

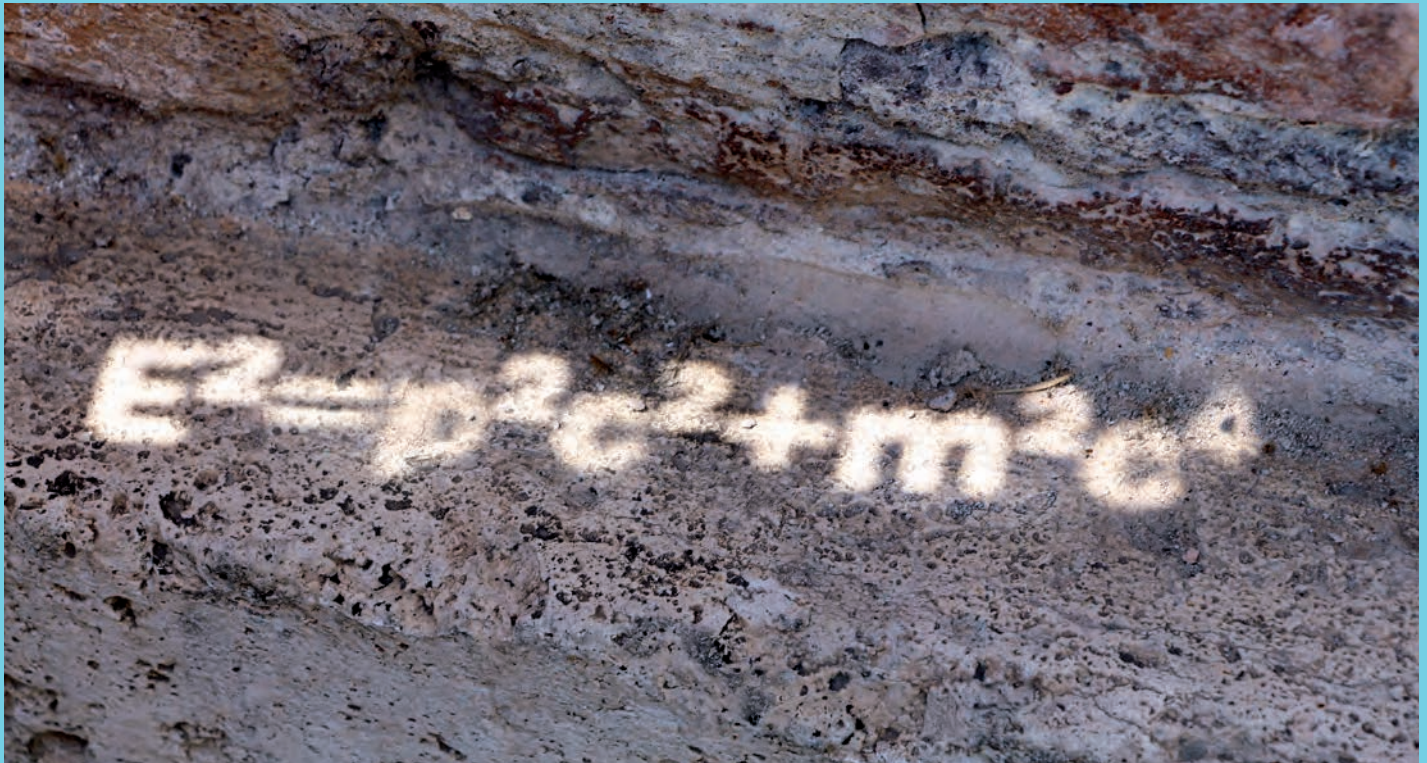
# Creare materia

## Produzione di particelle grazie alla relatività speciale

di Tommaso Spadaro

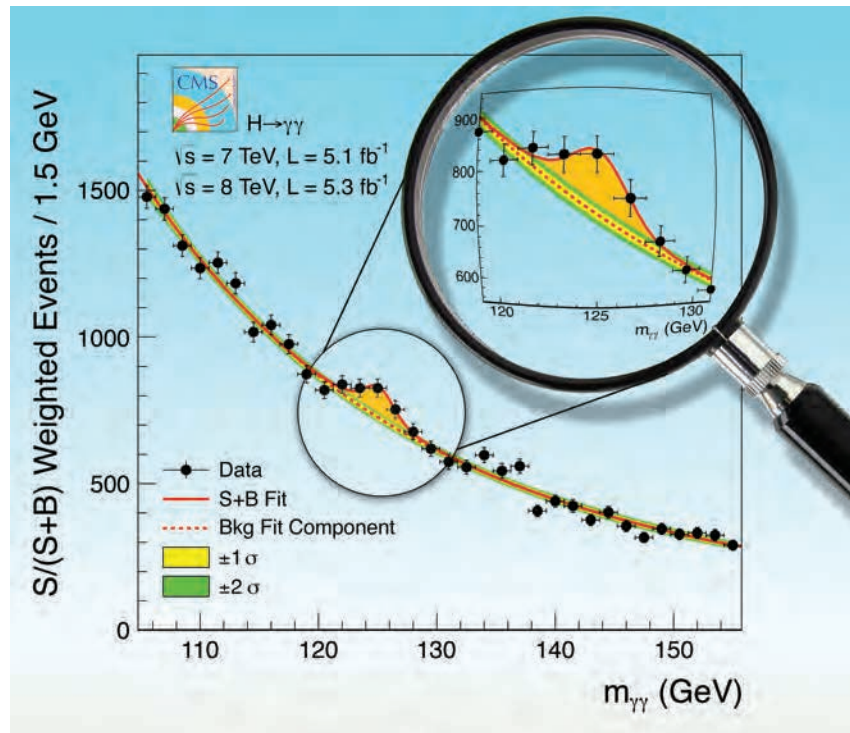
Uno degli obiettivi più ambiziosi della fisica delle particelle è la creazione e la scoperta di particelle “non previste” nel modello di fisica più “assodato” e verificato, perciò detto “standard”. Pur descrivendo con grande precisione la quasi totalità dei fenomeni osservati, il modello standard lascia inevase domande fondamentali che le osservazioni sperimentali suscitano: per esempio, qual è il meccanismo che ha creato l’asimmetria osservata tra materia e antimateria nell’universo; quale natura ha la materia “oscura”, i cui effetti gravitazionali sono stati osservati; da quale meccanismo sottostante derivano le enormi differenze di massa tra le particelle elementari che conosciamo, e così via.

Per farlo, i fisici delle particelle utilizzano le conseguenze sperimentali dell’equazione della relatività speciale, formulata da Albert Einstein nel 1905. In essa (vd. foto),  $E$  rappresenta l’energia di una o più particelle,  $p$  la loro quantità di moto complessivo (dove, in meccanica classica, la quantità di moto di un corpo è data dal prodotto di velocità e massa),  $m$  è la massa del sistema, infine,  $c$  è la velocità della luce. Cosa significa in realtà? La risposta dipende dal sistema considerato. Nel caso di una singola particella a riposo, ad esempio,  $p$  è nulla e l’equazione stabilisce l’uguaglianza tra massa a riposo ed energia, espressa nella famosa equazione  $E = mc^2$ . Questa è già una relazione ricchissima di significato:



a.

Immagine apparsa sulla copertina dell'edizione speciale della rivista Physics Letters B, che raccoglieva i due articoli delle collaborazioni Atlas e Cms sulla scoperta del bosone di Higgs. La figura riporta la distribuzione della "massa invariante" di due fotoni, negli eventi registrati dall'esperimento Cms al Lhc del Cern. La massa invariante è data dalla radice quadrata della differenza tra il quadrato della somma delle energie e il quadrato del modulo della somma vettoriale delle quantità di moto dei due fotoni. Il picco evidenziato dalla lente di ingrandimento è il contributo dovuto al bosone di Higgs.



in relatività, ogni corpo dotato di massa ha un'energia intrinseca. Di converso, si può trasformare l'energia in massa. Per trovare nuove particelle, i fisici cercano di fornire delle risposte con esperimenti di laboratorio: l'idea è di accelerare le particelle facendole interagire a energie sempre più elevate, al fine di produrre, nello stato finale del sistema, nuove e più pesanti particelle, trasformando quindi l'energia "cinetica" delle particelle interagenti in massa, come descritto nell'equazione della relatività speciale.

È così che i fisici sono riusciti a produrre in laboratorio, già a partire dagli anni '60, particelle "leggere" come i muoni e i pioni, che si potevano rivelare direttamente solo come prodotto delle interazioni dei raggi cosmici con l'atmosfera (vd. Asimmetrie n. 10, ndr). Al crescere delle energie delle macchine acceleratrici (vd. in Asimmetrie n. 18 p. 19, ndr) si è arrivati alla fine del secolo scorso a produrre e identificare anche il più "pesante" dei quark, il top, che ha massa di circa 170 GeV, pari a 180 volte la massa del protone.

La presenza di queste particelle potrebbe essere però "effimera": appena create, esse potrebbero decadere, trasformandosi in particelle stabili. Anche in questo caso la nostra equazione di conservazione di massa/energia ci aiuta a individuarle: misurando l'energia e, separatamente, la quantità di moto complessiva dei prodotti di decadimento, si può valutare la differenza tra  $E^2$  e  $p^2c^2$  in un gran numero di interazioni e misurare, così, la massa del sistema. Se,

considerando gli errori di misura, essa ricorre con maggiore frequenza intorno a uno stesso valore, si potrebbe trattare di una nuova singola particella. La massa di questa particella è data dal valore del picco osservato. È seguendo questa strada, che i fisici degli esperimenti Atlas e Cms nel 2012 hanno individuato il bosone di Higgs. Come hanno fatto a scoprirlo? Tra i moltissimi "eventi" di interazione tra due fasci di protoni dell'acceleratore Lhc a un'energia complessiva di 7-8 TeV, ne avevano selezionati alcuni nel cui stato finale erano presenti due fotoni emessi in coincidenza temporale. Il picco mostrato in fig. a si riferisce a quella piccola frazione di casi in cui i due fotoni sono proprio il risultato del decadimento di una singola nuova particella. Si tratta del risultato di vent'anni di ricerca e sviluppo di migliaia di ricercatori.

In che modo si fanno interagire le particelle? Una tecnica comune consiste nell'accelerare particelle cariche tramite campi elettrici, confinarle in una traiettoria stabilita tramite campi magnetici, per scagliarle infine verso un bersaglio in quiete (approccio a *fixed target*, cioè a bersaglio fisso). Possiamo considerare le particelle come dei proiettili. Esse si comportano come delle onde: maggiore è la loro energia, più corta è la lunghezza che riescono a "mettere a fuoco" mentre procedono nel bersaglio. Se entro questa distanza si trova un elemento in grado di interagire, ci sarà un'interazione. Se l'elemento sensibile del bersaglio sia un atomo, un elettrone, un protone, un neutrone, un quark, ecc., dipende dall'energia



considerata e dalla distanza caratteristica della forza di interazione. Talvolta, in questo processo, sia il proiettile che l'elemento sensibile del bersaglio possono cambiare il proprio stato e trasformarsi in altri elementi o persino annichilirsi. La varietà e complessità delle possibilità è notevole. Un punto fermo però rimane: la differenza di  $E^2$  e  $p^2c^2$  è invariante. Essa cioè rappresenta la massa complessiva disponibile a seguito dell'interazione. Spesso la quantità di moto del proiettile è molto maggiore della sua massa a riposo. In questo caso, la massa invariante complessiva è proporzionale alla radice della quantità di moto del proiettile e questa è una conseguenza fisica "scoraggiante": ad esempio, la fatica (e il costo) profusi per aumentare la quantità di moto del proiettile del 100%, porta a un misero aumento del 40% della massa invariante disponibile.

Per sfruttare pienamente l'energia disponibile, nell'approccio alternativo si prevede di accelerare due insiemi distinti di proiettili, facendoli scontrare l'uno contro l'altro in direzioni opposte. In questo caso, la macchina è detta *collisore*, la quantità di moto netta del sistema è zero (quantità di moto

uguali in modulo e opposti in direzione) e l'equazione predice che l'energia totale, pari alla somma delle energie dei due proiettili, può trasformarsi interamente in massa a seguito dell'interazione: un raddoppio delle energie dei proiettili conduce a un raddoppio della massa invariante disponibile. La complessità di questo secondo approccio è però notevole: nella configurazione a *fixed target* il bersaglio in quiete è un oggetto macroscopico e la molteplicità di elementi sensibili in esso contenuti è dell'ordine del numero di Avogadro. In un collisore occorre "muovere" un numero estremamente grande di proiettili per ottenere un numero di interazioni confrontabile. Occorre inoltre che le traiettorie dei fasci collidenti siano accuratamente controllate, affinché non sia troppo esigua la possibilità di far passare due proiettili sufficientemente vicini da interagire tra loro. Sfide come queste sono tecnologicamente molto ardue.

Per questo motivo, di solito occorre un'intera generazione umana per ottenere un aumento consistente dell'energia disponibile. Non sorprende quindi l'entusiasmo dei fisici in alcuni di questi rari momenti pionieristici (vd. fig. b).



b.  
Il 3 giugno scorso Lhc riprende a fare fisica a un'energia record di 13 TeV.

#### Biografia

**Tommaso Spadaro** è un ricercatore dei Laboratori Nazionali di Frascati e coordinatore delle attività locali di fisica delle particelle. Nella prima parte della sua carriera ha svolto molteplici analisi dei dati dell'esperimento Kloe, operante al collisore Dafne. Da alcuni anni collabora all'esperimento a bersaglio fisso Na62, operante al super proto-sincrotrone Sps del Cern.