

Introduzione al Modello Standard delle particelle elementari

Prima lezione

Marco Bonvini

INFN Sezione di Roma

MasterClass 2021

Laboratori Nazionali di Frascati

8 Marzo 2022



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare
Sezione di ROMA

In questo corso sul Modello Standard delle particelle elementari NON imparerete il Modello Standard delle particelle elementari

Per impararlo serve un background di fisica che si impara normalmente nei primi 3-4 anni di università

Cercherò più che altro di incuriosirvi e di darvi qualche idea

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!

Studiando il moto di caduta di un grave, si arriva a formulare la seguente legge del moto

$$h(t) = h_0 - \frac{1}{2}gt^2, \quad g = 9.81\text{m/s}^2$$

indipendente dal grave (sotto certe condizioni).

La variabile g parrebbe essere una *costante di natura*.

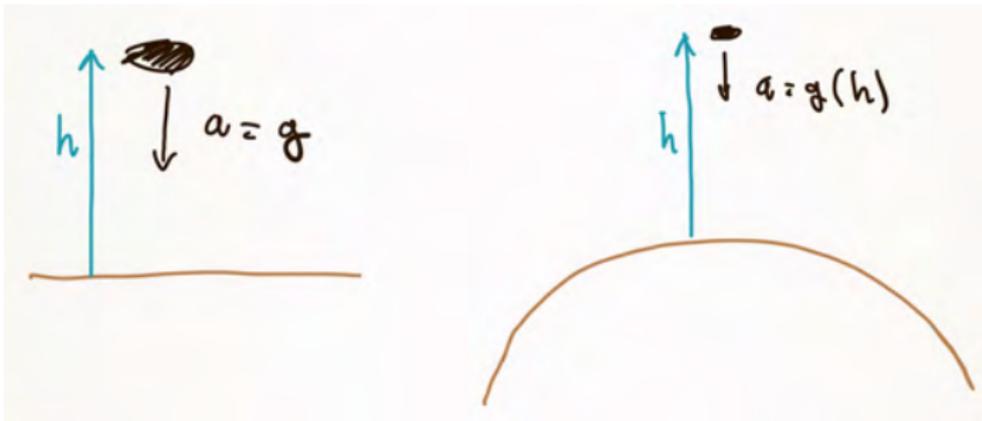
Una legge fisica è buona finché non viene confutata

Studiando il moto di caduta di un grave, si arriva a formulare la seguente legge del moto

$$h(t) = h_0 - \frac{1}{2}gt^2, \quad g = 9.81\text{m/s}^2$$

indipendente dal grave (sotto certe condizioni).

La variabile g parrebbe essere una *costante di natura*.



Studiando il moto di caduta di un grave, si arriva a formulare la seguente legge del moto

$$h(t) = h_0 - \frac{1}{2}gt^2, \quad g = 9.81\text{m/s}^2$$

indipendente dal grave (sotto certe condizioni).

La variabile g parrebbe essere una *costante di natura*.

Supponiamo ora di far cadere il grave da una quota altissima, diciamo qualche migliaio di km. La legge del moto sarebbe completamente diversa!

L'accelerazione non sarebbe costante, bensì

$$g(h) = \frac{G_N M_{\oplus}}{(h + R_{\oplus})^2}, \quad \begin{array}{l} M_{\oplus} = \text{massa della Terra} \\ R_{\oplus} = \text{raggio della Terra} \end{array}$$

dove $G_N = 6.6742... \times 10^{-11} \text{m}^3/\text{s}^2/\text{kg}$ è la costante di gravitazione universale.

Nel limite $h \ll R_{\oplus}$ si ritrova la prima equazione, ma essa è solo un limite semplice di una legge più generale!

Oggi pensiamo che G_N sia una costante di natura, ma chissà...

La legge del moto di caduta di un grave è diversa da quella di una pallina attaccata a una molla, di un pendolo, di un paracadutista, di un moto in un fluido, etc. Proliferazione di leggi fisiche (e di formulette da imparare...)

$$x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}}t\right)$$

$$\theta(t) = \theta_0 \cos\left(\sqrt{\frac{g}{\ell}}t\right)$$

$$v(t) = \frac{mg}{b} \left(1 - e^{-bt/m}\right)$$

...

...

La legge del moto di caduta di un grave è diversa da quella di una pallina attaccata a una molla, di un pendolo, di un paracadutista, di un moto in un fluido, etc. Proliferazione di leggi fisiche (e di formulette da imparare...)

Newton comprende che ogni moto è conseguenza di una *forza* F

$$\vec{F} = m\vec{a},$$

dove m , la massa *inerziale*, rappresenta una proprietà di ogni corpo. Questa legge (seconda legge di Newton o secondo principio della dinamica) è alla base di tutta la meccanica classica. Data una forza, il moto che ne segue deriva da questa legge (una sola formula da imparare!)

Esempio: il moto di caduta di un grave corrisponde quindi a una forza

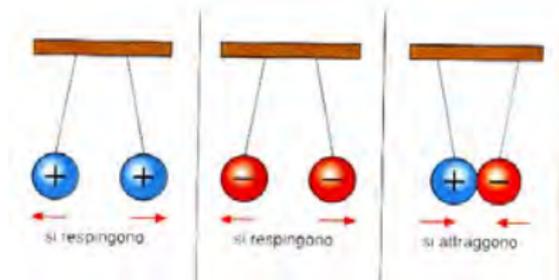
$$\vec{F} = m\vec{g}, \quad \vec{g} \text{ diretta verso il basso,}$$

dove m è la massa *gravitazionale*, che risulta essere proporzionale a quella inerziale (e quindi può essere considerata uguale).

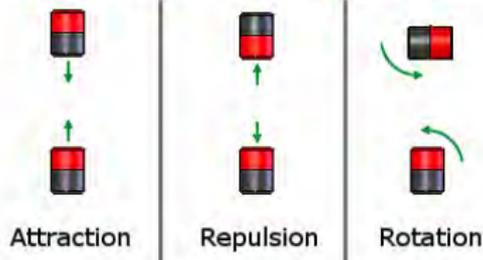
Nota: questa considerazione è alla base della relatività generale...

Un altro esempio di unificazione: Maxwell

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



Green Arrows Indicate Magnetic Forces



Poi si scoperse 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):

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

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

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

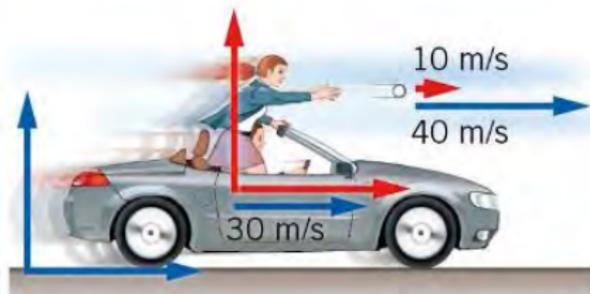
$$\vec{\nabla} \wedge \vec{B} = \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}$$

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.

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 .

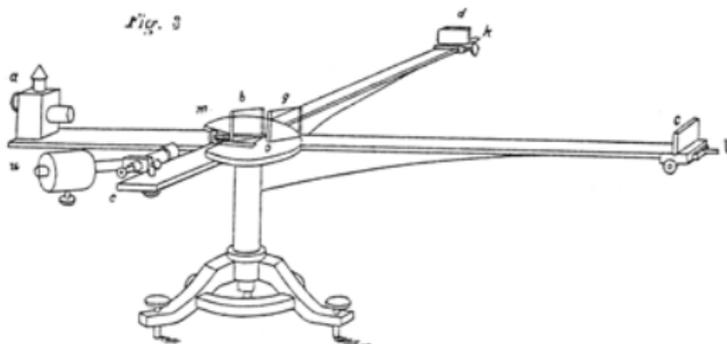
Tuttavia nelle Equazioni di Maxwell non c'è nessuna dipendenza della velocità della luce dalla velocità della sorgente che la emette.

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

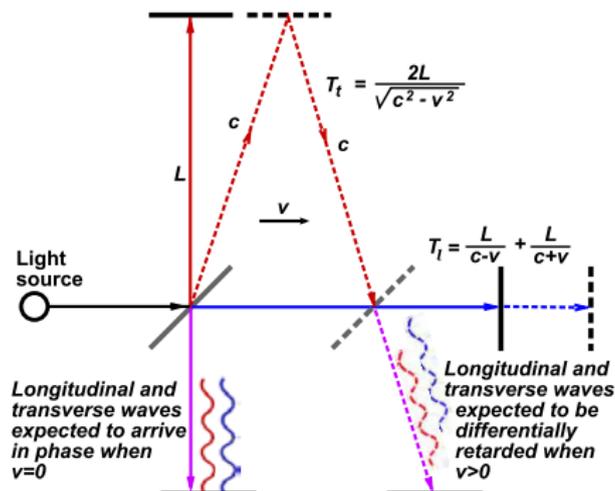
<https://www.youtube.com/watch?v=UA1qG7Fjc2A>

<https://www.youtube.com/watch?v=uMaFB3jM2qs>

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



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.

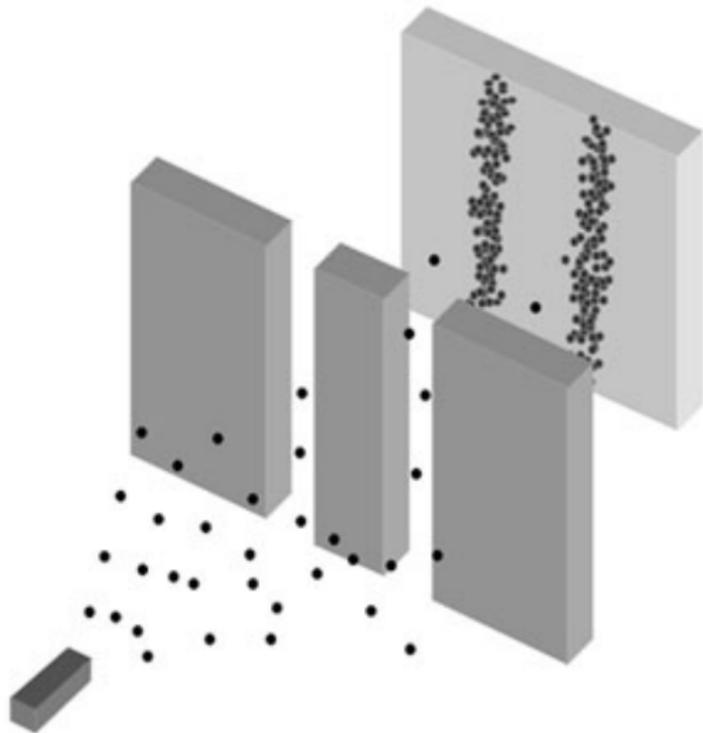
Per fare un esperimento devo poter fare delle misure [metodo scientifico di Galileo]. Ma fare misure significa in qualche modo interagire col sistema: appoggiare un metro, puntare un laser, anche solo guardare richiede luce che si riflette sul sistema. Tutto questo, se fatto bene, non influenza un sistema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

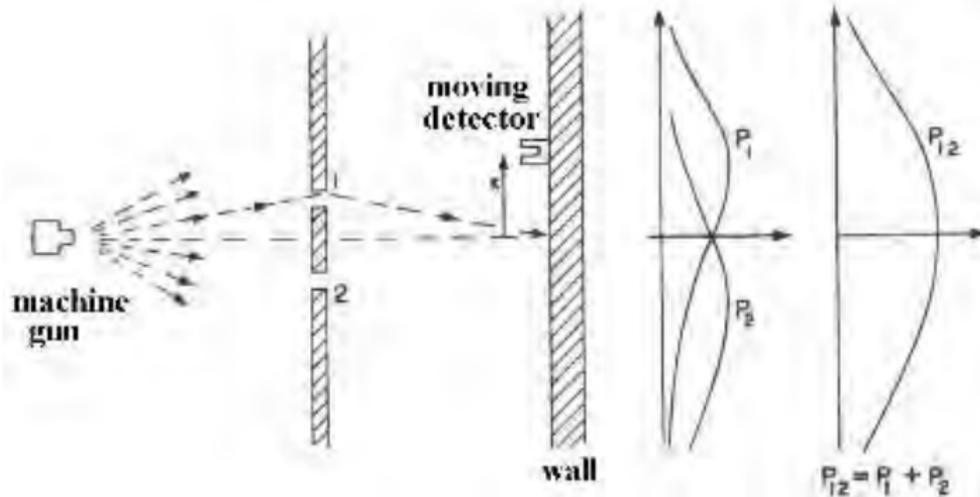
I sistemi "molto piccoli" (quantistici) non permettono di fare misure "esterne". Qualunque tentativo di misura altera il sistema. Non è possibile conoscere in che stato si trova un sistema senza cambiarlo.

Il nostro modo di pensare la fisica va profondamente rivisto nel regime quantistico.



<https://www.youtube.com/watch?v=PGrVJUUG1E>

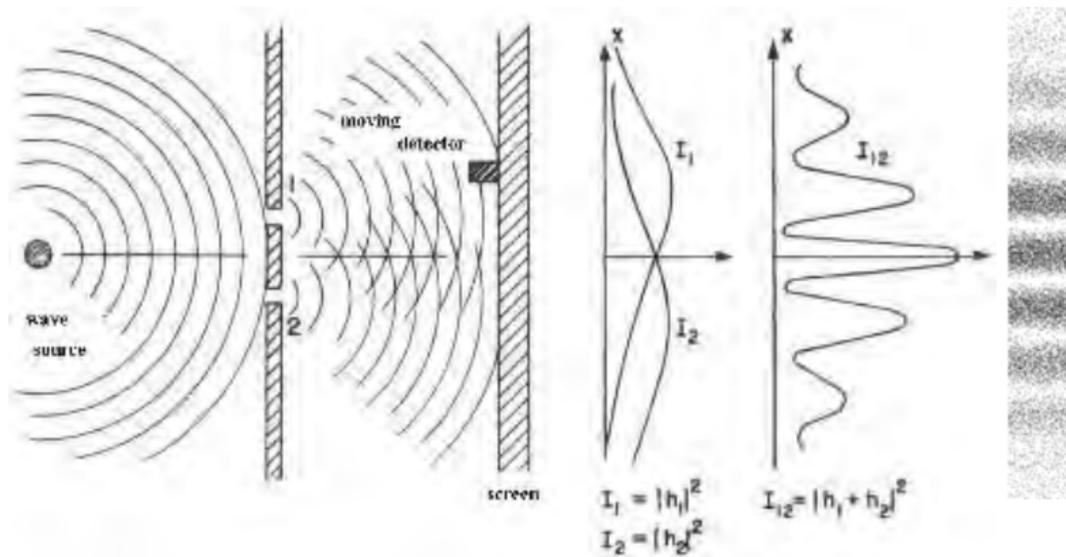
L'esperimento delle due fenditure: proiettili



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

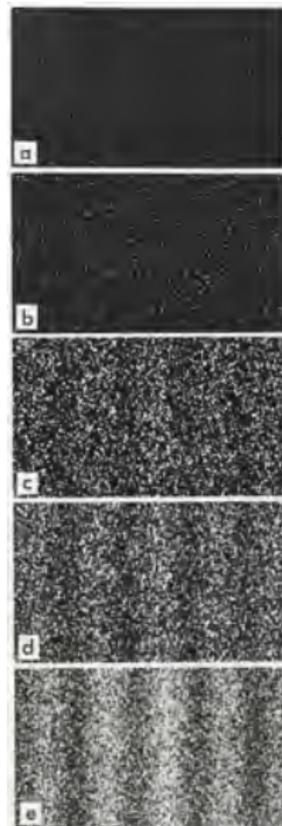
Che succede se lanciamo elettroni?

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 piu' 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

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

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 ($v \sim 10^7 \text{ m/s}$) si ha

$$\lambda \sim 1 \text{ nm}$$

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

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

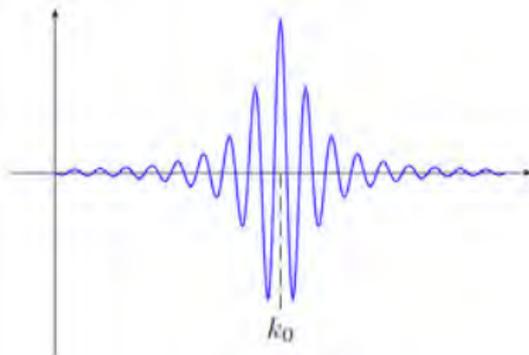
Questa funzione soddisfa l'equazione di Schrödinger (1925)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\vec{x}, t) = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(\vec{x}, t) + U(\vec{x}, t) \psi(\vec{x}, t), \quad \hbar = \frac{h}{2\pi}$$

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.



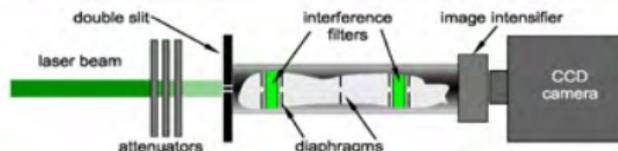
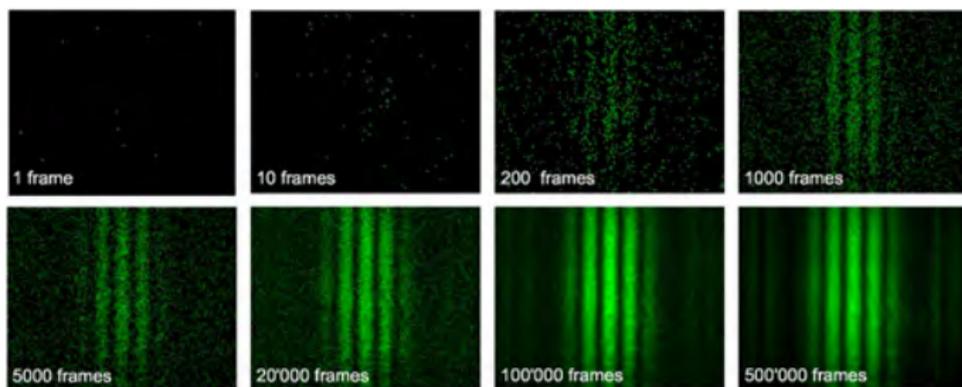
Onde elettromagnetiche

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

Anche le onde si comportano come particelle!

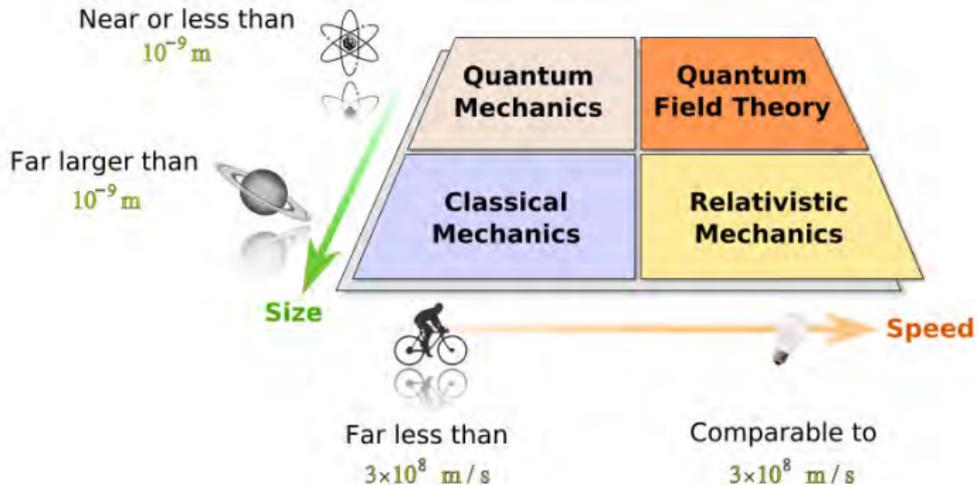
Onde elettromagnetiche → **fotoni** (quanti di luce)

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

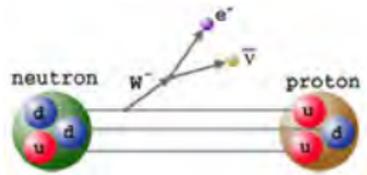
Da un punto di vista tecnico, esistono campi $\phi(x)$ (simili alle funzioni d'onda) che dipendono dalla posizione nello *spaziotempo* $x = (ct, \vec{x})$, e obbediscono a equazioni compatibili con la relatività speciale

Allo stesso tempo, la teoria è *quantistica*, ma in un modo un po' diverso da come la quantizzazione funziona nel modo 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