



L'ALPHA MAGNETIC SPECTROMETER AMS-02

HELIOS ARTICLE

David Pelosi

Dipartimento di Fisica e Geologia
Università di Perugia
david.53211@gmail.com

Leonardo Salicari

Dipartimento di Fisica
Università di Padova
leonardo.salicari@gmail.com

August 27, 2019

1 L'esperimento sulla Stazione Spaziale Internazionale per la ricerca sulla materia oscura.



Figure 1: *L'Alpha Magnetic Spectrometer AMS-02*

“Molte delle nostre stelle, forse la maggior parte di queste, potrebbero essere corpi scuri”; così Lord Kelvin nel 1884 iniziava a portare nel panorama astrofisico un quesito che rimarrà un grande punto di domanda anche nella ricerca moderna: la materia oscura. Anche se con un approccio ingenuo, Kelvin iniziò una campagna di osservazioni, che passò per l’astrofisico svizzero Fritz Zwicky fino agli americani Vera Rubin e Kent Ford, dei moti delle galassie. Tutti notarono una rotazione fin troppo elevata ai bordi delle galassie che non poteva essere spiegata ipotizzando il solo contributo dell’attrazione gravitazionale dovuto alla quantità di materia osservata al loro interno; questo aprì l’ipotesi all’esistenza di un tipo di materia non interagente elettromagneticamente, quindi non visibile ai nostri telescopi, ma interagente gravitazionalmente. A questo tipo di materia, viste le sue proprietà, fu dato il nome di materia oscura [1].

Ad oggi, esistono numerose prove indirette della esistenza della materia oscura basate sugli effetti della loro interazione gravitazionale. Le teorie più accreditate ascrivono alla materia oscura una natura particolare. Tuttavia, nonostante gli

evidenti effetti indiretti, particelle di materia oscura non sono, ad oggi, ancora state osservate direttamente e la ricerca della materia oscura rappresenta uno dei più importanti campi di ricerca della fisica odierna. Particolare attenzione ha la rilevazione indiretta di quest'ultima: essa si basa sullo studiare i risultati dell'auto-annichilazione delle particelle di materia oscura con se stesse oppure di un loro decadimento. Il vantaggio di questo approccio sta nell'andare a cercare particelle di cui conosciamo molto bene la natura e le caratteristiche, tra cui, giocano un ruolo importante, le particelle di antimateria.

Noi siamo costituiti, come le cose che ci circondano, da una combinazione di particelle che definiamo materia ordinaria. Esse vengono definite attraverso vari parametri come la massa; uno in particolare è la carica: negativa per l'elettrone, positiva per il protone etc. L'antimateria presenta tutte le caratteristiche della materia ordinaria eccetto che per la carica: quindi avremo particelle come l'anti-protone che hanno carica negativa e l'anti-elettrone, o positrone, di carica positiva. L'antimateria può formare strutture composite, come nuclei pesanti, esattamente come la materia ordinaria ma a tutt'oggi questo tipo di strutture più complesse, anche se possibile realizzarle in laboratorio [2], non sono state osservate nello spazio. Quindi, in quanto componente rara dei raggi cosmici, l'antimateria prodotta da fenomeni correlati con la materia oscura è un buon candidato per la ricerca di quest'ultima.

Molti modelli che cercano di spiegare la materia oscura prevedono un certo "eccesso" di flusso di particelle di antimateria nei raggi cosmici che, se confermati con dati sperimentali, potrebbero darci più dettagli sulla struttura di queste particelle così ignote. Tra i vari esperimenti sviluppati per rilevare antimateria nei raggi cosmici, particolare rilevanza ha l'esperimento AMS-02 un rivelatore di particelle progettato per operare come modulo esterno sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS).

Il progetto è stato presentato nel 1995 dal fisico delle particelle e premio Nobel per la fisica Samuel J.Ting, ed è stato lanciato dal Kennedy Space Center e installato sulla ISS nel Maggio 2011. Il progetto attuale nasce dall'evoluzione di un iniziale prototipo (AMS-01) lanciato a bordo dello Space Shuttle nel giugno 1998. Perché è stato necessario installarlo sulla ISS? Come riesce a captare segnali di antimateria? Come già discusso, lo scopo principale di AMS è quello di individuare e misurare le proprietà dei rari raggi cosmici di antimateria in arrivo sulla Terra: poter effettuare misurazioni ad una altitudine di circa 380 km permette di evitare l'interazione tra raggi cosmici e atmosfera, il quale causerebbe una indesiderata variazione della composizione che falserebbe le misurazioni. Per rispondere al secondo quesito vediamo più in dettaglio la strumentazione.

2 La strumentazione

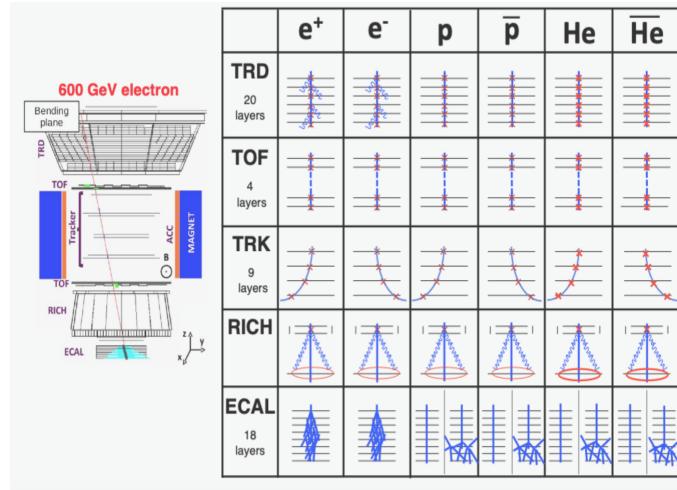


Figure 2: Rappresentazione grafica dei segnali registrati dai rilevatori di AMS al passaggio delle diverse particelle [3].

AMS riesce a identificare particelle grazie ai cinque rilevatori principali che lo costituiscono. Il primo a cui vanno incontro le particelle è il Transition Radiation Detector (TRD) che, insieme all'Electromagnetic CALorimeter (ECAL), distingue protoni da positroni e elettroni da anti-protoni. Il primo è sensibile al fattore di Lorentz $\gamma = E/m$, ovvero all'energia sulla massa della particella, quindi è in grado di distinguere protoni da elettroni, come antiprotoni da positroni, che differiscono nella massa.

ECAL invece ricostruisce lo sviluppo dello sciamone di particelle secondarie generato dalle interazioni del raggio cosmico con il materiale del rivelatore. L'analisi della geometria dello sciamone permette di identificare la natura della particella che lo ha generato: infatti si ha una diversa topologia dello sciamone a seconda che la particella sia di natura elettromagnetica (e^+/e^-) o adronica ($p^+/p^-/\text{nuclei}$). Combinando le misure del TRD e del ECAL, solamente 1 positrone su 1 milione viene erroneamente identificato come un protone.

Il Time Of Flight (ToF) è essenzialmente il cronometro di AMS: quando passa un raggio cosmico registra il tempo che impiega per attraversare la struttura cilindrica dell'esperimento. Grazie a questo, oltre a distinguere le particelle entranti dalla parte superiore da quelle che arrivano dalla parte inferiore, restituisce una misura di $\beta=v/c$, quindi della velocità.

Il tracciatore (TRK) rappresenta il cuore dell'apparato ed è lo strumento che ci permette di distinguere materia da antimateria. Questo è situato all'interno di un magnete permanente che genera un campo magnetico 3000 volte più intenso di quello terrestre che, come mostrato in Figura 2, sfrutta la forza di Lorentz per curvare le particelle cariche che vi entrano. Il tracciatore è formato da rilevatori al silicio i quali, con una precisione fino a $10 \mu\text{m}$, individuano e localizzano i punti di passaggio del raggio cosmico all'interno del campo magnetico così da poterne ricostruire la traiettoria e quindi la curvatura. L'intensità della curvatura fornisce indicazioni sull'energia della particella, mentre la direzione di deflessione permette di determinare il segno della carica. Il campo magnetico è l'unico rivelatore che permette la distinzione tra particelle di materia e particelle di antimateria. I ricercatori dell'Università degli Studi di Perugia e della sezione dell'Istituto di Fisica Nucleare Italiano (INFN) di Perugia hanno ricoperto un ruolo fondamentale nella progettazione e nella realizzazione di questa parte dell'esperimento.

Infine, il Ring Imaging Cherenkov detector (RICH) sfrutta l'emissione di radiazione Cherenkov per determinare la velocità (analizzando l'angolo di emissione della radiazione) e la carica della particella (analizzando l'intensità dell'emissione).

3 Risultati di AMS-02

Parte fondamentale di un esperimento sono i risultati che produce: ne approfondiremo uno riguardante la rilevazione indiretta di materia oscura. La figura mostra l'andamento del rapporto tra positroni e la somma di positroni ed elettroni in funzione dell'energia, misurata in GeV. Tale quantità rappresenta, quindi, una misura della abbondanza relativa di antimateria nella radiazione cosmica nel caso particolare di elettroni e positroni.

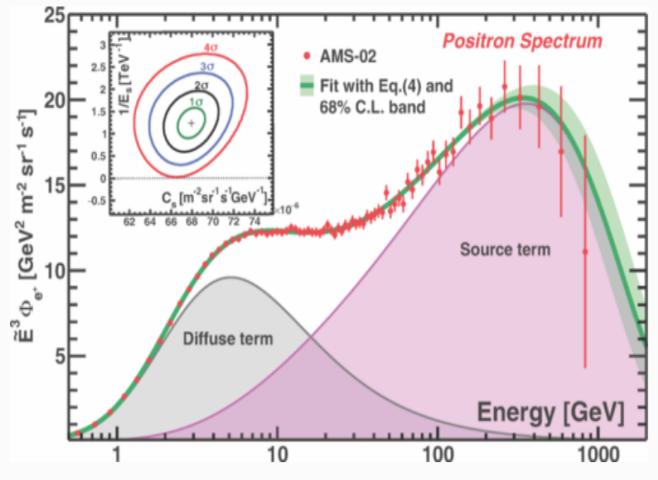


Figure 3: Dati ottenuti da AMS-02 relativi alla frazione di positroni

Come è composto il grafico? La curva verde rappresenta l'andamento atteso dal modello teorico che cerca di quantificare il rapporto sopra citato nei raggi cosmici, tenendo conto delle sorgenti astrofisiche note e dell'interazione dei raggi con il mezzo interstellare (ISM). La curva bordeaux, invece, rappresenta il modello teorico che tiene conto del contributo della materia oscura e che meglio approssima i dati sperimentali in rosso, misurati da AMS. Rispetto a ciò che ci si aspetta, si nota un eccesso di positroni a partire da circa 10 GeV con una crescita che appare graduale senza brusche variazioni e osserviamo perfino un picco massimo intorno ai 250 GeV. La dipendenza dall'energia della curva e la presenza di un massimo potrebbero essere compatibili con l'ipotesi di produzione di positroni ed elettroni da materia

oscura. Non si esclude del tutto che l'origine di questo flusso sia dovuta a pulsar o anche a fonti astrofisiche ancora non conosciute; entrambe sono infatti considerate possibili sorgenti di coppie elettrone/positrone.

Un'eventuale misura di una direzione privilegiata di arrivo dei positroni favorirebbe l'ipotesi dell'origine astrofisica. La materia oscura, infatti, è ipotizzata essere distribuita omogeneamente a livello locale. Ad oggi, le direzioni di arrivo dei positroni sono misurate essere isotrope con una precisione del 3%. Nuovi dati, tuttavia, potrebbero rivelare un sensibile livello di anisotropia. Insieme a ciò si aggiunge anche un altro discriminante, l'andamento della curva dopo i 250 GeV: se l'origine dell'eccesso è dovuto alla materia oscura allora si dovrebbe riscontrare un andamento liscio e decrescente, altrimenti ci si aspetta un brusco calo. Non rimane quindi che continuare la campagna dati, per approfondire questi aspetti.

4 La collaborazione

La gestione dell'intero rilevatore e della presa dati avvengono presso il POCC (Payload Operation Control Center) al CERN, dove 24 ore su 24 viene monitorata l'attività di AMS-02. È importante ricordare come l'intero progetto sia frutto di una straordinaria collaborazione internazionale.



Figure 4: *Control Room di AMS-02 al CERN.*

Tra gli istituti italiani partecipanti, decisivo è stato il contributo della Sezione INFN e Dipartimento di Fisica di Perugia; i ricercatori impegnati nel progetto hanno avuto importanti responsabilità nella progettazione, costruzione e integrazione del tracciatore al silicio di AMS-02, in stretta collaborazione con l'Università di Ginevra. Ricordiamo anche il contributo di altri istituti nella realizzazione dei rilevatori di AMS-02 tra cui: Univ. e INFN di Pisa per il ECAL, Univ. e INFN di Bologna per il TOF, Univ. di Milano Bicocca e relativa sede INFN per la gestione e trasferimento dei dati. È chiaro che un qualunque segnale di scoperta indiretta della materia oscura nei raggi cosmici avrà bisogno di una conferma sperimentale da altri esperimenti per poter essere confermato dalla comunità scientifica. Infatti, numerosi esperimenti sono attualmente in opera per rivelare tracce di materia oscura utilizzando tecniche sperimentali differenti e complementari fra di loro. Alcuni dei più importanti sono: ADMX (Axion Dark Matter Experiment) negli Stati Uniti, XENON Dark Matter Search Experiment e DarkSide-50, entrambi installati presso i laboratori nazionali del Gran Sasso.

Si stanno raccogliendo dati molto dettagliati con sensibilità e intervalli di energia finora inesplorati che potrebbero contribuire un giorno, neanche troppo lontano, a capire la natura stessa della materia oscura, risolvendo quindi quello che ad oggi è uno dei più grandi misteri del cosmo.

References

- [1] Stephanie M. Bucklin. "A history of dark matter". Ars Technica, 02/03/2017.
- [2] <https://home.cern/science/physics/antimatter/storing-antihydrogen>
- [3] The ALPHA Collaboration. "Confinement of antihydrogen for 1000 seconds". Nature Physics 7, 558–564 (2011).
- [3] <http://www.ams02.org/what-is-ams/technology/>

- [4] M. Aguilar et al. (AMS Collaboration). “First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV”. Phys. Rev. Lett. 110, 141102.