica eccezione lo spettro di positroni misurato da Fermi che è sistematicamente più

alto di quello misurato da AMS-02 e PAMELA. Questo potrebbe essere dovuto ad un residuo di contaminazione di protoni nei dati dell'esperimento Fermi, considerando che l'apparato, progettato per misurare fotoni gamma, non ha la stessa capacità identificativa degli altri due.

La figura 9, a destra, mostra la frazione di positroni, ovvero il rapporto tra i flussi ( $\phi$ ) di positroni e la somma dei flussi di elettroni e positroni:  $\phi(e^+) / (\phi(e^+) + \phi(e^-))$ . Storicamente è questa la quantità che è stata maggiormente misurata essendo decisamente più semplice da ottenere sperimentalmente non richiedendo la completa conoscenza di tutti gli effetti strumentali che entrano nel calcolo dei flussi, in quanto questi possono essere assunti simili per elettroni e positroni e, quindi, cancellarsi nel rapporto. Nella figura, accanto a misure recenti, viene mostrata anche una predizione teorica di questa frazione assumendo che tutti i positroni siano prodotti dall'interazione dei raggi cosmici col mezzo interstellare.

Diversi punti balzano all'occhio osservando queste figure:

- i dati sperimentali sotto i 5 GeV sono abbastanza consistenti o più bassi della predizione per la produzione secondaria;
- tuttavia i dati sperimentali per i diversi esperimenti differiscono significativamente a queste basse energie;
- al contrario sono in sostanzialmente in accordo ad energie più elevate, sopra i 10 GeV;
- dove, però, sono significativamente più alti nell'ipotesi di produzione secondaria.

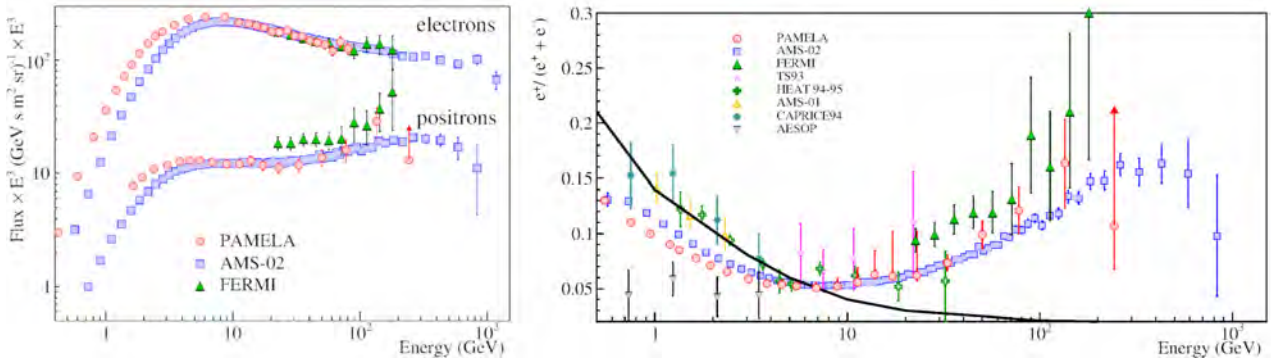
In realtà le differenze tra i dati sperimentali a basse energie ( $< 10$  GeV) non sono preoccupanti in quanto sono molto probabilmente dovute ad effetti di modulazione solare che condizionano differentemente raggi cosmici di segno di carica diversa (si ricordi che l'interazione col vento solare è praticamente un'interazione con campi magnetici). Infatti queste misure sono state ottenute durante fasi diverse e polarità diverse del ciclo solare e se si confrontano misure effettuate nello stesso periodo tra PAMELA ed AMS-02 si trova un ottimo accordo tra le stesse.

L'aumento della frazione di positroni ad alta energia, per la prima volta chiaramente identificato dall'esperimento PAMELA, è, come si vede dalla figura 9 a sinistra, dovuto ad uno spettro di  $e^+$  più duro di quello degli  $e^-$ . Questo aumento è difficile da spiegare col modello standard dei raggi cosmici, rappresentato dalla linea continua in figura 9 a destra, che, invece, predice una diminuzione della frazione ad alte energie. Ciò implica che o vi è una componente primaria di  $e^+$  (e, probabilmente, in egual misura un'ulteriore componente primaria di  $e^-$ ) oppure il paradigma dei raggi cosmici richiede delle modifiche.

Negli anni successivi alle misure di PAMELA ed AMS-02 innumerevoli ipotesi sono state avanzate per spiegare questi risultati, con l'esistenza di sorgenti di positroni quella che ha attirato il maggior interesse. Tra le sorgenti proposte vi sono sorgenti astrofisiche come le pulsar ma anche la possibilità che positroni vengano prodotti ed accelerati durante la fase di accelerazione dei raggi cosmici nelle SNR. Per ovvi motivi, molti studi si sono concentrati sulla possibilità che questi positroni in eccesso possano risultare dall'annichilazione o dal decadimento della materia oscura. Le prove dell'esistenza della materia oscura sono molteplici ma la sua esatta natura è ancora ignota. Tra i possibili candidati per la materia oscura che sono stati proposti vi sono le cosiddette WIMP ("Weakly Interactive Massive Particle"), particelle risultanti da un'estensione del modello standard della fisica fondamentale con masse possibili dal GeV a molti TeV. Queste particelle possono annichilare producendo particelle del modello standard tra cui positroni ed elettroni. Questa spiegazione però incontra due problemi: l'assenza di un segnale equivalente negli antiprotoni, come verrà discusso a breve, e nella radiazione gamma da sorgenti dove ci si attende una forte presenza di materia oscura, come le galassie sferiche nane. Per una discussione più approfondita sulla materia oscura si può vedere [12] e sulla ricerca della materia oscura con antiparticelle nei raggi cosmici si può vedere [13].

## Antinuclei

Come si diceva, segnali di materia oscura possono essere cercati anche in altre componenti rare



**Figura 9:** A sinistra: gli spettri in energia degli elettroni e dei positroni misurati degli esperimenti spaziali PAMELA, Fermi ed AMS-02. I flussi sono moltiplicati per  $E^3$ , con  $E$  l'energia cinetica in GeV. A destra: una raccolta di alcuni dei risultati più recenti sulla frazione di positroni. La linea continua è la predizione assumendo che tutti i positroni siano di origine secondaria.

come gli antiprotoni e gli antinuclei. Sin dalle prime osservazioni degli antiprotoni nella radiazione cosmica negli anni 70 del secolo scorso, si capì subito che gli antiprotoni, come i positroni, permettono di studiare importanti aspetti della radiazione cosmica. Come i positroni, gli antiprotoni sono prodotti durante la propagazione dei raggi cosmici nella galassia. Accanto a questa produzione secondaria, una componente primaria potrebbe risultare dall'annichilazione o decadimento della materia oscura. Negli ultimi anni, nuovi esperimenti, come PAMELA ed AMS-02 nello spazio o come BESS-Polar su palloni stratosferici con voli di lunga durata sopra l'Antartide, hanno significativamente cambiato lo scenario sperimentale con un aumento di ordini di grandezza della statistica esistente sulle antiparticelle.

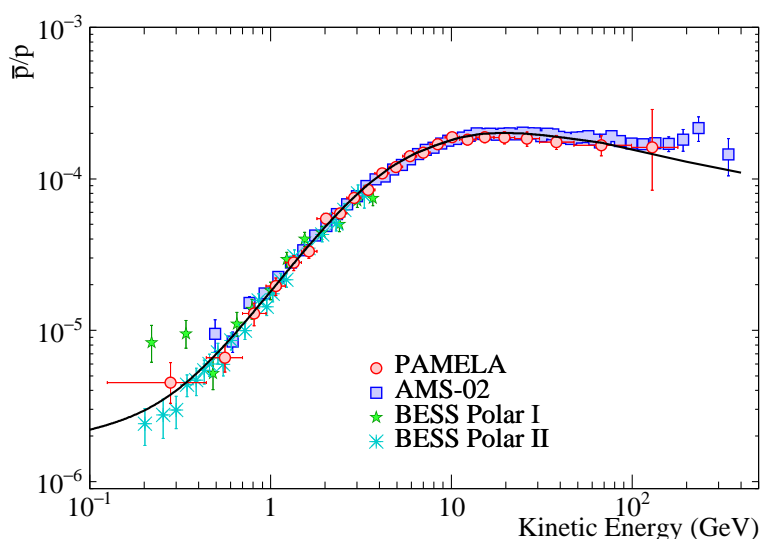
La figura 10 mostra i risultati più recenti sul rapporto dei flussi di antiprotoni su protoni assieme ad una predizione teorica per antiprotoni di origine secondaria (stesso modello della predizione per positroni in figura 9, destra). I dati sperimentali sono in buon accordo tra di loro e con la predizione secondaria anche se vi è un appiattimento ad alte energie non previsto dal modello. Differenza, però, che si riduce significativamente se il modello viene aggiornato coi dati più recenti sulle sezioni d'urto di produzione di antiprotoni da esperimenti ad acceleratori.

Il buon accordo tra dati sperimentali di antiprotoni e predizioni secondarie mette limiti importanti sulla presenza di componenti primarie da annichilazione e decadimento di materia oscura, escludendo anche molte interpretazioni dei

risultati sui positroni come segnali indiretti di materia oscura. Purtroppo, un lieve eccesso rispetto alla predizione secondaria nei dati di PAMELA e, soprattutto, AMS-02 tra alcuni GeV e 20 GeV ha spinto molti autori a proporre la presenza di una componente primaria da annichilazione di una particella di materia oscura con massa di alcune decine di GeV.

Purtroppo queste misure sono pesantemente condizionate dalle incertezze sulle sezioni d'urto di produzione e sulla propagazione dei raggi cosmici nella galassia. Questo perché l'eventuale componente primaria è una frazione della componente secondaria, rendendo le incertezze teoriche sulla propagazione dei raggi cosmici importanti quanto l'eventuale segnale stesso. Altri antinuclei, però, come l'antideuterio e l'antielio non soffrono di questo problema, in quanto la componente secondaria, soprattutto sotto qualche GeV, è pesantemente soppressa dall'alta soglia energetica richiesta per la produzione in collisioni di questi antinuclei. Esistono e permangono come plausibili molti modelli di annichilazione o decadimento di WIMP che predicono flussi di antideuterio ed antielio ordini di grandezza superiori alla componente secondaria. Per il momento non vi sono misure validate di antideuterio o di antielio, però sia l'attualmente operativo esperimento AMS-02 che il futuro esperimento GAPS [14], previsto volare su pallone stratosferico sopra l'Antartide nel prossimo futuro, promettono risultati su questi antinuclei che potrebbero cambiare fondamentalmente la ricerca sulla natura della materia oscura.





**Figura 10:** Il rapporto tra i flussi di antiprotoni e di protoni misurato da recenti esperimenti su palloni stratosferici e spaziali. La linea continua è la predizione assumendo che tutti gli antiprotoni siano di origine secondaria.

## Future missioni spaziali

In questi ultimi anni nuovi esperimenti, soprattutto nello spazio, equipaggiati con tecnologie all'avanguardia hanno permesso di far progredire significativamente la conoscenza della fisica dei raggi cosmici spingendo a rivedere i modelli di accelerazione e propagazione degli stessi. Con questa grande quantità di nuovi dati, però, sono sorte anche nuove domande che richiedono nuovi esperimenti, più grandi e più sofisticati. Alcuni sono in fase di sviluppo, altri ancora in una fase di progettazione.

I nuovi esperimenti dovranno espandere la regione di energia esplorata misurando direttamente lo spettro e composizione dei raggi cosmici fino alla zona del ginocchio per permettere di capire se vi sono altre strutture negli spettri e come varia la composizione quando ci si avvicina al ginocchio, dove il paradigma dei raggi cosmici prevede che siano assenti, ed in maniera diversa, in base al loro numero di carica, i raggi cosmici accelerati da SNR. Inoltre, dovranno cercare di misurare con più precisione le componenti rare, estendendone le misure ad energie superiori al TeV.

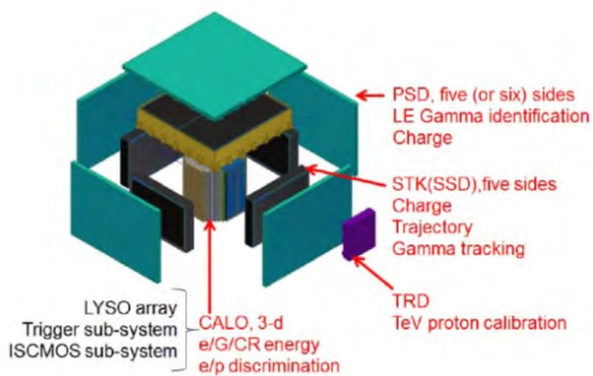
L'esperimento in fase di sviluppo più avanzata è l'esperimento HERD [15] proposto per essere installato sulla futura stazione spaziale cinese nella seconda metà di questo decennio. L'apparato, mostrato nella figura 11, sarà composto da un calorimetro a cubetti (CALO), circondato da un sistema di tracciamento (STK) di microstrip di silicio a suo volta circondato da scintillatori

plastici (PSD) e un rivelatore di radiazione di transizione (TRD) piazzato in un lato. L'esperimento è stato disegnato per misurare lo spettro e la composizione dei raggi cosmici fino al ginocchio ( $\approx 1$  PeV) e per misurare la componente di elettroni ( $e^-$  più  $e^+$  non avendo campo magnetico) fino ad una decina di TeV. Non avendo un campo magnetico, HERD non potrà chiarire completamente l'origine della componente di antimateria.

La misura di questa componente fino ad alcuni TeV è, invece, l'obiettivo scientifico di due missioni spaziali attualmente in fase di studio: ALADInO (Antimatter Large Acceptance Detector In Orbit) [16] ed AMS-100 [17], un'estensione dell'attuale esperimento AMS-02. Entrambi questi esperimenti sono pensati aventi rivelatori per l'identificazione di particelle assieme ad un magnete superconduttore che permetterebbe di estendere di almeno un ordine di grandezza l'accettanza e la rigidità misurabile con precisione di apparati esistenti come AMS-02.

Benché l'osservazione di raggi cosmici di altissima energia, dal ginocchio fino a sopra i  $10^{19}$  eV, sia condizionata dall'estremamente basso flusso di particelle, circa 1 particella per  $\text{km}^2$  al secolo per energie dell'ordine di  $5 \times 10^{19}$  eV, che rende l'osservazione diretta di queste particelle non praticabile, esperimenti dallo spazio sono stati proposti per questo campo della fisica dei raggi cosmici. Come descritto nell'articolo di A. Chiavassa in questo numero di **Ithaca**, tutte le misure di raggi cosmici di altissima energia sono state

ottenute con strumentazione a terra che misura i prodotti dell'interazione dei raggi cosmici con l'atmosfera, derivando da questi informazioni sulle energie e tipo di raggio cosmico. In questo modo si sono potuti costruire esperimenti che campionano enormi superfici (l'osservatorio Pierre Auger in Mendoza, Argentina ha 1600 water rivelatori Čerenkov detectors distribuiti su una superficie di 3,000 km<sup>2</sup>) compensando conseguentemente il bassissimo flusso della radiazione cosmica. Pur tuttavia, i dati disponibili sull'energie estreme (UHECR, energie  $\geq 10^{19}$  eV) sono ancora limitati e la loro origine e natura rimangono un'incognita. Per studiare queste energie estreme, già molti anni fa fu proposto di andare nello spazio da cui osservare la luce di fluorescenza prodotta dagli sciami atmosferici estesi originati dai raggi cosmici che interagiscono con l'atmosfera terrestre. Osservando l'atmosfera da centinaia di km di altezza è possibile aumentare l'accettazione osservativa di oltre 2 ordini di grandezza rispetto ad apparati terrestri come l'osservatorio AUGER, migliorando di più di un fattore 10 (vi è una riduzione dovuta al ridotto tempo osservativo, dato che questi apparati possono operare solo in condizioni di buio) la statistica esistente. Attualmente c'è una mis-



**Figura 11:** L'apparato HERD.

sione spaziale, POEMMA [18], dedicata ai UHECR in fase di studio da parte della NASA per un'eventuale missione nel prossimo decennio. POEMMA è l'evoluzione di proposte precedenti come OWL ed JEM-EUSO e di studi di fattibilità condotti con palloni stratosferici: EUSO-SPB1 e 2. La missione verrebbe posta in un'orbita circolare a 525 km di altitudine da cui osservare sia la luce di fluorescenza che la radiazione Čerenkov degli sciami atmosferici. Se e quando POEMMA

entrerà in operazione migliorerà di un fattore 10 la statistica sugli UHECR permettendo di dare risposta alle domande ancora aperte sulla fine dello spettro dei raggi cosmici.

Per una discussione più approfondita su questi argomenti si veda [19].



- [1] P. Carlson and A. De Angelis: *Nationalism and internationalism in science: the case of the discovery of cosmic rays*, Eur. Phys. J. H, 35 (2010) 309.
- [2] V. L. Ginzbur, S. I. Syrovatskii: *The Origin of Cosmic Rays*, Macmillan, New York (1964).
- [3] P. Picozza et al.: *PAMELA - A Payload for Antimatter Matter Exploration and Light-nuclei Astrophysics*, Astropart. Phys., 27 (2007) 296.
- [4] R. Battiston: *The antimatter spectrometer (AMS-02): A particle physics detector in space*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A, 588 (2008) 227.
- [5] R. L. Golden et al.: *Evidence for the Existence of Cosmic-Ray Antiprotons*, Phys. Rev. Lett., 43 (1979) 1196.
- [6] M. L. Ambriola et al.: *CAPRICE98: A balloon borne magnetic spectrometer to study cosmic ray antimatter and composition at different atmospheric depths*, Nucl. Phys. B, 78 (1999) 32.
- [7] A. Yamamoto: *BESS-Polar long duration balloon flights at Antarctica to search for primordial antiparticle*, Prog. Theor. Phys. Suppl., 151 (2003) 240.
- [8] S. Torii et al.: *The CALorimetric Electron Telescope (CALET): High Energy Astroparticle Physics Observatory on the International Space Station*, Proc. of Science, ICRC2015 (2015) 581.
- [9] J. Chang et al.: *The DARK MATTER PARTICLE EXPLORER MISSION*, Astropart. Phys., 95 (2017) 6.
- [10] P. Blasi: *Recent results in cosmic ray physics and their interpretation*, Braz. J. Phys., 44 (2014) 426.
- [11] P. Serpico: *Possible physics scenarios behind cosmic-ray "anomalies"*, Proc. of Science, ICR2015 (2016) 09.
- [12] M. Cirelli: *La Materia Oscura*, Ithaca, XII (2018) 117.
- [13] M. Boezio et al.: *PAMELA and Indirect Dark Matter Searches*, New J. Phys., 11 (2009) 105023.
- [14] C. J. Hailey: *An indirect search for dark matter using antideuterons: the GAPS experiment*, New J. Phys., 11 (2009) 105022.
- [15] S. N. Zhang et al.: *Introduction to the High Energy cosmic-Radiation Detection (HERD) Facility onboard China's Future Space Station*, Proc. of Science, 2017 (2018) 1077.
- [16] R. Battiston et al.: *High precision particle astrophysics as a new window on the universe with an Antimatter Large Acceptance Detector In Orbit (ALADInO)*, Exper. Astron., 51 (2021) 1331., (erratum) Exper. Astron. 51 (2021) 1299.

- [17] S. Schael et al.: *AMS-100: The Next Generation Magnetic Spectrometer in Space - An International Science Platform for Physics and Astrophysics at Lagrange Point 2*, Nucl. Instrum. Meth. Phys. Res. A, 944 (2019) 162561.
- [18] A. Olinto et al.: *The POEMMA (Probe of Extreme Multi-Messenger Astrophysics) mission*, Proc. of Science, ICRC2019 (2020) 378.
- [19] M. Boezio, R. Munini, P. Picozza: *Cosmic ray detection in space*, Prog. Part. Nucl. Phys., 112 (2020) 103765.



**Mirko Boezio:** è dirigente di ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare presso la sezione di Trieste. Lavora da trent'anni nel campo della fisica sperimentale astroparticellare e dei raggi cosmici. È stato il responsabile nazionale dell'esperimento PAMELA ed attualmente è il responsabile nazionale dell'esperimento GAPS.

**Riccardo Munini:** è ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare presso la sezione di Trieste. Lavora da una decina di anni nel campo della fisica sperimentale dei raggi cosmici partecipando all'analisi dei dati dell'esperimento PAMELA ed alla realizzazione dell'esperimento GAPS.

