

[antimateria]

anno 3 numero 7 / 10.08

asimmetrie

rivista trimestrale dell'Istituto
Nazionale di Fisica Nucleare

asimmetrie

La parola “antimateria” è ammantata da un’aura fantastica, suscita domande e stimola l’immaginazione. La teoria che ne descrive le caratteristiche ha da poco compiuto 80 anni. Per ogni particella elementare ne esiste una identica con carica opposta. Se l’atomo ha un nucleo positivo e un guscio esterno con elettroni negativi, per l’antimateria avviene l’esatto opposto: il nucleo è negativo e il guscio esterno è composto di particelle positive. Tolta la carica, tutte le altre caratteristiche dell’antimateria, tra cui anche la massa, sono identiche alla materia. Così l’immaginazione si affaccia su un mondo di antimateria. In numerosi romanzi di fantascienza si parla di una sostanza misteriosa e terrificante che ha la proprietà di distruggere la materia: l’antimateria.

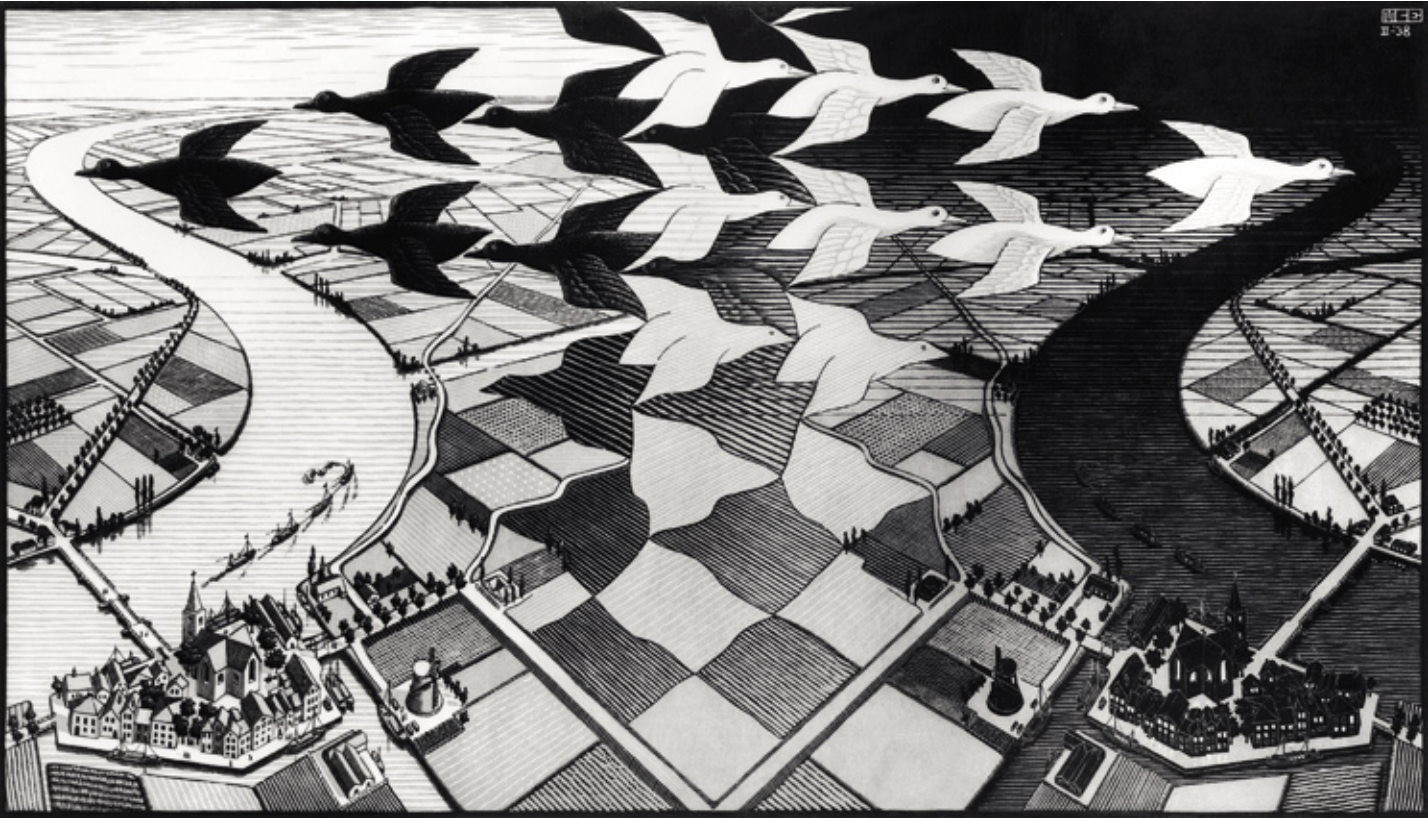
La sua esistenza è provata, essa è stata rivelata, prodotta e immagazzinata, anche se in piccolissime quantità. In campo medico si utilizza normalmente a scopo diagnostico e terapeutico. Nello Spazio ne cerchiamo le tracce e, usandola come una sonda proveniente dall’Universo, possiamo studiare i processi responsabili della sua creazione. Tutti i modelli che descrivono la nascita dell’Universo richiedono la creazione di quantità uguali di materia e antimateria. Ma il nostro mondo è composto esclusivamente di materia: l’asimmetria tra materia e antimateria, ossia l’assenza apparente di antimateria nell’Universo, è uno dei grandi problemi irrisolti nella fisica delle particelle e nella cosmologia. Incamminiamoci tra questi scenari a scoprire realtà non meno affascinanti della fantascienza.

Andrea Vacchi

La Fisica, la Bellezza e l'Antimateria

La storia enigmatica dell'antimateria e della simmetria nell'Universo.

di Andrea Vacchi



a.

Nell'estate del 1931 Wolfgang Pauli assisteva a un seminario di Robert Oppenheimer sul lavoro del fisico teorico Dirac. Si racconta che, nel bel mezzo di quella lezione, scattò in piedi, afferrò un pezzo di gesso camminando verso la lavagna, e lì davanti si fermò brandendolo come per intervenire, poi disse: "Ach nein, das ist ja alles falsch!"... tutto questo è certamente sbagliato! Più tardi Pauli scrisse, a proposito della spiegazione che Dirac dava dei risultati della sua teoria, "non crediamo che tutto questo debba essere preso sul serio".

Di carattere molto schivo, ai limiti della scontroosità, quando nel 1933 Paul Dirac seppe di aver ricevuto il premio Nobel la sua prima tentazione fu di rinunciare al riconoscimento. Accettò solo davanti all'obiezione di Ernest Rutherford, Nobel nel 1908, che il rifiuto avrebbe suscitato una pubblicità perfino maggiore.

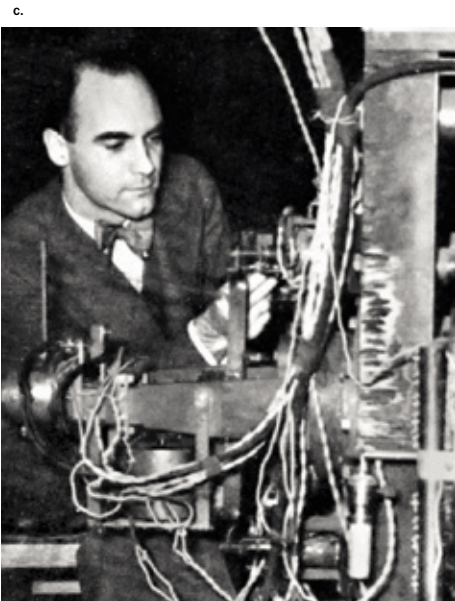
Aveva 31 anni e la convinzione che le leggi fondamentali della Natura fossero pervase da una bellezza matematica che resta tale da qualsiasi punto di vista e sempre.

In quel periodo la recente teoria della meccanica quantistica spiegava come il mondo delle cose molto piccole seguisse leggi diverse da quelle suggerite dal nostro intuito: la meccanica quantistica è una delle maggiori rivoluzioni nella fisica del ventesimo secolo e, anche se può apparire bizzarra e lontana dall'intuito, è probabilmente la descrizione della Natura più vicina alla realtà. Nel frattempo, Einstein proponeva la sua teoria della relatività speciale, dove si mostrava come le leggi che descrivono cose molto veloci sfidino i nostri criteri di buonsenso e che la materia è una tra le tante forme di energia. Nel 1927, Paul Dirac fece il passo fondamentale per accordare fisica quantistica e teoria della relatività speciale di Einstein, introducendo un'equazione in grado di spiegare il comportamento degli elettroni ad ogni velocità, fino alla velocità della luce: quale è la giusta descrizione dell'elettrone come onda quantica? E quale l'equazione che governa la dinamica di queste onde, rispettando le regole della relatività? Il lavoro di Dirac era volto a descrivere la Natura attraverso una formula che rispettasse un'estetica nella matematica. Gli capitò di dire: "È più importante arrivare a equazioni belle che ottenere da esse la riproduzione di osservazioni sperimentali". Questa impostazione lo condusse a risultati spettacolari. È fondamentale che l'esperimento confermi una teoria scientifica, ma certe teorie appaiono troppo belle per essere scartate, anche se restano in attesa di una conferma sperimentale. Semplicità ed eleganza sono le caratteristiche che appaiono quando una teoria è sviluppata con il minimo numero di assunzioni, quando è universale e descrive fenomeni ai quali non era diretta in origine.

Dirac amava la montagna: tra le sue ascensioni si ricorda il monte Elbruz nel Caucaso. Si preparava a queste escursioni arrampicandosi sugli alberi nelle colline attorno a Cambridge, vestito degli stessi abiti scuri che usava nel campus. Se per gli artisti la bellezza è spesso soggettiva, nella scienza si cercano equazioni che mantengano la loro forma anche attraverso trasformazioni che le adattano ai diversi sistemi di riferimento. L'equazione della sfera, ad esempio, non cambia quando le coordinate

a.
Il quadro *Day and Night* di M. C. Escher. Il positrone, la controparte di antimateria dell'elettrone, fu inizialmente immaginato come una lacuna nel mare di Dirac (vd. p. 9, ndr). Una scatola piena di elettroni, salvo un piccolo spazio, può essere vista come una scatola vuota con un positrone in quello stesso spazio.

sono invertite: la sfera resta tale vista da qualunque prospettiva, anche attraverso uno specchio. La sua affermazione sull'importanza della bellezza era diretta a Erwin Schrödinger. Dirac era dell'avviso che Schrödinger avrebbe dovuto continuare il suo sviluppo teorico senza curarsi degli esperimenti. Egli fece in questo modo, arrivando a scoprire un'equazione consistente con la relatività, ma in una forma matematica nuova, insolita per la maggior parte dei fisici di allora. È un'equazione che ha la stessa forma in ogni sistema di riferimento e resta invariata nelle trasformazioni di spazio e tempo richieste dalla teoria della relatività. Il lavoro di Dirac, intitolato *La Teoria Quantistica dell'Elettrone*, fu pubblicato ottanta anni fa, nel febbraio del 1928. Lo sviluppo che vi si proponeva portava alla sua equazione, in grado di fornire una spiegazione naturale per le caratteristiche dell'elettrone come lo *spin*, ma conduceva anche a risultati sorprendenti e apparentemente paradossali: ogni soluzione in cui l'elettrone aveva una prevedibile energia positiva, permetteva una controparte con energia negativa, stati a energia negativa che apparivano come particelle con numeri quantici inversi rispetto alla materia “normale”: tutti lo ritenevano innaturale, impossibile. Furono necessari tre anni di ipotesi e discussioni e finalmente nel 1931, interpretando i suoi risultati, Dirac intuì e propose l'esistenza dell'*antielettrone*, chiamato anche *positrone*, una particella con la stessa massa e lo stesso spin dell'elettrone, ma con carica elettrica opposta. Era un'ipotesi ardita nata come risultato di una formulazione teorica che diede luogo, tra i fisici, a discussioni infuocate. Dirac predisse, inoltre, che se un elettrone avesse incontrato un antielettrone, la coppia si sarebbe dovuta annichilare e la massa ricombinata trasformarsi in radiazione, così come richiesto dalla celebre equazione di Einstein $E = mc^2$. Una simile particella era sconosciuta. Dirac formulò l'ipotesi che in altre parti dell'Universo le cariche positive e negative fossero invertite, che esistesse quindi un Universo di antimateria. L'insistere sulla consistenza e bellezza della teoria portava a immaginare aspetti inattesi della Natura. Naturalmente questo richiedeva un'intelligenza intuitiva straordinaria, che certo a lui non mancava. Nel 1932, mentre studiava le tracce lasciate dalle particelle dei raggi cosmici nel suo rivelatore, la *camera a nebbia* (vd. “Il mistero dei raggi cosmici” p. 7, ndr), Carl Anderson notò che alcune di esse, pur avendo tutte le caratteristiche lasciate di solito dagli elettroni, reagivano al campo magnetico come se avessero carica opposta. Si trattava della prima chiara evidenza sperimentale dell'esistenza di una particella di antimateria, l'*antielettrone di Dirac*. Una scoperta sensazionale: l'antielettrone previsto dai risultati dell'equazione di Dirac era stato identificato senza possibilità di errore. Un trionfo esaltante per la fisica teorica che vide confermata dall'esperimento la sua predizione, frutto di immaginazione e bellezza matematica.



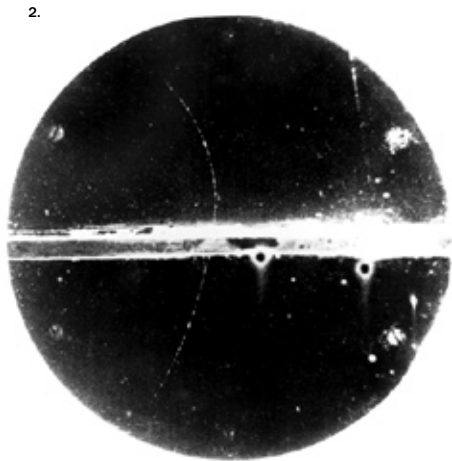
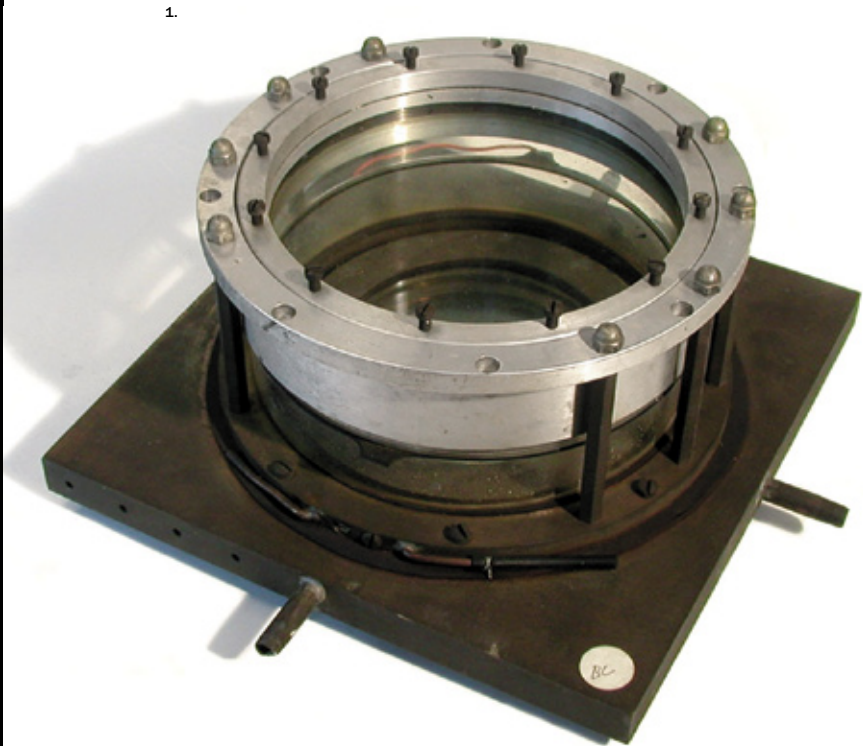
b.
Un ritratto di Paul Dirac.

c.
Carl Anderson vicino alla camera a nebbia con cui scoprì il positrone nel 1932.

[as] Il mistero dei raggi cosmici

La più naturale sorgente di antimateria era, allora come oggi, la radiazione proveniente dal Cosmo. Già nel 1912 Victor Hess, salendo a 5.000 metri con un pallone aerostatico, aveva notato che la ionizzazione prodotta sui suoi strumenti dalla radiazione cresceva aumentando la quota. “I risultati delle mie osservazioni si spiegano perfettamente supponendo che una radiazione di grandissimo potere penetrante entri dall’alto nella nostra atmosfera [...]”, scrisse più tardi. Una pioggia incessante di particelle provenienti dallo Spazio colpisce la Terra: sono i raggi cosmici, l'unico contatto materiale con la Galassia e l'Universo. Come e dove nascono? In che modo raggiungono la loro energia? Fuori dell'atmosfera terrestre i raggi cosmici sono particelle di ogni tipo: i più abbondanti sono protoni (i nuclei di idrogeno), poi nuclei di elio e di elementi più pesanti. Il campo magnetico della Terra ne devia la traiettoria in modo più o meno importante in base alla loro energia. Arrivando negli strati alti dell'atmosfera e urtando contro le molecole dell'aria,

i raggi cosmici primari producono uno sciame, una vera e propria cascata di particelle secondarie, ricca anche di antiparticelle. La natura delle particelle, nello sciame prodotto dai raggi cosmici, muta mentre esse sprofondano nell'atmosfera. Per questo, per poterne studiare le caratteristiche originarie, da sempre i fisici portano i loro strumenti in alta quota. Carl Anderson usava la camera a nebbia, uno strumento studiato da Charles Wilson, che permetteva di fotografare la traccia lasciata in un gas dalle particelle prodotte dai raggi cosmici. Nata per studiare la formazione delle nuvole, consisteva di un cilindro riempito d'aria, chiuso all'estremità da un pistone. Lo spostamento veloce del pistone causava un'espansione del volume della camera con un conseguente calo di temperatura dell'aria satura di vapore acqueo, e questo induceva la formazione di minuscole gocce liquide. Wilson aveva scoperto che le cariche elettriche (ioni) prodotte dal passaggio delle particelle nel gas agivano da centri di condensazione.



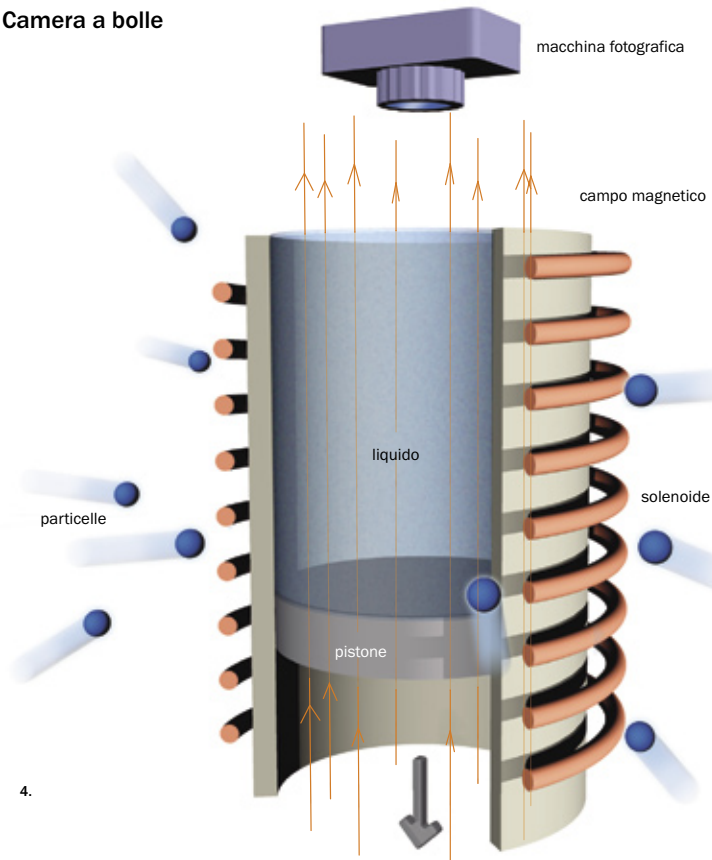
1. Questo strumento è una delle camere a nebbia usate da Carl Anderson in un forte campo magnetico. Millikan aveva chiamato la linea sperimentale, impostata attorno al 1930 con l'uso di questi strumenti, *study of cosmic rays, the birth cries of the universe*, ossia “studio dei raggi cosmici, il primo vagito dell'Universo”.

2. Sopra, la famosa fotografia del 1932: raffigura il positrone che entrando dal basso attraversa uno spessore di piombo perdendo energia. Una minore energia, infatti, determina una maggiore curvatura della traccia nel campo magnetico. L'elettrone avrebbe avuto una curvatura opposta.



3.

Camera a bolle



4.

3. Il lancio dall'Antartico di un moderno pallone stratosferico. Sgonfio, il pallone è alto come la torre Eiffel, mentre gonfio ha un diametro di 176 metri. Tra gli obiettivi dell'esperimento Bess-Polar c'è quello di chiarire il puzzle dell'asimmetria materia-antimateria studiando l'antimateria nei raggi cosmici.

4. Lord Rutheford definì la camera a nebbia o *di Wilson* "il più originale e meraviglioso strumento della storia della scienza". Nella camera a nebbia la radiazione entra in una camera di espansione che contiene un gas saturo di vapor d'acqua. L'espansione causata dal pistone raffredda il gas e si formano gocce di vapore attorno agli ioni prodotti dal passaggio delle particelle. La *camera a bolle* (vd. fig. 4), che valse il premio Nobel a Glaser nel 1960, è lo strumento complementare alla camera a nebbia. Levando il tappo a una bottiglia d'acqua minerale, abbassiamo la pressione e si formano bolle di gas. Nella camera a bolle un liquido è mantenuto a una temperatura prossima al punto di ebollizione. Se la pressione è tolta rapidamente dalla camera con il movimento del pistone il liquido avrà la tendenza a bollire. La particella che attraversa il liquido genera degli ioni sul suo tragitto e questi agiscono da punti di origine di piccole bolle. Una fotografia potrà riprendere la traccia e l'interazione della particella come se si trattasse di un fuoco d'artificio.



d.



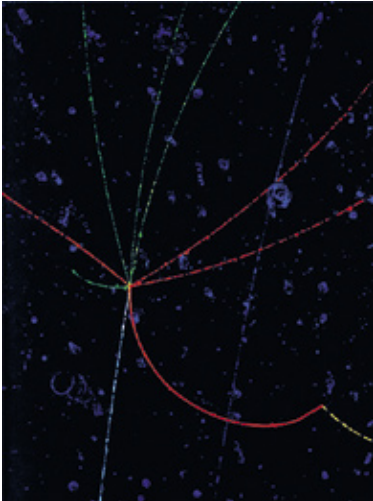
e.

Questa prova sperimentale fu confermata pochi giorni dopo da Patrick Blackett e Giuseppe Occhialini che, con uno strumento simile ma reso più selettivo dall'impiego di circuiti elettronici molto avanzati (la specialità del giovane Occhialini), osservarono due fenomeni già previsti da Dirac: la generazione di coppie di elettroni e positroni prodotti direttamente dalla radiazione, e l'annichilazione, il processo nel quale particelle e antiparticelle riunite sparivano emettendo radiazione. Nella lezione che tenne, ricevendo il premio Nobel nel 1933, Dirac ipotizzò l'esistenza dell'antiprotone, o protone negativo. Gli acceleratori di particelle oggi generano antiprotoni, antineutroni e antimesoni. Nella visione di Dirac, come verificato dalla fisica sperimentale, ogni particella elementare ha un complementare, un'*antiparticella*. Se l'elettrone è un piccolo rilievo, una goccia nello spazio, la sua antiparticella, il positrone, è una fossa, una lacuna. Particella e antiparticella possono essere create o distrutte solo in coppia e la loro somma è radiazione. Questi eventi di creazione e annichilazione di coppie si realizzano oggi normalmente nei grandi acceleratori e vengono osservati con raffinati strumenti negli apparati sperimentali. L'equazione di Dirac, una delle cattedrali della scienza, spianò la strada allo studio dell'antimateria e inaugurò un

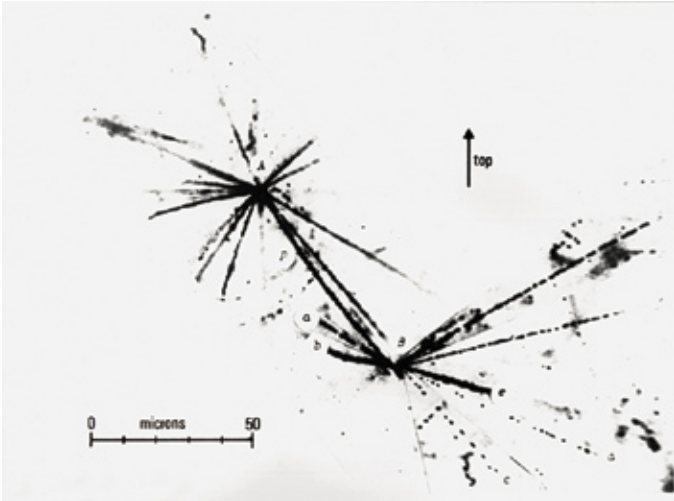
periodo fertilissimo di scoperte. La caccia alle antiparticelle era iniziata. Il passo successivo era dimostrare l'esistenza dell'antiprotone. Questa era messa in dubbio da un valido argomento: nell'Universo non c'è simmetria tra materia e antimateria. Inoltre, per produrre l'antiprotone è necessaria un'energia molto maggiore a quella necessaria a produrre positroni. Nel 1955 a Berkeley, in California, fu messo in funzione il più potente acceleratore mai costruito fino a quel momento (vd. Asimmetrie n. 6, ndr). Proposto da Ernest Lawrence, il Bevatron era capace di raggiungere 6,2 GeV (allora il miliardo di elettronvolt, il GeV di oggi, era chiamato BeV, da cui il nome dell'acceleratore). Lawrence era cosciente del fatto che questa era l'energia necessaria per superare la soglia di produzione degli antiprotoni. Emilio Segrè era stato il primo studente a laurearsi con Fermi all'Università di Roma. Anche Owen Chamberlain aveva studiato con Fermi ed era diventato poi assistente di Segrè durante il progetto Manhattan. Insieme progettavano un labirinto di magneti e contatori elettronici attraverso i quali potevano passare solo antiprotoni. L'ingegnoso esperimento usava rivelatori e dispositivi elettronici che per l'epoca erano di frontiera. "Dovemmo selezionarli e pesarli in molto meno di un milionesimo di secondo", spiegò in seguito Segrè. Nell'ottobre

d. Il laboratorio Berkeley come appariva nel 1955. Il Bevatron si trova sotto la cupola centrale.

e. Da sinistra Emilio Segrè, Clyde Wiegand, Edward Lofgren, Owen Chamberlain e Thomas Ypsilantis, i componenti del gruppo che scoprì l'antiprotone. Lofgren era responsabile dell'acceleratore.



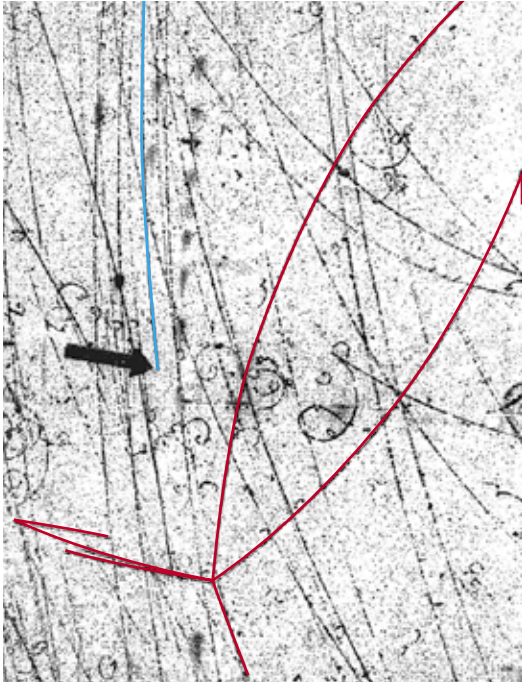
f.



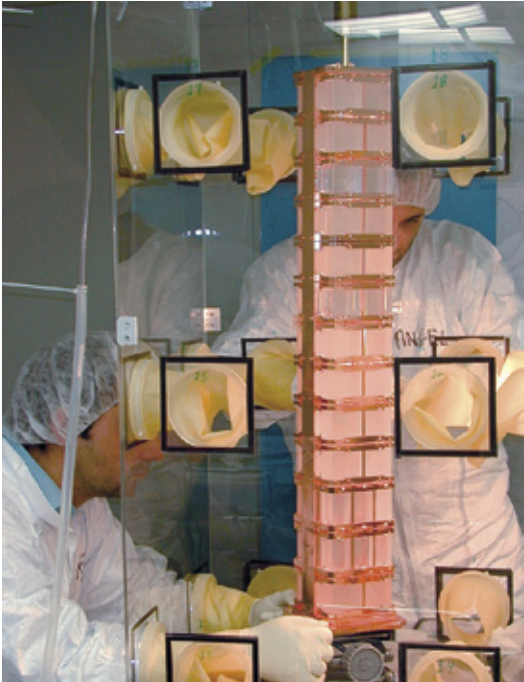
g.

f. Un antiprotone (traccia colorata artificialmente in azzurro) entra in una camera a bolle dal basso e colpisce un protone. L'energia rilasciata nell'annichilazione produce quattro particelle positive (pioni in rosso), quattro particelle negative (pioni in verde). La traccia gialla è un mesone *mu*, prodotto di decadimento di uno dei pioni da cui ha origine. I ricci blu sono prodotti da elettroni di bassa energia, da reazioni che non hanno a che vedere con l'antiprotone.

g. L'evento chiamato "Faustina", trovato nel febbraio 1955 dal gruppo di ricerca guidato da Edoardo Amaldi in una delle emulsioni fotografiche esposte ai raggi cosmici durante la spedizione in Sardegna del 1953, è interpretabile come processo di "produzione, cattura e annichilamento di un protone negativo".



h.



i.

h. Questa immagine, ottenuta nel 1958 nella camera a bolle di Berkeley, dimostra l'esistenza dell'antineutrone, l'antiparticella del neutrone. Nel punto segnato dalla freccia nera un antiprotone prodotto dall'acceleratore subisce una reazione di scambio della carica. L'antineutrone prodotto non lascia una traccia visibile, percorre una decina di centimetri prima di annichilare in una caratteristica stella di annichilazione. L'energia rilasciata è consistente con quella che ci si aspetta quando la massa a riposo di un neutrone e di un antineutrone vengono convertite in energia.

i. L'esperimento Cuore presso i Laboratori del Gran Sasso dell'Infn, di cui qui vediamo una colonna, è un rivelatore modulare costituito da 1.000 cristalli di ossido di tellurio disposti in una matrice quadrata di 25 colonne, ciascuna delle quali contiene 40 cristalli di TeO_2 di $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$. Questi, a una temperatura di ca. 7-10 mK, molto vicino allo zero assoluto, fungono sia da rivelatore che da sorgente di ^{130}Te . L'esperimento permetterà di studiare con grande sensibilità il decadimento raro, con due elettroni senza neutrino, del ^{130}Te . La misura delle caratteristiche di questo decadimento senza neutrini indicherà se il neutrino è una particella di Majorana e aiuterà a spiegare l'asimmetria particella-antiparticella nell'Universo. L'osservazione di questo decadimento avrà sulla fisica, sull'astrofisica e sulla cosmologia un impatto molto profondo.

del 1955, lui e i suoi collaboratori bombardarono un bersaglio di rame con i protoni accelerati dal Bevatron. Si contarono 60 particelle identiche ai protoni, ma con carica elettrica negativa: 60 antiprotoni! Iniziaronο anche altre ricerche indirizzate, ad esempio, verso la scoperta del primo antinucleo (vd. "Primo passo verso l'antinucleo" p. 12, ndr), e si scatenò da allora la fantasia dei narratori di fantascienza e non solo. La stampa locale, il Berkeley Gazette, usciva con un titolo preoccupato: "Minacciosa scoperta all'Università di California". Pare che al giornalista fosse stato detto che un antiprotone avrebbe causato l'esplosione di chi ne fosse venuto a contatto. Oggi miliardi di antiprotoni vengono prodotti normalmente al Cern di Ginevra e al laboratorio Fermi di Chicago, senza alcun pericolo. Poco dopo la scoperta dell'antiprotone Oreste Piccioni individuò l'antineutrone. Erano anni di vera passione scientifica tra grandi scoperte teoriche e sperimentali. Oreste Piccioni ebbe un importante ruolo anche nella scoperta dell'antiprotone, come ricordarono Segrè e Chamberlain nel ricevere il premio Nobel. Ma il suo contributo di grande fisico sperimentale resta storicamente l'elegantissima misura che, studiando la reazione di scambio della carica in cui un protone e un antiprotone danno un neutrone e un antineutrone, dimostrò

l'esistenza dell'antineutrone. La teoria di Dirac richiede che ogni particella abbia un partner di antimateria di massa uguale e carica elettrica opposta. Ogni particella ha la sua "anti". I protoni sono composti da *quark*. Analogamente gli antiprotoni sono composti da *antiquark*. In questo modo è possibile produrre la famiglia completa di antiparticelle. Vengono chiamate *particelle di Dirac* le particelle che hanno un complementare di antimateria. Nel 1937 il giovane fisico Ettore Majorana pubblicò il suo lavoro scientifico più famoso, *Teoria simmetrica di elettroni e positroni*, in cui si introduce l'ipotesi rivoluzionaria che il partner di antimateria di alcuni tipi di particelle siano loro stesse. Questo era in contraddizione con ciò che Dirac aveva proposto. Majorana suggerì che il neutrino, da poco introdotto da Pauli e Fermi per spiegare le caratteristiche del decadimento con elettroni di alcune sorgenti radioattive, fosse un esempio di particella capace di essere l'antiparticella di se stessa. I neutrini non hanno carica, non necessariamente si comportano come i quark e gli elettroni e le altre particelle di Dirac. L'assenza di carica permette l'ipotesi che il neutrino e l'antineutrino siano la stessa particella. Ettore Majorana propose questa idea e una particella che coincide con la sua antiparticella viene chiamata *particella di*

Majorana. La scoperta della massa del neutrino ha messo questo tema in primo piano. Per ordinare il neutrino all'interno del modello teorico chiamato *Modello Standard* è necessario sapere se i neutrini sono particelle di Dirac o particelle di Majorana. Oggi, moderni e raffinati esperimenti sono tesi a chiarire questo particolare aspetto dei neutrini. Dai primi lavori di Dirac sono trascorsi ottanta anni, l'idea dell'antimateria è ancora sorprendente e affascinante perché l'Universo appare composto completamente di materia.

L'antimateria sembra andar contro tutto ciò che sappiamo a proposito dell'Universo. L'Universo è completamente composto di materia anche se nel Big Bang sono state create quantità uguali di materia e antimateria. Perché? Tutte le particelle di materia e antimateria dovrebbero essere annichilite lasciando solo fotoni, ma in qualche modo una piccolissima frazione della materia ha potuto sopravvivere per creare l'Universo come lo conosciamo. È uno dei più grandi misteri della fisica moderna.

Biografia

Andrea Vacchi dirige la sezione di Trieste dell'Infn. È tra gli iniziatori dell'esperimento Infn Pamela per

la ricerca di antimateria nei raggi cosmici. È direttore editoriale di Asimmetrie.

Link sul web

<http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter>

<http://unjobs.org/authors/paul-a-m-dirac>

http://nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1933/dirac-bio.html

www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/AntiMatter/AntiMatter.html

Il grande passo dell’antimateria nucleare

La scoperta dell’antideuterio al Cern.

di Antonino Zichichi

“Coloro i quali dicono che l’antidrogeno è antimateria debbono riflettere su un dettaglio: beviamo acqua, non idrogeno liquido”. Sono le parole di Paul Dirac a un gruppo di fisici riuniti attorno a colui che, con un’equazione, aprì orizzonti nuovi alle umane conoscenze. Per avere l’acqua non basta l’idrogeno. Ci vuole anche l’ossigeno, il cui nucleo è fatto con 8 protoni e 8 neutroni. L’idrogeno è l’unico elemento della Tavola di Mendeleev fatto con due particelle cariche, l’elettrone e il protone, senza alcun bisogno che entrino in gioco le forze nucleari. Il primo esempio di elemento per la cui esistenza sono necessarie le forze nucleari è l’idrogeno pesante, il cui nucleo è fatto con un protone e un neutrone. Queste due particelle, per stare insieme, hanno bisogno della “colla nucleare”. Dall’idrogeno pesante in su, tutti gli elementi della tavola chimica, hanno bisogno, per esistere, del neutrone. Senza neutroni non potrebbe esistere altro che l’idrogeno leggero. Addio acqua. E addio materia a noi familiare. Nella famosa battuta di Dirac ci stanno 70 anni di scoperte teoriche e sperimentali, la cui conclusione è che l’esistenza dell’antimateria nucleare si regge su basi esclusivamente sperimentali. Infatti – come messo in evidenza da T.D. Lee – il teorema CPT perde le sue basi alla scala di Planck (circa 10^{19} GeV) dove convergono tutte le forze fondamentali della Natura. Essendo la Teoria della Grande Unificazione l’origine di tutto, se CPT crolla sul livello energetico della Grande Unificazione, addio a tutto ciò che deriva da CPT. Due parole sui tre operatori di invarianza CPT.

Il primo a essere stato scoperto è C: esso dice che tutta la realtà fisica deve restare invariata se si scambiano le cariche additivamente conservate con le corrispondenti anticariche. Il primo esempio fu quello dell’elettrone e dell’antielettrone. L’operatore C venne introdotto da H. Weyl nel 1931. L’operatore P (introdotto da E. P. Wigner, G. C. Wick e A. S. Wightman) dice che, scambiando i sistemi distrorsi con quelli sinistrorsi, i risultati di qualsiasi esperimento fondamentale non cambiano. L’operatore T (scoperto da Wigner, J.S. Schwinger e J.S. Bell) stabilisce che, invertendo l’asse del tempo, la realtà fisica resta inalterata. Il formalismo matematico, noto come *Relativistic Quantum Field Theory*, costruito per descrivere una forza fondamentale della Natura possiede la proprietà di invarianza CPT: invertendo tutto non cambiano i risultati fisici. Riassumendo: se invertiamo tutte le cariche usando C, i tre assi dello spazio (x y z) usando P e l’asse del tempo usando T, tutto rimane come prima. Adesso è necessario precisare che la materia è fatta di masse accoppiate con numeri quantici additivamente conservati (esempio: cariche elettriche, numeri leptonici, numeri barionici, cariche di “sapore” ecc.). Se a uno stato di materia applichiamo i tre operatori CPT otteniamo antimateria. Questo vuol dire che l’esistenza della materia, se vale il teorema CPT, implica l’esistenza dell’antimateria, e le masse di pezzi di materia debbono essere le stesse di quelle della corrispondente antimateria. Supponiamo che la Natura debba obbedire



a.



b.

alla legge di invarianza C. In questo caso l’esistenza della materia esige che deve esistere l’antimateria. Se però non vale l’invarianza C, l’esistenza dell’antimateria è garantita da CPT. Supponiamo che CP sia valida. Anche in questo caso l’esistenza della materia esige che deve esistere l’antimateria. Se però CP non vale, l’esistenza dell’antimateria è garantita da CPT. Se però crolla CPT, allora l’esistenza dell’antimateria è solo la fisica sperimentale a poterla garantire. Questa telegrafica rassegna non è un racconto, ma la sintesi di ciò che è effettivamente avvenuto nel corso di quasi 70 anni, a partire dal 1929 quando Dirac scoprì la sua equazione. H. Weyl scoprì C e si pensava che la scoperta dell’antielettrone da parte di C.D. Anderson e della produzione in coppia di elettroni e antielettroni da parte di P.M.S. Blackett e G. Occhialini ne fossero la prova. C’era poi l’eguaglianza delle vite medie dei muoni positivi e di quelli negativi. Si andò così avanti con la scoperta dell’antiprotone (E. Segrè e altri), dell’antineutrone (O. Piccioni e altri) e infine del secondo mesone strano neutro, con lunga vita media (L.M. Lederman e altri). Questo apparente trionfo degli operatori di invarianza andava in parallelo col successo nella identificazione di un formalismo matematico in grado di descrivere le forze fondamentali della Natura. Partendo dalle quattro equazioni di Maxwell e portando avanti il discorso era venuta fuori una costruzione meravigliosa, da noi già citata: la Relativistic Quantum Field Theory. Questo formalismo avrebbe dovuto

essere in grado di descrivere non solo le forze elettromagnetiche (da cui aveva tratto le sue origini), ma anche le forze deboli e quelle nucleari. A reggere queste convinzioni erano due grandi conquiste: la prima formulazione matematica delle forze deboli, fatta da E. Fermi, e il trionfo di H. Yukawa con la scoperta della colla nucleare, grazie a C. Lattes, Occhialini e C. Powell. A questi straordinari successi fecero però seguito enormi difficoltà. Nella *Quantum Electro-Dynamics* i poli di Landau e la conclusione che la carica elettrica fondamentale (“nuda”) doveva essere zero; nelle forze deboli il fatto che ai livelli energetici di 300 GeV crollava l’unitarietà; nelle forze nucleari l’enorme proliferazione di mesoni e barioni. Questa proliferazione era totalmente fuori da qualsiasi comprensione in termini di Relativistic Quantum Field Theory. Ed è così che viene fuori un formalismo matematico che è la totale negazione del concetto di “campo”: la cosiddetta “matrice di *scattering*”, detta *matrice-S*. Per la sua esistenza bastavano tre cose: analiticità, unitarietà e *crossing*. Perché complicarsi la vita con la Relativistic Quantum Field Theory se basta la matrice-S? Se però non c’è la Relativistic Quantum Field Theory, come la mettiamo con l’esistenza dell’invarianza rispetto a tutti gli operatori insieme, CPT? Ed ecco aprirsi un altro fronte. Nel 1953 R.H. Dalitz tirò fuori il famoso ($\theta-\tau$) puzzle: due mesoni con proprietà identiche dovevano essere con parità opposte. Spinti da questo “puzzle” T.D. Lee e C.N. Yang analizzarono i risultati sperimentali nello studio

a.
Il professor Dirac circondato da giovani fisici a Erice, dopo una lezione in cui spiegava la differenza tra antiparticelle e antimateria. È in questa occasione che ha detto quanto riportato in apertura di questo articolo.

b.
Eugene P. Wigner, Antonino Zichichi, Paul Dirac (Erice, 1982).



c.



d.

delle forze deboli e scoprirono che non esisteva alcuna prova a conferma della validità di C e P nelle interazioni deboli. Nel giro di un anno C.S. Wu scoprì che le leggi di invarianza C e P vengono violate nelle interazioni deboli. Come la mettiamo con l'esistenza dell'antimateria? Venne così fuori l'idea di L.D. Landau: se ciascun operatore C e P è violato, il loro prodotto CP può essere conservato. L'esistenza dell'antimateria è garantita dalla validità di CP. Si arriva così al 1964, anno in cui viene scoperta la violazione di CP nel decadimento dei mesoni neutri strani. C'è un piccolo dettaglio su cui si è sempre sorvolato. Nel 1957, prima che venisse sperimentalmente scoperta la violazione di P e C, in un lavoro da pochi letto (o capito) Lee, R. Oehme e Yang avevano messo in evidenza che – contrariamente a quanto da molti detto e ripetuto – l'esistenza dei due mesoni neutri strani θ_1 e θ_2 non era prova né della validità di C né di P né del loro prodotto CP. La rottura di CP coinvolge quella di T se vogliamo che rimanga integro il prodotto CPT. Per alcuni dei padri fondatori della fisica moderna l'invarianza rispetto all'inversione del tempo, a livello delle leggi fondamentali, doveva restare intoccabile. Quindi doveva crollare CPT. Dopotutto perché no. In fondo il baluardo di CPT era la Relativistic Quantum Field Theory, ma adesso questo formalismo matematico sembrava dovesse cedere il passo alla matematica della matrice-S. Il crollo degli operatori di invarianza (C, P, CP) e l'apparente trionfo della matrice-S erano

accoppiati a risultati sperimentali i quali dicevano che di antideutoni non c'era traccia nonostante fossero prodotti dieci milioni di pioni. Ero a Dubna quando, nel 1964, Jim Cronin presentò i risultati del suo lavoro. Avevo alla mia destra Bruno Touschek e alla mia sinistra Bruno Pontecorvo. Entrambi mi dissero: “E questi hanno perso la loro reputazione”. A quella novità che metteva in crisi l'invarianza CP furono pochi a crederci. Tra questi però c'era Dirac: la prese sul serio ed entrò in una fase di grande depressione scientifica. Lui, famoso per la sua prudenza, aveva giurato sull'invarianza C. Adesso crollava addirittura CP. E per avere il primo esempio di antimateria era necessario salvare CPT, quindi invocare la violazione di T. Le uniche cose da fare erano di natura tecnologico-sperimentale. E infatti la scoperta dell'antimateria ha richiesto la costruzione del più potente fascio di particelle negative nel protosincrotrone del Cern e l'invenzione di una tecnica nuova per riuscire a misurare con precisione, mai prima realizzata, i tempi di volo delle particelle cariche. È così che siamo riusciti a scoprire che un antideutone viene prodotto non dopo dieci milioni, bensì dopo cento milioni di pioni. Per capire l'importanza di questa scoperta è necessario avere le idee chiare su cosa si deve intendere per materia. Le particelle non bastano per costruire la materia. Ci vuole anche la colla. Usando quella elettromagnetica si fanno atomi e molecole. Per fare i nuclei ci vogliono protoni, neutroni e colla nucleare. È come se avessimo mattoni. Per costruire una casa ci vuole la colla, non bastano i mattoni. La materia

c.
John S. Bell a Erice nel 1963.

d.
Lee durante la sua lezione in cui spiega perché il teorema CPT perde la sua validità alla Scala di Planck (a sinistra nella foto Melvin Schwartz, all'estrema destra Isidor I. Rabi).

corrisponde alla casa, non ai mattoni e basta. Se, grazie a determinate leggi, sappiamo che devono esistere mattoni e antimattoni, tutto ciò che si può fare è avere mucchi di mattoni e mucchi di antimattoni. Non case e anticase. Se la realtà in cui viviamo ci dice che esistono le case; per essere sicuri che debbano esistere le anticase ci vuole una legge che stabilisca l'esistenza delle anticolle esattamente identiche alle colle che permettono ai mattoni di incollarsi per fare le case. Affinché questo avvenga è necessaria la validità della legge di invarianza CPT. Oggi sappiamo che tutte le forze fondamentali convergono all'energia di Planck, dove non vale più l'invarianza CPT. D'altronde se al “punto” sostituiamo la “cordicella” le cose non cambiano: la *Relativistic Quantum String Theory* non riesce a tirar fuori la validità di CPT. Questo vuol dire che non c'è teoria che possa garantire, partendo

dall'esistenza delle “case”, che devono esistere le “anticase”. Ecco perché la certezza che oltre all'antidrogeno devono esistere tutti gli antiatomi con i loro antinuclei nasce da quell'esperimento fatto al Cern nel marzo del 1965. Ed ecco perché vorrei chiudere con la citazione di Heisenberg che Lee ha fatto a Bologna, nella sua lezione d'apertura al simposio celebrativo del 30° anniversario della scoperta dell'antimateria: “Nel suo libro *The Physicist's Conception of Nature* Werner Heisenberg scrive: ‘Penso che la scoperta dell'antimateria sia forse il maggiore dei grandi salti nella fisica del nostro secolo’. Ora, Heisenberg ha scoperto la meccanica quantistica nel 1925. Dal 1972, egli è stato testimone di quasi tutti i grandi salti della fisica moderna. Ebbene egli classificherebbe la scoperta dell'antimateria come il più grande di tutti i salti”.

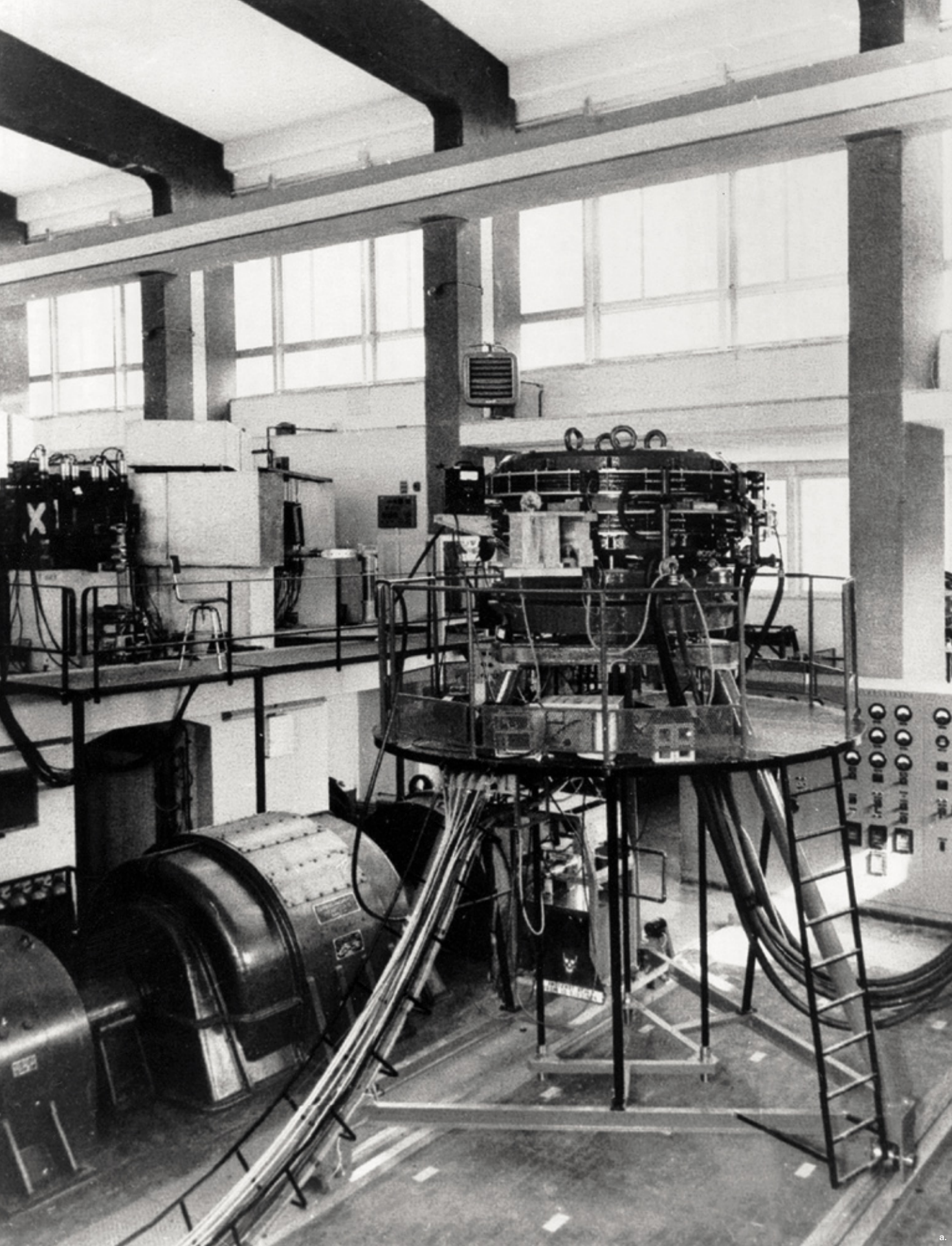
Biografia

Antonino Zichichi. Fondatore del Centro di Cultura Scientifica Ettore Majorana e autore del progetto dei Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn è tra i protagonisti della ricerca di fisica sperimentale italiana. Mentre nel 1978 era alla guida del gruppo

di studio per nuovi acceleratori dell'Ecfa (*European Committee for Future Accelerators*), fu elaborato, su sua proposta, il progetto per una macchina da 27 km di circonferenza, da cui nacque prima il Lep e in seguito Lhc.

Link sul web

www.ccsem.infn.it



a.

Antiparticelle accelerate

Come usiamo l'antimateria per la ricerca con gli acceleratori.

di Mario Calvetti

La scoperta dell'antimateria cambiò in modo straordinario la nostra visione della Natura. Improvvisamente un altro Universo sembrò possibile, costruito con antiprotoni, antineutroni e antielettroni. Il nostro “mondo” era quindi solo uno dei due modi possibili di esistenza: un antiuomo, in una antiterra, avrebbe potuto mangiare un'anticioccolata e sentire esattamente lo stesso sapore, perché le leggi della chimica sono le stesse. Ma queste, almeno per ora, sono solo visioni da fantascienza.

In realtà l'antimateria, infatti, non è presente abbondantemente in Natura: la si trova nei raggi cosmici, nei prodotti di decadimento di alcune sostanze radioattive e vive solo brevemente, perché viene distrutta entrando in contatto con la materia ordinaria. Ma gli scienziati sono riusciti a produrla “artificialmente” e oggi l'antimateria viene usata nei laboratori di ricerca di tutto il mondo. Il suo uso ha permesso una straordinaria serie di scoperte che hanno portato alla descrizione della struttura profonda della Natura, dell'evoluzione del Cosmo e delle sue leggi. Ripercorriamo insieme questa storia.

Tutto cominciò nel 1961 con il progetto Ada (*Anello di Accumulazione*), proposto dal fisico austriaco Bruno Touschek nei Laboratori Nazionali di Frascati (vd. fig. a). L'idea era di far circolare in senso opposto particelle e antiparticelle, in uno stesso tubo vuoto, immerse in un campo magnetico adeguato, in modo che potessero incontrarsi in volo.

Quando un elettrone e un positrone entrano in collisione, tutta la loro energia, compresa quella della loro massa, viene istantaneamente concentrata nel punto di collisione. Si forma una bolla di energia di alta densità, simile a quella che si pensa sia stata presente poco dopo il Big Bang. Più alta è l'energia delle particelle incidenti e più alta è l'energia depositata. Questa bolla di energia, di carica elettrica nulla (perché la carica elettrica totale si conserva sempre) è pronta a obbedire alle leggi della Natura che regolano le trasformazioni di energia in massa, e si “scatena” creando tutte le possibili particelle e antiparticelle che prima non esistevano: è la creazione della materia.

La meccanica quantistica ci dice che per breve tempo l'energia totale può non conservarsi. Si tratta del *principio di indeterminazione*, per cui particelle molto pesanti possono essere prodotte, esistere nel breve tempo dell'interazione e influire sui risultati degli esperimenti. Il progetto Ada dimostrò che era possibile costruire questo tipo di macchine. Furono anche scoperti alcuni fenomeni importanti relativi al funzionamento di questo tipo di acceleratori. Sull'onda di questo successo si costruì a Frascati un acceleratore più grande chiamato Adone. Era l'inizio di una nuova era che avrebbe portato alla costruzione di decine di “anelli di accumulazione” nel mondo intero e permesso una serie di scoperte che hanno forgiato la nostra comprensione del mondo.

La prima grande scoperta fu l'abbondante produzione di particelle nelle annichilazioni elettrone-positrone, vista da Adone per la prima volta. Questo ha portato a capire, tra l'altro, che i quark (che sono per noi, ad oggi, alcuni dei mattoni fondamentali della materia), oltre ad avere una carica

a.
Foto storica di Ada, il primo anello di accumulazione elettroni-positroni.

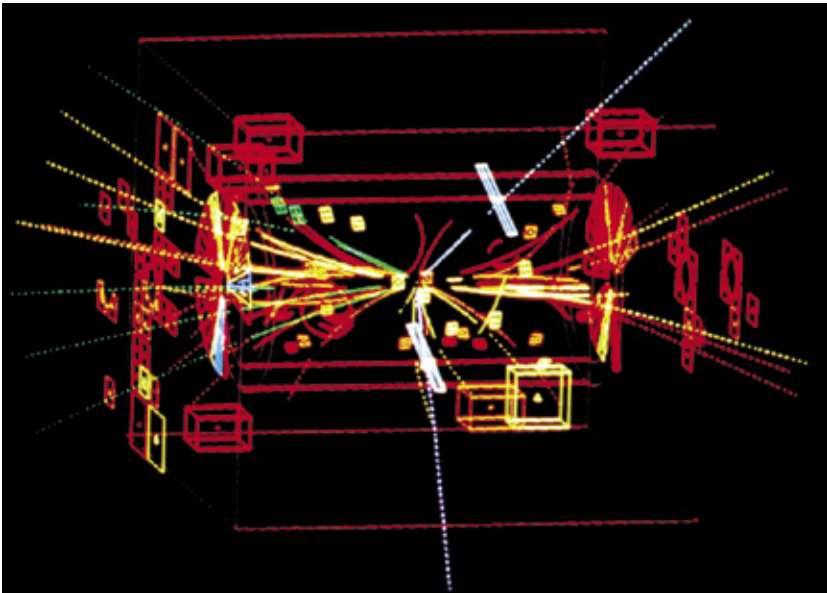
elettrica frazionaria, hanno anche un altro tipo di carica detta di “colore”, molto importante per la descrizione delle forze nucleari. Nel 1974, con la scoperta e lo studio della particella J/ψ negli Stati Uniti, osservata anche a Frascati con Adone pochi giorni dopo l'annuncio, iniziò una nuova fase nella sperimentazione in fisica delle particelle. A energia più elevata, sempre in annichilazioni elettroni-positroni presso il laboratorio Slac (*Stanford Linear Accelerator Center*) in California, fu osservato per la prima volta l'elettrone pesante *tau* che, insieme al normale elettrone e al *muone mu*, forma un terzetto di elettroni di masse crescenti, particelle identiche rispetto all'interazione debole (quella responsabile, ad esempio, del decadimento del neutrone). Era la prima manifestazione della terza famiglia dei *leptoni* che, insieme alle tre famiglie di quark e le corrispondenti anti-famiglie, sono, secondo il cosiddetto Modello Standard, gli elementi fondamentali, indivisibili, con i quali si possono costruire tutte le particelle conosciute. L'uso dell'antimateria negli acceleratori ha quindi portato alla verifica sperimentale di molti aspetti di questa teoria della fisica delle particelle.

Sempre secondo il Modello Standard tutte le particelle interagiscono tra loro attraverso lo scambio di altre particelle, che sono emesse e assorbite dai quark e dai leptoni. Queste particelle sono i *gluoni* per le forze nucleari, i *fotoni* e i *bosoni* Z^0 , W^+ e W^- per le forze elettromagnetiche e deboli. Ebbene, a parte il fotone, anche queste particelle sono state scoperte usando anelli di accumulazione materia-antimateria. Il gluone fu visto nei frammenti delle annichilazioni elettroni-positroni, allo Slac e a Desy (ad Amburgo, in Germania), attraverso la produzione di sciame di particelle (detti in gergo *jet*). La tecnologia degli acceleratori stava intanto progredendo, le dimensioni e le energie disponibili nella “bolla di energia” stavano crescendo. Verso la fine degli anni '70 divenne possibile produrre e immagazzinare abbastanza antiprotoni da poterli usare per la sperimentazione con gli anelli di accumulazione.

Nel 1978 fu approvato il progetto proposto da Carlo Rubbia per la conversione del Super Proto Sincrotrone del Cern in un anello di accumulazione protoni-antiprotoni. Il progetto era basato sulla possibilità di immagazzinare abbastanza antiprotoni usando la tecnica del “raffreddamento stocastico” (vd. “Come si distilla l'antimateria?” p. 19, ndr). Con questa tecnica, proposta da Simon Van Der Meer, che con Rubbia ha diviso il premio Nobel, si potevano accelerare gli antiprotoni lenti e rallentare quelli veloci, in modo da poterli mettere insieme in pacchetti molto densi prima di infilarli nell'acceleratore proposto. Con questo nuovo acceleratore le particelle W^+ , W^- e Z^0 sarebbero state prodotte in numero sufficiente da poter essere scoperte e così fu (vd. fig. b).

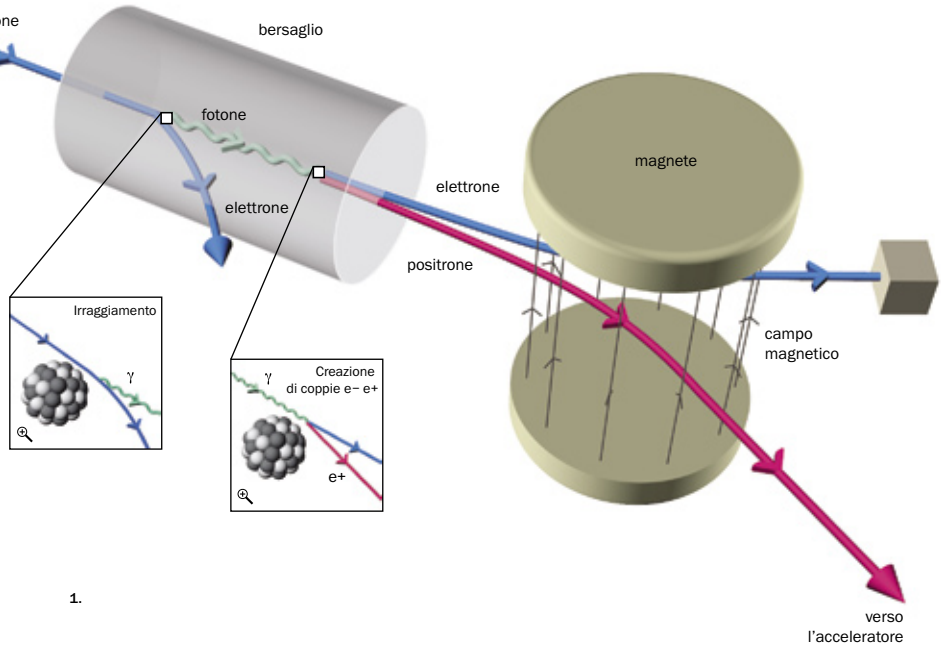
Negli stessi anni furono approvati i progetti per la costruzione dell'acceleratore Lep (collisionatore elettroni-positroni) in 27 km di tunnel 100 metri sotto terra al Cern, e del Tevatron (collisionatore

b.



b. Un evento registrato dall'esperimento UA1 al Cern. Si vedono le tracce delle particelle prodotte nell'interazione protone-antiprotone. Le due tracce bianche, che attraversano i rettangoli bianchi, sono l'elettrone e il positrone creati nel decadimento di uno Z^0 prodotto nel punto d'interazione. L'area dei rettangoli è proporzionale all'energia delle particelle.

[as] Come si distilla l'antimateria?



1.

Un fascio di particelle, per essere accelerato o portato a collidere con alta efficienza contro un altro fascio, deve essere composto di “pacchetti” di particelle di altissima densità. Un numero estremamente alto di particelle deve essere confinato in un volume di frazione di millimetri cubi e viaggiare a velocità quasi uguali nella stessa direzione di moto. Le particelle, cioè, devono rimanere estremamente “parallele”, in modo da muoversi tutte insieme, senza tendere a disperdersi più di quanto le lenti magnetiche che le guidano possano tenerle raccolte.

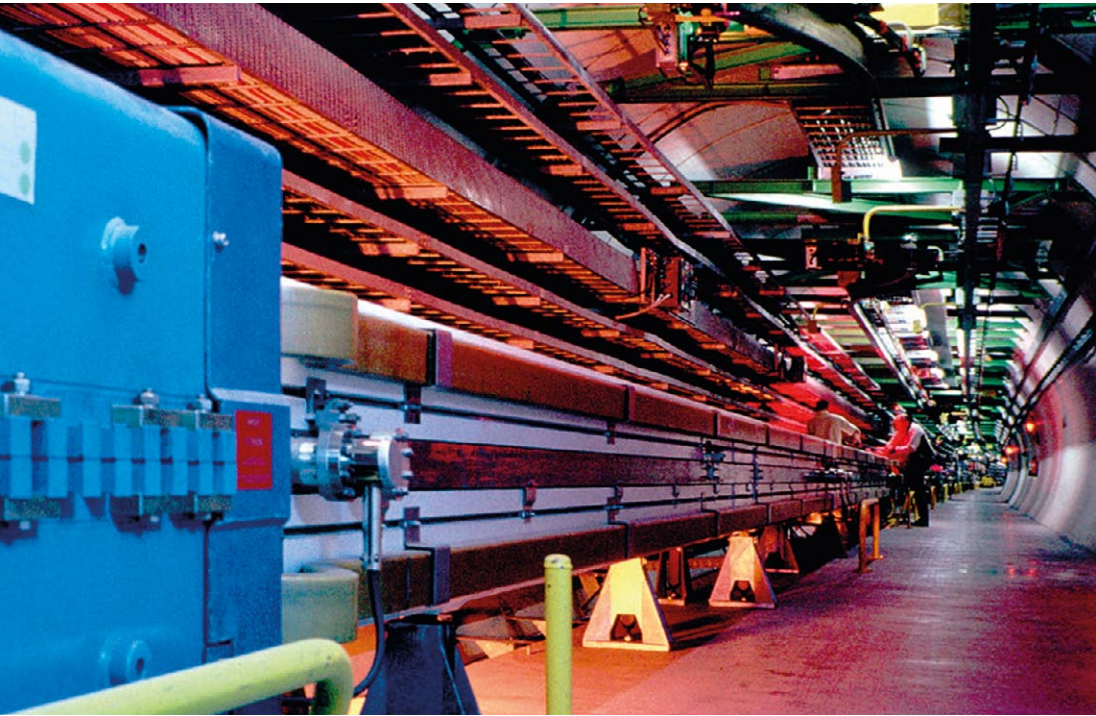
Se questo è possibile per le particelle di materia ordinaria, come elettroni e protoni, grazie alla loro abbondanza, non è altrettanto facile da ottenere per le loro antiparticelle, cioè positroni e antiprotoni. Le antiparticelle possono essere prodotte facendo interagire ad altissima energia le particelle “normali” con materiali di alto numero atomico (come ad esempio il tungsteno). Nel caso degli elettroni (vd. fig. 1), quando uno di essi si scontra con un nucleo, che è carico positivamente, viene fortemente deflesso, causando l'emissione di un fotone di alta energia, che a sua volta, nel campo di un nucleo, può con notevole probabilità creare una coppia elettrone-positrone. Ognuno di questi elettroni e positroni che si sono creati può dare origine allo stesso processo. Si ha cioè la formazione di uno sciame di particelle (elettroni, fotoni e positroni) che cresce di numero anche se diminuisce l'energia media di ogni particella. Adeguando lo spessore del materiale si può produrre il massimo numero di particelle alla sua uscita e, con delle lenti magnetiche, sarà poi possibile raccogliere i positroni e guidarli verso una struttura accelerante. Ovviamente

non tutti i positroni prodotti avranno l'energia e la direzione adatta per essere raccolti, ma la frazione che si ottiene usando come “materiale-bersaglio” il tungsteno può arrivare a parecchi percento del numero di elettroni incidenti. Per gli antiprotoni, il meccanismo di produzione è molto simile. Anche in questo caso si fanno interagire protoni di altissima energia con un materiale di alta densità. Tuttavia, il processo fisico alla base è diverso, poiché quello che si ottiene è una cosiddetta *cascata adronica*, in cui vengono prodotti un gran numero di *mesoni p*, molti *mesoni K*, insieme a neutroni, protoni e antiprotoni. Gli antiprotoni possono essere selezionati e raccolti sempre utilizzando campi magnetici, ma il loro piccolo numero e la loro grande differenza in energia e direzione di volo richiede l'accumulo in un anello intermedio, prima di essere ri-accelerati nell'acceleratore principale. Qui deve essere anche effettuata l'operazione di *raffreddamento stocastico* che serve a ridurre le dimensioni del pacchetto di antiprotoni e a rendere il più possibile parallele le loro traiettorie. Questa tecnica consiste nel misurare lo spostamento degli antiprotoni dalla loro posizione ideale in un determinato punto dell'acceleratore. Questa informazione viene poi usata per elaborare un segnale di correzione, che sposta gli antiprotoni verso la posizione corretta. L'elettronica di misura non può identificare la singola particella, ma solo lo spostamento medio di un gruppo casuale di antiparticelle. Tuttavia, dopo un certo numero di interazioni, gli antiprotoni hanno praticamente tutti la stessa velocità e risulta possibile metterli assieme in pacchetti molto densi. [Michele Castellano]

1. Produzione dei positroni: facendo incidere un elettrone (e^-) contro un materiale ad alto numero atomico si produce uno sciame di positroni (e^+), fotoni (γ) ed elettroni (e^-). Con l'ausilio di magneti, i positroni vengono raccolti e guidati verso una struttura accelerante da un lato, gli elettroni dall'altro.

Biografia

Michele Castellano è dirigente di ricerca dell'Infn presso i Laboratori Nazionali di Frascati. Ha partecipato allo studio delle interazioni elettroni-positroni su Adone e si è poi dedicato alla fisica degli acceleratori e ai Laser ad Elettroni Liberi.



c.

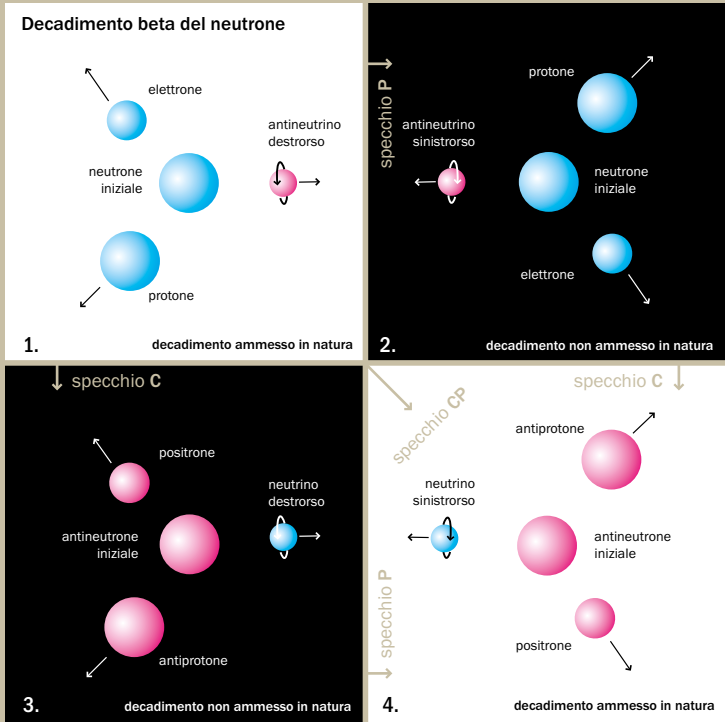
protoni-antiprotoni ma a energia più elevata) al Fermilab negli Stati Uniti. Al Tevatron è stato scoperto il *quark top*, l'ultimo mancante all'appello, e si sta ancora dando la caccia all'ultima importantissima particella, necessaria per confermare la teoria del Modello Standard, il *bosone di Higgs*. Misurando i decadimenti della Z^0 al Lep, i decadimenti del *mesone B* a Stanford e in Giappone, sono stati misurati con grande precisione i parametri della teoria mettendo le basi per possibili future scoperte. Oggi ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn abbiamo Dafne, acceleratore di elettroni e positroni di alta intensità, la più alta mai realizzata a bassa energia. L'esperimento Kloe installato su Dafne, ha misurato con grande precisione numerosi parametri della teoria osservando i decadimenti della materia e dell'antimateria (vd. "A caccia di asimmetrie" p. 22, ndr). Ancora, il più grande acceleratore mai pensato, oggi nella fase di progetto, sarà un acceleratore lineare per elettroni e positroni (Ilc – *International Linear Collider*), e nuove macchine come "fattorie" di mesoni sono in fase di studio: uno in Giappone, con il potenziamento dell'acceleratore esistente, e uno in prossimità di Roma, il progetto SuperB. L'antimateria, così sfuggente per noi, ha dato e sta ancora dando contributi fondamentali per la comprensione delle leggi della Natura. La grande avventura continua.

Biografia
Mario Calvetti insegna Fisica Generale all'Università di Firenze. Ha partecipato alla prima osservazione della J/ψ a Frascati, alla prima accumulazione di antiprotoni al Cern, alla scoperta delle particelle $W^\pm$ e Z^0 e alla scoperta della violazione diretta di CP. Attualmente è direttore dei Laboratori Nazionali di Frascati.

Link sul web
www.lnf.infn.it
www.slac.stanford.edu
www.fnal.gov
www.cern.ch
www.desy.de

c.
Il tunnel dell'acceleratore Lep del Cern, il più grande anello di accumulazione elettroni-positroni che sia possibile costruire. Pronipote di Ada, ha una circonferenza di 27 km sotto la città di Ginevra, in Svizzera.

[as] CP, la simmetria imperfetta



Richard Feynman, in una sua famosa lezione, provocò così i suoi studenti: "Supponete di poter comunicare con un alieno di una lontanissima galassia: potete escogitare qualcosa per sapere se è composto di materia o di antimateria?". La via alla soluzione passa per le proprietà di tre fondamentali trasformazioni applicabili alla nostra realtà: parità (P), coniugazione di carica (C) e inversione temporale (T). Per lungo tempo si è ritenuto che queste tre trasformazioni fossero delle vere e proprie "simmetrie": applicate alla realtà fisica, singolarmente o in successione, producono sistemi descritti da equazioni che rimangono invariate. Ebbene, queste simmetrie sono soddisfatte quando sono in gioco interazioni elettromagnetiche o forti ma, se esaminiamo processi regolati dalle interazioni deboli (come nel caso del decadimento beta del neutrone, fig. 1), ciò non è affatto vero. P. Se c'è "simmetria di parità" allora, cambiando verso ai tre assi del riferimento cartesiano che misura le tre coordinate di ogni punto dello spazio, le leggi della fisica non cambiano. Nel 1957, però, il gruppo condotto da Chien Shiung Wu studiò il decadimento beta del neutrone in nuclei di cobalto, e scoprì che applicando ad esso la trasformazione P si inverte la distribuzione nello spazio delle particelle finali e si produce un antineutrino sinistrorso, che non esiste in Natura (fig. 2): nel caso di questi decadimenti, il mondo "allo specchio P" è perciò irrealistico. C. Se adesso ci inventiamo un altro "specchio", che non inverte coordinate spaziali ma sostituisce a tutte le particelle le corrispondenti antiparticelle, allora gli elettroni diventano positroni, i protoni diventano antiprotoni, i neutrini diventano antineutrini, e così via. Anche questa simmetria viene però violata

nell'esempio da noi scelto, il decadimento beta del neutrone dove, applicando la trasformazione C, si produce un neutrino destrorso, che non esiste in Natura (fig. 3). CP. Riavutisi dallo sgomento seguito alla scoperta delle violazioni di C e P, se applicate singolarmente, i fisici notarono che tutti i processi elementari allora noti erano coerenti se effettuati in un anti-laboratorio (cioè un laboratorio allo "specchio C"), purché visto nello "specchio P": cioè le simmetrie C e P erano violate se applicate singolarmente, mentre la simmetria "composta" CP si conservava (fig. 4). Fine della storia? No. Nel 1964 James W. Cronin e Val L. Fitch scoprirono che i mesoni K_L , che sarebbero dovuti decadere solo in tre pioni, potevano eccezionalmente decadere in due pioni. In questo secondo caso si può dimostrare che c'è "violazione di CP". Questa asimmetria appare più evidente in altri due modi di decadimento dei K_L , uno lo "specchio CP" dell'altro, con un elettrone o con un positroni tra i prodotti finali. Se CP fosse una simmetria rigorosamente valida, il K_L dovrebbe decadere con eguale probabilità nei due modi: invece se i decadimenti con elettroni finali sono 1.000, saranno 1.006 quelli con positroni. La simmetria CP è violata: la Natura sa distinguere tra materia e antimateria! E se l'alieno di Feynman ci informa che, facendo lo stesso esperimento, scopre che le particelle meno frequenti (i "nostri" elettroni) sono anche tra i costituenti dei i "suoi" atomi, allora sapremo che è fatto di materia. T. I fisici hanno allora pensato anche a un terzo "specchio", ancora più bizzarro, che inverte la "freccia del tempo", facendo scorrere i fenomeni a ritroso. Per quanto possa sembrare strano, i processi elementari

sono realistici anche se "facciamo scorrere il film all'indietro", ma con qualche eccezione che, guarda caso, coinvolge sempre le interazioni deboli: invertendo la freccia del tempo in alcuni decadimenti, infatti, si ottengono dei processi che non esistono in Natura. CPT. Nel 1954 Gerhard Luders riuscì a dimostrare un fondamentale teorema, il teorema CPT: se a partire dal nostro universo ne immaginiamo un secondo, con scambio particelle-antiparticelle, a partire da esso un terzo, invertendo il segno a tutte le coordinate spaziali, e infine un quarto, invertendo lo scorrere del tempo, giungiamo a un universo realistico, senza contraddizioni, anche in presenza delle interazioni deboli. CPT è dunque una simmetria universale? Finora sembra di sì, tutti gli esperimenti confermano l'invarianza CPT. [Crisostomo Sciacca]

In alto una rappresentazione schematica del decadimento beta del neutrone (fig. 1). Lo stesso processo sottoposto a trasformazioni di parità (fig. 2) o di coniugazione di carica (fig. 3): i processi che si ottengono applicando singolarmente queste due trasformazioni non sono ammessi in Natura. Se invece le trasformazioni si applicano in modo combinato (fig. 4), allora il processo così ottenuto è possibile: il decadimento beta del neutrone è simmetrico per CP. Per il neutrino, oltre alla velocità è raffigurato lo spin, la sua "rotazione": in Natura il neutrino è solo "sinistrorso" (se racchiudiamo leggermente la mano sinistra, il pollice ne indica la velocità e le altre dita ne danno il "verso di rotazione"), mentre gli antineutrini sono solo "destrorsi", come la vite che avanza ruotando in senso orario.

A caccia di asimmetrie

Grandi esperimenti per scoprire piccole violazioni.

di Fernando Ferroni



a.

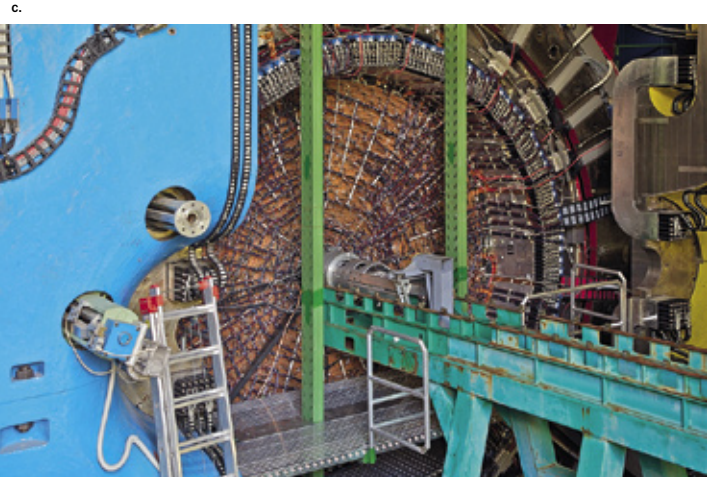
In fisica il concetto di simmetria gioca un ruolo fondamentale. In particolare nella meccanica quantistica, la teoria deputata a descrivere i fenomeni che avvengono nell’infinitamente piccolo, cioè a livello nucleare e subnucleare. È quasi ironico che, in un mondo dove tutte le leggi che lo governano sono figlie di una simmetria, ci sia una asimmetria fondamentale: quella tra materia e antimateria. Ad oggi non c’è alcuna evidenza che nell’Universo ci siano regioni composte di antimateria, tuttavia questa assenza è un fatto abbastanza misterioso. All’inizio del tempo, infatti, quando il Big Bang avvenne, necessariamente si produsse un’analogia quantità di materia e antimateria. Questo lo possiamo verificare quotidianamente nei nostri acceleratori di particelle dove l’annichilazione di un elettrone con la sua antiparticella, il positrone, produce stati finali assolutamente simmetrici rispetto alla quantità di materia e antimateria. La prova che all’inizio l’Universo fosse simmetrico è data inoltre dal cosiddetto fondo di microonde a 3 gradi kelvin che lo permea (vd. Asimmetrie n.4, ndr). Esso è composto di fotoni, quelli creati nell’evoluzione iniziale dell’Universo dall’annichilazione delle particelle con le loro antiparticelle. Essi erano allora molto energetici ma il lungo cammino che hanno percorso, nei quasi 14 miliardi di anni di vita, per effetto dell’espansione dell’Universo seguita al Big Bang, li ha fatti diventare “freddi”, cioè di bassa energia. Bisogna anche dire che in un Universo totalmente simmetrico non saremmo ammessi noi, osservatori fatti di materia! Solo i fotoni dovrebbero esistere, mentre tutte le particelle dotate di massa dovrebbero aver subito il processo di annichilazione. Ma noi esistiamo e così i pianeti, le stelle e le galassie. Insomma, la materia c’è, persino quella “oscura”! Questo vuol dire che una parte delle particelle, quelle di un determinato “segno” (la materia, appunto), sono sopravvissute. Se le contiamo, vediamo però che esse sono straordinariamente poche: un protone ogni 100 milioni di fotoni. C’è dunque una violazione della simmetria tra materia e antimateria, ma da questo ultimo dato si deduce che essa debba essere molto piccola. Le particelle cioè si devono comportare in maniera impercettibilmente diversa dalle antiparticelle. Si è supposto che ciò si potesse attribuire a una differenza di comportamento tra particelle e antiparticelle per quanto riguarda le proprietà della coniugazione di carica (C) e della parità (P): questa differenza nel comportamento viene chiamata *violazione CP* (vd. “CP, la simmetria imperfetta” p. 21, ndr). Alla fine degli anni '50 dello scorso secolo tutti erano convinti che la simmetria CP fosse inviolabile. Si pensava, cioè, che una particella riflessa da uno specchio si comportasse come la sua antiparticella davanti allo specchio. Due fisici statunitensi, Jim Cronin e Val Fitch, attaccarono questo tabù, e il coraggio fu premiato. La violazione fu osservata come un effetto minuscolo nel decadimento di un particolare tipo di particelle, i mesoni K^0 . Esistono due stati di mesoni K^0 : i “corti” (K_S), a vita breve che generalmente decadono in 2 pioni, e i “lunghi” (K_L), a vita medio-lunga, appunto, che decadono di solito in 3 pioni. Ciò che si trovò fu che il decadimento dei mesoni K^0 “lunghi” produceva due pioni con una frequenza bassissima ma che corrispondeva comunque a un minuscolo effetto di violazione di CP. Così minuscolo che non a caso la scoperta della violazione di CP è del 1964 ma il successivo progresso significativo si è avuto dopo quasi 30 anni! Una delle conseguenze di questo fondamentale esperimento, premiato col Nobel, fu la formulazione di Andrej Sacharov delle condizioni necessarie per spiegare l’asimmetria tra materia e antimateria nell’Universo. In breve esse sono: prima, l’esistenza del decadimento del protone (assai raro visto

a.
La nebulosa Occhio di Gatto. Al momento del Big Bang materia e antimateria furono prodotte nella stessa quantità, ma oggi ciò che conosciamo nel nostro Universo è fatto di materia. L'antimateria originaria sembra così scomparsa.

che noi, fatti di protoni, siamo qui a discuterne), che è oggetto di ricerca sperimentale in laboratori sotterranei nel mondo, e in Italia ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso dell'Infn; seconda, la violazione CP, per l'appunto osservata nell'esperimento di Cronin e Fitch; e, terza, il fatto che, al tempo della scomparsa dell'antimateria, a ogni reazione non sia corrisposta una reazione opposta, che la controbilanciasse mantenendo così il sistema in equilibrio. Inizia a questo punto un'avventura non ancora conclusa che cerca di spiegare e inquadrare questa violazione nelle attuali teorie di fisica delle particelle, e soprattutto di capire se questo è quello che serve per rendere l'Universo asimmetrico. La prima domanda fondamentale che ci si pose fu se la violazione osservata potesse spiegarsi con effetti non ancora conosciuti delle interazioni deboli o se dipendesse da una nuova forza (in aggiunta alle quattro note). Solo gli esperimenti potevano dare la risposta e per darla era necessario osservare un altro caso di violazione CP in un diverso processo debole (e allora sarebbe stato un fenomeno comune alle interazioni deboli), oppure dimostrare l'unicità di quanto osservato. Una premessa è necessaria. Perché si verifichi la violazione di CP serve che una particella e la sua antiparticella possano decadere nello stesso stato finale attraverso due percorsi quantistici diversi. La ricerca di un nuovo processo con i K "lunghi" richiedeva di misurare con precisione una quantità molto più piccola della violazione di CP osservata nell'esperimento di Cronin e Fitch. Se si fosse riuscito a misurare una quantità non nulla, allora la violazione di CP



sarebbe stata figlia delle interazioni deboli. Tre esperimenti si sono a lungo cimentati con questa misura in laboratori americani, al Cern di Ginevra e in Italia ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn, con l'esperimento Kloe all'acceleratore Dafne. Grazie alle prove sperimentali abbiamo verificato l'effetto, ed esso è sicuramente diverso da zero: dopo 30 anni si dimostra dunque che la violazione CP è generata dalle interazioni deboli. Il secondo grande progresso avviene in congiunzione con lo studio della cosiddetta matrice CKM (dalle iniziali dei nomi dei tre scienziati che la formularono, Nicola Cabibbo, Makoto Kobayashi e Toshihide Maskawa), che mostra come la violazione della simmetria CP nel caso delle interazioni deboli porti a prevedere l'esistenza di sei quark rispetto ai quattro allora noti. Si vuole verificare se la violazione di CP osservata sia quella prevista, non solo in base ai risultati sperimentali noti, ma anche in base alla teoria deputata a descrivere il fenomeno, cioè il Modello Standard delle interazioni elettrodeboli, che include anche la *Cromodinamica Quantistica* (QCD, perché fa riferimento alle proprietà dei quark, dette *colori*, che non hanno però nulla a che vedere coi colori come li intendiamo noi comunemente). I mesoni K purtroppo però non sono efficaci per questa verifica perché la loro massa è piccola, così piccola che le correzioni dovute alla QCD impediscono ogni calcolo capace di produrre predizioni. Bisogna allora cambiare famiglia di particelle e sceglierne di più pesanti per le nostre ricerche: tocca ai mesoni B⁰, che sono particelle equivalenti ai K⁰ ma di massa circa 10 volte maggiore. Due acceleratori speciali, in grado di produrre mesoni B alla frequenza di 10 Hz, sono



- b. La camera a vuoto dell'esperimento Na48, dove sono stati studiati i decadimenti spontanei dei mesoni K⁰ in coppie o triple di pioni. Nel 1999 dallo studio di questi decadimenti è stato ricavato un importante risultato: la misura della violazione CP diretta.
- c. Il rivelatore Kloe ai Laboratori Nazionali di Frascati dell'Infn. L'esperimento, ancora in funzione, ha consentito di eseguire misure molto precise sul decadimento dei mesoni K⁰ contribuendo in modo significativo a far luce su questi eventi, la cui comprensione è fondamentale per lo studio della violazione CP.
- d. Il rivelatore di Babar allo Stanford Linear Accelerator. Scopo dell'esperimento è studiare la violazione CP nel decadimento dei mesoni B. Per studiarla Babar fa scontrare un fascio di elettroni con uno di positroni che collidendo producono sia mesoni sia le loro antiparticelle. Attraverso l'attento studio delle differenze tra il decadimento del mesone B rispetto a quello del suo partner, l'anti-mesone B, sono stati forniti interessanti contributi allo studio della violazione CP.

stati costruiti in Giappone e negli Stati Uniti, e gli esperimenti opportunamente progettati hanno avuto un completo successo, dimostrando in maniera inoppugnabile che la violazione CP è spiegata dalla matrice CKM. La fisica della violazione CP è diventata oggi un settore di grande precisione e offre la possibilità di esplorare l'esistenza di una fisica che dia traccia di nuovi fenomeni. Questo compito è affidato a Lhc-b, uno dei quattro principali esperimenti del *Large Hadron Collider* al Cern

di Ginevra, e sarà forse affidato alle *SuperB-factory* di cui si sta discutendo la costruzione sia in Giappone che in Italia. L'avventura continua anche perché la violazione CP, che Sacharov pose come seconda condizione per l'asimmetria tra materia e antimateria, nonostante tutto quello che abbiamo imparato, non è ancora stata compresa in modo soddisfacente: l'entità della violazione osservata, infatti, non è ancora sufficiente a spiegare perché il nostro Universo sia fatto di materia e non di antimateria.

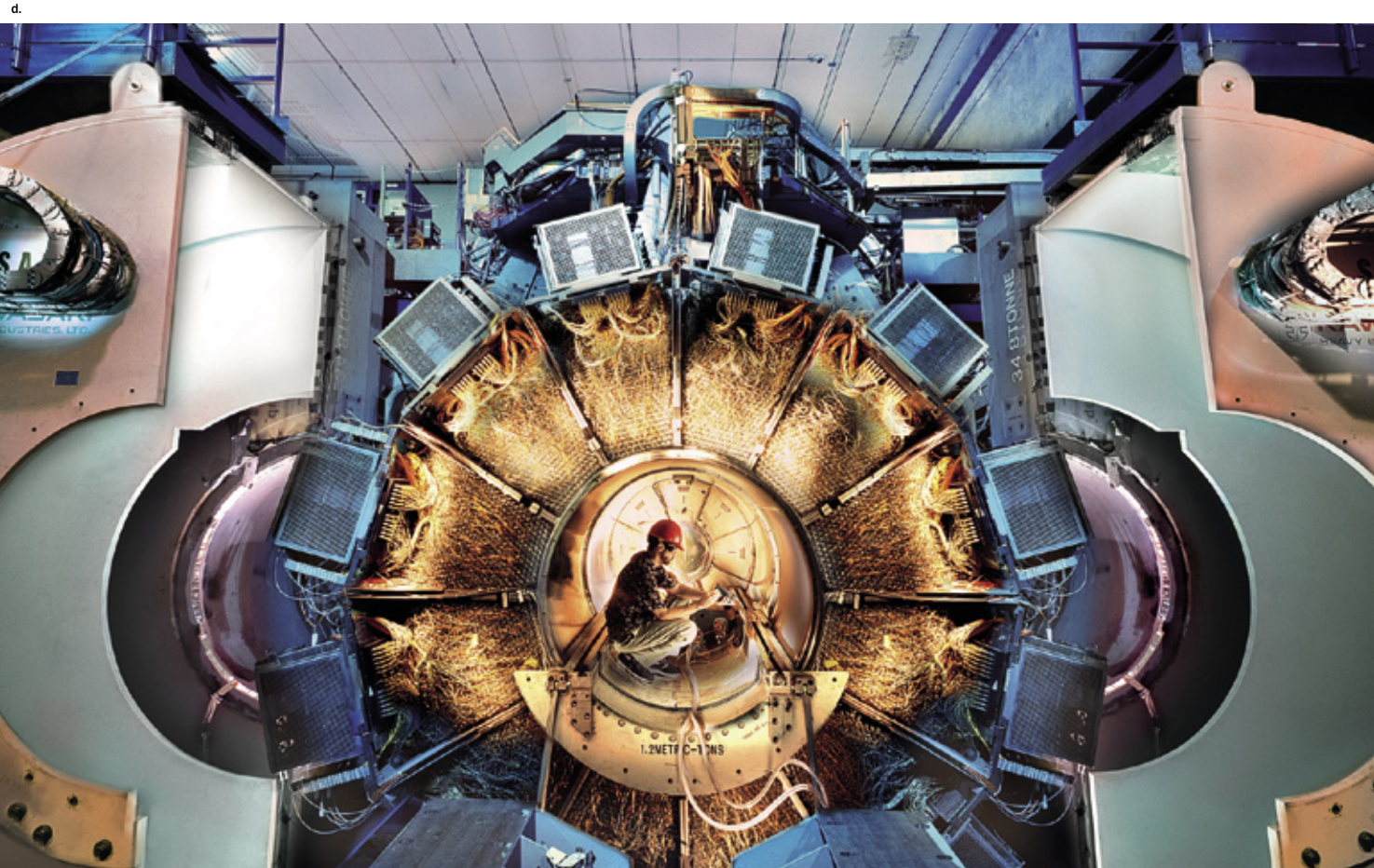
Biografia

Fernando Ferroni, professore all'Università La Sapienza, si occupa di fisica delle particelle elementari dal 1975 e ha partecipato a molti

esperimenti tra cui Babar allo Slac. Attualmente è presidente della Commissione Scientifica Nazionale di fisica delle alte energie con acceleratori dell'Infn.

Link sul web

- www.sciam.com/article.cfm?id=what-is-antimatter-2002-01-24
- www.sciam.com/article.cfm?id=in-search-of-antimatter
- <http://arxiv.org/abs/hep-ph/9712475>



[as] benvenuti a bordo

Intervista a Paolo Giordano.

di Catia Peduto



Abbiamo incontrato Paolo Giordano, scrittore e dottorando in fisica teorica associato alla sezione dell'Infn di Torino, alla presentazione del suo libro *La solitudine dei numeri primi* (ed. Mondadori) alla libreria Feltrinelli di Roma nella Galleria "Alberto Sordi". Il suo libro in poco tempo ha raggiunto la vetta delle classifiche di vendita, imponendosi nelle prime posizioni, e il giovane autore ha vinto il prestigioso Premio Strega e il Premio Campiello Opera Prima. Il romanzo narra le vicissitudini di due adolescenti dalla loro infanzia all'età adulta. Paolo usa la matematica e la fisica, che ha studiato con passione tanto da decidere di proseguire la carriera da scienziato e farne la sua futura professione, per coniare metafore esistenziali estremamente calzanti. Così Alice e Mattia, i due protagonisti del romanzo, sono come due numeri primi che i matematici chiamano "gemelli", che non si toccano mai perché fra di loro c'è sempre un numero pari.

[as] Paolo, la nostra rivista si chiama *Asimmetrie*. Trovo curioso che qui alla Feltrinelli il tuo libro sia stato appena definito "asimmetrico"... Sei d'accordo con questa definizione?

Beh, è un libro con una simmetria non perfetta. Per dirla da fisico, con una simmetria violata. I due personaggi (Alice e Mattia, ndr) trovano una corrispondenza delle proprie storie e dei propri pensieri l'uno nell'altra, ma questa corrispondenza è sempre imprecisa. E tutto il romanzo vive di queste imprecisioni.

[as] È un po' insolito che un dottorando in fisica si metta a scrivere un romanzo, come ti è venuta questa idea?

In effetti sì, il dottorato in fisica ti assorbe già abbastanza. Il fatto è che io ho suonato per molti anni e sfogavo nella musica la mia parte più creativa. Poi per una serie di motivi ho smesso e per un lungo tempo non ho fatto nient'altro. Dato che sono un antisportivo, mi mancava un'attività secondaria e allora mi sono messo a scrivere. Ho sempre amato molto i libri e ho incominciato scrivendo delle storie. Quando la cosa ha preso una veste un po' più seria, ho deciso di cimentarmi in un romanzo.

[as] Ti vedi più scrittore o fisico delle particelle?

Mi vedo un po' in tutte e due le cose, direi che sono due aspetti di me che convivono in maniera "asimmetrica"! Scienza e letteratura, infatti, secondo me non sono per nulla antitetiche, anzi trovo che alla base ci sia la stessa spinta emotiva iniziale: la volontà di mettere in ordine, di sistemare le cose.

[as] Nel tuo libro usi spesso delle metafore tratte dalla scienza. Ad esempio, mentre Mattia osserva la libreria di Alice, pensa che i libri dovrebbero essere ordinati secondo i colori dello spettro elettromagnetico. Capita anche a te, nella vita di tutti i giorni, di ragionare in questo modo?

Beh, sì penso che a tutti gli scienziati venga di ragionare così. Questa visione un po' ossessiva e iperanalitica ce l'ho anche io quando penso alle cose. Quando hai una formazione di tipo scientifico, è naturale che ogni tanto ti venga da fare delle analogie, anche perché sia la fisica che la matematica ti mettono a disposizione una strumentazione talmente ampia che poi ti

abituai a usarla. Nel mio romanzo però ho anche costruito un personaggio (Mattia, che farà il matematico, ndr) e quindi ho calcolato la mano in questo senso.

[as] Parlaci del tuo dottorato in fisica delle particelle: su cosa verte? Ti piace?

Sì, mi piace molto. Sono un teorico, mi occupo di fenomenologia, in particolare della fisica del mesone B. È una particella instabile, formata da un quark pesante, che si chiama bottom, e da uno leggero. Il suo studio è interessante soprattutto perché è legato alla violazione di CP e quindi, ad esempio, al problema della prevalenza della materia sull'antimateria.

[as] E cosa vorresti fare dopo: il ricercatore, lo scrittore o tutte e due?

Guarda, a me piacerebbe fare tutte e due. Vorrei fare fisica come attività principale e continuare a scrivere nel tempo libero. Visto che la prima prova come scrittore è andata così bene, almeno mi concederò la seconda. Anche perché sono tutti lì ad aspettarmi e sarebbe vigliacco tirarsi indietro.

[as] Hai già in mente una trama per il tuo prossimo libro, magari potrebbe trattare proprio dell'antimateria?

In realtà no, non ho la più pallida idea di cosa scriverò, ma ci sto incominciando a pensare. Dopo che hai finito un romanzo, ti senti parecchio svuotato e ci vuole un po' di tempo per ricaricarsi. E poi, al momento, sto anche collaborando alla sceneggiatura del film che verrà tratto da *La solitudine dei numeri primi*. Però con l'antimateria forse mi hai dato una buona idea. Potrei pensarci...

Fabbrica di antiatomi

Dal 2002 al Cern produciamo atomi di anti-idrogeno.

di Alberto Rotondi e Gemma Testera

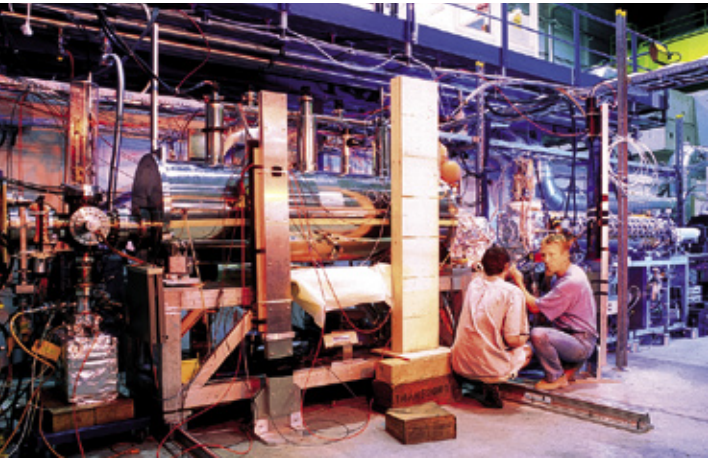
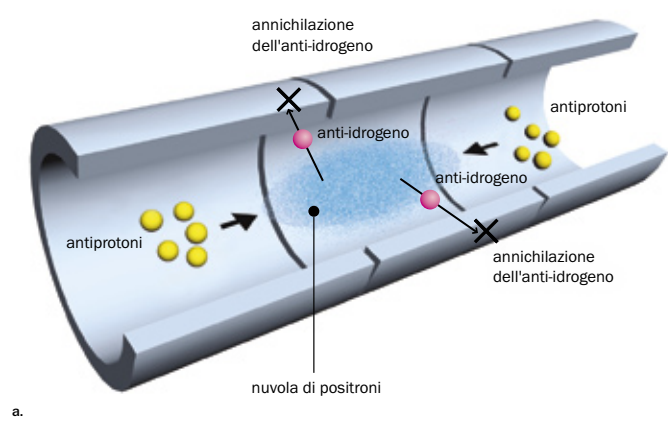
Fino agli anni '90 dello scorso secolo, non erano mai stati fabbricati in laboratorio dei veri e propri antiatomi. I fisici erano riusciti a rivelare vari tipi di antiparticelle (tra le più note: positroni, antiprotoni e antineutroni) e anche a creare un antinucleo (vd. “Primo passo verso l’antinucleo” p. 12, ndr). La materia, però, è formata da nuclei intorno ai quali orbitano elettroni: cioè atomi. Creare degli antiatomi significa quindi produrre della vera e propria antimateria, per poterne studiare a fondo le proprietà. I primi tentativi in questa direzione si sono rivolti verso l’anti-idrogeno, il più semplice antiatomo, il cui nucleo è costituito da un unico antiprotone, con un solo positrone orbitante. I primi, pochissimi, atomi di anti-idrogeno furono creati al Cern e al Fermilab tra il 1995 e il 1996: essi però non erano sufficienti per studiare le proprietà dell’antimateria. Erano solo poche decine e, per giunta, risultò impossibile catturarli e manipolarli. Nacque così nel 1997 l’esperimento Athena (*Apparatus for High precision Experiment on Neutral Antimatter*), frutto della collaborazione di un gruppo di circa 40 fisici provenienti da Italia, Svizzera, Gran Bretagna, Danimarca, Giappone, Brasile, che si propose di produrre grandi quantità di atomi di anti-idrogeno, utilizzando il fascio di antiprotoni dell’*Antiproton Decelerator* del Cern di Ginevra. Il successo di Athena arrivò nell’agosto del 2002 quando riuscì a produrre 50 mila atomi di anti-idrogeno. Tra il 2002 e il 2004 ne fabbricò più di 2 milioni, trovando le condizioni ottimali per il processo di formazione, e mostrando così la fattibilità di nuovi esperimenti per lo studio della simmetria CPT (verificando se i livelli

energetici dell’atomo di idrogeno sono identici a quelli dell’atomo di anti-idrogeno) e per i test sull’antigravità (vd. “Come cade l’antimateria” p.30, ndr). L’apparato di Athena, che ha permesso la produzione di grandi quantità di antimateria, è piuttosto complesso ed è in grado di formare gli antiatomi combinando antiprotoni e positroni e di rivelare i singoli antiatomi uno ad uno, grazie a un rivelatore altamente sofisticato. Positroni e antiprotoni vengono immagazzinati in “scatole” che i fisici chiamano *trappole*: sono camere cilindriche, grandi poco più di una comune pompa da bicicletta, costituite da elettrodi coassiali di metallo e tenute sotto vuoto. Le particelle di antimateria (i positroni e gli antiprotoni) sono contenute nella scatola come un gas in una bottiglia, e rimangono confinate per mezzo di pareti non materiali costituite da campi elettrici e magnetici, che le tengono vicine al centro della scatola, in modo che non tocchino le pareti materiali perché altrimenti scomparirebbero per annichilazione. Quindi l’antimateria è intrappolata in una sorta di “bottiglia magnetica”. Per potersi legare insieme a costituire un atomo di anti-idrogeno, antiprotoni e positroni devono formare un gas molto freddo, a una temperatura di pochi gradi sopra lo zero assoluto. Queste particelle vengono però fornite all’esperimento a temperature molto più elevate. Ad esempio, gli antiprotoni prodotti con l’Antiproton Decelerator, hanno un’energia cinetica che corrisponde a una temperatura migliaia di volte più alta di quella del Sole. È proprio nelle trappole che avviene

a.
All’interno della trappola di ricombinazione gli antiprotoni (in giallo) penetrano nella nuvola di positroni (in blu). Gli anti-idrogeni (in rosa) che si formano si annichilano sulle pareti (annichilazione dell’anti-idrogeno).

b.
L’esperimento Athena al Cern di Ginevra, in Svizzera. Quando materia e antimateria annichilano, producono alcune particelle elementari (mesoni) e due deboli lampi di radiazione, cioè due fotoni. Il rivelatore di Athena riusciva a individuare i mesoni, registrando i segnali elettrici che essi rilasciavano in due strati concentrici di sottili strisce di silicio, mentre i fotoni venivano rivelati dalla luce emessa attraversando i cristalli di ioduro di cesio.

Trappola di ricombinazione



b.

il processo di rallentamento, senza il quale l’antiatomo non si potrebbe formare. Gli antiprotoni vengono catturati in una prima trappola e qui rallentati attraverso uno scambio di energia con elettroni freddi: la loro temperatura diventa milioni di volte inferiore a quella iniziale in un tempo di soli circa 20 secondi. I positroni, che derivano invece dal decadimento di una sorgente radioattiva di sodio (²²Na), vengono rallentati e quindi immagazzinati in una seconda trappola. La parte più complessa è ora il trasferimento e l’intrappolamento simultaneo di entrambe le nubi (plasm) di antiparticelle in una terza trappola di ricombinazione (vd. fig. a) posta tra le prime due. Prima si trasferisce la nube di positroni, che si posiziona in una buca di potenziale al centro della trappola e mantiene una temperatura di -258 °C. Poi, variando opportunamente i campi elettrici, si trasferisce la nube di antiprotoni,

che rimane a energia superiore di quella dei positroni. Gli antiprotoni oscillano tra le barriere di potenziale della trappola, attraversando continuamente il plasma di positroni: in questo modo si riesce a formare l’anti-idrogeno. Questo antiatomo, essendo neutro, sfugge ai campi confinanti e arriva sulle pareti della trappola. Qui l’antiprotone annichila con un nucleo di un atomo di materia, producendo alcune particelle nucleari (dette mesoni), e il positrone annichila con un elettrone, producendo due deboli lampi di radiazione, cioè due fotoni con un’energia di 511 keV ciascuno (pari cioè alle masse dell’elettrone e del positrone) che partono in direzioni opposte. Athena ha rivelato simultaneamente questi due tipi di segnali, segno dell’avvenuta annichilazione tra materia e antimateria. Si è dimostrato, così, che è possibile creare antiatomi freddi, aprendo la strada a una nuova generazione di esperimenti.

Biografie

Alberto Rotondi insegna Fisica Nucleare all’Università di Pavia ed è attualmente direttore della locale sezione Infn. È stato rappresentante al Cern degli esperimenti Obelix e Athena.

Gemma Testera svolge la sua attività di ricerca presso l’Infn ed è impegnata da quasi 20 anni nel campo dell’antimateria e della rivelazione dei neutrini solari. È responsabile del gruppo italiano di Athena e rappresentante della collaborazione internazionale Aegis.

Link sul web

<http://athena.web.cern.ch/athena/>

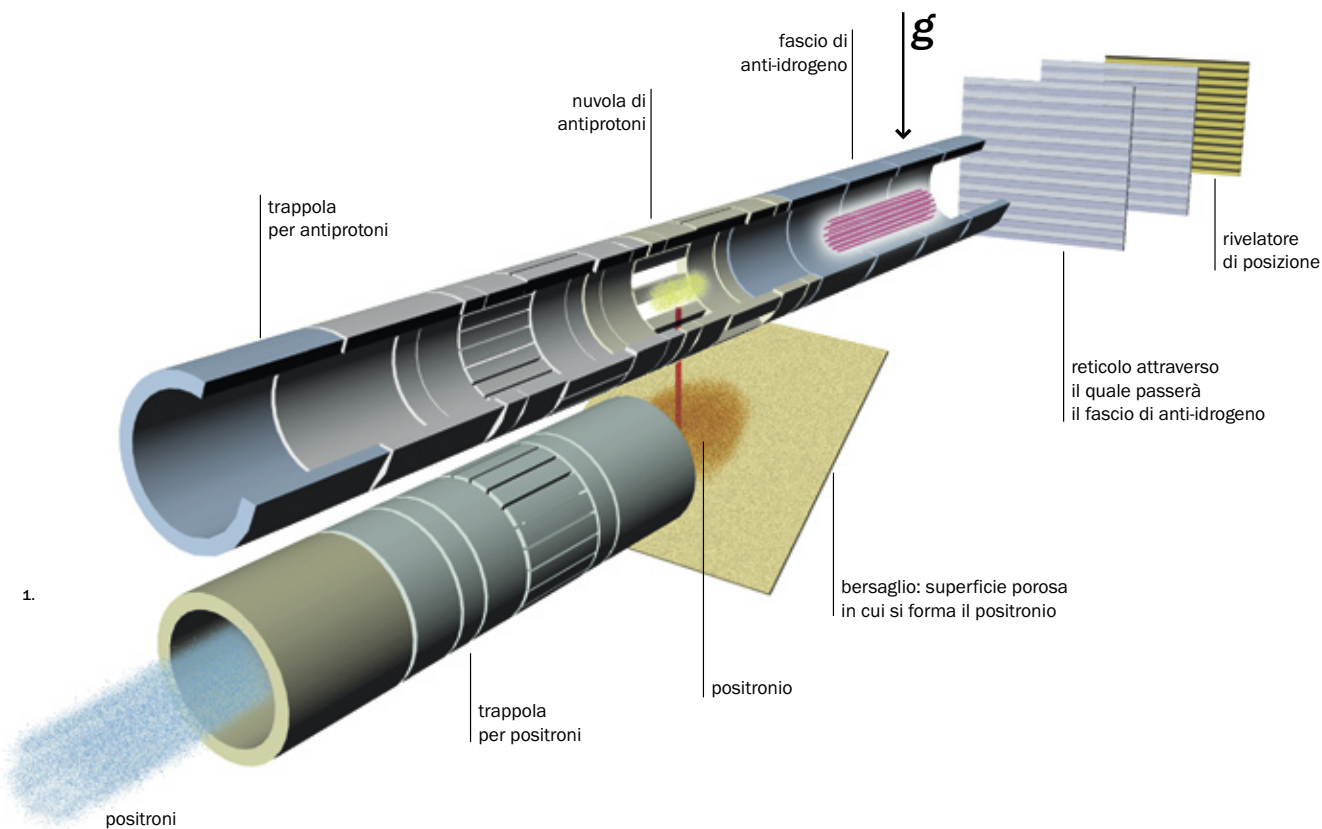
www.infn.it/notiziario/not13/esperimento.html

[as]
Come cade
l'antimateria

1. Schema delle trappole per antiprotoni e positroni nell'esperimento Aegis e dell'apparato per la misura della gravità.

Tutti i corpi, qualunque sia la loro forma o la loro composizione chimica, sono attratti dalla Terra allo stesso modo e cadono con la stessa accelerazione $g = 9,8 \text{ m/s}^2$ (circa). Questo lo capì già Galileo, 400 anni fa, e Einstein fece di questa osservazione il pilastro su cui fondare la sua teoria della gravitazione, detta *Relatività Generale*. Dunque, secondo Einstein, anche atomi fatti di antimateria dovrebbero cadere verso la Terra con la stessa accelerazione g dei corpi materiali. Ma nessuno finora ha mai realizzato un esperimento per verificare direttamente questo fatto. Il motivo principale è che la forza gravitazionale su singoli atomi (o antiatomi) è molto molto debole e, per misurarne gli effetti, occorrerebbe mantenere gli antiatomi in interazione con la Terra per tempi estremamente lunghi, in apparati sperimentali grandi più di intere città! L'esperimento diventa invece fattibile quando gli antiatomi sono molto freddi (cioè quasi fermi), come quelli prodotti da Athena. Il successore di Athena sarà il nuovo esperimento *Aegis*, in preparazione al Cern di Ginevra, che dovrebbe entrare in funzione tra il 2010 e il 2011 e che coinvolgerà vari ricercatori dell'Infn oltre a numerosi collaboratori stranieri. *Aegis* produrrà antidrogeno ancora più freddo di quello di Athena, con

una temperatura di 0,1 gradi sopra lo zero assoluto, e misurerà la caduta degli antiatomi dopo un metro di percorso. Gli antiprotoni saranno raffreddati nella trappola superiore (vd. fig. 1). Una nuvola densa di positroni verrà fatta incidere sul bersaglio posta sotto la trappola e qui si formerà il *positronio* (un elettrone e un positrone legati). Il positronio sarà poi investito da un fascio di luce laser che lo porterà in uno stato eccitato. Ora, il positronio eccitato, attraversando la nuvola di antiprotoni freddi, ha una grande probabilità di formare dell'anti-idrogeno freddo. Occorre un sistema piuttosto sofisticato per misurare la caduta di questi atomi di anti-idrogeno: un fascio orizzontale passerà attraverso due grate materiali con scanalature orizzontali seguite da un rivelatore di posizione, con cui si misurerà la posizione verticale di arrivo di questi antiatomi. Alcuni arriveranno sul rivelatore, altri no perché saranno fermati dalla grata stessa. La distribuzione delle posizioni verticali degli atomi di anti-idrogeno che annichilano sul rivelatore mostrerà una struttura di "luce e ombra" come quella prodotta da una tapparella semichiusa attraversata dai raggi del Sole. È studiando le caratteristiche di questa struttura che si otterrà per la prima volta il valore di g per l'antimateria.



Da Star Trek a Dan Brown

L'antimateria nell'immaginario fantascientifico.

di Fabio Pagan

Il 6 gennaio 1996 il quotidiano francese *Libération* usciva con una prima pagina singolare, ispirata al mondo dei supereroi dei fumetti: un grande disegno a colori con una specie di Superman aggrappato a un meteorite. Titolo: *Premiers pas dans l'antimonde*. In didascalia si ricordava che nel settembre precedente, al Cern, erano stati fabbricati i primi antiatomi di idrogeno (due intere pagine del giornale erano infatti dedicate all'esperimento, con una lunga intervista all'italiano Mario Macrì) e che oggi, sulla Terra, non esistono più particelle di antimateria: "Salvo – veniva precisato – nelle teorie dei fisici e nella fantasia degli autori di *science fiction*".

Una specie di tributo all'immaginario narrativo che ha sempre circondato l'antimateria. Ma, da quando Paul A.M. Dirac aveva previsto nella sua celebre equazione l'esistenza dell'antielettrone e aveva ricevuto nel 1933 il premio Nobel prospettando l'esistenza di un anti-universo, ci vollero una decina d'anni perché l'antimateria cominciasse a far capolino nei *pulp magazine*, le riviste da edicola dell'epoca. Gli storici della fantascienza attribuiscono a Jack Williamson – uno dei maestri dell'avventura spaziale, scomparso lo scorso novembre quasi centenario – il merito di aver usato per primo il concetto di antimateria nelle sue *Seetee stories*, apparse a partire dal 1942 sulla rivista *Astounding Science Fiction* con lo pseudonimo di Will Stewart (in Italia vennero pubblicate solo nel 1974 in un volume intitolato *Il millennio dell'antimateria*). Il termine *Seetee* è la trascrizione fonetica di Ct, ovvero *contraterrene*: così l'antimateria veniva spesso chiamata dopo che Carl Anderson (nel 1932) aveva identificato il positrone nella radiazione cosmica. Qualche altro esempio?



Alfred E. van Vogt (*The Storm*, 1943) parla di una tempesta cosmica innescata dallo scontro tra una nube di gas di materia ordinaria e una nube di antimateria. James Blish (*Beep*, 1954) si ispira a Dirac per un trasmettitore capace di collegare istantaneamente ogni punto della galassia grazie all'impiego di elettroni e positroni. Lo scrittore sovietico Anatolij Dneprov abbina universi paralleli e antimateria dapprima in un racconto (*La mummia purpurea*, 1961) e successivamente in un romanzo (*Operazione antimateria*, 1965). Larry Niven (*Flatlander*, 1967) racconta l'esplorazione di un oggetto di antimateria ai confini del Cosmo. Bob Shaw (*A Wreath of Stars*, 1976) immagina un intero mondo fatto di antineutrini. Fino al sofisticato *Ripples in the Dirac Sea* (1988), che ha fatto vincere il premio Nebula al suo autore, Geoffrey A. Landis, scrittore, inventore e ingegnere della Nasa, impegnato nelle missioni di esplorazione marziana. Tuttavia non c'è dubbio che l'antimateria, nella fantascienza, resta legata soprattutto alla saga televisiva e cinematografica di *Star Trek*. Parafrasando Shakespeare, l'antimateria è infatti la materia di cui sono fatti i sogni di Star Trek. Senza l'antimateria, non sarebbero possibili – come veniva detto dalla voce fuori campo

all'inizio del primo film della serie – “le crociere della nave stellare Enterprise: la sua missione è quella di esplorare nuovi mondi, alla ricerca di nuove forme di vita e di nuove civiltà, e di giungere arditamente dove nessun uomo è mai giunto prima d'ora”. Ma come far correre l'Enterprise a velocità superiore a quella della luce? Gene Roddenberry (il “papà” di Star Trek) decise di dotarla dell'ormai mitico *warp drive*, il motore di curvatura capace di contrarre lo spazio davanti all'astronave e di dilatarlo dopo il suo passaggio. La distorsione spazio-temporale consente di creare una scorciatoia tra il punto di partenza e quello di arrivo, catapultando l'Enterprise da un angolo all'altro della galassia. L'energia per la manovra è ottenuta attraverso l'annichilazione di atomi di deuterio e antideuterio, ingabbiati da potenti campi magnetici. La camera in cui avviene la reazione è costruita attorno a una rete di cristalli di litio, che controllano l'annichilazione senza interagire con l'antimateria. Il successo popolare di Star Trek fu tale che – sulla spinta delle richieste di migliaia di *fan* – la Nasa decise di battezzare Enterprise il suo primo Shuttle, realizzato non per andare in orbita ma per sperimentare le fasi di rientro e di

atterraggio, sganciato in quota da un Boeing 747. La presentazione di Enterprise, nel settembre del 1976, negli stabilimenti Rockwell di Palmdale, California, fu accompagnata dalle note della fanfara di Star Trek, ospiti d'onore Roddenberry e gli attori della saga. Lawrence Krauss, fisico e cosmologo alla Case Western Reserve University di Cleveland, Ohio, dedica al motore di curvatura un capitolo del suo libro *La fisica di Star Trek*, uscito in Italia nel 1996. Divertendosi a smontarne ogni possibilità di realizzazione anche in quel XXIII secolo in cui sono ambientate le avventure del comandante Kirk e del capitano Picard, del vulcaniano Spock e dei malvagi Klingon. Eppure Krauss – notissimo divulgatore scientifico, collaboratore del *New York Times* e di *Scientific American* – non rinnega la sua passione per Star Trek e per la fantascienza in generale, considerandola anzi uno strumento ideale per spiegare la scienza. Mi raccontò, la prima volta che lo incontrai al Centro Internazionale di Fisica Teorica di Trieste: “Tutto ebbe inizio quando seppi che una mostra sull'Enterprise di Star Trek, al Museo dello Spazio di Washington, aveva avuto più successo dell'esposizione dei veicoli spaziali reali. Mi dissi allora: quale via migliore per parlare di fisica alla



c.



d.

gente digiuna di scienza? Così decisi di usare le storie di Star Trek come una specie di laboratorio in cui esplorare la fisica dell'Universo”. Tutt'altro discorso per *Angeli e demoni*, il romanzo che Dan Brown pubblicò nel 2000, prima del *Codice da Vinci*, ma apparso in Italia solo nel 2004, sulla scia del successo planetario del *Codice*. Thriller scientifico-religioso su un'antica setta (gli Illuminati) che vuole distruggere il Vaticano con una bomba di antimateria. La cosa più curiosa e intrigante è che l'antimateria è stata rubata al Cern (descritto nel libro in termini piuttosto fantasiosi), dove era stata ottenuta di nascosto da un bizzarro fisico-sacerdote che voleva impiegarla per rifare in laboratorio il Big Bang con l'obiettivo di dimostrare la plausibilità della Genesi e quindi l'esistenza di Dio. Un *pastiche* divertente ma sconclusionato,

in cui l'antimateria acquista una dimensione metafisica ed esoterica. Al Cern, comunque, si è deciso di stare al gioco. L'ufficio stampa ha idealmente ringraziato Dan Brown per il picco di visite registrato dopo l'uscita del romanzo, ma non ha trascurato di fare le pulci agli errori scientifici presenti nelle sue pagine. Il più macroscopico è forse quello di aver attribuito a Lhc la capacità di fabbricare antimateria, la quale comunque – con buona pace dell'autore – non potrà mai servire a produrre energia. Ora al Cern attendono con curiosità (e un filo di preoccupazione) il film attualmente in fase di realizzazione, firmato dallo stesso regista del *Codice da Vinci*, Ron Howard, e interpretato ancora da Tom Hanks nei panni di Robert Langdon, docente di simbologia a Harvard. Dovrebbe arrivare sui nostri schermi a dicembre.

b.
L'autore davanti allo Shuttle sperimentale Enterprise montato su un Boeing 747 cargo, nel giugno del 1983 al Salone Aerospaziale di Parigi.

c.
Il cast del telefilm Star Trek davanti allo shuttle Enterprise.

d.
Lawrence Krauss, autore del libro La Fisica di Star Trek, stringe in mano un modellino dell'Enterprise.

b.



Biografia

Fabio Pagan, biologo di formazione e giornalista scientifico di professione, è vicedirettore e docente del Master in Comunicazione della Scienza della

Sissa e conduttore del magazine quotidiano Rai-Radio3 Scienza.

Link sul web

www.fantascienza.com/catalogo

http://en.wikipedia.org/wiki/Star_trek

www.phys.cwru.edu/~krauss

www.danbrown.com/secrets/bizarre_facts/angels_demons.html

<http://public.web.cern.ch/public/en/Spotlight/SpotlightAandD-en.html>



Antiparticelle cosmiche

Satelliti alla ricerca dell’antimateria primordiale.

di Piero Spillantini

Pezzettini di mondi lontani nello spazio e nel tempo, i raggi cosmici sono messaggeri degli stessi fenomeni che li hanno creati e accelerati, in quelle zone remote e in quel tempo passato. Le leggi fondamentali della fisica affermano che il mondo materiale che ci circonda è il prodotto di una “deformazione” dell’Universo, che all’inizio della sua storia doveva essere molto diverso: rigorosamente simmetrico nel contenuto di particelle e antiparticelle, di materia e di antimateria. I fisici hanno chiamato questa deformazione violazione di CP, ossia dell’applicazione simultanea della simmetria di carica C (scambio particelle-antiparticelle) e della simmetria di parità P (riflessione spaziale) (vd. “CP, la simmetria imperfetta” p. 21, ndr). Questa simmetria iniziale presuppone che possa esistere, da qualche parte, un “riflesso” del nostro mondo fatto, invece che della materia di cui abbiamo comune esperienza, di sola antimateria.

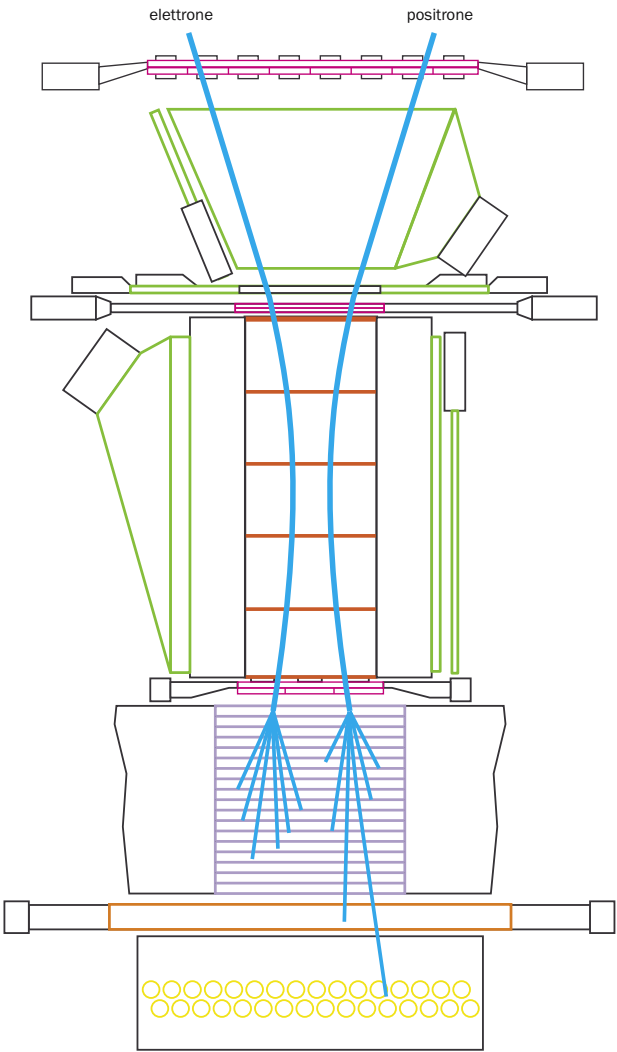
Dove sono, se esistono, gli “antimondi”? Quanti sono, e quanto sono lontani? Solo i pezzettini di antimateria presenti nei raggi cosmici possono dare una risposta, ma prima di arrivare a noi devono viaggiare a lungo e subire molte traversie: ne arrivano così pochi da essere confusi con quelli prodotti dalle interazioni tra i pezzettini di materia. Ecco perché è così difficile rivellarli, identificarli e contarli. Gli apparati devono essere grandi e complessi e devono intercettare i raggi cosmici direttamente nello Spazio, prima che interagiscano con l’atmosfera terrestre e divengano irrinconoscibili. Dall’epica impresa dello scienziato tedesco Victor Hess, che nel 1912 portò un rivelatore nell’alta atmosfera su un pallone aerostatico, molte altre imprese sperimentali hanno permesso di accumulare una grande quantità di dati. Se Hess poté dimostrare l’origine cosmica della misteriosa radiazione che si manifestava nell’ambiente, oggi la curiosità degli scienziati

si rivolge alla conoscenza dettagliata della sua natura e all’individuazione delle sue sorgenti. A questo scopo, anche se solo recentemente, si sono realizzati strumenti per satelliti in orbita, tali da rivelare i raggi cosmici prima che l’interazione con l’atmosfera terrestre ne modifichi la natura originaria. Uno di questi satelliti sta orbitando intorno alla Terra, trasmettendo dati dal giugno del 2006. Ha un nome accattivante, Pamela, e per identificare le antiparticelle è dotato di sistemi di rivelatori che raggiungono raffinatezze mai ottenute prima: un tracciatore elettronico, che rivela i punti di passaggio delle particelle con la precisione di 3 millesimi di millimetro, e un sistema di assorbimento dei raggi cosmici (il calorimetro), che fornisce un’immagine, con la risoluzione del millimetro, dell’interazione che il raggio cosmico subisce all’interno del rivelatore. Pamela è in grado di determinare con grande precisione la composizione e l’energia dei raggi cosmici: elettroni, positroni e antiprotoni, nuclei

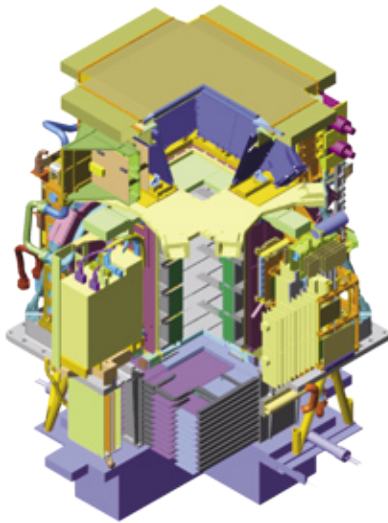
a. La materia non è distribuita uniformemente nell’Universo, ma raggruppata in stringhe e nodi separati da enormi spazi vuoti, forse residui di regioni dove si è avuta annichilazione materia-antimateria. Questa immagine del Cosmo disseminato di galassie è stata ripresa dal telescopio spaziale Hubble tra il 2003 e il 2004.

b. A sinistra, sezione di Pamela: sono rappresentate le tracce di un elettrone e di un positrone. Una particella attraversa tutto il rivelatore senza arrestarsi, l’altra si annichila nel calorimetro convertendo la sua massa in energia. A destra, uno spaccato della configurazione finale del rivelatore Pamela.

b.



- Spettrometro magnetico:** incurva le particelle cariche in base al segno della carica e ne registra la traiettoria. In questo modo si ottiene il segno della carica e si misura la quantità di moto della particella.
- Calorimetro elettromagnetico:** misura l’energia di elettroni e positroni e l’energia rilasciata da altre particelle.
- Sistema per il tempo di volo:** misura principalmente la velocità delle particelle, per poterne determinare la massa.
- Sistema di anticoincidenza:** permette di escludere le particelle che entrano lateralmente nel telescopio.
- Scintillatore inferiore:** completa la misura di energia del calorimetro e abilita il rivelatore di neutroni.
- Rivelatore di neutroni:** rivela i neutroni prodotti nel calorimetro.



[as] Uno su un miliardo



Le osservazioni condotte negli ultimi decenni hanno messo in evidenza aspetti affascinanti e misteriosi sulla struttura dell'Universo. Tra questi, in particolare, appaiono decisivi per la comprensione delle origini e dell'evoluzione del Cosmo quelli che incidono sul bilancio globale di materia ed energia, come l'apparente scomparsa della antimateria primordiale e la presenza della materia oscura. Per dare risposta a interrogativi di questa natura, nel 1995 è stato proposto il programma Ams (*Antimatter Matter Spectrometer*), realizzato da una collaborazione internazionale nella quale l'Italia, con Infn e Asi (Agenzia Spaziale Italiana), ha un ruolo primario. Il sofisticato spettrometro superconduttore Ams-02, che entro il 2010 sarà installato sulla

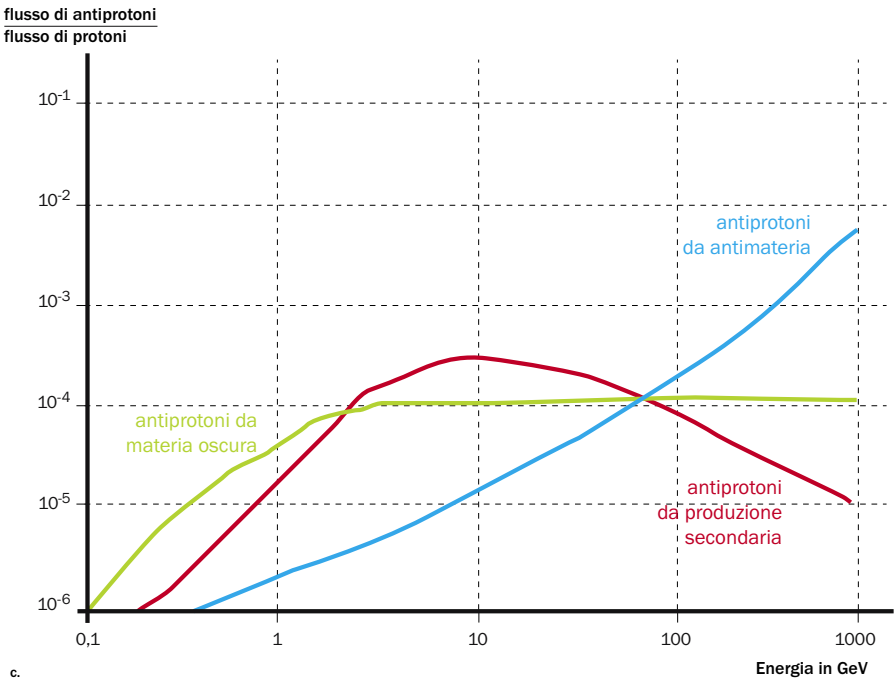
Stazione Spaziale Internazionale (Iss), pesa 7,5 tonnellate ed è dotato di un potente magnete superconduttore che avrà il compito di individuare eventuali antinuclei su oltre un miliardo di nuclei di fondo. Il magnete superconduttore di Ams-02 è il primo del suo genere a essere portato nello Spazio: opera a una temperatura di 1,4 gradi sopra lo zero assoluto (pari a $-271,7\text{ }^{\circ}\text{C}$) e produce al suo interno un campo magnetico di 1 tesla, circa 20.000 volte superiore al campo magnetico terrestre. L'esperimento sarà completato e inviato al *Kennedy Space Center* della Nasa agli inizi del 2009: sarà quello il momento giusto per dare il via al conto alla rovescia. [Roberto Battiston]

1. Illustrazione della Stazione Spaziale Internazionale, in orbita a 400 chilometri dalla Terra. Il rivelatore Ams è rappresentato nella posizione che occuperà a partire dal 2010. Oggi la Stazione Spaziale Internazionale è visibile dalla Terra e di notte è l'oggetto più brillante del cielo, dopo la Luna.

Biografia
Roberto Battiston è professore di Fisica Generale presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Perugia. È responsabile nazionale dell'esperimento Infn Ams.

leggeri, e di rivelare eventuali antinuclei, in un intervallo di energia molto esteso: da alcune decine di milioni di elettronvolt ad alcune centinaia di miliardi di elettronvolt. La rivelazione accertata anche di un solo antinucleo sarebbe la testimonianza inconfutabile dell'esistenza di antimateria in qualche remota regione dell'Universo. La probabilità che l'antinucleo si formi dall'interazione di particelle, infatti, è praticamente nulla: l'antinucleo può essere creato solo dentro una antistella. A sua volta l'antistella può formarsi solo in un sistema di ammassi di antigalassie, la scala alla quale la gravità può formare i corpi celesti. La presenza dell'antinucleo, quindi, assicurerebbe che l'antimateria accertata

è in quantità cosmologica, ossia sufficiente a tenere insieme gli ammassi di antigalassie in cui si è accesa la stella che ha prodotto l'antinucleo. Come accade per molti degli esperimenti che operano al confine delle possibilità tecniche, oltre che umane e sociali, la sperimentazione dà risposte anche a problemi fondamentali, non direttamente collegati allo scopo principale dell'esperimento. La ricerca di pezzetti di antimateria da antimondi lontani, infatti, spinge i ricercatori a indagare nel dettaglio il fondo di antimateria, fatto di positroni e antiprotoni, prodotto dalla materia ordinaria che ci circonda. Lo studio dettagliato delle particelle cosmiche che raggiungono i rivelatori offre un'altra occasione agli scienziati: rivelare la presenza e le caratteristiche della materia



c.

oscura nell'Universo. Non ne conosciamo ancora la natura, ma sappiamo che la sua massa complessiva è circa l'85% di tutta la materia esistente (vd. Asimmetrie 4, ndr). E sappiamo che la sua presenza origina un'attrazione gravitazionale tale da tenere insieme le grandi strutture del Cosmo, come le galassie e gli ammassi di galassie. La materia oscura è tra le sorgenti possibili di particelle di antimateria: un eccesso di antiparticelle intrappolate nella nostra galassia sarebbe una inequivocabile testimonianza della presenza di materia oscura

e lo studio di queste particelle potrebbe fornire indizi davvero preziosi per la sua comprensione. Promuovendo e guidando esperimenti per la ricerca di antimateria nei raggi cosmici a bordo di palloni stratosferici, l'Italia ha un ruolo trainante in questo percorso. È inoltre protagonista nello sviluppo di nuovi tipi di rivelatori su satelliti e nel perseguire l'obiettivo di portare questo tipo di sperimentazione nello Spazio. La paziente costruzione degli strumenti e la tenacia nel perseguire l'obiettivo sono stati per questa ricerca la chiave del successo di oggi.

c. Andamento qualitativo previsto del rapporto tra i flussi di antiprotoni e di protoni in funzione dell'energia cinetica. In rosso, il caso di antiprotoni prodotti solo dall'interazione dei protoni con la materia interstellare (produzione secondaria). L'andamento costante, in verde, rappresenta il caso di produzione diretta di coppie protone-antiprotone da una sorgente, per esempio da materia oscura. Antiprotoni provenienti da regioni di antimateria nell'Universo contribuirebbero con andamento crescente (curva blu), poiché la possibilità che penetrino la Galassia aumenta con l'energia.

Biografia

Piero Spillantini è professore all'Università di Firenze e consigliere scientifico all'ambasciata d'Italia a Mosca. È l'iniziatore dell'esperimento Pamela.

Link sul web

www.scienzagiovane.unibo.it/antimateria.html

<http://ulisse.sissa.it/chiediAULisse/domanda/2002/Ucau020923d006>

<http://ulisse.sissa.it/chiediAULisse/domanda/2004/Ucau041102d002>

<http://ulisse.sissa.it/chiediAULisse/domanda/2008/Ucau080206d001>

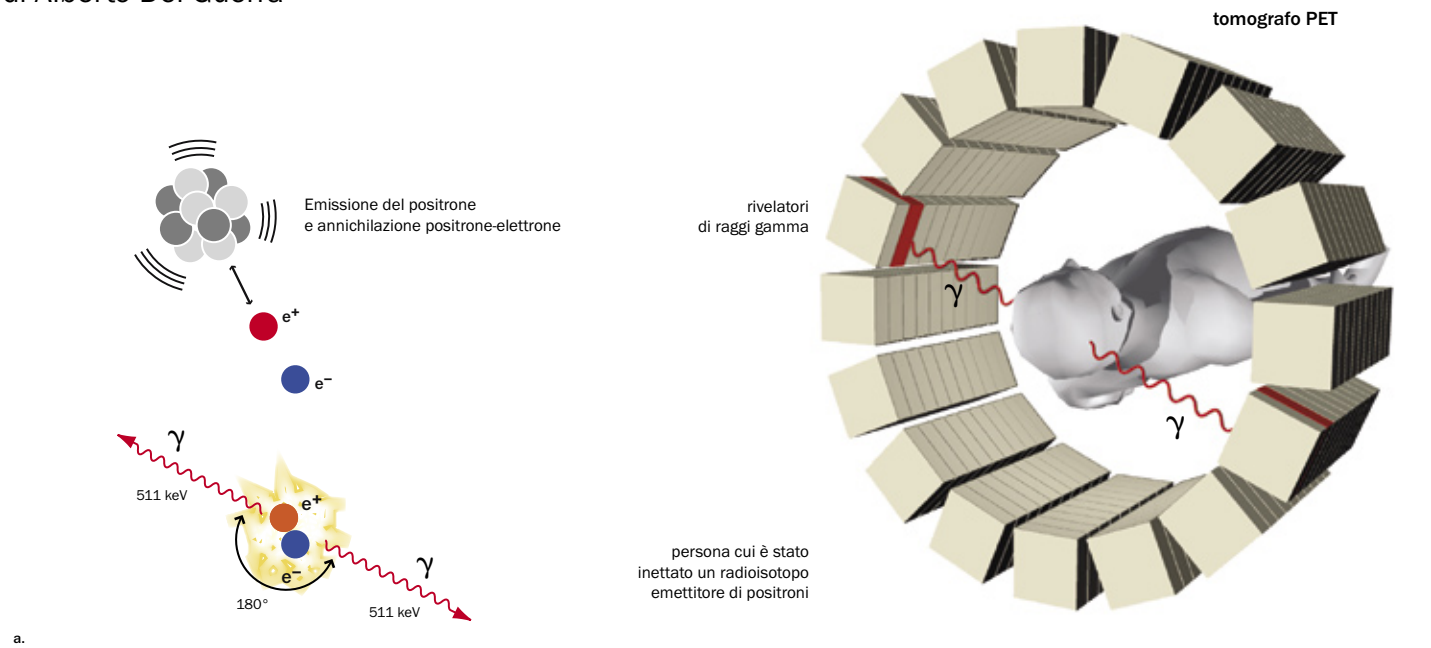
<http://pamela.roma2.infn.it/>

<http://ams.pg.infn.it/>

Antimateria al lavoro per la salute

Positroni per ottenere immagini dettagliate del corpo umano.

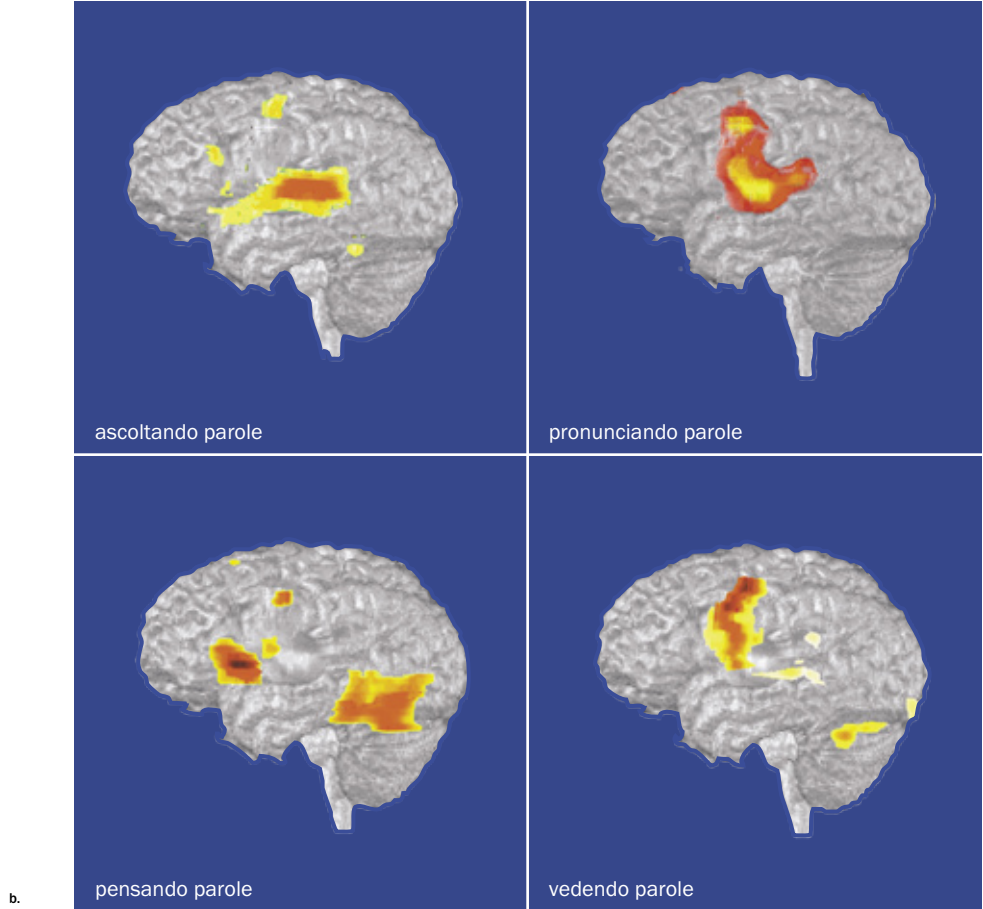
di Alberto Del Guerra



La Pet è soprattutto una tecnica di indagine medica. Il nome è l'acronimo inglese di *Tomografia a Emissione di Positroni*: un metodo non invasivo per condurre studi di fisiologia e fisiopatologia sfruttando l'antimateria, che si è rivelato di grande utilità nella diagnosi dei tumori. Diversamente dalla più comune Tac (*Tomografia Assiale Computerizzata*), oltre a individuare eventuali anomalie, la Pet è in grado di fornire importanti indizi sulla loro natura, registrando alcune caratteristiche della loro attività. La Pet si basa sull'uso di *radio-traccianti*, sostanze che introdotte in quantità minimali si integrano perfettamente nel sistema biologico, senza perturbarlo, riproducendo il processo fisiologico o patologico che si vuole studiare. Queste sostanze sono ottime “spie” di quanto sta accadendo ai tessuti in cui si inseriscono,

perché per essere rintracciabili, sono marcate con atomi radioattivi i cui nuclei, instabili, emettono radiazioni rivelabili dall'esterno. I più usati sono isotopi del carbonio, dell'azoto, dell'ossigeno e del fluoro (^{11}C , ^{13}N , ^{15}O e ^{18}F), che decadono spontaneamente in nuclei stabili emettendo positroni (*decadimento β^+*), le antiparticelle degli elettroni. Anche il positrone, come tutte le particelle, quando interagisce con la sua antiparticella si annichila: la Pet sfrutta proprio il processo di annichilazione. Quando il radio-tracciante decade ed emette un positrone, questo interagisce con un elettrone della sostanza biologica di cui è entrato a far parte e si annichila; al posto dell'elettrone e del positrone sono generati due fotoni, ciascuno di energia equivalente alla massa delle particelle originarie, pari a 511 keV. I fotoni devono essere emessi lungo la stessa direzione e in senso

a. Il principio fisico della Pet. Nel paziente viene iniettato un radiofarmaco; l'atomo instabile che vi è legato decade, emettendo un positrone. Immediatamente dopo, il positrone emesso urta con un elettrone della materia cellulare: particella e antiparticella si annichilano emettendo due fotoni gamma di energia pari alle masse scomparse, 511 keV. I due fotoni, che per la conservazione della quantità di moto sono emessi a 180° l'uno dall'altro, sono rivelati dal tomografo Pet (a destra) e definiscono così la direzione lungo cui si trova il punto in cui sono stati generati.



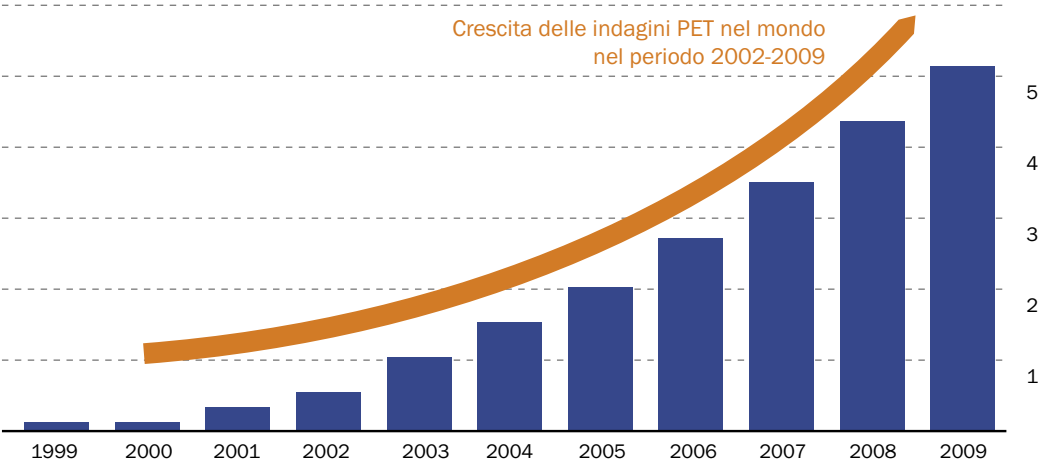
b. Le nuove frontiere delle applicazioni cliniche della Pet riguardano gli studi in campo neurologico, in particolare sulla malattia di Alzheimer e sul morbo di Parkinson. Nella figura sono rappresentate le immagini ottenute tramite Pet di un cervello umano nell'atto di ascoltare, pronunciare, pensare o vedere delle parole.

contrario, cioè a 180° tra loro, in modo che la somma delle due quantità di moto – di verso contrario – sia nulla come nel momento dell'interazione. I due fotoni vengono rivelati con cristalli di materiale scintillatore, il cui segnale è visto da “occhi” fotomoltiplicatori. Quando due rivelatori registrano in coincidenza temporale due fotoni in posizioni diametralmente opposte, la linea che congiunge i rivelatori definisce una direzione nello spazio, detta “linea di volo”, lungo la quale si deve trovare il punto in cui è avvenuta l'annichilazione, e quindi il radioisotopo. Ruotando i rivelatori attorno al paziente o, come si verifica più comunemente, disponendo di un anello di rivelatori attorno al paziente, si possono ricostruire tutte le “linee di volo” e, con

tecniche di ricostruzione tomografica, la distribuzione spaziale della sorgente. L'impiego dei positroni nelle indagini cerebrali fu proposto per la prima volta nel 1951. Il primo prototipo per la Pet era costituito da due semplici rivelatori in grado di ruotare attorno alla testa del paziente; fu costruito nel 1953 da G.L. Brownell e W.H. Sweet a Boston, circa 20 anni prima dell'invenzione della tecnica che ha rivoluzionato la radiologia diagnostica, la Tac. A partire dagli anni '80, grazie allo sviluppo delle metodologie di ricostruzione delle immagini tomografiche e la diffusione degli acceleratori per la produzione dei radioisotopi necessari, la Pet è divenuta una tecnica diagnostica molto sofisticata. Dapprima impiegata solo in centri di alta tecnologia, è oggi un metodo di indagine

indispensabile e largamente utilizzato in oncologia. Il grande successo è dovuto alle alte potenzialità di questa tecnica nell'identificazione dei tumori e delle metastasi all'interno del corpo umano, mediante il radiotracciante ^{18}F -FDG (^{18}F -FluoroDesossiGlucosio). Il ^{18}F -FDG segue il percorso del glucosio all'interno del corpo umano, quindi si accumula nelle cellule a più elevato metabolismo, come le cellule tumorali. Questo permette di ricostruire un'immagine quantitativa e tridimensionale delle zone tumorali, che offre la possibilità di una diagnosi oncologica più accurata e di elevato valore prognostico. La Pet è utilizzata in campo clinico anche in cardiologia e in neurologia, ma la sua applicabilità attuale è prevalentemente in

Indagini PET effettuate nel mondo (in milioni)



c.

oncologia e sempre più in combinazione con la Tac (Tac-Pet), così da fornire indicazioni quantitative sulle eventuali lesioni tumorali. D'altra parte, gli sviluppi ottenuti nell'ultimo decennio nell'imaging molecolare hanno permesso l'applicazione della Pet allo studio delle malattie neurodegenerative, quali l'Alzheimer e il Parkinson. Per la diagnosi e la valutazione clinica dell'Alzheimer, in particolare, si fa normalmente uso del tracciante ¹⁸F-FDG, monitorando il metabolismo nelle diverse zone del cervello e confrontandolo localmente con quello di un individuo normale. Più recentemente, la messa a punto di traccianti specifici basati sull'uso del carbonio 11 (¹¹C), e in particolare del ¹¹C-PIB (noto come il *composto B di Pittsburgh*), ha permesso per la prima volta l'imaging diretto in vivo delle placche amiloidee, ritenute responsabili dell'insorgere dell'Alzheimer. La stessa tecnica potrà essere utilizzata per la diagnosi e il controllo della malattia trattata con una terapia anti-amiloidea. Per lo studio del Parkinson, invece, il tracciante d'elezione è il ¹⁸F-Fluorodopa, la cui localizzazione nei centri recettori dopaminergici avviene in maniera quantitativa differente negli individui sani e nei pazienti affetti da morbo di Parkinson. Lo sviluppo tecnologico della Pet è rivolto soprattutto alla costruzione di macchine per indagini precliniche, alla messa a punto di nuovi farmaci e di modelli di malattie su cavia. In questo ambito, si stanno sviluppando prototipi ad altissima risoluzione spaziale in combinazione con macchine di risonanza nucleare ad alto campo. In questo caso l'informazione anatomica ad altissima risoluzione, quale quella della risonanza, potrebbe essere acquisita simultaneamente all'informazione funzionale fornita dalla Pet, aprendo quindi nuovi affascinanti campi di ricerca per l'oncologia e la neurologia, con l'ulteriore vantaggio di una riduzione di dose al paziente da radiazioni ionizzanti rispetto agli attuali sistemi Tac-Pet. Oltre a essere un importante mezzo di indagine clinica, la Pet è dunque un'area di ricerca affascinante di grande valenza interdisciplinare per la fisica medica.

Biografia
Alberto Del Guerra è professore ordinario di Fisica e direttore della Scuola di Specializzazione in Fisica Sanitaria all'Università di Pisa.

Svolge attività di ricerca in fisica medica, in particolare sulle tecniche strumentali dell'imaging molecolare.

Link sul web
<http://www.explorasciencenow.rai.it/DettVideo.aspx?IDVideo=18>
http://depts.washington.edu/nucmed/IRL/pet_intro/

c.
La crescita delle installazioni Pet nel mondo negli ultimi 10 anni.

[as] tecnologia e ricerca

Positroni “medicinali”.

Intervista di Francesca Scianitti

a.

L'FDG è il farmaco più richiesto dagli ospedali per le indagini diagnostiche Pet. L'orario stabilito per la consegna a Nizza è fissato per l'indomani mattina alle otto. Enrico De Maria, *site manager* dell'azienda di Ivrea e amministratore delegato della divisione italiana della AAA, mi spiega che per arrivare in tempo a Nizza il farmaco dovrà essere prodotto nel corso della notte ed essere consegnato al corriere entro le tre del mattino successivo. Il controllo della linea di produzione proseguirà quindi per l'intero pomeriggio, fino alle undici, quando le macchine saranno messe in funzione e i tecnici incaricati di seguire la lavorazione si metteranno all'opera. A quel punto, io avrò già lasciato la AAA da parecchie ore e solo il giorno seguente avrò modo di sapere che i pazienti in attesa all'ospedale di Nizza sono stati regolarmente sottoposti all'esame previsto. Il nome, in forma di acronimo, nasconde moltissimo: AAA significa *Advanced Accelerator Applications* e rappresenta un chiaro tributo alle origini dell'azienda. La AAA nasce infatti nel 2002 con l'idea di sfruttare un brevetto mondiale sviluppato al Cern, il centro europeo che ospita il più grande e potente acceleratore di particelle del mondo, da Carlo Rubbia e da Stefano Buono, il fondatore della società. Il brevetto permette di produrre i più comuni radioisotopi per la terapia del cancro utilizzando gli acceleratori di particelle. “Questo è stato solo l'inizio – mi spiega Enrico De Maria – il brevetto era depositato al Cern, di fatto inutilizzato, e fino a quel momento i radiofarmaci per la medicina nucleare erano prodotti usando i reattori, il che non garantiva la necessaria praticità agli ospedali. Il brevetto

del Cern rappresentava quindi una sicura opportunità di sviluppo di tecniche più agili ed efficienti per la loro produzione. In seguito, però, anche a causa della sempre maggiore diffusione della tecnologia Pet negli ospedali, abbiamo deciso di dedicarci alla diagnostica più che alla terapia, con la commercializzazione dell'FDG”. Il cuore pulsante delle attività della AAA è un piccolo ciclotrone, un acceleratore di particelle in grado di accelerare protoni a energie tali da trasformare opportunamente gli atomi a livello del nucleo atomico. Bombardando con i protoni accelerati un bersaglio di acqua arricchita – composta per il 99% da ossigeno 18 invece che dal comune ossigeno 16 dell'acqua normale – è possibile produrre fluoro 18, un isotopo instabile che decade emettendo particelle di antimateria, i positroni, e che per questo può essere utilizzato come tracciante per i farmaci. È l'emissione di positroni a garantire l'effetto del fluoro 18 e quindi della molecola di FDG alla quale questo è legato: i positroni, infatti, si annichilano quando interagiscono con la materia cellulare; nel processo sono emessi fotoni che, una volta rivelati dall'esterno, permettono di ricostruire un'immagine della zona colpita da patologia, non semplicemente statica come in una Tac, ma in piena attività metabolica. Il ciclotrone da 16 MeV è ospitato in una sala grande non più di venti metri quadrati. “Le caratteristiche fondamentali del nostro ciclotrone sono l'affidabilità e la flessibilità – mi spiega Enrico De Maria – non è necessario che offra prestazioni straordinarie come richiesto agli acceleratori dedicati alla ricerca fondamentale.

a.
Le bobine del ciclotrone, il cuore della AAA.



b.

Tuttavia, per rispondere in tempo reale alle richieste degli ospedali deve poter garantire di funzionare con continuità”. Trascorse due ore dalla fine della produzione la quantità iniziale di fluoro 18 è diventata circa la metà, mentre la restante parte è decaduta nell’atomo stabile, non più radioattivo. Per questo la produzione non comporta la giacenza di scorie: i residui della lavorazione sono riversati in vasche d’acqua, dove riposano per alcuni giorni in modo da garantire la completa inattività. “Il breve tempo di dimezzamento rappresenta però anche una sfida e impone un’organizzazione molto flessibile del lavoro – mi spiega Enrico De Maria – il farmaco, infatti, ha una durata media limitata, di circa dieci ore, superata la quale diviene inutilizzabile. Da Ivrea raggiungiamo senza difficoltà gli ospedali di Torino, Milano, la Spezia e Nizza e ogni ciclo di lavorazione, della durata di due o tre ore, produce fluoro 18 in quantità sufficienti a trattare da trenta fino a cento pazienti”. Ma la AAA non ha come unica attività la produzione e la commercializzazione dell’FDG. Buona parte dei ricavi della vendita servono a finanziare il settore dedicato alla ricerca in medicina nucleare, con studi su nuovi radiotraccianti, nuovi medicinali per la

radioterapia alfa e analisi metaboliche dei farmaci marcati con radioisotopi. “La produzione di fluoro 18 serve anche per le indagini tramite MicroPet su piccoli animali – mi spiegano Azzurra Filannino e Giovanni Tesoriere, giovani ricercatori della AAA – e per condurre studi di cinetica e dinamica del farmaco monitorando i processi di assorbimento, eliminazione e metabolizzazione dei farmaci marcati. Inoltre, portiamo avanti piani di ricerca per lo sviluppo di nuove terapie in campo oncologico, per la diagnosi e lo studio di patologie neurologiche tramite indagini incrociate Tac-Pet, come nel caso del Parkinson, e per la diagnosi di patologie cardiache”. La AAA ha indubbiamente la fisionomia di un’azienda affermata che non ha alcuna intenzione di arrestare la sua crescita. Lo raccontano la giovane età dei suoi dipendenti e l’edificio che la ospita, che prevede non pochi spazi da destinare a futuri sviluppi del settore ricerca. È evidente anche nelle parole dei suoi tecnici e ricercatori – una decina in tutto – che, di formazione molto diversa gli uni dagli altri, mostrano la caratteristica flessibilità di un settore che nasce dall’incontro fortunato tra la ricerca fondamentale e l’applicazione delle tecnologie che in essa hanno avuto origine e sviluppo.

b.

Una ricercatrice lavora alla produzione di FDG all’interno della camera bianca. Il farmaco è prodotto in condizioni di massima sterilità: l’ingresso è dotato di una doppia barriera e gli accessi per il materiale sono protetti da un filtro per l’aria e da irraggiamento UV. Per evitare fughe di radioattività, inoltre, gli ingressi sono mantenuti a pressione più bassa della pressione atmosferica.

Una tomografia galattica

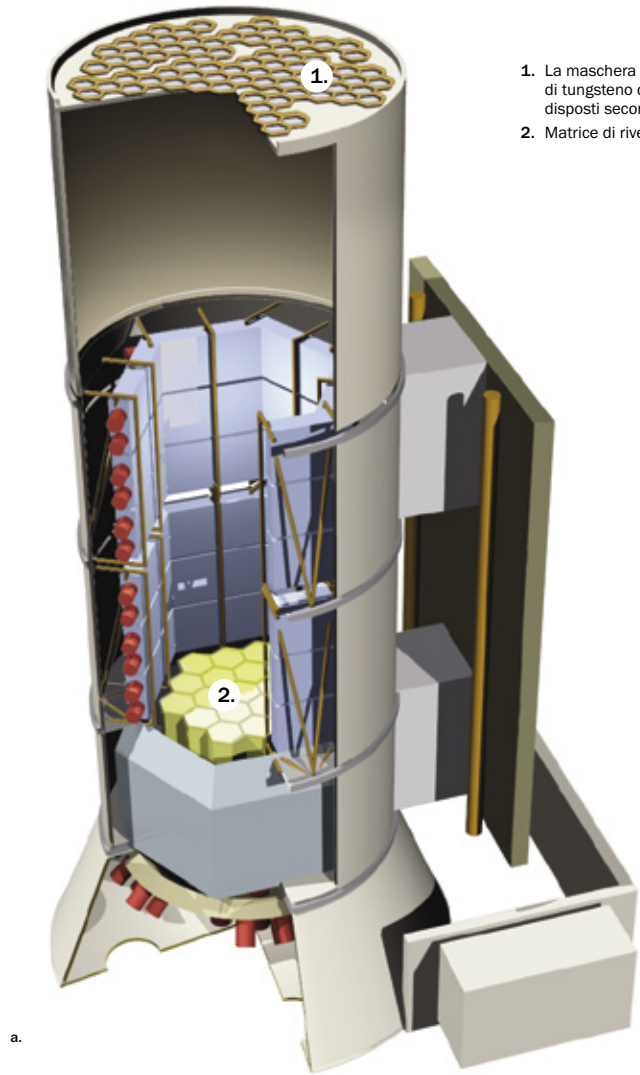
Positroni per una Pet alla Galassia.

di Enrico Costa

Se escludiamo l’elusiva materia oscura, e l’ancora più sfuggente energia oscura, l’Universo, fatto di stelle, galassie, polveri e plasma, è costituito da protoni, neutroni ed elettroni. E così il nostro mondo. Piccole quantità di antimateria in forma di antiparticelle, soprattutto positroni e antiprotoni, si formano e si annichilano continuamente, su scale di tempo molto diverse. La massima concentrazione di positroni si ha nel centro della nostra galassia: una caratteristica che offre agli scienziati un’importante opportunità di conoscenza della struttura di questa regione. Quando un positrone interagisce con un elettrone della materia ordinaria, infatti, si annichila originando due fotoni. Rivelando i fotoni da annichilazione è quindi possibile sottoporre la Galassia a una vera e propria indagine Pet, simile a quella sviluppata in campo medico sfruttando i positroni emessi da una sostanza radiotracciante introdotta nel corpo umano (vd. “Antimateria al lavoro per la salute” p. 38, ndr). Tuttavia, un aspetto non trascurabile distingue la Pet medica da quella “galattica”: quando al centro della Galassia si annichila una coppia elettrone-positrone, se uno dei due fotoni generati è emesso verso di noi – e

impiegherà 25.000 anni ad arrivare! – l’altro si muoverà nella direzione opposta e si perderà nello spazio. La Pet galattica non gode quindi di un vantaggio di cui gode la Pet in laboratorio: la presenza di due fotoni di energia esattamente pari a 511 keV (equivalente a metà della massa della coppia elettrone-positrone scomparsa) che rivelati simultaneamente indicano la linea lungo cui si trova la sorgente. La certezza che l’unico fotone rivelato sia originato dall’annichilazione di coppie elettrone-positrone si ha solo misurandone l’energia con rivelatori che abbiano una buona capacità di distinguere energie molto simili (buona risoluzione energetica). Per ricostruire la direzione di provenienza dei fotoni, invece, e distinguere sorgenti vicine (per ottenere, cioè, una buona risoluzione angolare), sono stati ideati nel tempo metodi diversi. Il pioniere dei rivelatori di fotoni galattici da annichilazione, sviluppato nel 1978, consisteva in un rivelatore al germanio con un collimatore, posto su un pallone stratosferico e in grado di registrare fotoni entro un angolo di 11°. Puntando alternativamente il centro della Galassia e altre parti del cielo, per differenza, si trovò un flusso di fotoni dal centro riconducibile

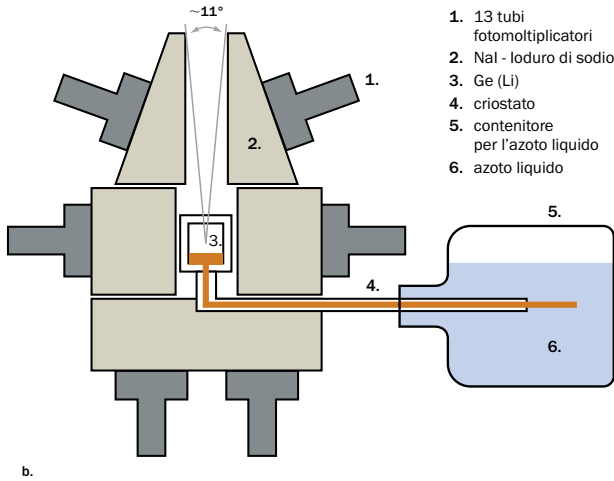
a un’emissione di $2,6 \times 10^{43}$ positroni al secondo. Quale misteriosa sorgente poteva fare tanto? Le attuali osservazioni radio, ottiche e nei raggi X, mostrano nella zona innumerevoli sorgenti della natura più disparata e, tra queste, anche un buco nero gigante. Oggi il collimatore è stato sostituito da un nuovo strumento, la *maschera codificata* (vd. “La maschera codificata” p. 44, ndr), capace di ricostruire una vera e propria immagine del cielo e di distinguere sorgenti vicine tra loro anche in zone molto affollate. Ne è dotato il satellite Integral (*INTErnational Gamma-Ray Astrophysics Laboratory*) dell’Agenzia Spaziale Europea (Esa), in orbita intorno alla Terra dall’ottobre del 2002. Integral è costitutivo da due strumenti principali: Spi, dotato di una grande risoluzione energetica, e Ibis che eccelle in quella angolare. Le osservazioni condotte da Integral sono in grado di stabilire che i fotoni di annichilazione provengono da una regione al centro della Galassia, detta *bulge*, di forma sferica con un diametro di circa 20°. Ibis, però, non è in grado di risolvere l’emissione in sorgenti, quindi probabilmente i positroni sono emessi da una regione diffusa o da molte sorgenti deboli. Di tutte le ipotesi possibili a priori, per



1. La maschera codificata: una piastra di tungsteno con una matrice di fori disposti secondo uno schema definito.
2. Matrice di rivelatori di germanio.

a. Lo spettrometro del satellite europeo Integral. I rivelatori di germanio raffreddati misurano con grande precisione l'energia dei fotoni gamma e, in modo approssimativo, il punto in cui vengono assorbiti. Bloccando i fotoni da tutte le direzioni, tranne quelli che passano attraverso una maschera di tungsteno, si ricostruiscono immagini del cielo.

b. Trenta anni fa la scoperta dell'antimateria galattica in un esperimento condotto nel 1978 ai laboratori Bell. Un rivelatore di Germanio di 120 cm² posto su un pallone stratosferico era raffreddato con azoto liquido e schermato con ioduro di sodio per impedire ai fotoni gamma di raggiungere il rivelatore. Un foro (*collimatore*) lasciava passare solo i fotoni entro un angolo di 11° dal centro galattico.

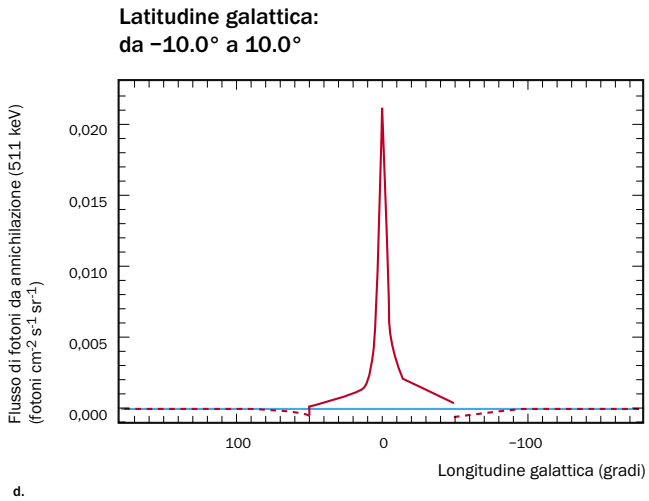
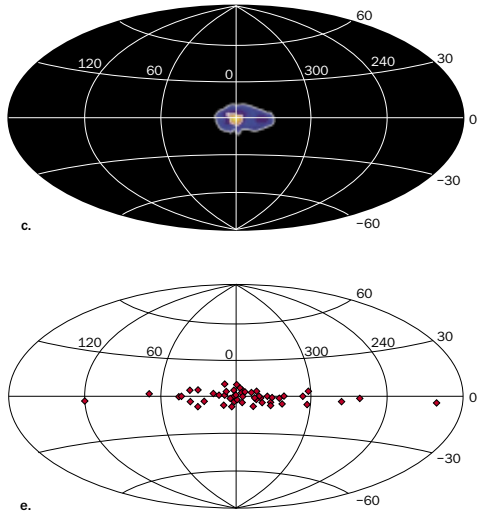


1. 13 tubi fotomoltiplicatori
2. NaI - Ioduro di sodio
3. Ge (Li)
4. criostato
5. contenitore per l'azoto liquido
6. azoto liquido

[as] La maschera codificata

La maschera codificata è un'estensione del principio della camera oscura utilizzata per ottenere "fotografie" del cielo nelle quali siano distinguibili le sorgenti di raggi gamma. Se il rivelatore è in grado di misurare, oltre all'energia, anche la posizione in cui il fotone è stato rivelato, grazie alla maschera è possibile risalire alla posizione delle sorgenti. La maschera codificata consiste di uno strato di materiale assorbitore con una matrice di fori disposti secondo uno schema predefinito: disponendola a una certa distanza dal rivelatore, su questo verrà proiettata un'ombra della maschera, che dipenderà dalla direzione

da cui provengono i raggi gamma. Se le sorgenti in campo sono più di una, si otterrà la sovrapposizione di più immagini, la cui intensità e posizione dipenderanno dalla posizione e dalla luminosità delle diverse sorgenti. In questo modo, analizzando le immagini con metodi statistici e matematici, è possibile ricostruire una vera e propria "fotografia" del cielo nella quale sono distinguibili le sorgenti dei raggi gamma. Il metodo non è molto sensibile, ma permette di studiare un grande campo di vista (centinaia di gradi quadrati) separando le sorgenti, soprattutto in zone del cielo molto affollate.



spiegare l'intensa emissione di positroni, solo due sono ammissibili al confronto con i dati sperimentali, in quanto non incompatibili con essi. La prima è data dai numerosi buchi neri e stelle di neutroni presenti nella zona centrale della Galassia, anche sotto forma di sistemi binari, che a causa degli intensi campi possono produrre coppie elettrone-positrone. Una seconda possibilità è che, in una regione di alta densità e in prossimità del buco nero gigante, alcune delle particelle ipotizzate come costituenti della materia oscura decadano o si eccitino rilasciando coppie elettrone-positrone. Anche se la materia visibile ha pochissime interazioni con la materia oscura, quest'ultima ipotesi potrebbe essere la chiave per svelare la natura della materia oscura. Vi è però un'interessante "asimmetria nell'asimmetria". La evidenziano i dati di Spi

pubblicati a gennaio di quest'anno: dove il bulge si raccorda col disco galattico, su entrambi i lati, sono presenti due ali che si estendono per circa 30°. Sorprendentemente la regione a destra ha una luminosità doppia di quella a sinistra. Le sorgenti che ricadono nella nostra prima ipotesi, buchi neri, stelle di neutroni, sistemi binari, emettono raggi X e sono ben risolte da Ibis. Mentre il numero di tutte le altre sorgenti di raggi X è sostanzialmente simmetrico ai lati del bulge, le binarie costituite da una stella ordinaria di piccola massa e da un buco nero o una stella di neutroni presentano, a energie maggiori di 20 keV, la stessa asimmetria spaziale dei fotoni di 511 keV. Visto anche che i modelli di materia oscura non spiegano la asimmetria, è probabile che proprio queste binarie, numerose nel bulge, siano la principale sorgente dei positroni. Forse questo risolve il mistero!

c. L'immagine della Galassia ottenuta con i fotoni di energia 511 keV. Al centro, l'emissione del bulge galattico di forma sferica. Più all'esterno il raccordo tra il bulge e il disco di forma ellittica. Si nota che a destra (a longitudini crescenti) la regione è più estesa.

d. L'effetto è più chiaro se si sommano tutti gli eventi entro una latitudine di 10° e si riproduce una mappa unidimensionale in longitudine. Il bulge è molto luminoso al centro e si estende per circa 10° a destra e a sinistra. Le ali si estendono sino a circa ±50° ma l'ala a destra è il doppio di quella a sinistra.

e. Un'immagine del cielo ai raggi X al di sopra di 20 keV, ottenuta con il rivelatore Ibis di Integral, con una risoluzione angolare di 0,2°. Ogni punto è una stella binaria costituita da una stella di piccola massa e un buco nero o una stella di neutroni. Si trova che, nelle regioni corrispondenti alle ali della mappa a 511 keV, il numero di binarie di piccola massa alla destra è il doppio di quello alla sinistra.

Biografia

Enrico Costa è dirigente di ricerca presso l'Istituto di Astrofisica Spaziale e Fisica Cosmica dell'Inaf, a Roma. Ha collaborato alla missione BeppoSAX ed è oggi responsabile di SuperAGILE.

Link sul web

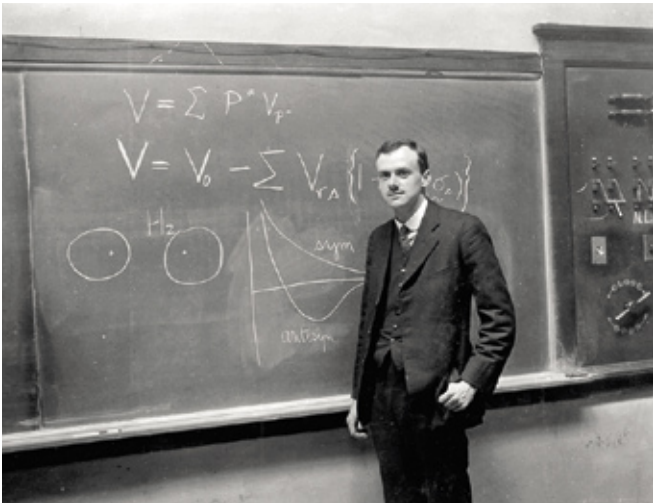
http://isdc.unige.ch/Outreach/Integral/integral_it.html

<http://www.esa.int/SPECIALS/Integral/index.html>

[as] radici

L’equazione di Dirac.

di Enrico Bellone
direttore de Le Scienze



<
Dirac alla lavagna, nei primi
anni '30 dello scorso secolo.

Siamo alla fine del 1927 e la comunità dei fisici ha molti problemi da risolvere. Uno di questi riguarda una proprietà enigmatica dell’elettrone che è stata battezzata con il nome *spin* e che consiste nella presenza di due numeri quantici, pari a $+\frac{1}{2}$ e $-\frac{1}{2}$. In termini di senso comune, l’elettrone si comporta come se potesse ruotare intorno a un asse in un senso e in quello opposto: un modo intuitivo di descrivere il fatto per cui questa particella ha lo spin. Ma l’intuizione non è un buon argomento. Essa permette certamente di costruire un modello di elettrone, presumendo che la particella abbia una forma geometrica tale da consentire rotazioni attorno a qualcosa. Altrettanto certamente, però, una teoria sull’elettrone non può partire da un modello di questo genere. Deve essere una teoria matematica, e su questo c’è un ampio consenso. Il giovane Paul A.M. Dirac ha, in generale, una posizione molto precisa: dobbiamo usare tutte le potenzialità della “matematica pura” con lo scopo di generalizzare la base formale della fisica teorica, e solo dopo possiamo tradurre i risultati matematici in un linguaggio che parla di “entità fisiche”. Quale entità fisica è allora in gioco? Nel caso dell’elettrone, la modellistica suggerisce che esso sia un oggetto corporeo e quindi dotato di dimensioni. Ma, come osserva Dirac nel 1928, non è affatto chiaro il motivo per cui “la Natura dovrebbe aver scelto questa particolare struttura per

l’elettrone, invece di essere soddisfatta della carica puntiforme”. La vera questione sta invece nella necessità di superare “l’incompletezza delle precedenti teorie” e di sviluppare un sistema matematico che soddisfi sia i requisiti della teoria della relatività, sia quelli della teoria dei quanti. Il superamento si realizza con un capolavoro, intitolato *The Quantum Theory of the Electron*, che Dirac pubblica appunto nel 1928. È impossibile descrivere questo capolavoro senza ricorrere all’armamentario della matematica. In linea di massima, si può comunque ricordare che Dirac riprende certe matrici già impiegate da Wolfgang E. Pauli, in contesto quantistico, per esprimere certe proprietà dello spin. Quelle matrici, ora, devono per Dirac rispettare anche le clausole relativistiche sulle simmetrie fra spazio e tempo. Le matrici di Pauli erano a due righe e due colonne, quelle di Dirac sono a quattro righe e quattro colonne. Fatta questa operazione, altri passi puramente algoritmici sfociano necessariamente in una nuova equazione generale per l’elettrone. Per valutare lo spin era allora indispensabile esplicitare il comportamento dell’elettrone in un campo elettromagnetico. Un comportamento matematico, s’intende. Che culminava in un successo e in un nuovo enigma. Il successo stava nella deducibilità dello spin da un punto di vista puramente teorico. L’enigma era inatteso e riguardava proprio

le soluzioni matematiche dell’equazione di Dirac. Esse infatti formavano una famiglia che, inaspettatamente, era formata da due sottofamiglie di pari entità. Solo una era tuttavia da prendere in considerazione: l’altra “metà delle soluzioni deve essere scartata in quanto si riferisce alla carica $+$ e”. E dovrebbe essere scartata perché nessuno ha mai osservato in Natura un elettrone con carica positiva. Ma l’operazione di rigetto non era comunque ammissibile nella cornice della teoria quantistica. Quest’ultima non poteva infatti scartare a priori eventi connessi alla “altra metà” delle soluzioni e che implicavano la possibilità di salti quantici tra livelli energetici descrivibili come positivi o negativi. In un primo momento, quindi, parve giusto a Dirac sostenere che la sua teoria fosse da valutare come una “approssimazione”. Le carenze stavano tutte quante nella base empirica. La teoria di Dirac aveva in realtà scoperto il positrone, ma dovevano trascorrere alcuni anni prima che Carl D. Anderson, e soprattutto Patrick M. Blackett e Giuseppe Occhialini, nel 1933 scovassero le prove sperimentali di quella “approssimazione”. Nell’intervallo fra il 1928 e il 1933 molti furono i tentativi di fornire una interpretazione accettabile delle previsioni fatte da Dirac. Per tutti noi, ad ogni modo, quell’articolo di Dirac rimane come uno dei punti più alti della storia della cultura umana.

[as] incontri

La scienza vien... Sperimentando

di Antonella Varaschin



>
Bambini ai microscopi nella
sezione dedicata alla botanica.

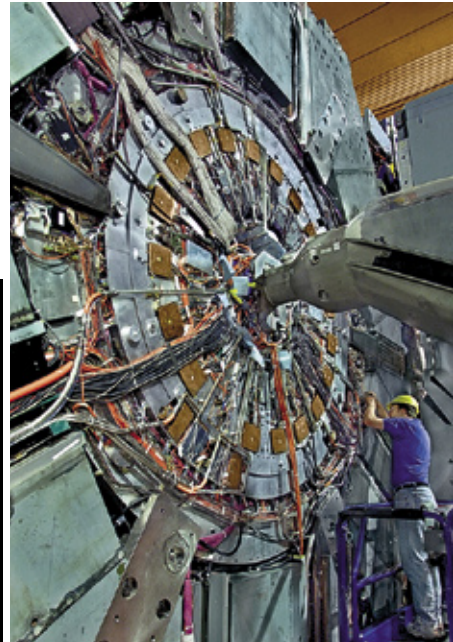
Tende grigie e polverose alle finestre, tavoloni un po’ traballanti e vecchi dispositivi sperimentali: certo non si presentava come il più all’avanguardia dei laboratori di fisica quello del mio liceo, ma erano comunque uno spasso per me le ore di lezione trascorse lì. Lo erano perché ho avuto la fortuna di avere un’insegnante appassionata, perché così non si era interrogati e perché c’era un tecnico molto simpatico che per cinque anni ci ha promesso di cucinarci la pasta col fornellino per gli esperimenti (ma che, neanche a dirlo, faceva promesse da marinaio!). Ma erano ore piacevoli anche perché potevamo mettere mano alle cose, restare affascinati dalle “magie” dell’ottica e delle onde. Perché si lavorava in gruppo e, in un certo senso, si imparava a esercitare la propria creatività. Questo mi è venuto in mente quando ho visitato per la prima volta *Sperimentando*, la mostra interattiva di scienza allestita a Padova, quest’anno alla sua settima edizione, che si è svolta dal 14 aprile all’11 maggio, per iniziativa dell’Associazione per l’Insegnamento della Fisica, grazie al contributo del Comune di Padova, dei Laboratori Nazionali di Legnaro e della Sezione di Padova dell’Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, e di altre istituzioni

pubbliche locali ed enti di ricerca. “Magari ci fosse stata un’opportunità simile ai miei tempi!”, ricordo di aver pensato. Questo mi ha fatto sentire un po’ più vecchia, ma anche fortunata perché, in fin dei conti, faccio proprio un bel lavoro! L’esposizione, infatti, che è suddivisa in aree tematiche, ospitava quest’anno, nello spazio riservato alla fisica, la mostra *La Natura si Fa in 4*, progettata da noi dell’Ufficio Comunicazione dell’Infn assieme ai ricercatori. Devo ammettere che dà soddisfazione vedere i ragazzini delle scuole che si divertono giocando con qualcosa che tu hai pensato proprio per loro. Gli exhibit della mostra li introducono a temi e concetti della fisica assai complessi, che forse non resteranno tutti impressi in mente. Ma magari resterà loro impressa la piacevole esperienza di aver condiviso una mattinata “giocando con la scienza” e, se saremo fortunati, forse torneranno in classe con qualche curiosità in più. “Questa è una bella opportunità – ci dice Franco, insegnante di fisica in un liceo scientifico di provincia – quando si fa lezione in classe c’è poco da fare, i ragazzi trovano che tutto sia un “mattone”. Qui invece possono “far le cose” divertendosi, imparando non solo i concetti ma anche il metodo scientifico. “Io inizio fin da

settembre a progettare e realizzare con i miei studenti un esperimento da portare a Sperimentando (annualmente viene indetto un concorso per il migliore esperimento). Per loro questo è davvero molto utile perché riesce a coinvolgerli più di qualsiasi lezione”, ci spiega Rossana, insegnante di chimica di un istituto tecnico di Padova. E i ragazzi che cosa ne pensano? “Molto meglio che stare in classe – ci dice Marco, seconda liceo classico – anche perché le guide che ci spiegano le cose sono ragazzi poco più grandi di noi, molto più divertenti dei nostri insegnanti... ma non lo dica al prof, mi raccomando!”. Sperimentando ha avuto in un mese di apertura al pubblico quasi 8 mila visitatori, contro i già 6 mila dello scorso anno, e “non sono tutti studenti portati dagli insegnanti, ma anche pubblico generico – ci dice Ariella Metellini, curatrice dell’esposizione – I giorni di maggior affollamento infatti sono quelli del fine settimana, quando gli spazi della mostra vengono letteralmente invasi dalle famiglie, dai ragazzi ma anche da un pubblico adulto ed eterogeneo: è una bella soddisfazione vedere come il numero di visitatori cresca di anno in anno. Speriamo allora che Sperimentando si affermi definitivamente nel territorio come un appuntamento con la scienza da non mancare”.

La tessera mancante nel puzzle dei quark_Si chiama eta_b, la sfuggente particella scoperta da poco dai fisici dell'esperimento Babar, una sorta di tassello mancante nella nostra descrizione del comportamento dei quark, i più piccoli costituenti della materia.

Dalla previsione della sua esistenza, nella teoria che descrive le proprietà dei quark *b* (*b* come *bottom* o *beauty*), alla sua cattura sono passati ben trent'anni. Alla fine, si è riusciti a "vederla" grazie al sofisticato apparato sperimentale Babar allo *Stanford Linear Accelerator Center* (Slac), in California, dove lavorano 500 fra ricercatori e tecnici di tutto il mondo. La scoperta ha il marchio della ricerca dell'Infn e dell'industria italiana: in Babar il grande magnete che incurva la traiettoria delle particelle cariche nel cuore del rivelatore e altre componenti fondamentali dello stesso sono frutto del lavoro dei ricercatori italiani. La particella eta_b è una coppia costituita dal quark *b* e dal suo antiquark e per i fisici è speciale, perché è lo stato "fondamentale" della coppia, quello con la minor massa possibile. [C.P.]



GammaBusters_11 giugno, 18:05 ora americana. Il satellite per astronomia gamma Glast ha lasciato senza difficoltà la pista di lancio di Cape Canaveral ed è ora pronto a ricevere il racconto di un Universo impercettibile a occhio nudo, descritto dalla forma di luce più energetica del Cosmo: i raggi gamma. In orbita a 550 km dalla Terra, Glast chiarirà alcuni misteri sulle intense esplosioni che generano i *gamma-ray-burst*, sui buchi neri supermassivi nel cuore di galassie lontane e, in generale, sulle origini dei raggi cosmici. Uno scenario mutevole in cui gli oggetti brillano e si offuscano continuamente su scale di tempo e a energie molto diverse e il cui monitoraggio è possibile grazie al lavoro congiunto degli osservatori spaziali e di altri esperimenti già attivi a terra.

E proprio quando in Florida si preparava il lancio di Glast, lo specchio di 17 metri di diametro di Magic (vd. foto) rivelava la più lontana sorgente di raggi gamma di altissima energia mai osservata prima: un buco nero distante dalla Terra sei miliardi di anni luce, che emette radiazione fagocitando la materia della galassia di cui è parte. Nei prossimi mesi, quando alle isole Canarie sarà attivo un secondo telescopio gemello, la capacità di Magic, il più grande telescopio per raggi gamma oggi esistente al mondo, sarà più che duplicata. A indicare in quale direzione puntare gli enormi specchi sarà pronta una rete di satelliti, tra i quali anche Glast, ribattezzato nell'agosto scorso *Telescopio Spaziale Fermi* in onore dello scienziato che per primo comprese il meccanismo di accelerazione dei raggi cosmici. [F.S.]



Avvio di Lhc_Il 10 settembre scorso è entrata in funzione la più grande macchina del mondo, l'acceleratore di particelle *Large Hadron Collider* (Lhc) nei laboratori europei del Cern in Svizzera. Dopo aver verificato in 50 minuti ogni singolo settore, il primo fascio di protoni ha percorso con successo, a una velocità prossima a quella della luce, tutti i 27 km del tunnel che si trova sotto la periferia di Ginevra (vd.: <http://cdsweb.cern.ch/record/1125916>). Poche ore dopo, un secondo fascio percorreva l'acceleratore in verso opposto. Recentemente, a causa di una fuga di elio in uno dei settori del tunnel, i test sono stati arrestati e ripartiranno dopo la prevista pausa invernale. L'obiettivo rimane quello di aumentare progressivamente l'energia dei due fasci, fino a 7 TeV, producendo collisioni all'energia di 14 TeV, la massima mai raggiunta in laboratorio. Nell'anello di Lhc sono ospitati i quattro esperimenti principali Atlas, Cms, Lhc-b e Alice: tra i loro obiettivi scientifici, la rivelazione del bosone di Higgs, la particella che fornisce la massa ai componenti della materia, lo studio dell'asimmetria tra materia e antimateria e l'osservazione del plasma di quark e gluoni, cioè uno stato della materia esistito subito dopo il Big Bang. Dal 1994 questa grande impresa è costata lo sforzo di migliaia di ricercatori di tutto il mondo. Il contributo dell'Italia, coordinato e finanziato dall'Infn, è stato essenziale, con oltre 600 ricercatori italiani che lavorano al Cern. [C. P.]



I laboratori dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare sono aperti alle visite.

I laboratori organizzano, su richiesta e previo appuntamento, visite gratuite per scuole e vasto pubblico. La visita, della durata di tre ore circa, prevede un seminario introduttivo delle attività dell'Infn e del laboratorio e una visita alle attività sperimentali.

Per contattare i laboratori dell'Infn:

Laboratori Nazionali di Frascati (Lnf)
T + 39 06 94032423
/ 2552 / 2643 / 2942
sislnf@lnf.infn.it
www.lnf.infn.it

Laboratori Nazionali del Gran Sasso (Lngs)
T + 39 0862 4371
(chiedere dell'ufficio prenotazione visite)
visits@lngs.infn.it
www.lngs.infn.it

Laboratori Nazionali di Legnaro (Lnl)
T + 39 049 8068547
schiavon@lnl.infn.it
www.lnl.infn.it

Laboratori Nazionali del Sud (Lns)
T + 39 095 542296
sislns@lns.infn.it
www.lns.infn.it

Ulteriori informazioni per visitare i laboratori dell'Infn si trovano alla pagina www.infn.it/educational



www.infn.it

rivista on line
www.asimmetrie.it