

Introduzione teorica alla fisica delle particelle

Marco Bonvini

INFN Sezione di Roma

MasterClass 2025

Sapienza Università di Roma

16 Aprile 2025



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di ROMA

Per capire, anche rozzamente, la fisica delle particelle, bisogna STUDIARE per anni

Lo scopo di questa lezione è di incuriosirvi...

Cos'è la FISICA?

È la modellizzazione matematica dei fenomeni naturali, cercando di ricondurre la totalità dei fenomeni ad un numero limitato di leggi fondamentali.

A volte si parla di *unificazione*

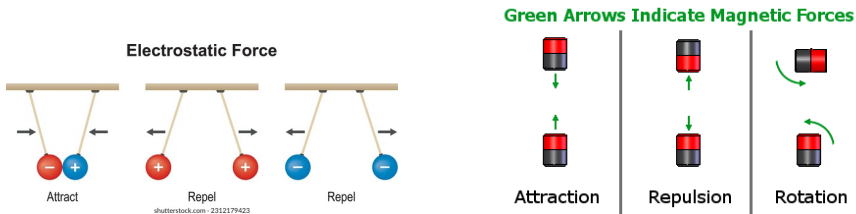
Metodo scientifico [Galileo, 1564-1642]:

- identificare un fenomeno fisico e idealizzarlo al meglio
- effettuare misure sperimentali
- formulare ipotesi (leggi fisiche)
- fare previsioni
- verificare le previsioni sperimentalmente

Una legge fisica è buona finché non viene confutata!

Un esempio di unificazione: Maxwell

Originariamente, i fenomeni elettrici e magnetici erano considerati indipendenti e scorrelati.



Poi si scoprì che cariche in movimento generano campi magnetici, che campi magnetici variabili inducono correnti elettriche.

Fu Maxwell (1864) ad unificare i due tipi di fenomeni nella teoria dell'*elettromagnetismo*.

Equazioni di Maxwell (nel vuoto):

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{E} = \rho$$

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{B} = 0$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

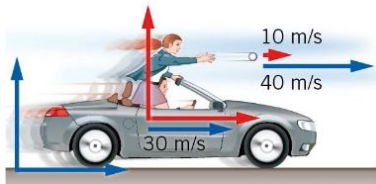
dove c è una costante fondamentale dell'elettromagnetismo (legata a ϵ_0 e μ_0 che avete visto a scuola).

In assenza di cariche ($\rho = 0$) e correnti ($\vec{J} = \vec{0}$) le equazioni descrivono la propagazione di onde elettromagnetiche (luce), con velocità $c = 299792458$ m/s.

La velocità della luce (nel vuoto) c è una costante di natura.

Molto bello, ma qualcosa non torna...

La relatività galileiana prevede che nelle trasformazioni tra sistemi di riferimento inerziali le velocità si sommino (vettorialmente).



Io lancio un sasso a 10 m/s dall'auto, l'auto viaggia a 30 m/s , dalla strada vedono il sasso muoversi a 40 m/s .

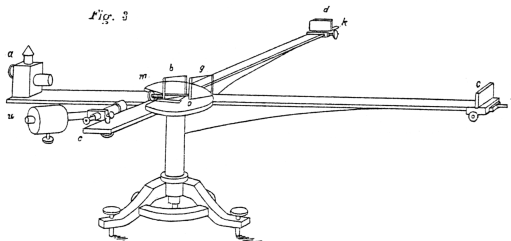
Tuttavia nelle Equazioni di Maxwell non c'è nessuna dipendenza della velocità della luce dalla velocità della sorgente che la emette.

Come può essere? Forse le Equazioni di Maxwell in realtà sono valide in uno speciale sistema di riferimento, quello dell'*etere*, che sarebbe il mezzo in cui si propagano.

Alla ricerca dell'etere: l'esperimento di Michelson e Morley

Se l'etere esiste, la Terra si muove rispetto ad esso (aberrazione stellare)

Esperimento di Michelson e Morley [1887] cerca di misurare la velocità della Terra rispetto all'etere



https://en.wikipedia.org/wiki/Michelson-Morley_experiment

Risultato: la velocità della luce nel vuoto è la stessa in ogni sistema di riferimento

Evidentemente le trasformazioni di Galileo non sono sempre valide!

→ trasformazioni di Lorentz e teoria di Einstein

Due rivoluzioni agli inizi del '900

Teoria della relatività speciale

- la velocità della luce è la stessa in ogni sistema di riferimento
- lo spazio e il tempo non sono assoluti, ma dipendono dall'osservatore, e si mischiano cambiando sistema di riferimento
- lo spazio e il tempo fanno parte di un unico spaziotempo quadridimensionale

Teoria quantistica

- quantizzazione dell'energia
- principio di indeterminazione
- dualità onda-particella

Quando si va a descrivere un sistema a scale molto piccole (diciamo delle dimensioni di un atomo o inferiori) la descrizione classica non funziona più.

Il motivo è molto semplice.

Per fare un esperimento devo poter fare delle misure [metodo scientifico di Galileo]. Ma fare misure significa in qualche modo interagire col sistema: appoggiare un metro, puntare un laser, anche solo guardare richiede luce che si riflette sul sistema. Tutto questo, se fatto bene, non influenza un sistema classico, ma altera inevitabilmente un sistema molto piccolo.

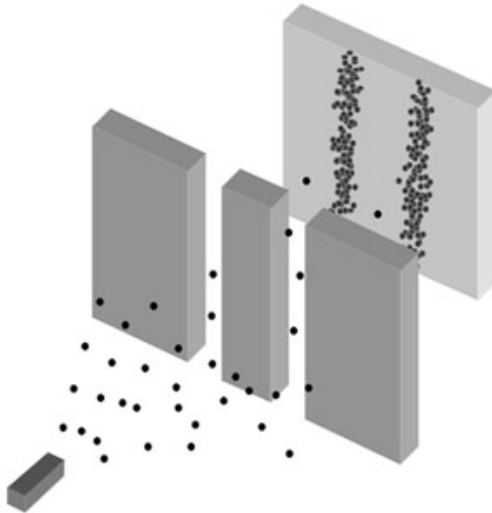
Come faccio ad appoggiare un metro su un atomo?

Lo strumento più semplice è la luce, ma anche quella altera il sistema: la luce porta energia che viene trasferita all'atomo nel momento in cui lo "colpisce".

I sistemi "molto piccoli" (quantistici) non permettono di fare misure "esterne". Qualunque tentativo di misura altera il sistema. Non è possibile conoscere in che stato si trova un sistema senza cambiarlo.

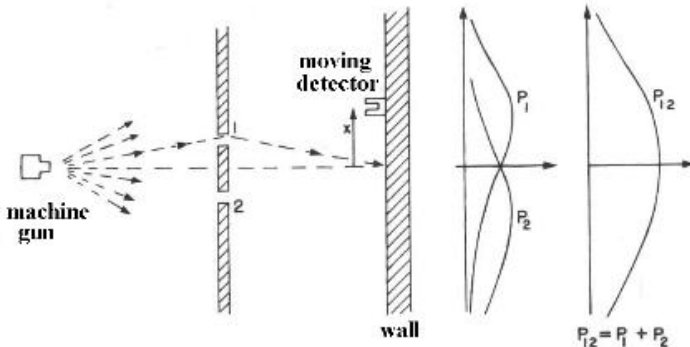
Il nostro modo di pensare la fisica va profondamente rivisto nel regime quantistico. L'osservazione diventa parte integrante della teoria.

L'esperimento delle due fenditure



<https://www.youtube.com/watch?v=PGrVJUUA1E>

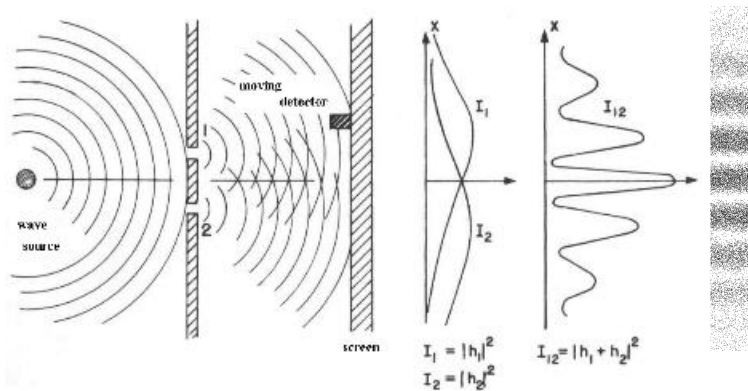
L'esperimento delle due fenditure: proiettili



Lanciando proiettili, la distribuzione con entrambe le fenditure aperte è la somma delle distribuzioni con una aperta e l'altra chiusa.

Conseguenza ovvia del fatto che il proiettile *o passa da una fenditura o dall'altra*.

L'esperimento delle due fenditure: onde



Con le onde è diverso, perché si sommano le *ampiezze*, ma l'*intensità* è il quadrato dell'ampiezza.

Fenomeno dell'*interferenza*: un tipico effetto ondulatorio

L'esperimento delle due fenditure: elettroni

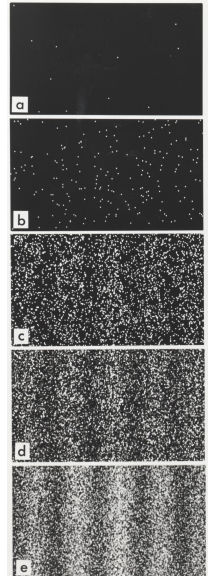
Che succede se lanciamo elettroni?

Dalla loro scoperta [Thomson 1897] era chiaro che fossero particelle, e quindi ci si aspetta che si comportino come proiettili.

E invece, usando fenditure sufficientemente piccole ($\lesssim 100\text{nm}$), si osserva sperimentalmente che producono frange di interferenza, come se fossero onde.

Ancora più sorprendente, anche mandando un elettrone alla volta [Tonomura 1989] (dove è quindi chiaro che si ha a che fare con singole particelle) alla fine le frange di interferenza compaiono (quindi non è un effetto collettivo).

<https://www.youtube.com/watch?v=jvO0P5-SMxk>



L'elettrone è una **particella** ma in certe condizioni si comporta anche come un'**onda**.

De Broglie (1924) propone di associare una lunghezza d'onda a una particella tramite

$$\lambda = \frac{h}{mv}, \quad h = 6.6 \times 10^{-34} \text{ Js} \quad (\text{costante di Plank})$$

dove $m = 0.9 \times 10^{-31} \text{ kg}$ è la massa dell'elettrone e v la sua velocità.

Per un elettrone che si muove a velocità molto grandi ($v \sim 10^6 \text{ m/s}$) si ha

$$\lambda \sim 10 \text{ nm}$$

Se la fenditura ha dimensioni confrontabili con λ la “natura ondulatoria” dell'elettrone diventa fondamentale nella descrizione del fenomeno.

La funzione d'onda e l'equazione di Schrödinger

La meccanica quantistica descrive questo fenomeno associando ad ogni particella una *funzione d'onda* $\psi(\vec{x}, t)$, funzione della posizione e del tempo.

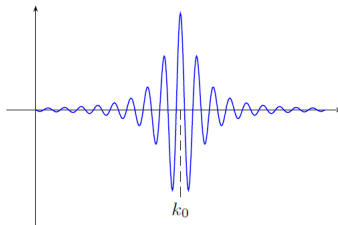
Questa funzione soddisfa l'equazione di Schrödinger (1925)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{x}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{x}, t) + U(\vec{x}, t) \psi(\vec{x}, t), \quad \hbar = \frac{h}{2\pi} \quad \left(\begin{array}{l} \text{Costante di} \\ \text{Planck ridotta} \end{array} \right)$$

dove U è l'energia potenziale (dipende dal sistema che si sta studiando).

In questa interpretazione la natura ondulatoria è manifesta. La natura particellare invece deriva dal fatto che la funzione d'onda si propaga in *pacchetti d'onda*, localizzati nello spazio e nel tempo, che quindi appaiono come dei corpuscoli su scale più grandi.

Inoltre, come per le onde, è il modulo quadro della funzione d'onda $|\psi(\vec{x}, t)|^2$ che è osservabile, e rappresenta una densità di probabilità.



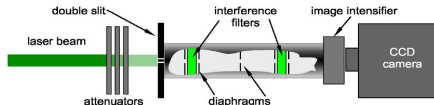
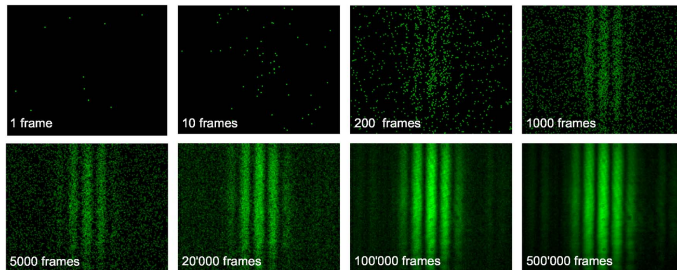
Onde elettromagnetiche

Ma se le particelle si comportano come onde, le onde che fanno?

Anche le onde si comportano come particelle!

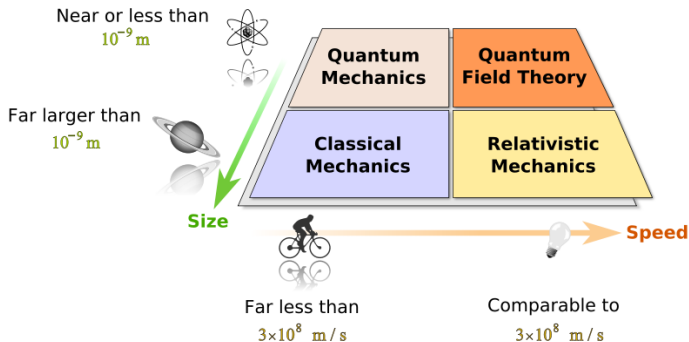
Onde elettromagnetiche → **fotoni** (quanti di luce)

Anche con la luce si possono vedere le frange di interferenza comparire mandando un fotone alla volta



Però c'è un problema: i fotoni vanno alla velocità della luce (ovviamente...) e quindi vanno descritti da una teoria relativistica, ma la meccanica quantistica non lo è.

Ci vuole qualcosa di nuovo, che sia quantistico e relativistico: **la teoria dei campi**



La teoria (quantistica e relativistica) dei campi

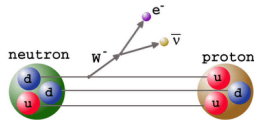
Da un punto di vista tecnico, esistono campi $\phi(x)$ (simili alle funzioni d'onda) che dipendono dalla posizione nello *spaziotempo* $x = (ct, \vec{x})$, e obbediscono a equazioni compatibili con la relatività speciale

Allo stesso tempo, la teoria è *quantistica*, ma in un modo un po' diverso da come la quantizzazione funziona nel caso non-relativistico (nel gergo si parla di *seconda quantizzazione*)

Uno degli aspetti principali è che è possibile **creare o distruggere** particelle (campi), compatibilmente con le *leggi di conservazione* dell'energia relativistiche (e di altre cose)

Esempio: decadimento del neutrone

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$



Il neutrone sparisce e compare un protone, un elettrone e un antineutrino

Un'altra importante conseguenza è l'esistenza delle **antiparticelle**: particelle con massa identica ma cariche opposte

Le particelle elementari sono i costituenti fondamentali della materia, senza struttura interna (non sono composti da altre particelle più piccole).

Esse interagiscono tra loro tramite *interazioni fondamentali*.

In teoria dei campi le interazioni sono *mediate* a loro volta da particelle...

Ci sono **due** tipi di particelle elementari:

- le particelle di “materia” (elettroni, quark, ...), che sono *fermioni* (spin $1/2$)
- i mediatori delle interazioni (fotoni, gluoni, ...), che sono *bosoni* (spin 1)
- il bosone di Higgs (spin 0)

Le interazioni sono “associate” a **simmetrie** della teoria, dette *simmetrie di gauge*

Le simmetrie sono importantissime...

Conosciamo **quattro** interazioni fondamentali tra le particelle elementari:

	intensità relativa	raggio d'azione	mediatori
elettromagnetica	1	∞	fotoni
forte	10^2	10^{-15}m	gluoni
debole	10^{-3}	10^{-18}m	W, Z
gravitazionale	10^{-36}	∞	gravitoni?

Le prime tre sono descritte dal **Modello Standard delle particelle elementari**

La quarta è molto diversa, ed è descritta dalla relatività generale [Einstein 1916]

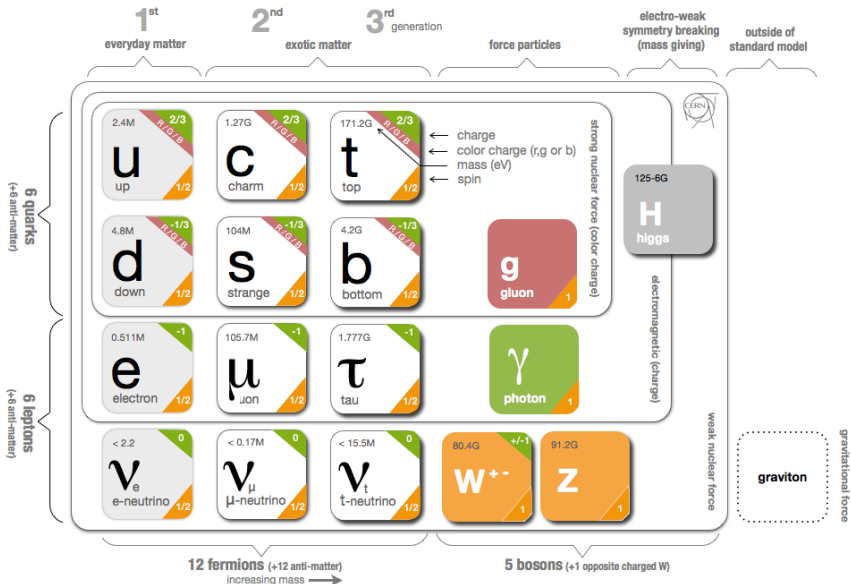
Nota bene: a volte si sente parlare di *forze* fondamentali...

In realtà, il termine “forza” è specifico e rappresenta la causa del moto.

L'interazione è un concetto più generale, e nel contesto della teoria dei campi rappresenta la possibilità delle particelle di comunicare tra loro e di trasformarsi.

Modello Standard: teoria di campo basata sulla simmetria $SU(3) \otimes SU(2) \otimes U(1)$

Il contenuto in particelle del Modello Standard



L'interazione forte - Quantum chromodynamics (QCD)

Oltre agli elettroni ci sono altre particelle che formano la materia: i **quark**. *Protoni e neutroni*, che formano i nuclei atomici, sono composti di quark.

I quark hanno carica elettrica e *anche* un altro tipo di carica: il **colore**.

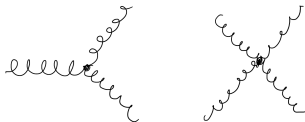
NB: "colore" è solo un nome, utile per fare un'analogia, ma nulla di più...

Ci sono tre colori base: **R**, **G**, **B**

Ogni quark si trova in una combinazione di questi colori base, e il Modello Standard è invariante per "*rotazioni nello spazio del colore*" - $SU(3)$.

I mediatori dell'interazione forte si chiamano *gluoni*.

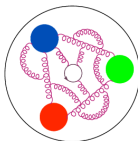
A differenza dei fotoni, che non hanno carica elettrica, i gluoni hanno carica di colore, e quindi possono interagire tra loro.



Questo rende le interazioni forti più complicate da descrivere

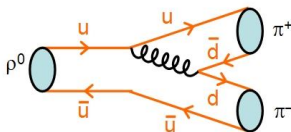
L'interazione forte - il confinamento

Una particolarità di questa teoria è che non esistono particelle *libere* colorate. Tutte le particelle libere sono stati composti di quark e gluoni (come i protoni, i neutroni, i pioni, ...) e sono “bianchi” (ovvero non hanno carica di colore). Il fenomeno si chiama *confinamento*.

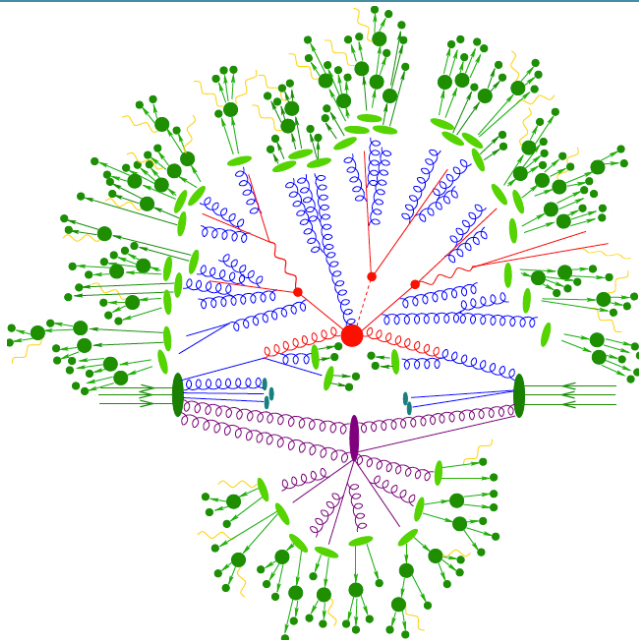


Quark e gluoni partecipano ai processi di interazione anche negli urti o decadimenti tra particelle composte, ma solo per un tempo molto breve. Immediatamente si ricombinano in altre particelle composte.

Esempio: decadimento $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$.



Collisione protone-protone a LHC



L'interazione debole - SU(2)

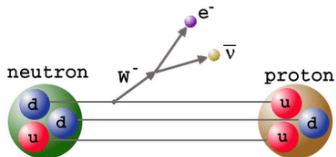
Quark, elettroni e anche *neutrini* hanno anche un altro tipo di carica, detta carica debole.

Ci sono due tipi di carica di base, e il Modello Standard è invariante per rotazioni nello spazio di questa carica bidimensionale - SU(2).

I mediatori di questa interazione sono due bosoni che si chiamano W e Z .

Il W ha anche una carica elettrica, e quindi interagisce col fotone.

Questa interazione è responsabile di molti decadimenti (conversioni tra particelle) visto che coinvolge e “mischia” tutte le particelle di materia, anche di famiglie diverse.



L'interazione debole è l'unica che non “genera” una forza.

E il bosone di Higgs?

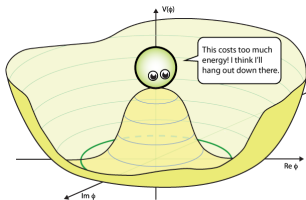
Problema: i mediatori delle interazioni (bosoni di gauge) devono avere massa nulla (difficile da spiegare... fidatevi!)

Ma i bosoni W e Z hanno una massa! Come è possibile?

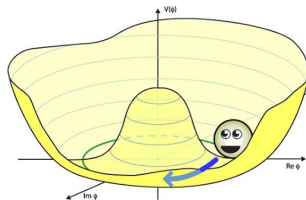
Soluzione: la simmetria debole $SU(2)$ deve essere **rotta**.

Questo significa che la lagrangiana è simmetrica per l'azione di $SU(2)$, ma la Natura non lo è. Si dice che il "vuoto" della teoria non è simmetrico.

Per realizzare questa *rottura di simmetria*, occorre introdurre un nuovo campo scalare ϕ (spin 0) che sente l'interazione debole: il campo di Higgs
[meccanismo di Brout-Englert-Higgs, proposto nel 1964]



fase simmetrica, non stabile



fase stabile (vuoto), non simmetrica

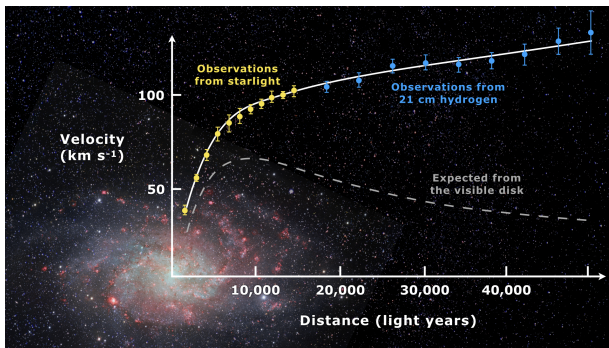


La scoperta di questa nuova particella nel 2012 a LHC è valsa il premio Nobel 2013 a François Englert e Peter Higgs (Brout è morto nel 2011)

La materia oscura (dark matter)

Il Modello Standard non può essere definitivo. Ci sono alcuni problemi...

Ad esempio, il moto delle galassie (e dei cluster di galassie) è diverso da quello che ci si aspetta sulla base della materia visibile



https://en.wikipedia.org/wiki/Galaxy_rotation_curve

Deve esserci della materia “gravitazionale” che non emette luce (dark) nelle galassie e tra le galassie (oppure le leggi di gravitazione sono sbagliate)

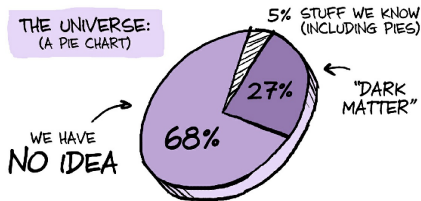
La materia oscura - modello standard o oltre?

L'ipotesi più semplice è che ci sia materia ordinaria ma "fredda", che non emette luce. Potrebbe essere:

- gas
- pianeti
- mini buchi neri
- ...

Tuttavia nessuna di queste spiegazioni sembra compatibile con le osservazioni e con i modelli cosmologici.

È più verosimile immaginare che esista materia nuova, non appartenente al modello standard. Ricerca ai collider come LHC, finora inconcludente.



Il Modello Standard è una teoria di campo (quantistica e relativistica) che descrive tre delle quattro interazioni fondamentali che conosciamo: elettromagnetica, forte e debole.

L'interazione gravitazionale non è inclusa nel Modello Standard, ed è descritta dalla relatività generale. Vi sono tentativi di unificare le quattro interazioni (gravità quantistica, teoria delle stringhe).

Il Modello Standard non può essere la teoria definitiva:

- mancano le masse dei neutrini
- manca la materia oscura
- *non è abbastanza elegante*
- ci sono alcune evidenze sperimentali incoerenti con esso
- ci sono alcuni aspetti teorici problematici

Ci sono vari esperimenti e progetti per chiarire meglio questi aspetti e capire cosa c'è oltre il modello standard.

Se sceglierete fisica potrete essere protagonisti in queste sfide del prossimo futuro!