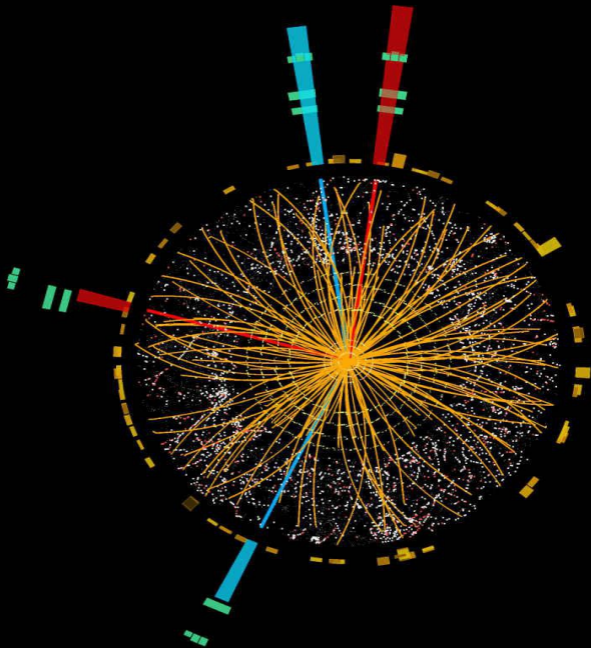


L'ANTIMATERIA

Indagare l'Antimateria

Vol. 1



INDAGARE
L'ANTIMATERIA

Nel 1929 Paul Dirac ipotizzò a livello teorico l'esistenza dell'antimateria. Da allora, gli scienziati di tutto il mondo si dedicano allo studio delle sue proprietà intrinseche e delle sue possibili applicazioni tecnologiche, che potrebbero guidare l'umanità verso un futuro paragonabile alla più incredibile storia di fantascienza

INDAGARE L'ANTIMATERIA

Dopo la scoperta dell'antimateria, nella prima metà del XX secolo, questa diventò per molti scrittori di fantascienza un argomento ricorrente e una poderosa fonte di ispirazione: approfittando della novità e della mancata conoscenza delle proprietà di questo nuovo tipo di materia, gli scrittori consentirono alla loro

immaginazione di librarsi ben al di là dei limiti della conoscenza, descrivendo un possibile futuro in cui l'antimateria era parte del quotidiano.

L'antimateria può sembrare una fantasia, ma è reale. È molto simile alla materia comune che ci circonda, ma invece di essere formata da particelle, atomi ed elementi, è formata da antiparticelle, antiatomi e anti elementi. Ogni particella di materia ha un'antiparticella corrispondente nell'antimateria, quasi identica, ma con almeno una proprietà fisica il cui valore è di segno opposto; in questo modo, quando una particella e la sua antiparticella interagiscono, si annichilano reciprocamente dando luogo

a un'enorme emissione di energia. Ciò spiega perché sia difficile trovare, produrre o conservare l'antimateria, sebbene le sue proprietà la rendano una sostanza potenzialmente destinata a cambiare il corso di tutta la nostra tecnologia.

Isaac Asimov, il celebre scrittore di fantascienza, nei romanzi e nei racconti del suo Ciclo dei robot, iniziato nel 1940, immaginò la realizzazione di un cervello artificiale per gli androidi, in grado di dotarli di una coscienza simile a quella umana. Questo cervello era costituito da una rete realizzata in una lega di platino-iridio al cui interno le comunicazioni avvenivano attraverso

dei flussi di positroni, un tipo di particella con la stessa massa dell'elettrone ma con carica elettrica di segno opposto. Asimov divulgò questo fu turistico modo di dotare gli androidi di intelligenza in opere come *I, robot* (*To, robot*, 1950) o *Bicentennial man* (*L'uomo bicentenario*, 1976), grazie alle quali per la prima volta il grande pubblico conobbe il nome di una particella di antimateria.

Nel 1966 l'antimateria giunse sul piccolo schermo con la famosa serie televisiva *Star Trek*, in cui era utilizzata come fonte di energia, sfruttandone l'ingente quantità che veniva emessa in un'ipotetica reazione materia-antimateria che si realizzava, sotto pieno controllo,

nei motori dell'astronave Enterprise. Nella seconda serie dell'epopea, Star Trek: The Next Generation, trasmessa nel 1987, uno dei personaggi principali era il comandante Data, un robot con un cervello positronico che raccoglieva l'eredità dei robot ideati da Asimov. Vari decenni più tardi, sfruttando i progressi scientifici avvenuti in questo campo, Dan Brown trasformò l'antimateria nell'arma più letale dell'umanità nel suo romanzo *Angels & Demons* (Angeli e demoni, 2000). In quest'opera, il protagonista, Robert Langdon, deve trovare una bomba costituita soltanto da un quarto di grammo di antimateria, che sarebbe in

grado di distruggere il Vaticano intero attraverso una grande esplosione causata dal suo contatto con la materia ordinaria. Ovviamente, a segnare i limiti del possibile non sono gli scrittori ma le leggi della natura, e molte di queste applicazioni sono ancora assai lontane dalla realtà. Anche se è impossibile sapere se l'antimateria ci permetterà un giorno di dotare i robot di una coscienza o di fare viaggi interstellari, la rapidità con cui aumentano le conoscenze nel campo della fisica delle particelle sembra indicare che grazie all'antimateria, in un futuro non molto lontano la realtà supererà ancora una volta la fantasia.

MATERIA E ANTIMATERIA, GEMELLE E OPPOSTE

Se si considerano le applicazioni avanzate dell'antimateria descritte nelle opere di fantascienza, si può pensare che sia un elemento estremamente complesso, tanto da credere che

appartenga solo al mondo dell'immaginario. Tuttavia, basta addentrarsi un po' nella scienza che la descrive per scoprire che la comprensione dell'antimateria è tanto semplice quanto quella della materia ordinaria.

Per materia ordinaria si intende quella che ci circonda e di cui è formato l'universo: si può percepire con i sensi, ha una massa e occupa un volume nello spazio. L'antimateria, dal canto suo, condivide la maggior parte delle proprietà e delle caratteristiche della materia ordinaria. In realtà, se la materia e l'antimateria non interagissero affatto, sarebbe impossibile distinguerle: per questo motivo, si può affermare che

l'antimateria è la gemella della materia. Di conseguenza, per poter capire il concetto di antimateria, è prima necessario comprendere le caratteristiche della materia ordinaria. Dal punto di vista classico, il concetto di materia incorpora tutto ciò che ha una massa, occupa uno spazio e perdura nel tempo. Questo concetto include elementi che vanno dalle particelle subatomiche (ovvero più piccole dell'atomo) fino ai corpi celesti più grandi dell'universo. Le particelle subatomiche si combinano in varie configurazioni per formare atomi, elementi, molecole o corpi, allo stesso modo in cui le lettere dell'alfabeto si combinano formare sillabe, parole, frasi

e libri.

L'elenco delle particelle subatomiche identificate aumenta regolarmente grazie alle scoperte realizzate nei centri di ricerca.

L'identificazione e la differenziazione delle particelle sono possibili grazie al fatto che ognuna di esse possiede caratteristiche fisiche specifiche (tra cui massa, carica elettrica e momento magnetico) che conferiscono loro proprietà uniche. Le più conosciute sono quelle che costituiscono l'atomo, ovvero il protone, il neutrone e l'elettrone.

Il termine atomo deriva dal greco *atomón*, che significa "indivisibile". Si tratta del nome che il filosofo greco Democrito utilizzò per definire l'unità

più piccola della materia, ossia un'unità indivisibile. Anche se attualmente non vi è alcun dubbio che gli atomi siano divisibili in particelle ancora più piccole, l'antico concetto di unità minima non è del tutto sbagliato, dal momento che l'atomo continua a essere l'unità più piccola di materia dotata delle proprietà di un elemento chimico: mentre i protoni, gli elettroni o i neutroni sono tutti uguali nell'ambito della stessa classe di particelle, gli atomi presentano proprietà chimiche variabili a seconda della loro configurazione interna, dando luogo ai 118 elementi chimici conosciuti, di cui 94 sono presenti in natura e 24 sono stati sintetizzati

artificialmente.

L'identità di ogni atomo è determinata dal numero di protoni che contiene, chiamato numero atomico (numero Z). Un atomo di ossigeno, per esempio, possiede otto protoni; se ne perde uno, non sarà più un atomo di ossigeno ($Z=8$), ma si trasformerà in un atomo di azoto ($Z=7$). Il criterio maggiormente accettato per ordinare gli elementi è la tavola periodica, la cui prima versione fu pubblicata nel 1869 dal chimico russo Dmitrij Ivanovič Mendeleev.

I protoni si trovano nel nucleo dell'atomo con i neutroni, tenuti insieme da legami molto intensi realizzati da una delle forze fondamentali della natura, la

cosiddetta interazione (o forza) nucleare forte. Nel nucleo si concentra la maggior parte della massa dell'atomo: la massa di un protone è di $1,6726 \times 10^{-27}$ kg, quella del neutrone è leggermente maggiore, pari a $1,6749 \times 10^{-27}$ kg. In confronto, la massa dell'elettrone è insignificante, pari a $9,1094 \times 10^{-31}$ kg, oltre 1800 volte più piccola rispetto a quella del protone. Nel bilancio della distribuzione della massa di un atomo qualsiasi, quasi il 100% di essa si concentra nel nucleo.

Gli elettroni, nonostante contribuiscano in maniera trascurabile alla massa dell'atomo, sono responsabili di quasi tutto il suo volume. Orbitano

attorno al nucleo a una distanza nell'ordine di 10^{-10} m, lasciando solo spazio vuoto tra essi e il nucleo. Per comprendere le dimensioni atomiche, possiamo ricorrere ad alcuni confronti: se un atomo avesse le dimensioni di un campo da calcio, il nucleo avrebbe le dimensioni di un pisello posto al centro del campo, e la dimensione di un protone rispetto a quella della Terra è simile alla dimensione del nostro pianeta rispetto all'intera Via Lattea. In conclusione mentre quasi tutta la massa di un oggetto è attribuibile ai nucleoni (ovvero le particelle contenute nel nucleo, protoni e neutroni) degli atomi che lo compongono, il suo volume è

dovuto agli elettroni o, più precisamente, alla loro disposizione attorno ai nuclei atomici.

Gli elettroni non possono orbitare in qualsiasi regione dello spazio. In realtà, accade esattamente il contrario: gli elettroni possono orbitare solo in poche regioni permesse, chiamate orbitali atomici. Ogni orbitale può essere occupato da un numero limitato di elettroni, dotati di una quantità di energia specifica che diminuisce progressivamente quanto più l'orbitale si trova vicino al nucleo. Secondo il principio di minima energia, ogni sistema fisico stabilizzarsi in uno stato di energia minima. Di conseguenza, gli elettroni tendono a riempire prima

l'orbitale più vicino al nucleo, poi il secondo, il terzo e così via, fino a quando tutti gli elettroni non si siano distribuiti. Si può immaginare il nucleo come l'arena di un anfiteatro, gli orbitali come le gradinate che la circondano e il pubblico come gli elettroni. Secondo questa similitudine, ogni persona del pubblico cercherà di stare più vicino possibile all'arena, al fine di vedere o ascoltare con il minimo sforzo.

Quando almeno uno degli elettroni dell'atomo si trova a un livello di energia più elevato rispetto al livello minimo permesso, si dice che l'atomo è eccitato. Al contrario, se tutti gli elettroni si trovano nel rispettivo livello

di energia minimo permesso, si dice che l'atomo è nel suo stato fondamentale. In uno schema che mostra la configurazione degli elettroni di un atomo di idrogeno, di un atomo di ossigeno e di un atomo di francio, rispettivamente con 1, 8 e 87 elettroni, nei loro stati fondamentali. Si noti che, trattandosi di uno schema, questo non mostra la forma reale degli orbitali, che non sono circolari ma di forme differenti e molto più complesse.

Gli atomi nello stato fondamentale sono neutri, ovvero non possiedono alcuna carica elettrica. Tuttavia, tra le particelle che li formano, le uniche neutre sono i neutroni, mentre gli elettroni hanno una carica negativa e i protoni positiva. I segni delle cariche

non corrispondono a una proprietà negativa o positiva, ma sono solo convenzioni utilizzate per indicare che tali cariche sono opposte.

Gli orbitali atomici non corrispondono alla traiettoria precisa percorsa da un elettrone, ma descrivono la regione dello spazio nella quale è più probabile trovarlo: secondo le leggi della meccanica quantistica è impossibile conoscere con esattezza la sua posizione in ogni momento. Nel 1831, il fisico britannico Michael Faraday scoprì il fenomeno dell'induzione elettromagnetica, ossia il fenomeno secondo cui una carica elettrica in moto crea un campo

magnetico: poiché gli elettroni sono in costante movimento e sono carichi elettricamente essi producono un campo magnetico che conferisce loro una proprietà chiamata momento magnetico, responsabile della loro interazione con altre particelle o campi dotati di magnetismo.

L'interazione tra gli atomi produce costantemente uno scambio di elettroni, che vengono acquistati o ceduti a seconda della struttura degli atomi. Cedendo elettroni, gli atomi neutri si convertono in cationi, carichi positivamente in quanto dotati di un numero maggiore di protoni nel nucleo rispetto al numero di elettroni presenti negli orbitali. Al contrario, quando gli

atomi catturano elettroni, si trasformano in anioni, carichi negativamente. Grazie a questa tendenza a cedere o ad acquistare elettroni, gli atomi si combinano con altri atomi dello stesso elemento o di elementi diversi formando molecole, composti cristalli e altre strutture di cui è costituita la materia che conosciamo. Esiste solo un gruppo di elementi, chiamati gas nobili, la cui struttura chimica è talmente stabile che essi in genere non reagiscono con altri atomi, anche appartenenti allo stesso elemento. Riassumendo, le particelle che formano la materia ordinaria hanno come proprietà fondamentali una massa, una carica elettrica e un momento

magnetico determinati e si combinano tra loro dando luogo a forme più complesse di materia grazie alle interazioni che si stabiliscono tra le stesse.

ANTIMATERIA: L'ALTRO LATO DELLO SPECCHIO

A ogni particella di materia si può associare un'antiparticella con le medesime proprietà fondamentali, ma con almeno una di segno opposto. Questa situazione può essere paragonata a quella di due gemelli identici, uno dei quali destrimano e l'altro mancino: anche se a prima vista sarebbe

impossibile distinguerli, la dominanza dei lati opposti del corpo sarebbe sufficiente per farli interagire con l'ambiente circostante in maniera diversa. In generale, le antiparticelle vengono definite come particelle identiche alle rispettive particelle ordinarie, ma con carica elettrica opposta. Tuttavia, questa definizione non è del tutto esatta, in quanto anche le particelle neutre, come il neutrone, hanno la corrispondente antiparticella. Di fatto, l'unica particella che non possiede un'antiparticella corrispondente è il fotone, la cui antiparticella coincide con il fotone stesso.

L'interazione tra le antiparticelle

è esattamente uguale all'interazione tra le particelle ordinarie. Di conseguenza, partendo dalle antiparticelle elementari, si possono formare antiatomi, antielementi, antimolecole e si potrebbe arrivare anche alla formazione di antimondi e antiuniversi. Per esempio, per formare un antiatomo sarebbero necessarie le antiparticelle dei protoni, dei neutroni e degli elettroni.

Esattamente come l'atomo con la configurazione più semplice è quello dell'idrogeno, l'antiatomo più semplice sarebbe quello dell'anti-idrogeno, formato da un antiprotone e da un positrone. Gli antiprotoni sono perfettamente identici ai protoni, salvo

per il fatto che la loro carica elettrica è di segno negativo anziché positivo, anche se presenta lo stesso valore assoluto ($1,6 \times 10^{-19}$ C). Le antiparticelle degli elettroni sono i positroni (l'unica antiparticella che ha un nome proprio, non formato utilizzando il prefisso "anti"), che sono perfettamente identici agli elettroni, ma con carica elettrica positiva anziché negativa. Infine l'antineutrone ha la stessa massa del neutrone e, come quest'ultimo, è privo di carica elettrica. Tuttavia, i loro momenti magnetici hanno direzione opposta. Il nome antimateria può essere un po' ingannevole, in quanto induce a pensare che tutte le sue proprietà siano opposte a

quelle della materia. Di fatto, alcuni scienziati preferiscono chiamarla con altri nomi, per esempio materia specchio, come la definiscono Robert L. Forward e Joel Davis nel loro libro *Mirror matter: pioneering antimatter physics*. Sono stati proposti anche i termini *comateria*, *contromateria* e *obmateria*, nessuno dei quali si è affermato nella comunità scientifica, che continua a chiamarla prevalentemente *antimateria*.

UN INCONTRO PIÙ CHE ESPLOSIVO

Esiste un fenomeno che, da solo, giustificherebbe la denominazione antimateria: è il fenomeno di annichilazione delle coppie particella-antiparticella. Quando un'antiparticella incontra la particella corrispondente, entrambe si annichilano, lasciando quale

unica traccia della loro esistenza un'enorme emissione di energia. L'annichilazione della materia con l'antimateria si verifica soltanto quando l'interazione avviene tra particelle e antiparticelle corrispondenti; in altre parole gli elettroni si annichilano con i positroni, ma non con gli antiprotoni. Lo stesso accade per i protoni, che si annichilano solo con gli antiprotoni, e per i neutroni, che si annichilano solo con gli antineutroni.

Si ritiene che questo fenomeno spieghi perché l'antimateria non sia facilmente rinvenibile nell'universo, e ancor meno sulla Terra e perché la poca quantità di antimateria presente abbia una vita estremamente breve. Un

positrone è in grado di muoversi indefinitamente attraverso il vuoto dello spazio profondo; tuttavia, è sufficiente il contatto con un solo elettrone perché i due scompaiano.

L'annichilazione tra la materia e l'antimateria produce una quantità di energia il cui valore dipende dalla massa delle particelle interagenti, come contempla la formula più famosa della storia della scienza: $E = mc^2$. Questa equazione, formulata da Albert Einstein, indica che la massima quantità di energia (E) che si può ottenere da un corpo a riposo è uguale alla sua massa (m) moltiplicata per il quadrato della velocità della luce nel vuoto (c). Poiché

la velocità della luce nel vuoto è molto elevata, pari a $299'792'458$ m/s, è sufficiente l'annichilazione di una massa molto piccola per produrre quantità di energia enormi.

Dietro una formula matematica tanto, semplice si cela uno dei principi più importanti della fisica: ciò che realmente esprime questa formula è che l'energia e la massa non si creano né si distruggono, ma si trasformano l'una nell'altra. In altre parole, rappresentano una stessa grandezza presente in natura sotto due forme differenti.

Di fatto, se si pone $c = l$ per la velocità della luce, la massa delle particelle subatomiche può essere espressa in elettronvolt (eV), un'unità di

energia: la massa dell'elettrone, per esempio, è di $0,511 \text{ MeV}$.

L'equazione di Einstein si deduce dai principi fondamentali della teoria della relatività ristretta, le cui leggi, se riferite alla scala della maggior parte dei fenomeni macroscopici, possono essere semplificate e sostituite dalle leggi della meccanica newtoniana, in modo tale che l'energia dei corpi possa essere calcolata utilizzando espressioni che dipendono dal tipo di fenomeno studiato: per esempio, l'energia cinetica di un corpo in moto è determinata dalla formula $E = \frac{1}{2}mv^2$, dove v è la velocità con cui si sposta il corpo. Per apprezzare la differenza tra i livelli di

energia in gioco nell'uno e nell'altro caso, è possibile ricorrere al seguente esempio: se due automobili che pesano 1000 kg ciascuna si scontrano frontalmente a una velocità di 100 km/h, l'energia cinetica dell'impatto provocherà importanti danni a entrambi i veicoli. Tuttavia, se una delle due auto fosse costituita da materia e l'altra da antimateria, l'annichilazione materia-antimateria dovuta al semplice contatto tra le loro masse darebbe luogo a un'esplosione di energia sufficiente causare danni su scala planetaria.

L'annichilazione tra materia e antimateria determina la trasformazione in energia pressoché del 100% della massa coinvolta, un valore a cui non si

avvicina nemmeno lontanamente alcun'altra fonte di energia conosciuta. Infatti, le bombe a idrogeno, le più potenti mai sviluppate, sono in grado di convertire solo l'1% della propria massa in energia. Questo rendimento perfetto fa sì che con una piccola quantità di massa si possa ottenere molta energia: basterebbe un solo grammo di materia e antimateria per produrre la stessa quantità di energia rilasciata da una delle bombe atomiche lanciate su Hiroshima e Nagasaki alla fine della Seconda guerra mondiale.

Per avere un'idea più chiara delle quantità di energia che si possono ottenere attraverso l'annichilazione

materia-antimateria, immaginiamo una tabella che mostra la relazione tra l'energia coinvolta in alcuni fenomeni che si verificano costantemente attorno a noi e la massa e la quantità di antiprotoni che sarebbero necessarie per produrre una quantità di energia equivalente.

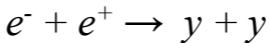
Come si può osservare, con quantità molto piccole di antimateria si possono ottenere grandi quantità di energia. La massa di un'automobile, per esempio, sarebbe sufficiente per coprire il fabbisogno di energia di tutto il pianeta per 1 anno intero, e con pochi milligrammi (il peso della millesima parte di un foglio di carta) si potrebbe mettere in orbita attorno alla Terra un

peso di alcune tonnellate.

L'annichilazione materia-antimateria è l'esempio perfetto e più esplicativo dell'equazione definita da Einstein, che cambiò il corso della fisica moderna. Tuttavia, in che modo e perché avviene la conversione da massa a energia e viceversa? Per comprendere questo fenomeno è importante ricordare che, in base alla legge di conservazione dell'energia, questa non può essere né creata né distrutta. Di conseguenza, quando una particella si annichila con la rispettiva antiparticella, queste si trasformano in particelle e antiparticelle con massa inferiore e, quindi, con più energia. Poiché ogni tipo di

annichilazione è differente, le particelle e la quantità di energia risultanti dipendono dalle condizioni e dalle particelle iniziali.

Per esempio, l'annichilazione più semplice è quella che avviene tra un elettrone e un positrone, che dà luogo alla produzione di due raggi gamma (γ). Le particelle che formano i raggi gamma sono rappresentate da fotoni (particelle senza massa) con frequenza molto elevata, che contengono tutta l'energia in cui si è convertita la massa della coppia elettrone-positrone. Questa reazione si esprime nel seguente modo:



Quando la particella e l'antiparticella si incontrano a riposo, i fotoni vengono emessi nella stessa direzione ma in verso opposto, con un'energia di $0,511 \text{ MeV}$ ciascuno, equivalente alla massa di un elettrone o di un positrone a riposo. Se le particelle si incontrano in moto, la loro annichilazione produrrà anche in questo caso due fotoni gamma, con direzione ed energia dipendenti dalle condizioni iniziali dell'annichilazione.

SFRUTTARE IL MATERIALE PIÙ PERICOLOSO DELL'UNIVERSO

Il fenomeno dell'annichilazione tra materia e antimateria è di grande interesse scientifico e ci si può aspettare che lo sviluppo di processi diretti al controllo di queste interazioni porterà in

futuro all'introduzione di molteplici applicazioni tecnologiche. Al giorno d'oggi, gli usi pratici dell'antimateria sono molto limitati; tuttavia, considerato il suo enorme potenziale nella generazione di energia, è prevedibile che il suo impiego sarà una delle chiavi del futuro.

Il pubblico in generale può essere affascinato dalle applicazioni dell'antimateria con cui gli scrittori di fantascienza hanno stimolato la nostra immaginazione: robot dotati di coscienza grazie ai loro cervelli positronici o astronavi in grado di solcare lo spazio interstellare, come quelle di *Star Trek* e della saga di *Star Wars*. Per il momento, gli scienziati e gli

ingegneri si concentrano su applicazioni realizzabili in un arco di tempo di pochi anni o decenni.

Le proprietà dell'antimateria vengono attualmente studiate nei più importanti laboratori di particelle del mondo, come il CERN (Svizzera) o il Fermilab (Stati Uniti), il cui massimo obiettivo è scoprire i segreti più profondi dell'universo. Tuttavia, ciò non significa che l'antimateria non abbia già trovato alcune applicazioni pratiche: in campo medico si utilizza per ottenere immagini dell'interno del corpo umano mediante la tecnica chiamata PET (*Positron Emission Tomography*, tomografia a emissione di positroni). Si

sta anche cercando di capire come potere sfruttare le sue proprietà al fine di utilizzarla come fonte di energia: in teoria, l'antimateria è il combustibile perfetto, in quanto ne basta una massa molto piccola per ottenere grandi quantità di energia, senza lasciare residui materiali apprezzabili. Inoltre, alcuni studi pionieristici hanno esplorato il suo potenziale in altri campi, come l'ingegneria e la metallurgia.

Tra le possibili applicazioni dell'antimateria, quella che può sembrare più futurista potrebbe in realtà concretizzarsi solo a distanza di pochi anni: si tratta dell'uso dell'antimateria come combustibile per i viaggi nello spazio. Nonostante l'elevato costo

economico attualmente richiesto per creare l'antimateria, il suo sfruttamento a questo scopo potrebbe essere redditizio. Per generare l'enorme quantità di energia necessaria per portare un veicolo spaziale al di là del campo gravitazionale terrestre, i razzi attuali utilizzano combustibili chimici, dei quali è richiesta una grande quantità che finisce per costituire la parte maggiore della massa totale del dispositivo. Se si aumenta la massa che si desidera mettere in orbita, la quantità di combustibile cresce esponenzialmente, raggiungendo ben presto un limite tecnologico nella dimensione del razzo che si può costruire. Le piccole quantità

di antimateria necessarie per mandare un cargo nello spazio risolverebbero questo problema, in quanto sarebbero trascurabili rispetto alla massa della parte restante della navicella.

Un motore funzionante con un combustibile costituito da materia e antimateria convertirebbe il 100% della loro massa in energia, migliorando i viaggi nello spazio non solo in termini economici, ma anche in termini di tempo e comodità. Di conseguenza, aumenterebbero enormemente le distanze raggiungibili, tanto da consentire, teoricamente, di uscire dal sistema solare. Si immagini, per esempio, come potrebbe essere un viaggio spaziale verso un pianeta situato

a una distanza dalla Terra pari a 40 anni luce ($3,78 \times 10^{14}$ km), ossia un pianeta raggiungibile in 40 anni viaggiando alla velocità della luce. In questo caso, nei primi 4,93 anni di viaggio la navicella spaziale, spinta a propulsione dall'antimateria, viaggerebbe con un'accelerazione equivalente a quella della gravità terrestre, pari a $9,81$ m/s; ciò permetterebbe agli astronauti di muoversi esattamente con la stessa facilità e comodità che avrebbero sulla superficie della Terra. La navicella raggiungerebbe quindi una velocità equivalente al 98% della velocità della luce e continuerebbe a viaggiare in queste condizioni per altri 32,65 anni,

muovendosi solo per inerzia, senza necessità di propulsione. Infine, avvicinandosi al suo obiettivo, la navicella impiegherebbe altri 4,93 anni per decelerare: complessivamente, il viaggio durerebbe 42,51 anni. Per fare un confronto, sfruttando il meccanismo di propulsione delle navicelle a combustibile chimico, come quelle attuali, un viaggio verso la stella più vicina al sistema solare, Proxima Centauri, che si trova a 4,23 anni luce (4×10^{13} km) durerebbe approssimativamente 72'000 anni.

Anche se il confronto tra il tempo necessario per effettuare un ipotetico viaggio interstellare con una navicella

alimentata ad antimateria e quello necessario per effettuare lo stesso viaggio con una navicella a combustibile chimico è nettamente a favore della prima, un viaggio di più di 40 anni può sembrare troppo lungo per l'equipaggio. In questo caso, le leggi della teoria della relatività giocano a favore del viaggiatore umano: quando un corpo si muove a velocità relativistiche, prossime a quella della luce, il tempo trascorre in maniera diversa rispetto a quanto percepito da un osservatore statico. Pertanto, il tempo per l'equipaggio della navicella trascorrerebbe più lentamente rispetto a quanto avviene per gli abitanti della Terra: mentre sulla Terra passerebbero

42,5 anni, per gli astronauti all'interno della navicella trascorrerebbero solo 11,1 anni. Sebbene questi tempi non siano neanche lontanamente paragonabili a quelli pressoché istantanei prefigurati dal cinema di fantascienza, si avvicinano comunque sempre più all'ambito del tecnologicamente possibile.

Il combustibile di antimateria migliorerebbe enormemente i viaggi nello spazio, ma si potrebbe applicare anche ai mezzi di trasporto che effettuano spostamenti più contenuti? In teoria, se si utilizzasse un combustibile di antimateria per i veicoli terrestri o per gli aerei, si potrebbe viaggiare a

velocità molto elevate e si ridurrebbe i tempi impiegati per gli spostamenti. Tuttavia, questi vantaggi non compenserebbero i vari inconvenienti che produrrebbe un tale combustibile. Tanto per cominciare, l'antimateria è talmente costosa da produrre che spesso viene chiamata "la sostanza più cara del pianeta" e utilizzarla nei mezzi di trasporto terrestri non sarebbe redditizio. Anche ammesso che, un giorno, si possa arrivare a ridurre il costo dell'antimateria o la si possa ottenere da una fonte naturale, non sarebbe comunque una buona idea utilizzarla per il trasporto terrestre dato che, in caso di incidente, l'antimateria immagazzinata entrerebbe in contatto

con la materia ordinaria, producendo un'esplosione di energia sufficiente a distruggere, come minimo, i dintorni dell'evento. Di conseguenza, oltre a cercare di abbattere il costo di produzione, si dovrebbe inventare un metodo estremamente sicuro per conservarla e trasportarla; ciò comporterebbe costi ulteriori, che metterebbero i veicoli ad antimateria in una posizione di svantaggio rispetto ad altre soluzioni più vantaggiose, come le auto elettriche e i treni a levitazione magnetica.

Esiste un caso particolare in cui l'antimateria potrebbe servire da combustibile sul nostro pianeta:

l'esplorazione del mondo sottomarino. Come nel caso dei razzi, un sistema in grado di estrarre l'energia dell'annichilazione materia-antimateria avrebbe un peso e un volume significativamente inferiori rispetto ai sistemi attuali, consentendo ai sottomarini di essere molto più leggeri e spaziosi. Pertanto, in un futuro prevedibile, l'antimateria potrebbe portarci dalle maggiori profondità del pianeta al punto dello spazio più lontano mai raggiunto dall'uomo: paradossalmente, il combustibile più pericoloso troverebbe applicazioni solo nei veicoli che affrontano le condizioni di maggiore avversità per l'essere umano.

L'ANTIMATERIA AL NOSTRO INTERNO

In campo medico, da vari anni, l'antimateria trova applicazioni vantaggiose. All'inizio degli anni '80, i fisici Ted Kalogeropoulos e Levy Gray, della Syracuse University (Stati Uniti), scoprirono che irradiando un oggetto con un fascio di antiprotoni è possibile

ottenere un'immagine della sua struttura interna. Poiché ciò è applicabile anche all'esame interno del corpo umano, i due ricercatori svilupparono una tecnica per acquisire immagini mediche, che battezzarono con il nome di radiografia antiprotonica. Oltre a rivoluzionare il campo della diagnostica per immagini, scoprirono che lo stesso fascio di antiprotoni avrebbe potuto essere utilizzato per distruggere tumori oggi inoperabili o per riparare lesioni profonde del corpo umano: la radioterapia con antiprotoni risulterebbe più efficace rispetto a quella basata sull'uso dei protoni, in quanto gli antiprotoni, una volta raggiunta la zona desiderata, si annichilerebbero con la

materia emettendo energia addizionale e producendo, secondo quanto stimato, effetti collaterali minori.

Come accennato in precedenza, in medicina esiste una tecnica per acquisire immagini chiamata PET, nella quale, anziché irradiare il corpo con antiparticelle, si rilevano i positroni emessi durante la disintegrazione di alcuni isotopi del carbonio, dell'azoto, dell'ossigeno e del fluoro.

Dopo avere somministrato al paziente farmaci contenenti questi isotopi, appositamente preparati per essere assorbiti nei tessuti target, è possibile studiare una zona specifica in quanto la maggior concentrazione di

questi elementi in tale zona ne rende più intensa l'emissione di positroni, che annichilandosi con gli elettroni circostanti emettono raggi gamma. Registrando e analizzando queste emissioni e le loro caratteristiche, si ottiene un'immagine molto dettagliata della zona studiata.

La quantità di antimateria necessaria per le applicazioni mediche è molto piccola e basta aumentarla solo di poco affinché possa essere utilizzata, in maniera simile, anche in ingegneria. L'antimateria si può utilizzare per ottenere immagini di materiali più densi del corpo umano, come i metalli, quindi risulta utile nelle tecniche di analisi e di costruzione dei sensori. Con le tecniche

applicata dell'antimateria è possibile non solo rilevare imperfezioni in un blocco di metallo, ma anche riscaldare zone molto localizzate al fine di eliminare tali imperfezioni. Con un po' più di antimateria sarebbe anche possibile ottenere immagini di oggetti situati a distanza dalla sorgente degli antiprotoni, fino a qualche centinaio di metri. Per il momento, queste applicazioni possono essere impiegate, per esempio, per rilevare e correggere imperfezioni strutturali in modo poco invasivo, permettendo interventi che sarebbero impossibili con qualsiasi altro procedimento.

Nonostante l'importanza di tutte le

applicazioni citate in precedenza, l'aspetto più rilevante e utile per il futuro è lo studio stesso delle proprietà dell'antimateria, senza il quale non sarebbe stato possibile sviluppare le applicazioni pratiche attuali, né si potrebbero sviluppare applicazioni future. L'obiettivo è svelare la struttura dell'antimateria, le sue caratteristiche, se le sue proprietà sono completamente simmetriche rispetto a quelle della materia o se, al contrario, esistono alcune proprietà ancora sconosciute che la rendono più differente dalla materia convenzionale rispetto a quanto riteniamo, per la qual cosa non potrebbe più essere definita come la sua gemella. Lo studio dell'antimateria non solo è

imprescindibile per lo sviluppo delle applicazioni pratiche future, ma è ancora più importante per comprendere meglio l'origine e la struttura dell'universo, in particolare gli eventi che accaddero negli istanti immediatamente successivi al Big Bang.

Nelle violente disintegrazioni materia-antimateria che si producono all'interno dei grandi acceleratori, si generano nuove particelle delle quali vengono studiate le proprietà, nonché le leggi e le simmetrie fisiche che governano tali proprietà. In questo modo, l'uso dell'antimateria contribuisce allo sviluppo del modello attuale della fisica delle particelle, conosciuto come

modello standard.

Quando l'antimateria giungerà nei laboratori di fisica delle università, l'equazione $E = mc^2$ diventerà la reazione più impressionante ed energetica mai osservata dagli studenti.

UN PERCORSO DI ANTIPARTICELLE

Considerando le meraviglie dell'antimateria e le piccole quantità richieste per un uso pratico, è ragionevole chiedersi per quale motivo non venga sfruttata maggiormente e quali siano gli inconvenienti che rendono così difficile il suo utilizzo, oltre al già citato costo di produzione proibitivo.

Esiste un inconveniente molto importante che pregiudica l'utilizzo dell'antimateria, un fenomeno che è contemporaneamente la sua maggiore virtù e il suo peggior difetto: il fatto che l'antimateria si annichila quando interagisce con la materia. Questo fenomeno spiega perché l'antimateria sia estremamente difficile da immagazzinare e conservare, dato che si deve evitare qualsiasi contatto delle antiparticelle con le particelle: non solo l'antimateria deve essere conservata in un recipiente sottovuoto spinto, ma e ne deve anche evitare il seppur minimo contatto con le pareti. A causa di questa proprietà, il percorso per arrivare alla

manipolazione dell'antimateria è stato e continua a essere lungo e complicato.

Le prime particelle di antimateria a essere scoperte sperimentalmente furono i positroni generati in maniera naturale, identificati nel 1933, pochi anni dopo che Paul Dirac ne aveva dedotto l'esistenza a livello teorico. La creazione artificiale delle prime antiparticelle avvenne solo un paio di decenni dopo. Quando si creò per la prima volta l'antimateria in un acceleratore di particelle, nessuno aveva pensato alle applicazioni successive che avrebbe potuto avere, a quel tempo inimmaginabili: il motivo per cui fu creata l'antimateria dato dal fatto che mancavano delle evidenze

empiriche che confermassero l'esistenza di qualsiasi antiparticella che non fosse il positrone. Si cercava soprattutto di trovare l'antiprotone, la cui esistenza sembrava logica ed evidente in base a tutte le previsioni teoriche anche se, 22 anni dopo l'identificazione del primo positrone, non era ancora stata confermata da evidenze sperimentali.

La principale difficoltà nella generazione di antiprotoni in un acceleratore di particelle è che, per crearli, è necessaria una quantità di energia molto più elevata rispetto a quella richiesta per la creazione dei positroni, dal momento che la loro massa è 1836 volte maggiore: la massa

dell'antiprotone è di 938 MeV, mentre quella del positrone di 0,511 MeV. Pertanto, per creare un antiprotone è necessario generare un'energia di $2 \times 938 = 1876$ MeV. Il fattore 2 si applica in quanto, per conservare la carica neutra totale, si deve creare una coppia protone-antiprotone, entrambi di massa identica. In caso contrario, infatti, si romperebbe la simmetria, cosa non permessa dalle leggi della meccanica quantistica, come aveva già dimostrato Dirac.

Nel 1954, un'équipe dell'Università della California (Berkeley), guidata dal fisico italiano Emilio Segrè e composta dagli statunitensi Clyde Wiegman, Thomas

Ypsilantis e Owen Chamberlain, si propose di abbattere questa barriera energetica al fine di creare gli antiprotoni e dimostrarne sperimentalmente l'esistenza. Nell'arco di 18 mesi questi scienziati progettaron l'esperimento e misero a punto il Bevatron, l'acceleratore di particelle del Lawrence Berkeley National Laboratory.

Il Bevatron era in grado di produrre l'energia necessaria per ottenere antiprotoni a partire dall'energia emessa durante gli urti di particelle accelerate molto energetiche contro un bersaglio stazionario. In questo modo, per esempio, dall'urto di

due protoni iniziali si potevano ottenere quattro particelle finali: i due protoni iniziali più una coppia protone-antiprotone, generata dall'energia dell'impatto.

Gli scienziati che lavoravano al progetto sapevano perfettamente che la capacità di rivelare l'antiprotone era tanto importante quanto la capacità di crearlo. Così, dotarono il Bevatron di tre sistemi di rivelazione, basati su processi distinti:

- Piastre con emulsione fotografica collocate dietro il bersaglio che veniva bombardato. Quando una particella interagiva con la pellicola fotografica, lasciava una traccia

caratteristica e dipendente dalle proprietà della particella stessa.

- Contatore Cherenkov, che permetteva di identificare il tipo di particelle che lo attraversavano osservando la cosiddetta radiazione Cherenkov, un'emissione luminosa azzurra causata da particelle cariche elettricamente in moto ad altissima velocità, alimentate dall'interazione tra gli antiprotoni e il materiale del rivelatore;
- Contatori di particelle con cronometri incorporati, per misurare l'intervallo di tempo richiesto da ciascuna particella per attraversare il rivelatore, dedurre la velocità e, di

conseguenza, determinare il tipo di particella.

Il 4 ottobre 1955, nel Bevatron fu rivelato il primo antiprotone, una sola antiparticella tuttavia sufficiente a fugare definitivamente ogni dubbio sulla sua esistenza. Due settimane dopo, l'équipe pubblicò la sua scoperta su *The Physical Review Letters*, un risultato che fu accolto come la conferma delle aspettative da parte della comunità scientifica, la quale, dopo la dimostrazione sperimentale del positrone e le previsioni teoriche di Dirac, si sarebbe dimostrata più sorpresa da un eventuale risultato negativo. Per questo risultato, nel 1959

Segrè e Chamberlain ricevettero il premio Nobel per la Fisica.

Gli studi per creare antiparticelle continuarono e bastarono pochi mesi perché nel Bevatron venissero identificati i primi antineutroni, mentre tra la dimostrazione del positrone e quella dell'antiprotone erano trascorsi oltre 20 anni. Gli acceleratori di particelle si sono evoluti rapidamente fino a raggiungere, al giorno d'oggi, livelli di energia prima impensabili. I nuovi e più moderni acceleratori di particelle del CERN o del Fermilab ebbero la meglio sul Bevatron che andò gradualmente perdendo il suo ruolo di protagonista nel mondo della fisica delle

particelle fino a quando, nel 2009, iniziò il suo smantellamento. I primi passi, ossia la creazione e la rivelazione dell'antimateria, erano stati compiuti. Tuttavia, non erano sufficienti per studiarne le proprietà. Il passo successivo sarebbe consistito nel riuscire a conservare l'antimateria, ovvero nel mantenerla per almeno alcuni secondi senza che si annichilisse a contatto con la materia, al fine di renderne possibile l'analisi. Anche questa volta gli scienziati dovettero attendere più di 20 anni per vedere realizzati i propri obiettivi. Infine, il 18 agosto 1978, il CERN emise un comunicato stampa in cui annunciava che, per la prima volta nella storia, si

era riusciti a conservare gli antiprotoni. Infatti, era stato possibile mantenere alcune centinaia di antiprotoni in un dispositivo chiamato ICE (Initial Cooling Experiments) per un periodo di 85 ore; prima di allora, il tempo massimo durante il quale si era riusciti a mantenere gli antiprotoni senza che si annichilassero era di una decimilionesima frazione di secondo. Nel 1981, la capacità di conservare gli antiprotoni permise di produrre, anche al CERN i primi urti tra protoni e antiprotoni, che condussero a importanti scoperte nella fisica delle particelle.

In seguito a questi risultati, gli scienziati si spinsero ancora più avanti

nell'esplorazione e nella scoperta del mondo dell'antimateria. Era necessario dominare l'antimateria come se fosse materia convenzionale: era quindi arrivato il momento di produrre il primo antiatomo. Il 15 settembre 1995 si riuscì a produrre antiatomi di idrogeno, l'antielemento più semplice, costituito solo da un antiprotone e da un positrone. Ancora una volta questo risultato fu realizzato al CERN, utilizzando il LEAR (*Low Energy Antiproton Ring*, anello di antiprotoni a bassa energia). Gli antiatomi impiegarono circa 40 miliardesimi di secondo per reagire con la materia, ma questo intervallo fu sufficiente affinché lasciassero un segno nella storia della scienza. La fisica delle

particelle continuò a progredire a un ritmo sempre più rapido: nel 2002 si poterono creare gli antiatomi freddi, che si muovevano a velocità relativamente basse, facilitando in questo modo lo studio delle loro caratteristiche, e nel giugno del 2011 si arrivò a conservare gli antiatomi per 16 minuti, un periodo di tempo eccezionalmente lungo rispetto all'ordine di grandezza dei fenomeni studiati dalla fisica delle particelle, dove regnano dimensioni estremamente piccole e velocità eccezionalmente elevate, tali da rendere qualsiasi evento molto rapido in confronto ai nostri standard.

TROVARE L'ANTIMATERIA IN NATURA

Per creare artificialmente l'antimateria, è necessario impiegare grandi quantità di energia. Tuttavia, l'universo pullula di sistemi e di fenomeni che coinvolgono quantità di

energia di gran lunga maggiore rispetto a quella necessaria per creare l'antimateria, per cui non è azzardato supporre che in alcuni di essi sia possibile trovare una fonte naturale di antimateria. Di fatto, i primi positroni rivelati da Carl David Anderson nel 1932 erano il prodotto della collisione dei raggi cosmici con la materia ordinaria.

Per localizzare la presenza di particelle e antiparticelle nell'universo, gli scienziati posizionarono negli strati superiori dell'atmosfera dei rivelatori di particelle che permisero di identificare nel cuore della nostra galassia un oggetto ricco di positroni, uno pseudoatomo formato da un elettrone che

orbita attorno a un positrone. La sua disintegrazione ha una firma molto specifica: due raggi gamma con energia di 0,511 MeV, che permettono di identificarne la causa e la localizzazione. Si tratta, com'è ovvio, di una fonte di antimateria inaccessibile.

La fonte di antiprotoni più abbondante in prossimità della Terra si trova nelle fasce di Van Allen, una zona della magnetosfera terrestre in cui si concentra un grande numero di particelle cariche, presenti in quantità tali da avere indotto la NASA a condurre alcuni studi diretti a raccogliere, mediante campi magnetici, l'antimateria che si forma in queste strutture.

Sebbene le altre fonti naturali di antimateria conosciute nella galassia siano scarse, non è necessario esplorare tutto l'universo per poter affermare che sono poco numerose. Come l'annichilazione elettrone-positrone ha la propria firma, così ne hanno una anche le altre annichilazioni tra coppie di particella e antiparticella. Gli scienziati conoscono molto bene le caratteristiche dei segnali che si potrebbero ricevere e sono attenti a rilevarli. Dal momento che, finora, non si è verificata una ricezione abbondante, si può dedurre che non esistano molte fonti naturali di antimateria.

In base allo stato attuale della

scienza, non vi è dubbio che nell'universo esista molta più materia che antimateria, e vi sono anche prove scientifiche che dimostrano che la stessa scarsità di antimateria era presente miliardi di anni fa. Ciò induce a chiedersi quali siano le cause di questo squilibrio. Come è stato dimostrato sperimentalmente ed empiricamente, la creazione di materia e antimateria è simmetrica. In altre parole, la creazione di ogni particella implica la creazione della corrispondente antiparticella. Se tutta la materia esistente nell'universo è stata creata dal Big Bang, in base a questo principio dovrebbe esistere la stessa quantità di materia e di antimateria. Tuttavia, alcune prove sperimentali

mostrano che l'antimateria si creò in quantità differenti. Di conseguenza, si verificò una rottura della simmetria che rimane tuttora inspiegata: non si sa se la natura preferisca, per qualche motivo, la materia all'antimateria o se invece questa rottura fu solo accidentale. Per il momento, l'unica certezza che possiamo avere è che, se dobbiamo la nostra esistenza a qualcosa, questo qualcosa è l'asimmetria tra materia e antimateria verificatasi dopo il Big Bang.

D'altro canto, dalla conoscenza dell'antimateria possiamo attenderci lo sviluppo di nuove tecnologie e applicazioni di cui iniziamo solo a intravedere le prime possibilità, come le

tecniche mediche di diagnosi e trattamento e la capacità di realizzare in un futuro non molto lontano operazioni di ingegneria al momento impossibili, compresa la propulsione di navicelle spaziali che potrebbero portarci al di là dei limiti del sistema solare. Ma, soprattutto, la conoscenza dell'antimateria può essere una componente chiave per comprendere le leggi più profonde della natura, che spiegherebbero l'origine e il futuro dell'universo.