

## **Tu che sei un fisico - Episodio 7**

### **TITOLO**

*Da dove viene la massa della materia?*

### **SHOW NOTES**

*Oggi parliamo dell'origine della massa di una famiglia di particelle che chiamiamo adroni. Degli adroni fanno parte due particelle che tutti conoscono, il protone e il neutrone, che sono responsabili del 99% della massa di tutta la materia ordinaria!*

*Ti piace "Tu che sei un fisico"? Lo consiglieresti a un'amica o un amico? Allora ti chiedo, se ti va, di condividerlo sui social, e soprattutto di lasciare una recensione sulla piattaforma che usi per ascoltarlo. È un modo semplice per permettere a "Tu che sei un fisico" di raggiungere ancora più ascoltatori. Grazie!*

*Mandami le tue domande a:*

*[tucheseiunfisico@borborgimi.org](mailto:tucheseiunfisico@borborgimi.org)*

*O anche su:*

*<http://www.twitter.com/tucheseiunfisi1>*

*<http://www.facebook.com/Tu-che-sei-un-fisico-103204041288333/>*

*<http://www.borborgimi.org/tu-che-sei-un-fisico>*

*Seguimi su:*

*<http://www.twitter.com/marcodeimastro>*

*<http://www.instagram.com/marcodeimastro>*

## SIGLA

Oggi parliamo dell'origine della massa di una famiglia di particelle che chiamiamo adroni, scopriremo l'origine della massa del 99% della materia ordinaria, e finiremo per parlare brevemente anche del bosone di Higgs.

## INTRO

Benvenuti a questa puntata di "Tu che sei un fisico"! Oggi risponderò a due domande di fisica delle particelle, messe insieme perché sono intimamente collegate tra di loro. Come se non bastasse, queste due domande mi sono arrivate dallo stesso ascoltatore, che si firma Robo. Robo, sappi che dopo questo episodio metterò tutte le tue altre domande in fondo alla lista, per lasciare spazio agli altri ascoltatori!

Prima di immergerci, due brevissime osservazioni. La prima: se avete a portata di mano un pezzetto di carta e una penna o una matita, teneteli vicini: nel corso della chiacchierata mi capiterà di dare dei numeri, e potrebbe essere più facile seguire il ragionamento segnandoseli. Che sia chiaro, nessuna equazione e nessuna formula! Soltanto qualche cifra per capire gli ordini di grandezza di cui stiamo parlando. E un paio di addizioni e una divisione, ma non temete, le faccio io per voi!

La seconda osservazione: oggi parliamo di materia e di massa, e dunque non possiamo non parlare anche del bosone di Higgs, che è una particella normalmente associata alla generazione della massa delle particelle. Quello che scopriremo, però, sarà probabilmente un po' diverso da quello che si racconta normalmente della relazione tra bosone di Higgs e massa della materia. Ascoltate fino in fondo, e potreste restare sorpresi...

## DA DOVE VIENE LA MASSA DELLA MATERIA?

Cominciamo con la prima di domanda di Robo, che mi ha chiesto:

- Tu che sei un fisico, come mai tra gli adroni scoperti con LHC ce ne sono alcuni che sono costituiti dai stessi componenti ma hanno masse diverse?

Come molte delle domande che mi arrivano, questa è una di quelle che richiedono un po' di spiegazioni preliminari prima di arrivare a una risposta. Iniziamo dunque dal chiarire che cosa siano gli *adroni*.

Gli adroni sono una famiglia di particelle subatomiche composte da due o tre quark. Gli adroni non sono dunque delle particelle *elementari*. La parola "adrone" viene dal greco *hadros*, un termine che significa "solido", "robusto", "pieno": gli adroni sono infatti particelle relativamente pesanti, perlomeno rispetto all'altra famiglia di particelle che ha un nome di origine greca, i

leptoni: in greco “leptos” vuol dire “leggero”, “sottile”, e dei leptoni fa parte per esempio l’elettrone.

Dicevamo che gli adroni sono particelle composte da due o tre quark. Quelli formati da due quark, o meglio, da un quark e un anti-quark, vengono chiamati “mesoni”, ovvero le particelle “di mezzo”. Anche questo nome ha a che fare con la massa di queste particelle. Il primo mesone di cui i fisici ipotizzarono l’esistenza - e che, dopo qualche peripezia, sarebbe stato identificato con quella particella che chiamiamo pione - aveva infatti una massa intermedia tra quella d’elettrone, il più leggero dei leptoni, e il protone, il più noto rappresentante degli adroni. Che poi, più tardi, siano stati scoperti dei mesoni più pesanti del protone, la dice lunga su come una certa nomenclatura abbia perso il suo significato originario, ma questa è un’altra storia...

Abbiamo parlato dei mesoni, gli adroni formati da due quark. Prima di parlare degli adroni formati da tre quark, approfitto di questa escursione nella tassonomia delle particelle per rispondere al volo alla seconda domanda di Robo, che mi ha anche chiesto:

- Tu che sei un fisico, come é possibile che esistano dei mesoni costituiti da un quark e dal relativo anti-quark? Non dovrebbero annichilirsi come si incontrano?

Ricorderete forse, ne abbiamo parlato nel quinto episodio di “Tu che sei un fisico”, che quanto una particella di materia incontra il suo corrispondente di antimateria, avviene un fenomeno che chiamiamo *annichilazione*: le due particelle scompaiono lasciando al loro posto un fotone la cui energia corrisponde alle energie delle particelle originali.

Per rispondere alla seconda domanda di Robo, cominciamo col dire che non esistono mesoni *stabili*: ogni combinazione che conosciamo di un quark e un antiquark è una struttura precaria, che, dopo un tempo più o meno lungo, si disintegra, o, come amiamo dire noi fisici, decade. La seconda cosa che dobbiamo sottolineare è che esistono mesoni composti da un quark di un specie (o, per usare di nuovo la terminologia dei fisici, di un certo *sapore*) e a un antiquark di un’altra specie. Il pione con carica elettrica positiva è per esempio lo stato legato di un quark *up* e un antiquark *down*. L’antiquark *down* non è l’antiparticella del quark *up* - quella sarebbe un antiquark *up* - e dunque i componenti del pione positivo non possono annichilirsi tra loro. Questo non significa che il pione positivo sia stabile, ci sono altri meccanismi che ne provocano il decadimento, non non divaghiamo.

Nel caso in cui consideriamo un mesone composto a un quark e un antiquark dello stesso sapore, in effetti l’uno è l’antiparticella dell’altro, e i due possono annichilirsi. Questo processo è in effetti alla base di una parte dei decadimenti di questo tipo di mesoni. Prendiamo per esempio il mesone formato da un quark *charm* e un quark anti-*charm*, una particella che chiamiamo *J/psi* per ragioni che magari un giorno vi racconterò. Nel 25% dei casi i due costituenti della *J/psi* si annichilano in un fotone, che a sua volta dà vita a una coppia muone-antimuone, o elettrone-antielettrone, o persino a una nuova coppia di un quark e un antiquark, che a loro volta formeranno nuovi adroni.

Torniamo agli adroni. Abbiamo parlato dei mesoni, quegli adroni formati da un quark e un anti-quark. Ci sono poi i *barioni*, che sono quegli adroni formati da tre quark. Anche qui il nome viene da una parola greca, "barios", che vuol dire "pesante": immagino stiate cominciando a intravedere una certa attitudine da parte dei fisici del secolo scorso nel battezzare le famiglie di particelle!

I più famosi barioni sono il protone e il neutrone, due particelle di cui si sente parlare già alle scuole superiori. Nel modello più semplificato che possiamo immaginare, che è anche quello che solitamente si racconta, il protone è una particella formata da due quark up e un quark down, mentre il neutrone è formato da un quark up e due quark down. Siccome stiamo parlando di particelle composte, viene naturale chiedersi se esista una relazione tra la massa dei componenti e la massa della particella composta. La domanda iniziale di Robo, che chiedeva come mai adroni composti dagli stessi quark hanno masse diverse, sottintende infatti che la massa di una particella composta sia data dalla somma delle particelle che la compongono. Ma è vero?

Prendiamo proprio il caso del protone e del neutrone, ed è arrivato il momento anche di prendere il vostro pezzetto di carta e la vostra penna, perché sto per dare i numeri. I numeri che sto per dare sono le masse delle particelle di cui stiamo parlando, e siccome si tratta di masse di particelle, e non di filoni di pane o di sacchetti di frutta, non userò come unità di misura il grammo, ma un'unità di misura che noi fisici delle particelle usiamo tanto per misurare le masse, che le energie e persino le velocità delle particelle: l'elettron-Volt. Non starò a spiegarvi che cosa sia l'elettron-Volt, per quello che ci interessa oggi potete immaginarlo come a una frazione molto piccola del grammo. L'unità di misura che userò in realtà non è l'elettron-Volt, ma il mega-elettron-Volt: come in certi contesti è più utile usare il kilo-grammo (ovvero 1000 grammi), in quello che ci interessa oggi useremo un'unità che corrisponde a un milione di elettron-Volt: il suffisso "mega" sta infatti per "milione". Il mega-elettron-Volt viene normalmente abbreviato in "MeV", che, come già vi ho detto, per voi oggi è semplicemente una frazione piccola del grammo.

Pronti a prendere appunti? La massa di un quark up è circa 2.2 MeV, quella di un quark down circa 4.7 MeV. Se l'ipotesi di Robo sulla massa degli adroni fosse corretta, ovvero che la massa di un adrone corrisponde alla somma della massa delle particelle elementari che lo compongono, la massa del protone dovrebbe essere  $2.2 + 2.2 + 4.7$  MeV (ricordate: due quark up e un quark down) per un totale di circa 9 MeV. Quella del neutrone dovrebbe essere  $2.2 + 4.7 + 4.7$  MeV (un quark up e due quark down) per un totale di quasi 12 MeV.

Peccato, però, che la massa del protone sia pari a circa 938 MeV, praticamente cento volte di più della semplice somma delle masse dei suoi costituenti, che abbiamo calcolato essere circa 9 MeV! La stessa cosa vale per il neutrone, che ha una massa di circa 940 MeV, lievemente superiore a quella del protone, anche qui siamo a quasi cento volte tanto quanto predetto dalla

somma dei costituenti, che vi ricordo è soltanto 12 MeV. Da dove viene il 99% della massa aggiuntiva?

La risposta è nascosta nel modello che abbiamo usato per descrivere il protone e il neutrone (e, per estensione, tutti gli adroni). Abbiamo iniziato detto che protoni e neutroni sono particelle composte da tre quark, ma questo modello è fuorviante.

Un adrone è infatti una particella che contiene sì un certo numero di quark (diciamo tre per restare al caso di protoni e neutroni), ma questi quark, che noi fisici chiamiamo quark “di valenza”, non stanno insieme per magia. Dentro a un protone e un neutrone (e dentro a tutti gli adroni) ci sono anche un certo numero di gluoni, che sono le particelle messaggere dell’interazione nucleare forte, quella forza che tiene per l’appunto “legati” tra loro i quark in quelle strutture più o meno stabili.

I gluoni sono particelle prive di massa, un po’ come i fotoni messaggeri dell’interazione elettromagnetica, e dunque a prima vista potremmo pensare che non contribuiscono alla massa della particella composta che tengono insieme. I gluoni sono però dotati di un sacco di energia: si tratta in buona parte di energia di legame, e, in parte minore, di energia cinetica dovuta al loro movimento. Per quanto controintuitivo possa sembrare, questa energia contribuisce alla massa dell’adrone che i gluoni tengono insieme, e di fatto ne costituisce praticamente il 99%. Ecco spiegato dunque l’arcano: la massa degli adroni è per il 99% costituita dall’energia di legame che tiene insieme i quark che li compongono, e non dalla massa dei quark stessi!

Quello che succede anche nel cuore degli adroni è che, di tanto in tanto, i gluoni possono trasformarsi, per un periodo di tempo limitato, in una coppia di un quark e un antiquark, che, dopo aver fatto capolino, si ritrasforma in un gluone con un processo simile all’annichilazione di cui parlavamo prima. Nel cuore degli adroni, insieme ai quark di valenza, è dunque un ribollire di altri quark che nascono e muoiono di continuo, che chiamiamo quark “del mare”. Notate che questi quark possono avere un sapore diverso da quelli di valenza, ed è dunque possibile trovare dentro un protone un quark che non sia di sapore up o down, ma anche strange, o charm.

Il fatto che il 99% della massa degli adroni sia dovuta all’energia di legame data dai gluoni ha delle conseguenze profonde. La massa della materia ordinaria è infatti dovuta per la maggior parte alla massa dei protoni e dei neutroni che costituiscono i nuclei degli atomi che la compongono. La massa degli elettroni che ronzano intorno agli atomi, infatti, contribuisce alla massa totale dell’atomo per una frazione veramente trascurabile, visto che la massa di un elettrone è duemila volte più piccola di quella di un protone. Il 99% della massa della materia ordinaria dell’universo, quella di cui voi ed io e tutto quello che ci circonda è composto, è dunque dovuta all’energia che viene dall’interazione nucleare forte, e non alla massa intrinseca delle particelle elementari.

Riprendete i vostri appunti. Ricordate? Il protone ha una massa di circa 938 MeV, il neutrone di circa 940 MeV. La piccola differenza di massa è, quella sì, dovuta alla differenza di massa tra il quark up e il quark down. E i valori delle masse dei quark, loro, sono dovuti all'intensità della loro interazione con il campo di Higgs. E qui mi permetto di fare due precisazioni che mi stanno a cuore.

Intanto, quando sentite la frase "il bosone di Higgs è responsabile della massa della materia", adesso sapete che non è vero! E non è vero per due ragioni. Intanto, è il *campo* di Higgs, e non il *bosone* di Higgs, a essere responsabile della massa delle particelle elementari (e di questa differenza, che non è affatto banale, magari parleremo in un altro episodio). E poi, come abbiamo appena capito insieme, il meccanismo di Higgs è responsabile della massa delle particelle elementari come i quark, che però costituisce appena l'1% della massa della materia ordinaria. Per il restante 99% dovete dire grazie all'interazione forte!

Questo vuol dire forse che la massa delle particelle elementari non ha un ruolo nell'universo in cui ci troviamo a vivere? Cosa succederebbe se immaginassimo dei quark e degli elettroni privi di massa, in un universo dove la massa della materia fosse dovuta esclusivamente all'energia di legame? In questo universo immaginario, il protone e il neutrone avrebbero la stessa massa, e, per quanto ne sappiamo, il protone non sarebbe stabile, e dunque non ci sarebbero atomi e molecole come le immaginiamo. La piccolissima, quasi insignificante massa dell'elettrone, determina la distanza media dell'elettrone del protone nell'atomo di idrogeno, una quantità che chiamiamo il raggio di Bohr. Questa distanza determina di fatto la dimensione di tutti gli atomi, e dunque tutte le proprietà della chimica del mondo in cui viviamo. Anche se solo conta solo per l'1% della massa della materia ordinaria, la massa delle particelle elementari è dunque essenziale perché il mondo di comportamenti come lo osserviamo.

E perché le particelle elementari hanno proprio quelle masse? Perché il quark up ha una massa di 2.2 MeV, il quark down di 4.7 MeV, e l'elettrone una massa duemila volte più piccola di quella del protone? È una di quelle cose che ancora non sappiamo. Sappiamo infatti che è il meccanismo di Higgs a dare massa alle particelle elementari, ma non *perché dia loro proprio quei valori di massa*. Che è una delle ragioni per cui c'è ancora parecchio da studiare e capire nella fisica delle particelle!

Infine, avrete forse notato che durante tutta la chiacchierata ho fatto ben attenzione a parlare sempre materia *ordinaria*. Perché questa pedanteria? Semplice: perché la materia fatta da protoni, neutroni, elettroni, e in generale dalle particelle descritte dal Modello Standard, sembra costituire solo il 15% della materia i cui effetti gravitazionali osserviamo nelle galassie. E il restante 85%? È quella materia che chiamiamo *oscura*, di cui sappiamo veramente ben poco, e di cui magari parleremo in un altro episodio.