
A caccia di antimateria nello spazio

Roberto Battiston

Dipartimento di Fisica, Università di Trento,
Trento Institute for Fundamental Physics and Applications (TIFPA)

Ginevra, estate 1993. Studio di Sam Ting al CERN, premio Nobel nel 1976 per la scoperta della particella J/Psi, la famosa *november revolution* in cui i quark, componenti elementari dei protoni e dei neutroni, le particelle elementari che formano il nucleo atomico, passarono da tre a quattro aprendo la strada allo *Standard Model* delle particelle elementari e delle interazioni fondamentali, basato su famiglie di coppie di particelle elementari, nel caso dei quark up-down, strange-charm e, in seguito, bottom-top, e su quattro forze, quella elettromagnetica, quella forte, quella debole e quella gravitazionale.

Dopo la laurea, avvenuta proprio nel gruppo di Ting alla fine degli anni '70, avevo lasciato il gruppo di ricerca di Sam e avevo scelto di partecipare a due diversi esperimenti, ciascuno a modo suo importante: con il primo, UA2, avevo partecipato alla scoperta dei bosoni intermedi Z^0 e W^\pm , risultato per cui Carlo Rubbia e Simon van der Meer ricevettero il Nobel nel 1984. Il secondo era SLD (Stanford Large Detector), presso il centro di ricerca SLAC (Stanford Linear Accelerator Center) negli USA, dove si cercava di produrre, adattando un'acceleratore già esistente, grandi quantità dei nuovi bosoni Z^0 puntando ad arrivare prima del LEP (Large Electron-Positron Collider), il super acceleratore dedicato a questo tipo di ricerca che nel frattempo veniva costruito al CERN.

Nel campo della ricerca di frontiera, decidere quale direzione prendere è un po' come fare un

sorpasso in una gara di Formula 1, può andare bene o andare male: se la scelta di partecipare a UA2 si rivelò un successo per i risultati ottenuti, lo stesso non si può dire dell'esperienza americana, visto che la modifica dell'acceleratore di SLAC fu molto lenta e faticosa, e si concluse ben dopo la partenza del LEP al CERN verso la fine degli anni Ottanta.

Alla fine di quel decennio, ripresi a collaborare con Sam, che nel frattempo aveva formato un grande gruppo di ricerca, la Collaborazione L3, e realizzato il più imponente fra i quattro esperimenti del LEP. Sam mi propose di coordinare la realizzazione di un innovativo rivelatore al silicio. Si trattava di uno strumento ultra preciso, la cui realizzazione mi occupò completamente per i quattro anni seguenti. Nel 1993 L3 era ormai entrato nella fase in cui avrebbe preso dati senza modifiche sostanziali fino agli anni Duemila. Sam ed i suoi più stretti collaboratori erano dunque già alla ricerca di nuove idee e nuove sfide. Proprio in quel periodo, Sam aveva dedicato i suoi sforzi alla creazione di una enorme collaborazione internazionale con l'obiettivo di mettere a punto un colossale esperimento tramite il quale sfruttare il nuovo super acceleratore di protoni in costruzione negli Stati Uniti, SSC (Superconducting Super Collider). Ma anche lì le cose non erano andate nel verso giusto; nell'autunno del 1993 il progetto SSC fu cancellato dal Congresso americano. Sam aveva anche cercato di proporre al CERN un esperimento derivato

per il nuovo acceleratore LHC (Large Hadron Collider) in corso di realizzazione con l'obiettivo di scoprire il bosone di Higgs. Il CERN, diretto dal neo premio Nobel Carlo Rubbia aveva però bocciato la proposta.

Gli esperimenti in fisica delle particelle richiedono lunghe pianificazioni.

Per prima cosa bisogna elaborare una proposta scientifica da sottoporre alle agenzie di finanziamento, poi occorre formare una **Collaborazione**, vale a dire un gruppo di scienziati, composto da centinaia, a volte da migliaia di ricercatori e ingegneri, a cui spetterà il compito di realizzare i sofisticati strumenti da utilizzare nell'esperimento.

La costruzione, calibrazione e messa in opera di un esperimento in un acceleratore di particelle è infatti un'attività decisamente complessa: occorre posizionare e collegare decine di chilometri di cavi, realizzare stanze piene di elettronica per l'acquisizione dei segnali e di computer per l'elaborazione dei dati. Ecco perché si comincia a lavorare almeno cinque - sette anni prima del momento in cui si raccolgono i dati e inizia l'analisi.

È un po' come se Galileo, per studiare il moto del pendolo nel Duomo di Pisa, avesse dovuto costruire prima la cattedrale: non avrebbe potuto lavorare da solo e avrebbe in ogni caso potuto fare pochissimi esperimenti nel corso della sua vita¹. Se non si voleva disperdere il tesoro di competenze rappresentato dalla Collaborazione internazionale L3, comprendente circa 600 ricercatori estremamente capaci, che lavoravano a stretto contatto da decine d'anni, era necessario muoversi per tempo ed individuare una prospettiva scientifica interessante e stimolante. Nell'estate del 1993 la discussione nel nostro gruppo di lavoro si era spostata rapidamente dalla fisica delle particelle a quella delle astroparticelle, e dalla fisica a terra a quella nello spazio.

In quegli anni molti dei settori di ricerca fondamentale che oggi sono affermati muovevano i primi passi. Valutammo di procedere nel campo

¹In realtà Galileo non effettuò alcun esperimento nel Duomo di Pisa. Fece solo un'osservazione, mentre era casualmente lì, osservazione resa pubblica anni dopo da Vincenzo Viviani.

dei raggi gamma di alta energia nello spazio e a terra, ma capimmo che l'ambito astrofisico ci avrebbe allontanato dal settore della fisica fondamentale. La ricerca delle onde gravitazionali con interferometri LASER era ancora molto lontana da traguardi significativi, senza contare che richiedeva una tecnologia estremamente complessa. Alla fine, ci indirizzammo verso la ricerca dell'antimateria nei raggi cosmici, un obiettivo ambizioso e affascinante, perfettamente coerente con il nostro settore di ricerca.

Le leggi della natura, per quanto le conosciamo, sono simmetriche tra materia e antimateria. Allo stesso tempo, materia e antimateria non possono convivere senza distruggersi reciprocamente. Sulla Terra la poca antimateria che viene prodotta naturalmente nei decadimenti radioattivi o nelle interazioni con i raggi cosmici con l'atmosfera, è composta per lo più da positroni, da pochissimi antiprotoni e da particelle instabili, come i muoni positivi e i pioni. Quando in un ospedale si fa una PET (*Positron Electron Tomography*) si usa proprio l'antimateria, ossia i positroni emessi da isotopi radioattivi: solo così si possono realizzare molecole presenti nella fisiologia umana, e creare l'immagine di certi tipi di tumore.

Nello spazio la questione è però sostanzialmente diversa.

Particelle elementari di antimateria, eventualmente presenti nei raggi cosmici possono vivere e viaggiare molto a lungo; la densità media della materia interstellare è bassissima, dell'ordine di un atomo di idrogeno per centimetro cubo. Sappiamo che esiste nei raggi cosmici una piccola quantità di antiparticelle prodotte dagli urti casuali con la materia interstellare: stiamo parlando di una parte su 200 di positroni, e una parte su 10.000 di antiprotoni. Gli antineutroni sono instabili, come i neutroni, e non vivono più di pochi minuti, per questo non sono presenti nel flusso dei raggi cosmici.

L'obiettivo del nuovo *team* era quello di realizzare un rivelatore di particelle nello spazio in grado di analizzare il flusso di raggi cosmici cercando componenti ultrarare a livello di parti per 10 miliardi. La scoperta di antiparticelle pesanti, come l'antielio quattro, sarebbe stata completa-

mente inaspettata, in quanto avrebbe richiesto l'esistenza di processi di nucleosintesi possibili solo all'interno di una antistella.

L'esperimento fu battezzato Alpha Magnetic Spectrometer (AMS), in riferimento alla Stazione Spaziale che a quel tempo si chiamava ancora Alpha e non era ancora stata costruita. Nel corso di numerose riunioni al CERN e al MIT vennero definiti i dettagli dell'esperimento.



Figura 1: Foto di gruppo del team AMS del Dipartimento di Fisica e Sezione INFN di Perugia (fine anni '90).

L'idea era quella di usare le stesse tecnologie sviluppate agli acceleratori e adattarle allo spazio. Per cercare l'antimateria una misura essenziale era quella della carica elettrica: particelle e antiparticelle hanno carica elettrica opposta. Per questo, occorre osservare la curvatura della traccia di ogni singolo raggio cosmico che passa nel rivelatore, utilizzando un magnete e un rivelatore tracciante [1]. Per tutti noi si trattava di una nuova sfida: adattare, a un lancio sullo Shuttle e all'operazione nello spazio, rivelatori di particelle elementari che avevamo sempre utilizzato a terra. Molti aspetti ancora non erano chiari, per cui ci lasciammo delle alternative. Per esempio, furono ipotizzati due tipi di rivelatori traccianti: uno tradizionale, proposto dal MIT e basato su un grande volume pieno di gas, in grado di fare molte misure di posizione, ciascuna con precisione limitata, e uno proposto dal mio *team* dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) di Perugia (figura 1), sulla base dello sviluppo fatto per l'esperimento al LEP, e basato su pochi piani di rivelatori a silicio, ciascuno capace di fornire una misura di posizione di altissima precisione. Dopo una lunga serie di verifiche, risultò che la mia proposta era sensibilmente più adatta all'utilizzo nello spazio e fu approvata: si trattava

del primo grande rivelatore al silicio che avrebbe operato in un ambiente diverso dalla Terra.

Il contributo italiano alla progettazione e realizzazione dei rivelatori a bordo di AMS è stato fondamentale: la collaborazione italiana comprendeva oltre al gruppo di Perugia, Pisa, Bologna, Milano, Roma e, in seguito, Trento.

Una volta completata la proposta dell'esperimento AMS, la sottoponemmo alla NASA (National Aeronautics and Space Administration), all'INFN, all'ASI e agli altri enti di ricerca e agenzie spaziali di sedici diversi paesi. L'idea piacque molto a Daniel Goldin, amministratore della NASA, che approvò un volo di prova sullo Shuttle, da realizzarsi nel 1998. Dopo l'approvazione della NASA, in rapida sequenza tutte le agenzie ed enti di ricerca internazionali approvarono la loro partecipazione a questo esperimento.

Era il 1994 e avevamo meno di quattro anni a disposizione!

Sembrava proprio un'impresa impossibile per un *team* che, per quanto esperto in rivelatori di particelle, non aveva alcuna esperienza nel settore spaziale. Goldin ci fornì il supporto di un'eccellente squadra di ingegneri della NASA e della Lockheed Martin, in particolare ricordo Trent Martin e Ken Bollweg con i quali ho poi collaborato per 30 anni, che risultarono decisivi.

Furono quattro anni indimenticabili: un'intensità di lavoro, ma anche un entusiasmo mai visti prima. Stavamo entrando in un mondo nuovo, sia per gli obiettivi scientifici sia per le tecnologie da sviluppare. Il 2 giugno 1998 AMS-01, la versione di prova di AMS, fu lanciato con la missione STS-91 e operò con successo per nove giorni in orbita, raccogliendo centinaia di milioni di raggi cosmici e verificando che la quantità di antielio era meno di una parte per milione.

Il successo di AMS-01 ci permise di continuare nella realizzazione della versione definitiva, AMS-02, che avrebbe avuto la capacità di raccogliere 10.000 volte più statistica operando per tre anni sulla Stazione Spaziale Internazionale (ISS) (figura 2). Nel 1998 però non potevamo sapere che nel 2003 ci sarebbe stato il disastro dello Space Shuttle Columbia, il tragico incidente che

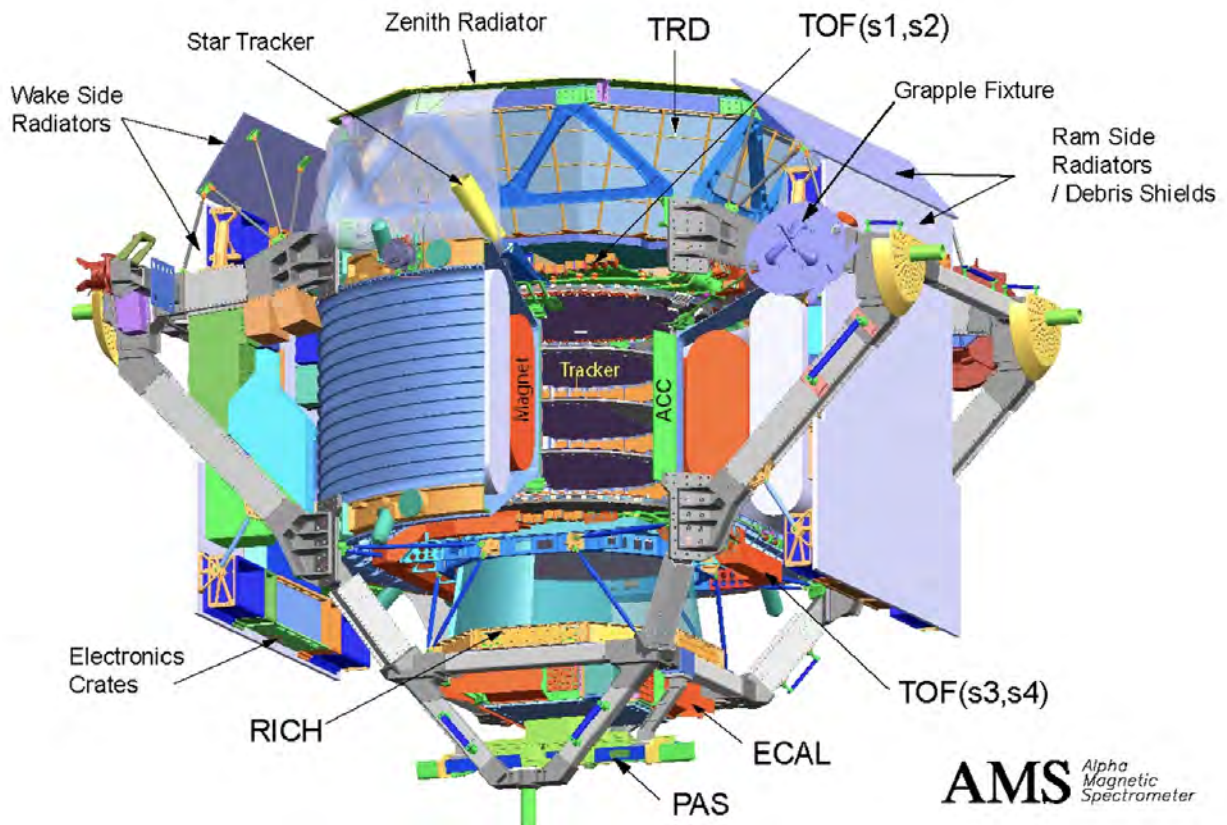


Figura 2: L'architettura strumentale della versione definitiva dell'esperimento AMS-02 sulla ISS.



Figura 3: Maggio 1998, Kennedy Space Center (Florida): la Collaborazione AMS, di fronte allo Shuttle Endeavour che trasporterà AMS-01 per la prima missione di 12 giorni nello spazio

disintegrò la navicella durante il volo di rientro nell'atmosfera terrestre causando la morte dei sette astronauti a bordo. Di conseguenza, il lancio di AMS-02 si sarebbe realizzato solo tredici anni dopo. Iniziò un periodo molto complicato.

Nel 2003 la NASA, per ridurre al minimo indispensabile il numero di missioni necessarie a completare la Stazione Spaziale Internazionale,

su richiesta della Commissione di inchiesta sul disastro del Columbia, tolse AMS-02 dal programma dello Shuttle. Ci trovammo in una situazione paradossale: impegnati a costruire un rivelatore che non avrebbe mai volato.

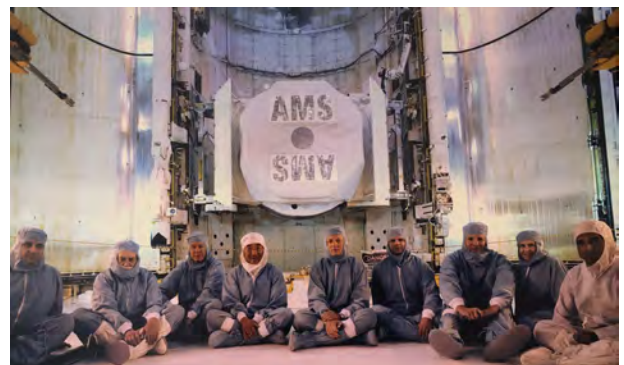


Figura 4: Marzo 2011, Kennedy Space Center (Florida): foto di gruppo davanti alla area di carico (*bay area*) dello Shuttle Discovery che porterà sulla ISS AMS-02. Da sinistra: S. Gonzales, J. Bingham, K. Bollweg, S.C.C. Ting, R. Battiston, T. Martin, S. Schael, S. Ting, C. Gargiulo.

A quel tempo ero diventato viceresponsabile di AMS-02: iniziammo, con Sam, una sistematica



Figura 5: AMS-02 dopo l'installazione sul braccio principale della ISS, il 20 maggio 2011.

azione di *lobbying* presso il Congresso americano allo scopo di essere reinseriti. Fu l'occasione, altamente istruttiva, per verificare come funziona, nel concreto, il sistema politico americano: nell'incontrare i principali senatori e deputati democratici e repubblicani che si occupavano di questo tema, rimasi impressionato dalla competenza, dall'attenzione e dal rispetto che avevano nei nostri confronti. Per loro lo spazio, la ricerca scientifica, la collaborazione internazionale erano argomenti da sostenere in modo bipartisan, senza inutili o pretestuosi conflitti ideologici. La decisione fu presa: il nuovo amministratore della NASA, Michael Griffin, ricevette dal Congresso precise istruzioni per reinserire AMS-02 nel programma dello Shuttle.

A differenza del piano iniziale, in base al quale AMS-02 sarebbe tornato a terra ogni tre anni per essere rifornito di elio liquido, strategia necessaria per far funzionare il nuovo magnete superconduttore che stavamo sviluppando, nel nuovo schema saremmo stati installati sulla Stazione Spaziale Internazionale senza possibilità di ritorno. Questo portò alla decisione di riutilizzare il magnete permanente usato con successo per AMS-01. Il 19 maggio del 2011, AMS-02 fu lanciato nell'ambito della penultima missione dello Shuttle, la STS124 (figura 4). A bordo della navicella c'era un astronauta italiano, Roberto Vittori, che avrebbe operato il braccio robotico della ISS durante la delicata fase di installazione di AMS-02 sulla struttura principale della Stazione, dove ad attenderlo c'era un altro astronauta italiano, Paolo Nespoli, impegnato nella sua prima missione di lunga durata.

Ma la partecipazione degli astronauti ESA

italiani alle operazioni di AMS non finisce qui.



Figura 6: Dicembre 2019 - gennaio 2020: nel corso di una serie di quattro storiche EVA Luca Parmitano (ESA) e Drew Morgan (NASA) sostituiscono il cuore del sistema di raffreddamento del tracciatore al silicio di AMS-02, garantendo all' esperimento altri 10 anni di vita.

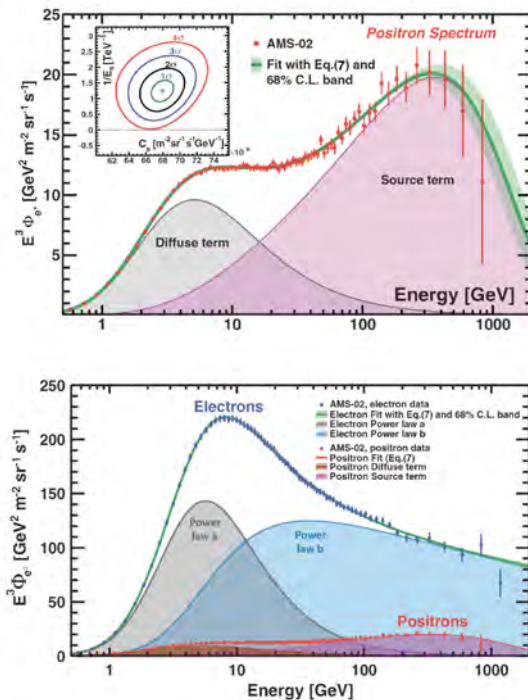


Figura 7: Sopra: spettro di energia degli elettroni nei Raggi Cosmici, confrontato con lo spettro di positroni. Sotto: l'ingrandimento dello spettro di positroni mette in evidenza la presenza di un termine di sorgente che mostra un picco a circa 350 GeV.

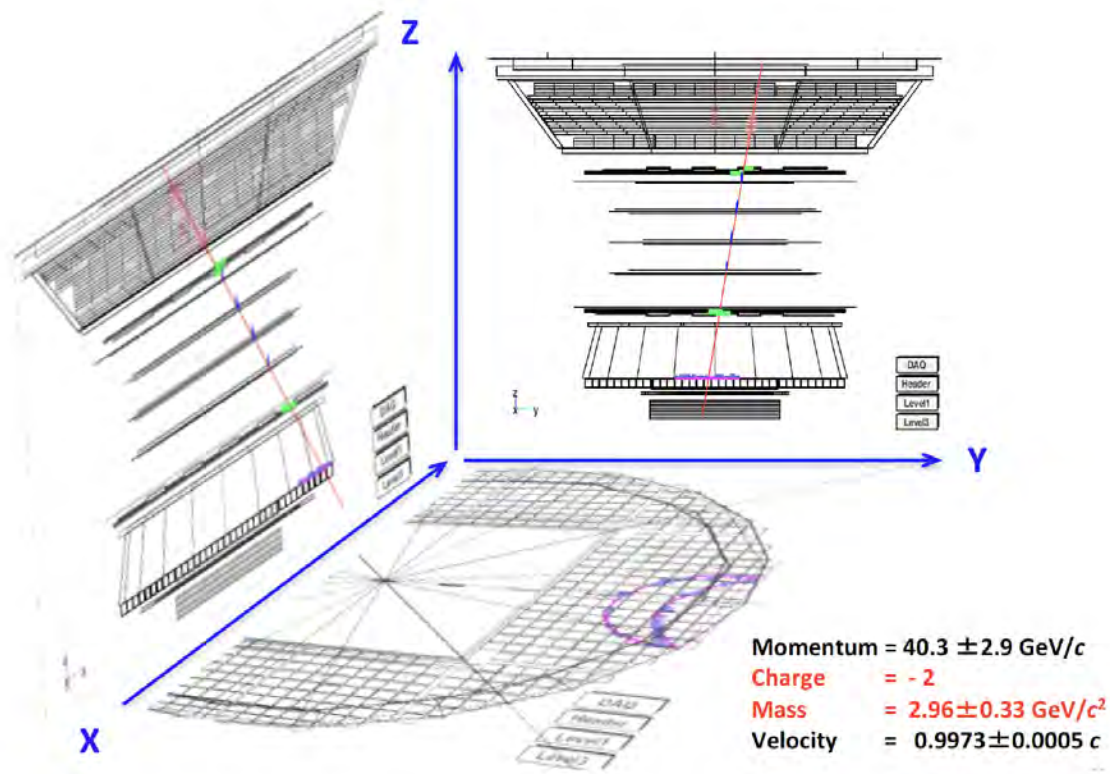


Figura 8: Evento candidato di anti- ^4He raccolto da AMS-02 [3].

Dopo quasi 10 anni di operazione, nonostante una progettazione che prevedeva una forte ridondanza, verso la fine del 2019, il sistema di raffreddamento del tracciatore al silicio ha mostrato dei segni di malfunzionamento che ne hanno richiesto la sostituzione. AMS non è stato progettato per essere riparato in orbita, ma la NASA, grazie ad uno straordinario sforzo di ingegneria a cui hanno collaborato anche gli ingegneri del CERN guidati dall'italiano Corrado Gargiulo, ha sviluppato una tecnica di intervento e una speciale strumentazione per potere sostituire sistema di pompe di raffreddamento di AMS-02.

La pianificazione dei voli ha voluto che l'astronauta che ha guidato l'intervento fosse un altro italiano, Luca Parmitano, astronauta del corpo europeo e primo comandante italiano della ISS. Nel corso della sua missione di lunga durata del 2019 - 20, durata ben 201 giorni, @astro_luca ha svolto quattro storiche *extraveicular activities* (EVA), assieme all'americano Drew Morgan, intervenendo impeccabilmente, per sostituire il sistema di raffreddamento (figura 6). Si è trattato di una sorta di intervento a cuore aperto, in cui otto piccoli tubi di metallo operanti in condizioni normali a pressione di più di 100 atmosfere,

sono stati tagliati e riconnessi proprio come si trattasse della sostituzione di un cuore meccanico: una sorta di idraulica di precisione ad alta quota. Tutto è andato bene, anche se il serraggio dell'ottavo tubo si è rivelato più complesso del previsto. Grazie al lavoro di Luca, AMS-02 ha ripreso a funzionare agli inizi del 2020 e potrà continuare a raccogliere dati per almeno altri dieci anni.

Oggi, a distanza di dieci anni dal lancio del 2012, AMS-02 ha raccolto più di 180 miliardi di raggi cosmici, studiando con un dettaglio mai raggiunto prima la composizione della pioggia di particelle di alta energia che colpiscono la Terra provenendo dalle profondità del cosmo. Sono stati trovati numerosi nuovi effetti relativi alle proprietà dei raggi cosmici [2]. Ad esempio, per quanto riguarda l'antimateria, si è scoperto un inatteso eccesso di positroni di alta energia, che forma un picco a una energia di circa quattrocento volte la massa del protone e la cui sorgente è, al momento, misteriosa (figura 7). Potrebbe trattarsi di un fenomeno astrofisico mai osservato in precedenza (positroni prodotti da pulsar) o addirittura di un segnale collegabile all'osservazione indiretta di particelle di grande massa di

materia oscura.

Per quanto riguarda l'antimateria nucleare, invece, finora sono stati riportati otto eventi di anti-elio, 5 di anti-³He e 3 di anti-⁴He. Si tratta di eventi ultrarari, raccolti al ritmo di due eventi di anti-He ogni 100 milioni di nuclei di He, tipicamente un evento all'anno (figura 8).

Come abbiamo discusso in precedenza, l'osservazione indiscutibile di pochi antinuclei di ⁴He avrebbe profonde conseguenze sulla nostra comprensione dell'universo. È il motivo per cui i risultati dell'analisi di questi eventi non sono stati ancora pubblicati. Questi dati vengono studiati con la massima attenzione da parte dei ricercatori di AMS-02, per capire se ci possano essere sorgenti di fondo strumentale non capite. Come diceva Carl Sagan:

"Scoperte straordinarie richiedono una evidenza straordinaria."

Stay tuned.

Questo testo è stato adattato dall'autore dal libro *La prima alba del cosmo*. Rizzoli, Milano (2019).



- [1] R. Battiston, S. C. C. Ting et al.: *Antimatter Study Group*, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A, 350 (1994) 351.
- [2] AMS Collaboration, M. Aguilar, R. Battiston, S. C. C. Ting et al.: *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II—Results from the first seven years*, Physics Reports, 894 (2021) 1.
- [3] R. Battiston: *High precision cosmic ray physics with AMS-02 on the International Space Station*, La Rivista del Nuovo Cimento, 43 (2020) 319.



Roberto Battiston: è professore ordinario di fisica sperimentale presso l'Università di Trento. È stato presidente dell'Agenzia Spaziale Italiana (ASI) dal 2014 al 2018 e presidente della Commissione Nazionale INFN per la Fisica Astroparticellare dal 2009 al 2014. Fisico sperimentale, specializzato nel campo della fisica fondamentale e delle particelle elementari, è uno dei maggiori esperti di raggi cosmici. Ha coordinato assieme

al premio Nobel Samuel C. C. Ting la realizzazione dello spettrometro magnetico alfa (AMS), operante sulla Stazione Spaziale Internazionale dal 2011 e dedicato alla ricerca dell'antimateria e della materia oscura. Ha pubblicato circa 550 articoli scientifici sulle più importanti riviste internazionali. Editorialista della Stampa, Repubblica, Corriere della Sera e dell'Adige svolge una intensa attività come saggista e divulgatore. Ha pubblicato di recente *L'Alfabeto della Natura* (2022, Rizzoli), *Fare Spazio* (2019, La Nave di Teseo) e *La prima alba del Cosmo* (2019, Rizzoli).

