

PROLUSIONE DI

Livio Lanceri

PROFESSORE ORDINARIO
DI FISICA SPERIMENTALE



NOI E L'ANTIMATERIA

Buongiorno a tutte e a tutti. Vi ringrazio per l'opportunità di parlarvi dei nostri rapporti con l'Antimateria. Data l'ora, non sarà facile trattenermi: ci proverò...

PROLOGO

Come ogni tanto succede alle maggiori scoperte scientifiche, l'antimateria ha conquistato qualche anno fa le prime pagine della stampa quotidiana, poco dopo l'annuncio, da parte del CERN di Ginevra, dell'avvenuta sintesi in laboratorio dei primi atomi di anti-idrogeno. Ad esempio, il quotidiano parigino "Libération" titolava con grande evidenza e un'immagine fantascientifica: "Premiers pas dans l'antimonde", con all'interno una lunga intervista al fisico genovese Mario Macri, uno dei coordinatori dell'esperimento.

Questo fatto rimase nell'immaginario collettivo. Qualche anno dopo, il noto romanziere Dan Brown, nel suo *bestseller* "Angeli e Demoni", mise l'antimateria al centro della trama di un intrigo internazionale. È interessante leggere assieme qualche frase dalla sua prefazione:

"Nel momento stesso in cui materia e antimateria vengono a contatto, tutta la loro massa si trasforma in energia: questo significa che è possibile liberare una quantità enorme di energia senza produrre inquinanti chimici o radioattivi.

Basterebbero quantità minime di antimateria per rifornire di energia una città come New York.”

“Dal contatto fra un grammo di antimateria e un grammo di materia si sprigiona la stessa quantità di energia di una bomba atomica da 20 chiloton, come quella sganciata su Hiroshima.”

“Impossibile fare a meno di chiedersi se questa sostanza altamente volatile salverà il mondo o verrà usata per creare l’arma più letale che sia mai esistita.”

Quanto è accurata questa descrizione? È fondata l’allarmante conclusione di Dan Brown? Prendiamone spunto per fare il punto su “Noi e l’Antimateria”.

- Vi racconterò, in sintesi, l’interessante storia della scoperta, che risale a circa ottant’anni fa.
- Anticiperò poi la domanda, naturale e più che legittima: queste ricerche e queste scoperte servono a qualcosa? Hanno applicazioni pratiche? (fra parentesi, la risposta è: sì!).
- Ogni scoperta ed ogni avanzamento delle nostre conoscenze aprono nuovi interrogativi: per concludere, passerò in rassegna alcune linee di ricerca che esplorano le attuali frontiere in questo campo.



LA SCOPERTA (1927-1932)

La scoperta dell'antimateria si innesta su due grandi rivoluzioni della fisica, agli inizi del '900: la meccanica quantistica e la relatività.

In meccanica quantistica, all'equazione che classicamente descrive l'energia di particelle come l'elettrone viene associata un'equazione d'onda, l'equazione di Schrödinger. Le soluzioni di questa equazione sono le cosiddette "funzioni d'onda", tutt'ora alla base della nostra comprensione del comportamento degli elettroni negli atomi, dei legami chimici tra atomi e molecole, della struttura dei corpi solidi, delle proprietà dei materiali che sono alla base di dispositivi moderni come i vostri "smartphone", e così via.

Ma l'equazione di Schrödinger funziona bene solo per particelle, elettroni in particolare, che abbiano velocità piccole rispetto a quella della luce, come tipicamente avviene negli atomi. Nella teoria della relatività ristretta, messa a punto in quegli anni da Einstein, ha un ruolo importante la velocità c della luce nel vuoto, approssimativamente eguale a 300.000 chilometri al secondo. Particelle dotate di massa m , come l'elettrone, non possono raggiungere o superare questa velocità. L'equazione relativistica per l'energia di particelle libere è modificata rispetto a quella classica e contiene il famoso termine mc^2 che rappresenta l'energia di una particella a riposo. Schrödinger aveva tentato, in prima battuta, di scrivere un'equazione d'onda direttamente compatibile con la relatività, che fosse cioè valida anche per elettroni e altre particelle in regime relativistico, ma, come altri fisici teorici dell'epoca, non c'era riuscito.

Interviene a questo punto il fisico teorico britannico Paul Adrien Maurice Dirac (1902-1984), di cui riporto un ritratto fotografico e l'iscrizione sulla lapide che lo ricorda, assieme alla sua equazione, nell'abbazia di Westminster, vicino al monumento a Newton. L'equazione proposta da Dirac è compatibile con la re-

l'equazione di Dirac



$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = c\vec{\alpha} \cdot (-i\hbar \vec{\nabla})\Psi + \beta mc^2 \Psi$$

α e β : matrici 4x4,
 Ψ funzione d'onda a 4 componenti



descrive elettroni relativistici,
ma anche qualcosa in più,
inaspettato

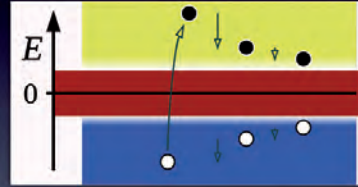
latività, a prezzo di qualche complicazione. I coefficienti che compaiono nell'equazione sono matrici, non semplici numeri, e le soluzioni sono funzioni d'onda a quattro componenti; descrivono elettroni (o protoni) relativistici, ma anche qualcosa di più, di inatteso.

Due delle quattro componenti della funzione d'onda sono più che benvenute: con energia positiva, descrivono gli stati di spin ("su" o giù") degli elettroni e dei protoni. (Per inciso: gli elettroni e i protoni si comportano in un modo analogo a palline in rotazione. La variabile rotatoria "spin", di cui bisogna tener conto, nell'equazione di Schrödinger non c'è: bisogna aggiungerla per così dire "a mano", forzatamente). Le altre due componenti, però, corrispondono ad energia negativa. Che farne? L'energia di particelle libere dovrebbe essere positiva!

elettroni e positroni

funzioni d'onda a 4 componenti: OK (spin !), ma: $E < 0$?

$$\begin{array}{l} \text{spin} \uparrow \\ \text{spin} \downarrow \\ \text{---} \\ \text{spin} \uparrow \\ \text{spin} \downarrow \end{array} \begin{pmatrix} \Psi_1 \\ \Psi_2 \\ \Psi_3 \\ \Psi_4 \end{pmatrix} \begin{array}{l} E > 0 \quad \text{OK} \\ E < 0 \quad ?? \end{array}$$



Dirac (1927): idea brillante, ma difficile da accettare:

vuoto = mare di elettroni con $E < 0$
assenza di un elettrone ($q < 0, E < 0$) del mare =
= presenza di particella (antielettrone) con $q > 0, E > 0$

Dirac propone un'interpretazione brillante, ma difficile da accettare. Propone di considerare il vuoto (tenetevi forte: il “vuoto”, dove per definizione non dovrebbe esserci nulla!) come un “mare di elettroni” a energia negativa. Fornendo sufficiente energia a uno di questi elettroni nel “mare”, esso si materializzerebbe come un normale elettrone ad energia positiva, lasciando un “buco” nel mare. Questa assenza dal mare (cioè dal vuoto!) di un elettrone ad energia (e carica elettrica) negativa, si manifesterebbe come una particella di egual massa, ma energia e carica elettrica positiva: un “antielettrone”, o “positrone”. In pratica, fornendo energia al vuoto, questa potrebbe materializzarsi in una coppia particella-antiparticella.

Se questa idea del vuoto vi sembra folle, siete in buona compagnia: è la reazione degli studenti di fisica al primo incontro con questa nozione; anche i fisici

teorici dell'epoca l'accosero con grande scetticismo. Un'autorità come Wolfgang Pauli liquidò la proposta di Dirac come totalmente irragionevole. Dirac ad ogni modo nel 1931 pubblicò le conclusioni alle quali era giunto: secondo la sua equazione, dovevano esistere le antiparticelle, e non solo per l'elettrone, anche per le altre particelle note, come il protone.

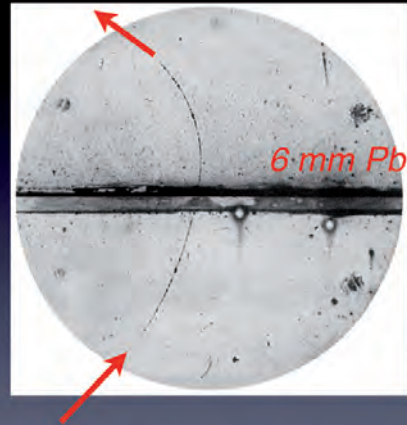
(Nota a lato: quest'idea funziona bene nella descrizione attuale delle correnti elettriche nei semiconduttori, cui contribuiscono sia elettroni negativi in "banda di conduzione", sia "lacune" positive, cioè assenze di elettroni, in "banda di valenza")

Entra qui in scena la parte sperimentale della scoperta. In quegli anni, argomento caldissimo è lo studio dei raggi cosmici, la cui scoperta si fa risalire al 1912. Diversi gruppi sperimentali cercano di capirne la natura, osservandoli con diverse tecniche. Al Caltech (Pasadena, California), Robert Millikan, già premio Nobel per la misura della carica elettrica dell'elettrone, assegna a un suo studente di origine svedese, Carl Anderson, il compito di costruire un elettromagnete più potente di quelli a lui disponibili, per meglio analizzare i raggi cosmici usando camere a nebbia.

Avete presente le scie lasciate dagli aerei di linea, puntolini quasi invisibili, sullo sfondo del cielo azzurro in una giornata serena? Dalla scia, ben visibile, sappiamo che sta passando un aereo, anche se a occhio nudo lo distinguiamo appena. In modo analogo le particelle dei raggi cosmici, invisibili, lasciano tracce di goccioline condensate nel vapore soprassaturo di una camera a nebbia. La densità delle gocce è correlata con la massa della particella, la curvatura in campo magnetico permette di distinguere la carica elettrica, positiva o negativa.

Scoperta del positrone (1932)

- Carl Anderson scopre tracce misteriose...
- curvatura: particelle con carica positiva (protoni?)
- ma: densità di traccia non compatibile con il protone!



è un positrone !

Carl Anderson, utilizzando camere a nebbia ed il suo nuovo magnete, scopre tracce misteriose: secondo la curvatura hanno carica positiva, come i protoni, ma la densità delle gocce è incompatibile con la massa del protone, somiglia a quella degli elettroni. Come ogni laureando o dottorando sa, interagire con il proprio relatore o supervisore non è sempre facile, figuriamoci se è un premio Nobel come Millikan. La reazione di Millikan è scettica: non può essere, stai sbagliando qualcosa, guardi le tracce dalla parte sbagliata, confondi il punto d'ingresso con quello d'uscita e quindi la curvatura... Anderson insiste, inserisce nell'apparato sperimentale una piastra di piombo che permette di stabilire inequivocabilmente il verso di percorrenza della traccia, grazie alla perdita di energia della particella nella lastra e alla corrispondente variazione nel raggio di curvatura. Si convince di aver ragione, pubblica il risultato, compatibile con

l'antiparticella ipotizzata da Dirac. Arrivano rapide le conferme da altri ricercatori, che avevano registrato nei loro apparati tracce simili, ma non erano stati in grado di interpretarle. Dirac aveva ragione!

(Nota a lato: quando passeggiamo o ce ne stiamo distesi sulla superficie terrestre, al livello del mare, tra i raggi cosmici che ci attraversano in ogni secondo per metro quadro, una ventina circa sono positroni!)

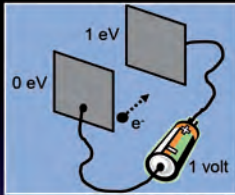
Questo è solo l'inizio. Negli anni successivi, il fisico svizzero Stueckelberg e il ben noto Richard Feynman indipendentemente propongono una nuova interpretazione delle soluzioni a energia negativa, che non ricorre alla controversa ipotesi del "mare". Segue la formulazione dell'Elettro-Dinamica Quantistica, che include l'equazione di Dirac in una teoria relativistica dei campi quantizzati, capace di descrivere e prevedere quantitativamente quanto accade in questo strano mondo, in cui coppie particella-antiparticella possono essere create oppure sparire in annichilazioni.

Rimanevano da scoprire altre antiparticelle, ad esempio l'antiprotone e l'antineutrone.

Nel dopoguerra, dopo il 1950 circa, questo tipo di ricerca cambia radicalmente registro, non è più "artigianale", diventa una grande impresa che richiede molte persone e mezzi importanti. Inizia l'era degli acceleratori di particelle. La parola chiave è "energia". La sua unità di misura in questo contesto è l'elettronvolt (eV), l'energia che potreste fornire ad un elettrone con un semplice dispositivo costituito da due piastre metalliche collegate ai poli di una pila da 1 volt.

Perché aumentare l'energia delle particelle accelerandole? La risposta sta, almeno in parte, nella relatività di Einstein: concentrando abbastanza energia in poco spazio (con urti fra particelle), possiamo trasformarla in materia, in nuove particelle, per studiarle in maniera controllata in laboratorio, invece di aspet-

dopo il 1950: acceleratori



$$E = 1 \text{ eV}$$

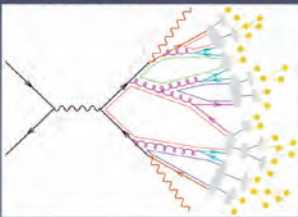
ciclotrone
1-10 MeV
1 MeV =
= 1.000.000 eV



aumentare l'energia:
perchè ?

Einstein: $E = mc^2$

sincrotrone
GeV - TeV
1 GeV = 1000 MeV
1 TeV = 1000 GeV



collider
urti "frontali"
esempio: LHC
7 + 7 TeV



tare che piovano dal cielo grazie alle interazioni dei raggi cosmici primari con l'atmosfera che ci sovrasta. Ricordiamo che, attualmente, sono in funzione nel mondo migliaia di acceleratori, la maggior parte dei quali utilizzati per applicazioni industriali e mediche: vorrei sottolineare che gli acceleratori sono forse uno dei lasciti più importanti alla società, da questo tipo di ricerca in fisica. L'energia fornita alle particelle varia dai milioni di elettronvolt (MeV) nei ciclotroni, al miliardo di elettronvolt (GeV) in sincrotroni come Elettra, fino al record del collisore LHC del CERN, con energia totale, disponibile negli urti frontali fra protoni, superiore per altri quattro ordini di grandezza.

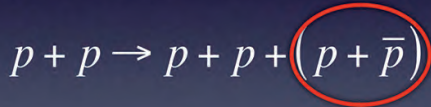
Troppo difficile trovare antiprotoni nei raggi cosmici: la scoperta dovette attendere la produzione "artificiale", con acceleratore. Nel 1955 il Bevatron di Berkeley fu in grado di accelerare protoni a più di 6 miliardi di elettronvolt: sui

Anti-protoni ?

troppo difficile trovarli nei raggi cosmici!

1955: produzione “artificiale” con acceleratore (Bevatron di Berkeley)

protoni ($E > 6.3$ GeV) contro bersaglio



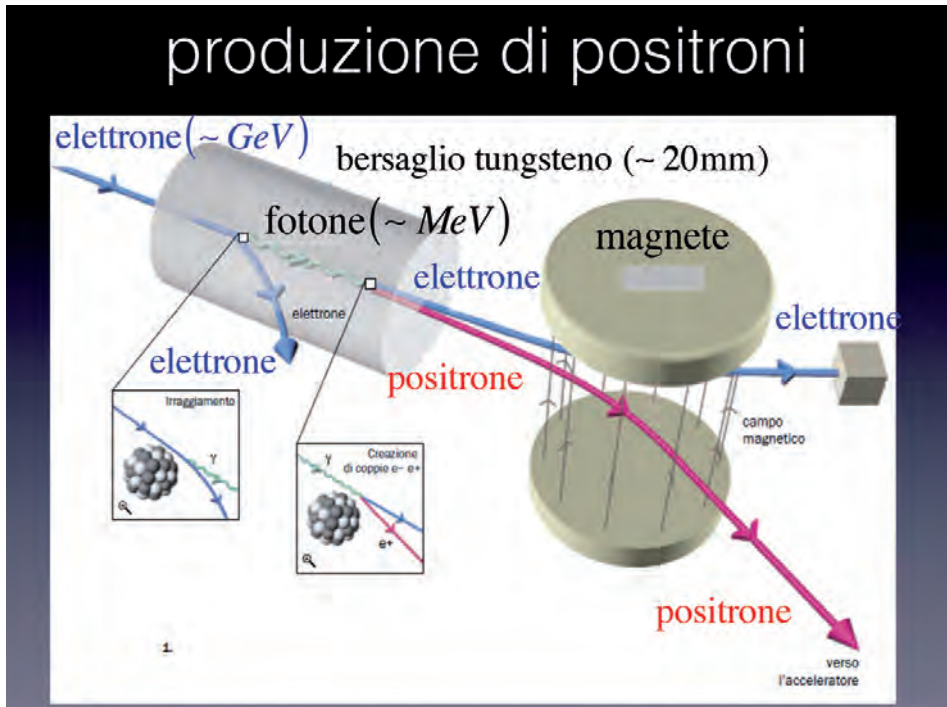
anti-protoni: misurati con “contatori”
e poi visualizzati con tracce delle
annichilazioni in emulsioni fotografiche



Nobel 1959: Segrè, Chamberlain

protoni di un bersaglio in quiete, questa energia è sufficiente a produrre coppie protone-antiprotone. L'esistenza dell'antiprotone fu dapprima dimostrata in un esperimento con “contatori di particelle” (Chamberlain, Segrè, Wiegand, Ypsilantis), e presto confermata, in collaborazione con il gruppo romano di Edoardo Amaldi, da immagini di annichilazione in emulsioni fotografiche. L'immagine che ho scelto mostra un esempio con otto tracce di particelle cariche, “pioni” positivi e negativi, create nell'annichilazione. Segrè e Chamberlain, la cui proposta era stata selezionata dal laboratorio per l'esecuzione del primo esperimento, ricevettero il premio Nobel. Un *team* condotto da un loro competitore, l'italiano Piccioni, scoprì l'antineutrone nello stesso laboratorio, l'anno successivo (1956).

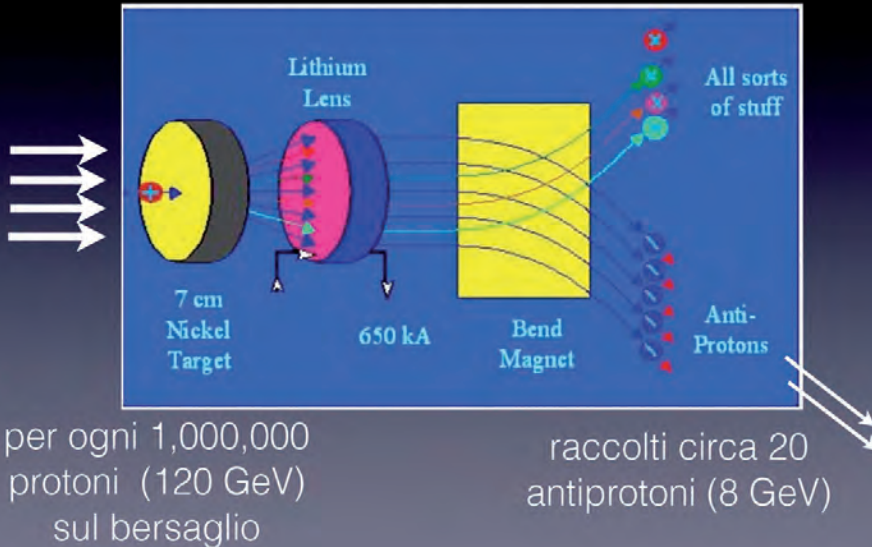
produzione di positroni



Attualmente la produzione di positroni è un'operazione non troppo complicata, se disponete di un acceleratore come Elettra, in grado di fornirvi un fascio di elettroni da un miliardo di elettronvolt. Ad esempio, inviando gli elettroni su un bersaglio di tungsteno dello spessore di un paio di centimetri, nell'interazione con gli intensi campi elettrici dei nuclei si producono fotoni con energia superiore ad un milione di elettronvolt, che interagendo con i nuclei a loro volta possono materializzarsi in una coppia elettrone-positrone. Con un magnete, si possono separare i positroni per poi utilizzarli.

produzione di anti-protoni

record: 30 miliardi di antiprotoni all'ora, a FermiLab



La produzione di antiprotoni è tutt'altra faccenda, come potrete aver intuito. Il record nella produzione di antiprotoni spetta al Laboratorio Fermi di Chicago, che ne ha prodotti in notevoli quantità, fino a circa 30 miliardi di antiprotoni all'ora, per utilizzarli nel Tevatron, un collisore di protoni e antiprotoni. Un fascio molto intenso di protoni, accelerati a 120 miliardi di elettronvolt, veniva inviato su un bersaglio di nickel spesso sette centimetri. Tra le moltissime particelle prodotte nelle interazioni, relativamente pochi antiprotoni di energia inferiore (8 GeV) venivano raccolti da un sistema di focalizzazione e di separazione: solo venti antiprotoni circa, per ogni milione di protoni incidenti sul bersaglio.

MA: SERVE A QUALCOSA? (SÌ!)

Le risorse umane e materiali richieste dalla sperimentazione sull'antimateria sono notevoli. Vi sarete certamente chiesti, a questo punto, se i risultati giustificano l'investimento e in particolare se ci sono applicazioni pratiche: "l'antimateria serve a qualcosa?". È una domanda legittima e ricorrente, rivolta alla scienza di base e agli scienziati. Venne rivolta anche al fisico britannico Michael Faraday (1781-1867), che nella prima metà dell'Ottocento diede contributi fondamentali alla chimica e allo studio sperimentale dell'elettromagnetismo. Al primo ministro Sir Robert Peel, che gli chiedeva a cosa servissero i suoi studi sull'induzione elettromagnetica e sull'effetto dinamo, rispose: "Non lo so, ma scommetto che un giorno il vostro governo ci farà pagare le tasse su questo!". Parafrasando, possiamo immaginare che sull'antimateria Dirac e Anderson avrebbero potuto dire: "Non lo so, ma scommetto che un giorno sarà oggetto di contrattazione e discussione fra i vostri amministratori pubblici...".

E in effetti, recentemente abbiamo potuto leggere sulla stampa locale titoli come:

"Il taglio del nastro a medicina nucleare: Manca solo la Pet."

"Una Pet per l'ospedale. Dalla giunta regionale ok all'ordine del giorno."

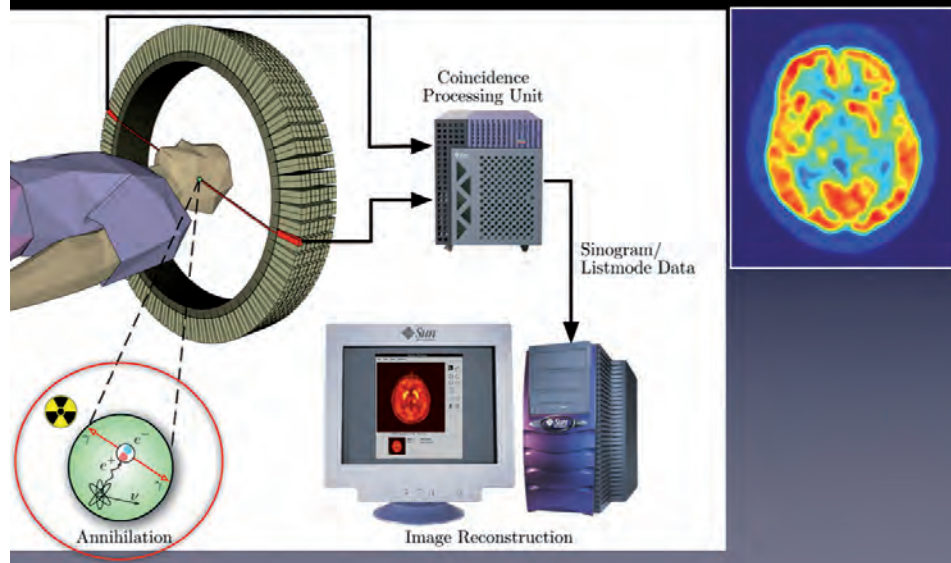
Pet? Se ne sente parlare, ma cos'è esattamente? È un acronimo per "Positron emission tomography".

In italiano: "Tomografia ad Emissione di Positroni". Come funziona? Al paziente viene somministrata una sostanza radioattiva emettrice di positroni, cioè di antielettroni, inserita in molecole di zuccheri assorbiti preferenzialmente dalle cellule metabolicamente più attive. I positroni emessi trovano rapidamente un elettrone con cui accoppiarsi ed annichilarsi, con la produzione di due raggi gamma, cioè due fotoni (quantità di energia elettromagnetica), che si allontanano in direzioni opposte. Un sistema di rivelazione, che utilizza le tecnologie

sviluppate dalla fisica sperimentale delle particelle, registra le coincidenze di queste coppie di fotoni; i dati sono rapidamente elaborati e registrati, fornendo, a partire dagli allineamenti tra i fotoni, una mappa tridimensionale (una “tomografia”) delle regioni di provenienza, cioè delle regioni popolate da cellule con metabolismo più attivo. Incrociate con informazioni da altri strumenti diagnostici, queste mappe forniscono dati preziosi sulla proliferazione o sul regresso di cellule tumorali. Vengono anche utilizzate in studi di neurofisiologia, ad esempio per individuare zone del cervello che si attivano in presenza di determinati stimoli o attività mentali.

Probabilmente vi state chiedendo come si fa a procurarsi i positroni necessari. Si utilizza un metodo alternativo, basato sul decadimento di nuclei atomici che


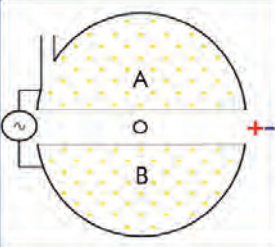
Tomografia ad Emissione di Positroni



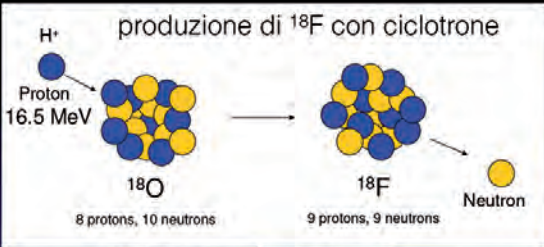
sono instabili, per la presenza di un numero eccessivo di protoni rispetto al corretto bilanciamento con i neutroni, caratteristico della cosiddetta “linea di stabilità”. Un protone “di troppo” si trasforma in neutrone, emettendo un positrone: è il cosiddetto decadimento “beta+”. Riportiamo l’immagine pittorica di un isotopo del fluoro (^{18}F) che si trasforma in un isotopo dell’ossigeno (^{18}O) con l’emissione di un positrone. Per le applicazioni mediche, è essenziale che la sostanza radioattiva abbia vita media breve, in modo da esaurirsi rapidamente e non permanere nell’organismo del paziente. Deve quindi essere prodotta artificialmente al momento del bisogno, vicino all’ospedale.

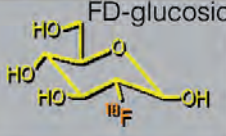
Come si fa? Ci vuole un acceleratore, un ciclotrone, che acceleri protoni fino a circa 16 milioni di elettronvolt. I protoni, colpendo nuclei d’ossigeno (^{18}O),

ciclotroni e radioisotopi medicali

produzione di ^{18}F con ciclotrone



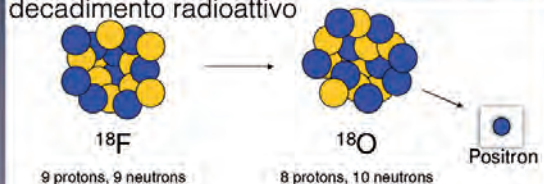


FD-glucosio

$[\text{}^{18}\text{F}]\text{FDG}$
 $\text{C}_6\text{H}_{11}\text{O}_5\text{}^{18}\text{F}$

2-Deoxy-2- $[\text{}^{18}\text{F}]$ fluoro-D-glucose

decadimento radioattivo



vanno a sostituirsi a un neutrone, che viene espulso, e li trasformano così in nuclei dell'isotopo radioattivo del fluoro (^{18}F). C'è bisogno a questo punto dell'intervento della chimica, per incorporare gli atomi radioattivi in molecole di glucosio che l'organismo del paziente può metabolizzare. Nel corpo del paziente il decadimento "beta+" del fluoro lo trasmuta nuovamente in ossigeno, con l'emissione dei positroni richiesti dalla Pet.

RICERCA: LE FRONTIERE ATTUALI

Bene. Sappiamo molte cose ormai sull'antimateria, e abbiamo anche il conforto di sapere che non mancano applicazioni pratiche. Ma, come sempre succede, con l'allargarsi della conoscenza, sorgono nuovi interrogativi, anche di natura fondamentale. Qualcuna di queste domande vi sarà forse già venuta in mente spontaneamente.

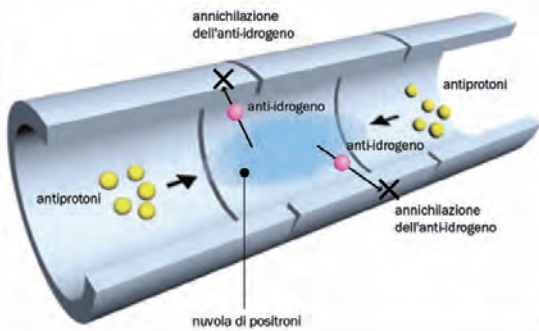
- La forza di gravità, attrattiva, che agisce su di noi legandoci alla terra, agisce allo stesso modo sull'antimateria? Non ci sarà forse una "antigravità", o anche solo una gravità modificata per l'antimateria?
- Gli antiatomi hanno la stessa chimica degli atomi? Si possono legare a formare antimolecole complesse corrispondenti a quelle che incontriamo nel nostro mondo? Per intenderci, potrebbe realizzarsi, in presenza di una quantità sufficiente di anti-materia, e nelle condizioni opportune, un vero "anti-mondo" complesso, con una anti-Aula Magna, un anti-Rettore, e un anti-prolusore?
- E, per finire, una domanda ancor più fondamentale: vediamo sperimentalmente particelle e antiparticelle comparire e scomparire sempre a coppie, a braccetto, sia nella creazione, sia nella distruzione; peraltro, positroni e antiprotoni, in isolamento, sono altrettanto stabili dei loro partner, l'elettrone e il protone. Com'è allora che attorno a noi vediamo quasi solo materia, e piccolissime quantità di antimateria? Dov'è andata a finire l'antimateria?

anti-atomi di anti-idrogeno

Esperimento ATHENA al CERN

prossime sfide:

Trappola di ricombinazione



- intrappolamento di atomi neutri abbastanza a lungo per:
- misure di gravità
- studi spettroscopici di assorbimento ed emissione di radiazione elettromagnetica

Per rispondere ai primi due interrogativi, il punto di partenza è: cominciare a sintetizzare e studiare gli anti-atomi più semplici, quelli di anti-idrogeno, formati da un antiprotone e un positrone, legati assieme dall'attrazione elettrica. Studi di questo tipo vengono condotti al CERN di Ginevra, che con i suoi acceleratori può produrre sia antiprotoni sia positroni. Con opportune trappole elettromagnetiche si può obbligarli a convivere nello stesso volume ad alto vuoto, fino alla spontanea formazione di anti-idrogeno. Questo risultato è già stato ottenuto. Le prossime sfide sono principalmente legate all'intrappolamento degli anti-atomi per un tempo sufficientemente lungo: gli antiatomi, elettricamente neutri, una volta formati scappano infatti da tutte le parti, non essendo più imbrigliati dai campi elettromagnetici, se non per deboli effetti magnetici. Sono in programma, per il futuro, sia misure di gravitazione, sia studi spettroscopici di assorbimento

Antimateria primaria nei raggi cosmici?

anti-particelle provenienti da distanti anti-galassie ?



all'esterno dell'atmosfera dovremmo osservare flussi anomali di:

- anti-particelle
- raggi gamma, da annichilazioni alle frontiere tra zone dominate rispettivamente da materia e anti-materia

ed emissione di radiazione elettromagnetica, cioè indagini delle proprietà da cui discendono le possibilità di legami chimici. Naturalmente la realtà sperimentale è più complicata di quanto appaia nella precedente descrizione schematica: le apparecchiature sviluppate allo scopo sono complesse e delicate.

Il terzo interrogativo (dov'è andata a finire l'antimateria?) potrebbe avere diverse risposte.

Una prima possibilità: per qualche motivo nell'universo potrebbero essersi separate zone popolate prevalentemente da materia, da altre in cui l'antimateria domina, e forma intere anti-galassie... Se questo fosse vero, dovremmo osservare, all'esterno dell'atmosfera terrestre, flussi anomali di antiparticelle, e anche di raggi gamma, provenienti da annichilazioni nelle regioni di confine, tra diverse zone, dominate rispettivamente da materia e da antimateria.

Per questa indagine, e per altre ricerche osservative in astrofisica, sono in corso missioni spaziali su satelliti in orbita terrestre: PAMELA, AGILE, Fermi/GLAST, AMS. Si tratta di collaborazioni internazionali, con importanti contributi di ricercatori di Trieste (universitari e dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, che finanzia queste ricerche) sia all'ideazione e realizzazione della strumentazione che a bordo dei satelliti registra le tracce dei raggi cosmici primari, sia alla successiva analisi dei dati raccolti e trasmessi a terra. Al centro dell'attenzione della comunità scientifica, recentemente, è stata l'osservazione di un eccesso di positroni, che ha richiesto la revisione dei modelli sulle possibili sorgenti cosmiche di queste antiparticelle.

Spiegazioni alternative? Forse l'antimateria non è relegata in qualche angolo sperduto dell'universo, ma è proprio sparita!

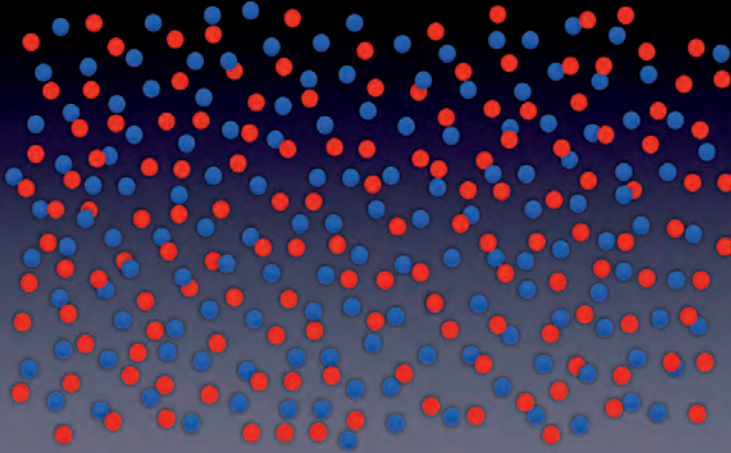
Abbiamo un indizio: la radiazione cosmica di fondo, che fa dell'universo una specie di grande forno a microonde (a bassa temperatura!). Mediando sullo spazio, per ogni protone o neutrone della materia ordinaria, nel nostro universo sono stati osservati una decina di miliardi di fotoni. Se questa è la buona direzione di indagine, allora la spiegazione va ricercata nelle interazioni tra particelle elementari!

Provo a illustrare le basi di questa spiegazione.

Le numerose informazioni sperimentali in nostro possesso convergono a farci ricostruire la storia dell'universo, che in una fase primordiale era molto più caldo, e consisteva in un "brodo" di particelle, antiparticelle e radiazione in equilibrio fra loro. Come i reagenti e i prodotti di una reazione chimica raggiungono concentrazioni costanti all'equilibrio termico, così particelle, antiparti-

universo primordiale

materia: 10 000 000 001 - antimateria 10 000 000 000



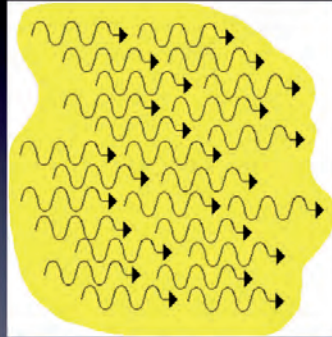
celle e fotoni mantenevano proporzioni costanti attraverso continue creazioni e annichilazioni di coppie particella-antiparticella. Per qualche motivo, ancora da capire, però, si deve essere realizzato un piccolissimo eccesso, di circa una parte per dieci miliardi, nel numero di particelle rispetto alle antiparticelle.

L'espansione e il raffreddamento dell'universo ha spezzato l'equilibrio tra particelle, antiparticelle e fotoni: da un certo punto in poi, l'energia disponibile per le interazioni è diventata insufficiente al processo di creazione di coppie a spese della radiazione. Senza questa controparte, i "matrimoni" tra coppie di particelle e antiparticelle con conseguente annichilazione in fotoni hanno portato alla scomparsa di particelle e antiparticelle, a vantaggio dei fotoni... con una relativamente piccola, fortunata eccezione: quel piccolo eccesso di parti-

universo attuale

materia: 1 (noi) + fotoni (fondo cosmico)

●
universo
attuale



qual'è l'origine di questa piccola ma importante asimmetria
materia-antimateria, di circa 1 parte per 10 000 000 000 ??

celle rispetto alle antiparticelle costituisce la materia dell'universo attuale, a fronte di un numero molto maggiore di fotoni, la radiazione di fondo cosmico. Se questa è la spiegazione corretta, qual è l'origine della piccola ma importante asimmetria tra materia e antimateria, di circa una parte per dieci miliardi?

Sperimentalmente, le antiparticelle hanno un comportamento simmetrico, e quasi esattamente speculare, rispetto alle particelle. Già nel 1964 (Christenson, Cronin, Fitch, Turlay) e poi negli anni successivi, piccolissime “incrinature” o “deformazioni” nello “specchio” materia-antimateria furono però osservate nei decadimenti di particelle instabili “strane” chiamate mesoni K. I fisici giapponesi Kobayashi e Maskawa (Nobel 2008), generalizzando un'idea dell'italiano Nicola Cabibbo, attribuirono questi effetti al mescolamento tra i “quark”,

prossimi esperimenti



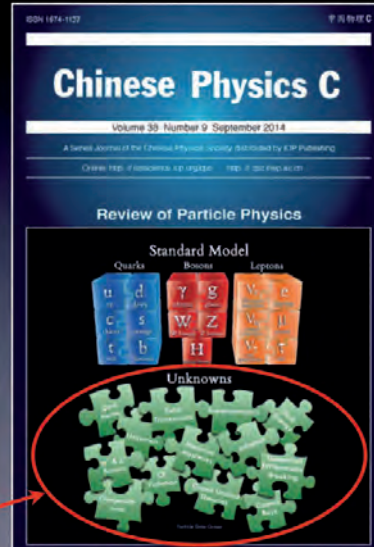
SuperKEKB



Belle II

Su questi temi la ricerca continua, all'LHC del CERN di Ginevra, e nell'esperimento Belle II in preparazione a KEK in Giappone

Incognita...



che secondo il Modello Standard delle interazioni fondamentali tra particelle, sono i mattoni di cui sono fatti protoni, neutroni ed altre particelle composite. Diventavano prevedibili piccole asimmetrie materia-antimateria anche nei decadimenti di altre particelle instabili, i mesoni B. Queste differenze sono state osservate da recenti esperimenti: BaBar al laboratorio SLAC a Stanford, in California, e Belle a KEK in Giappone. Dunque l'antimondo, a livello microscopico, sembra proprio essere una copia speculare, ma deformata, del nostro mondo. Però le differenze di comportamento osservate finora spiegano solo parzialmente l'asimmetria tra materia e antimateria: la caccia ad una spiegazione completa è ancora aperta!

Su questi temi, la ricerca continua, in esperimenti in corso presso il collisore per protoni LHC del CERN di Ginevra, e nell'esperimento Belle II, in prepara-

zione assieme al nuovo collisore per elettroni e positroni SuperKEKB, nel laboratorio KEK in Giappone. A questa collaborazione internazionale partecipo assieme ad altri colleghi di Trieste; mi piacerebbe parlarvene, ma come diceva Kipling alla fine dei suoi racconti, questa è un'altra storia...

(nota a lato: l'asimmetria materia-antimateria è una delle incognite, uno dei tasselli del puzzle, che la ricerca in fisica delle particelle elementari vuole comporre, in stretto collegamento con l'astrofisica e la cosmologia. Quest'anno appare in evidenza, sotto il nome "tecnico" di "CP violation", sulla bella copertina della voluminosa pubblicazione, che ogni due anni aggiorna i confini tra noto e incognito in questo settore. Per la prima volta il privilegio di pubblicare la rassegna è andato a "Chinese Physics C": anche le potenze emergenti investono nella ricerca di base!)

EPILOGO

In conclusione: sappiamo già molto sull'antimateria, sulla materia e sulle interazioni fondamentali, ma restano molte cose importanti da capire: ad esempio, perchè è sopravvissuta un po' di materia, abbastanza da costituire l'universo attuale, in cui viviamo. Le conoscenze sull'antimateria, e gli strumenti sviluppati per studiarla, hanno anche applicazioni pratiche, particolarmente in campo medico. Quanto ai timori di Dan Brown...

Ricordiamo: nella prefazione di "Angeli e Demoni", per l'antimateria Dan Brown ha sia previsto un uso pacifico in campo energetico, sia paventato un uso bellico. Un'ipotetica "bomba ad antimateria", che utilizzi un solo grammo di antimateria, rilascerebbe la stessa energia della bomba nucleare, che ha distrutto Hiroshima nella Seconda Guerra Mondiale.

“Angels and Demons” di Dan Brown



Un grammo di antimateria?
non è così facile...!

Un grammo di antiprotoni:
 $\sim 6 \times 10^{23}$ antiprotoni

Un grammo di positroni:
 $\sim 10^{27}$ positroni

Produzione record a Fermilab:
 $\sim 10^{15} \bar{p} / \text{anno} \approx 1.7 \times 10^{-9}$ grammi / anno

Un grammo di antimateria? Non è così facile procurarselo! Dalle nostre nozioni di base in chimica, sappiamo che un grammo di antiprotoni (una “mole”) contiene un numero di Avogadro (circa 6 seguito da 23 zeri...) di antiprotoni. Se pensiamo ai positroni, più leggeri, il numero è ancora più grande. Per rimettere i piedi a terra, ricordiamo che la produzione record di antiprotoni al FermiLab è stata di poco più di un miliardesimo di grammo all’anno. Inoltre l’energia spesa per l’accelerazione dei protoni all’origine del processo era molto più elevata di quella immagazzinata nella massa dei (pochi) antiprotoni raccolti.

I conti sono presto fatti: tutti gli antiprotoni prodotti fin qui terrebbero accesa una lampadina di pochi watt solo per pochi minuti. Per accumulare un grammo di antiprotoni, gli acceleratori di FermiLab dovrebbero rimanere in funzione per

circa un miliardo di anni. E, ovviamente, quand'anche riuscissimo ad ottenere tutti questi antiprotoni, immagazzinarli in modo da evitare annichilazioni non volute con la materia ordinaria, in attesa dell'utilizzo, sarebbe un'altra impresa ciclopica ed estremamente dispendiosa. Quindi, l'utilizzo di antimateria per immagazzinare energia e costruire bombe è inefficiente e impraticabile: *don't worry, be happy!*



