

CM pos. $\psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(p|\psi\rangle + n|\psi\rangle)$
no faster stable. $f(\alpha) = ?$
Wave function $\chi(\alpha) = \chi(\alpha)$
Total links $\sum \langle \chi, \psi + \psi, \chi \rangle$
understand what happens when particles collide. P.F.

La Fisica delle Particelle Elementari

S. Pacetti



INTERNATIONAL



MASTERCLASSES 2012

hands on particle physics

Dipartimento di Fisica - Università di Perugia

Perugia - 9 marzo 2012



Modelli matematici e costanti fondamentali



Le Teoria della Relatività



Le Meccanica Quantistica



Teoria Quantistica dei Campi



Il Modello Standard

La *Lagrangiana* del Modello Standard

$$\begin{aligned}\mathcal{L}_{\sim\text{MS}} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu}^a F^{a\mu\nu} + i \bar{\psi} \not{D} \psi \\ & + \psi_j \lambda_{jl} \psi_l H + \text{c.h.} \\ & + |D_\mu H|^2 - V(H) \\ & + \nu_j M_{jl} \nu_l\end{aligned}$$

Il quadrante della natura le cui leggi si lasciano scrivere in una pagina con precisione assoluta e massima evidenza empirica

Alcune risposte veloci

Cos'è il Modello Standard?

È un modello matematico non troppo complesso che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Descrive molto bene una vastissima gamma di fenomeni da quelli microscopici (“attoscopici”) a quelli super veloci!**

Come fa ad essere così “completo”?

Lo è perché incorpora sia le relatività di Einstein che la meccanica quantistica. Il Modello Standard è una **teoria di campo quantistica e relativistica**.

Quali e quante sono le particelle che riesce a descrivere?

Tutte quelle note! **Tre coppie di quark e tre di leptoni**.

... e le interazioni?

Le interazioni scaturiscono da **simmetrie fondamentali**. Il Modello Standard riesce a descrivere l'interazione forte, l'interazione debole e quella elettromagnetica ma non ancora **l'interazione gravitazionale!**



Modelli matematici e Costanti fondamentali della Fisica

(G. Isidori at Master Classes 2010)

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap. VI)

Galileo Galilei

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap. VI)



Scopo della Fisica: descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche

Modello matematico: un insieme di equazioni per **grandezze adimensionali** che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...

Equazione matematica

$$y(t) = y_0 + v_{y0} t - \frac{1}{2} g t^2$$

equazione con soltanto quantità adimensionali

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap. VI)



Scopo della Fisica: descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche

Modello matematico: un insieme di equazioni per **grandezze adimensionali** che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...

Legge oraria del moto uniformemente accelerato

$$y(t) = y_0 + v_{y0} t - \frac{1}{2} g t^2$$

costante fisica dimensionale
(misurata negli esperimenti)

coefficiente adimensionale
(calcolato nel modello)

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap. VI)



Scopo della Fisica: descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche

Modello matematico: un insieme di equazioni per **grandezze adimensionali** che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...

L'introduzione di quantità **dimensionali** determina il "passaggio"

modello matematico

→

teoria fisica

ovvero alla **descrizione e previsione di fenomeni naturali**

In una **teoria ideale**

- tutti i coefficienti adimensionali sono **calcolabili**
- si ha un **minimo numero di costanti fisiche dimensionali fondamentali**
- le dimensioni delle grandezze coinvolte sono **automaticamente** determinate dalle costanti fondamentali

Unità fondamentali₁

Le grandezze fondamentali sono: $\left\{ \begin{array}{l} \text{spazio} \rightarrow L \\ \text{tempo} \rightarrow T \\ \text{energia} \rightarrow E \end{array} \right.$

*We defined as **fundamental** those constants which **cannot be calculated** at our present level of fundamental knowledge (or rather ignorance). (Lev B. Okun)*

Le tre costanti fondamentali dimensionali che “corrispondono” alle tre grandezze sono:

La velocità della luce nel vuoto: $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$

Rappresenta la **massima velocità raggiungibile** in natura. È alla base della teoria della relatività ristretta che **unifica** spazio e tempo, come anche massa ed energia.

La costante di Planck: $\hbar \simeq 1.055 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}$

Rappresenta il “quanto” del momento angolare e dell’**azione** è la porta di accesso nel “regno” della meccanica quantistica.

La costante di gravitazione universale: $G \simeq 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$

Descrive l’interazione gravitazionale Newtoniana. Il suo status di costante fondamentale non è ancora così solido come quello di \hbar e c .

Unità fondamentali₂

I valori numerici delle tre costanti c , \hbar e G espressi nelle unità di misura del Sistema Internazionale (SI) sono piuttosto "inumani", lontani dall'esperienza quotidiana. . .

La velocità della luce nel vuoto:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \text{dimensione: } L/T$$

La costante di Planck:

$$\hbar \simeq 1.055 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg} \quad \text{dimensione: } E \times T$$

La costante di gravitazione universale:

$$G \simeq 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad \text{dimensione: } E \times L/M^2$$

Esercizio. Trovare le combinazioni delle tre costanti fondamentali che hanno le dimensioni: di una **lunghezza** di un **tempo** e di una **massa**.

Si procede così:

$$[c^\alpha \hbar^\beta G^\gamma]^{1/n} = [L^{\alpha+2\beta+3\gamma} T^{-(\alpha+\beta+2\gamma)} M^{\beta-\gamma}]^{1/n},$$

per avere ad esempio una lunghezza dobbiamo azzerare gli esponenti di T e M . . .

Unità fondamentali₂

I valori numerici delle tre costanti c , \hbar e G espressi nelle unità di misura del Sistema Internazionale (SI) sono piuttosto "inumani", lontani dall'esperienza quotidiana. . .

La velocità della luce nel vuoto:

$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad \text{dimensione: } L/T$$

La costante di Planck:

$$\hbar \simeq 1.055 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg} \quad \text{dimensione: } E \times T$$

La costante di gravitazione universale:

$$G \simeq 6.674 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad \text{dimensione: } E \times L/M^2$$

Ricombinando c , \hbar e G si possono ottenere tre nuove costanti con dimensione *pura*

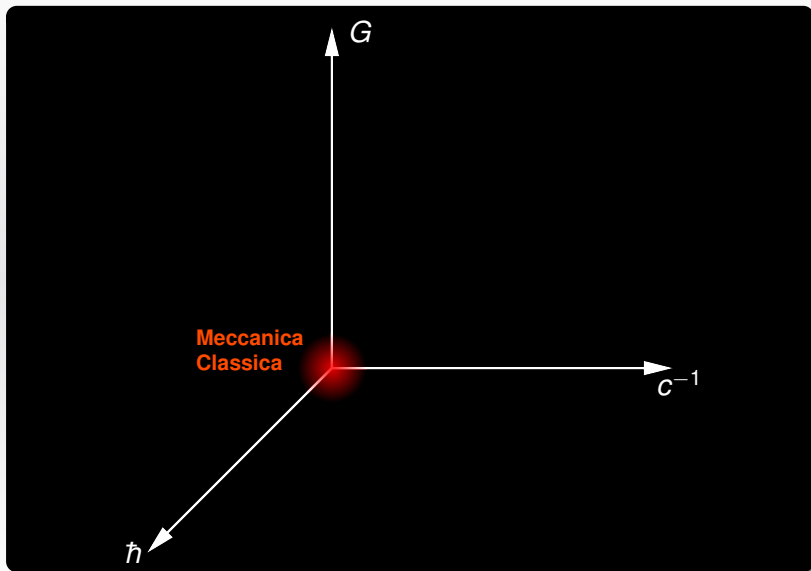
- $L_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \sim 10^{-35} \text{ m}$
- $T_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar G/c^5} \sim 10^{-43} \text{ s}$
- $M_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar c/G} \sim 10^{19} M_{\text{protone}}$

If, however, we imagine other worlds, with the same physical laws as those of our own world, but with different numerical values for the physical constants determining the limits of applicability of the old concepts, the new and correct concepts of space, time and motion, at which modern science arrives only after very long and elaborate investigations, would become a matter of common knowledge.

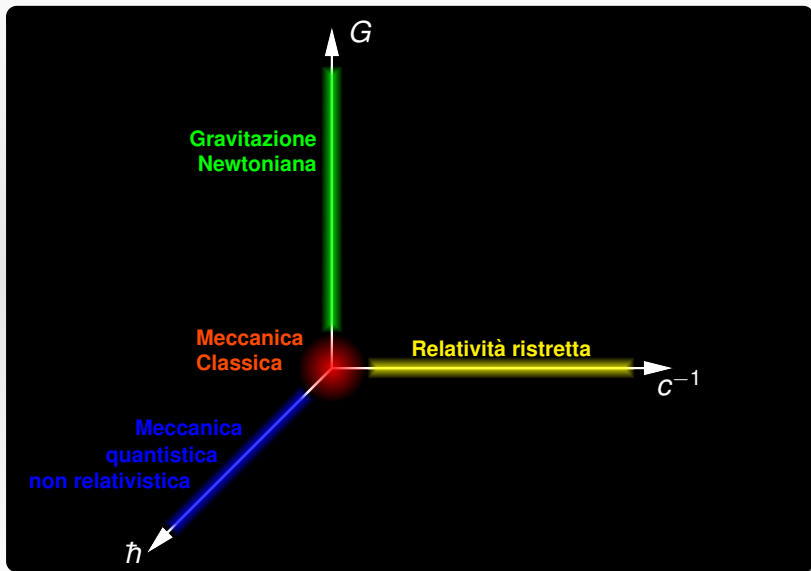
(George Gamow, *Mr. Tompkins in paperback*)



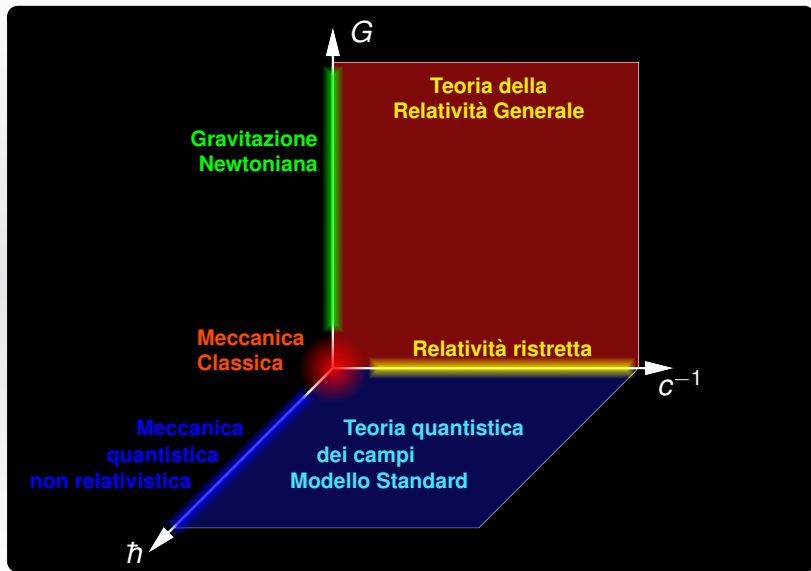
La teoria cubica (\hbar , c^{-1} , G)



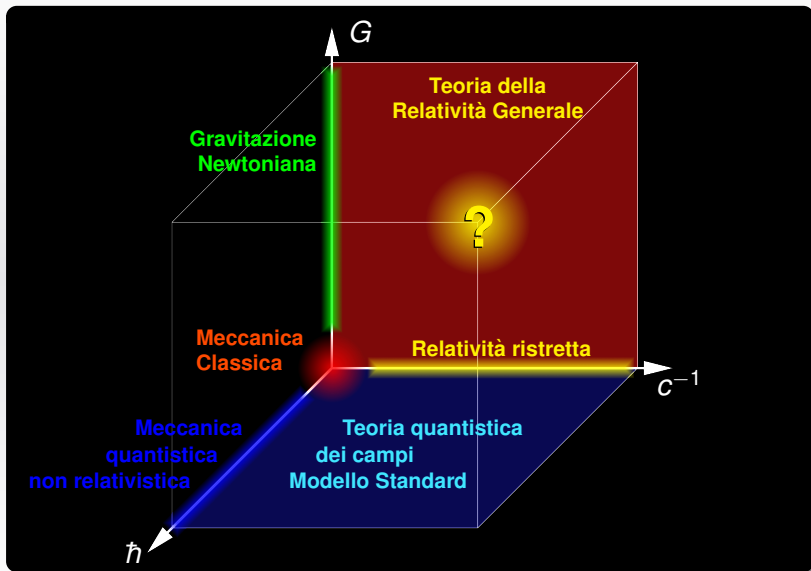
La teoria cubica (\hbar , c^{-1} , G)



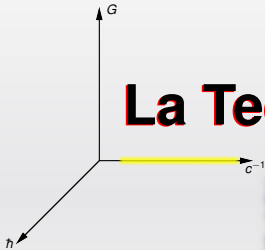
La teoria cubica (\hbar , c^{-1} , G)



La teoria cubica (\hbar , c^{-1} , G)



La Teoria della Relatività



Stephen Hawking (*The Simpsons*)

Le Teoria della Relatività₁

La teoria della **relatività ristretta** è stata formulata da Albert Einstein nel 1905

Einstein scoprì un errore nelle equazioni del moto di Newton, ritenute valide fino ad allora, e ne trovò la soluzione. La seconda legge di Newton doveva essere corretta

$$\vec{F} = \frac{d}{dt}(m \vec{v}) = m \vec{a} + \frac{dm}{dt} \vec{v}$$

se la massa **non**
è costante!

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

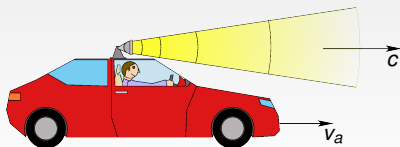
Il principio di relatività Galileiana e Newtoniana **non funziona** per l'elettromagnetismo

"The motions of bodies included in a given space are the same among themselves, whether that space is at rest or moves uniformly forward in a straight line."
Isaac Newton

Studiando fenomeni elettromagnetici in un dato sistema di riferimento è possibile stabilire se tale sistema sia **fermo** oppure si muova con **moto rettilineo uniforme**



Moto assoluto



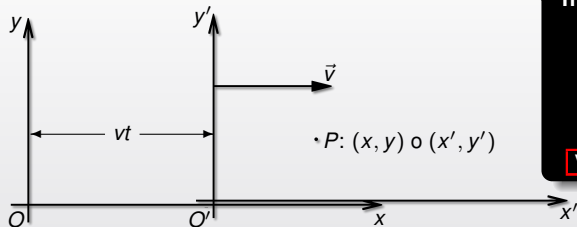
c è la velocità della luce nel sistema di riferimento in cui l'auto ha velocità costante v_a . La velocità della luce misurata dall'osservatore in auto è

$$c' = c - v_a$$

è possibile misurare la **velocità assoluta** dell'auto!

$$v_a = c - c'$$

Le Teoria della Relatività₂



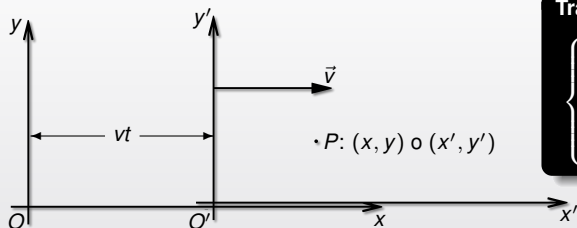
Trasformazioni di Galileo

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ t' = t \end{cases}$$

Il tempo è assoluto!

Velocità limite = ∞ m/s

Le Teoria della Relatività₂



Trasformazioni di Lorentz

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

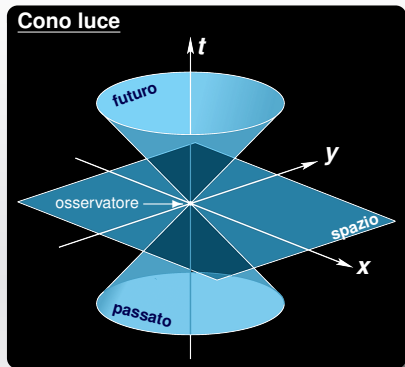
- Il tempo non è più una grandezza **privilegiata**, viene unificata allo spazio e si **trasforma** passando da un riferimento inerziale ad un altro.
- La velocità della luce nel vuoto rappresenta la velocità limite ed è **costante in ogni sistema di riferimento inerziale**.

Nessuna contraddizione:

Gli intervalli di tempo e spazio Δt e $\Delta \vec{r}$, invarianti con Galileo, si trasformano, ora, in modo tale che **la velocità della luce nel vuoto rimanga costante** in ogni sistema inerziale!

- Tutte le leggi fisiche sono invarianti in sistemi di riferimento inerziali.
- **Impulso ed energia sono conservati** e vale l'identità: $E = mc^2$

Le Teoria della Relatività₃



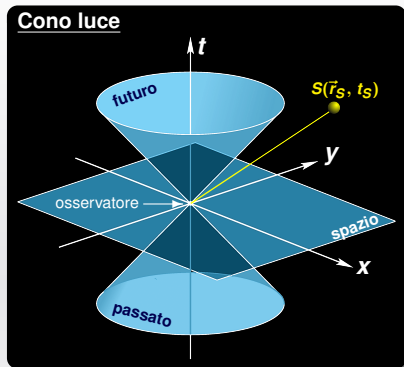
Le quantità invarianti per trasformazioni di Galileo sono, **indipendentemente**, gli intervalli: $\Delta\vec{r}$ e Δt

Nel caso relativistico, avendo unificato spazio e tempo, la quantità che si conserva per trasformazioni di Lorentz è:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta \vec{r}^2$$

Il **cono luce**, nello spazio tempo, è la superficie di equazione

$$c^2 \Delta t^2 = \Delta \vec{r}^2$$



Le quantità invarianti per trasformazioni di Galileo sono, **indipendentemente**, gli intervalli: $\Delta \vec{r}$ e Δt

Nel caso relativistico, avendo unificato spazio e tempo, la quantità che si conserva per trasformazioni di Lorentz è:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta \vec{r}^2$$

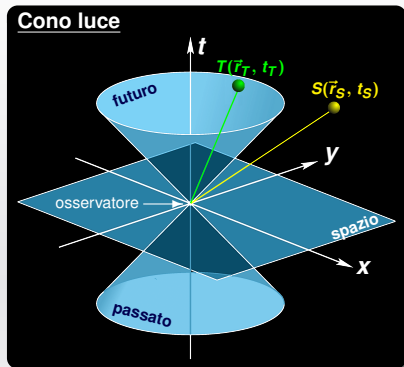
Il **cono luce**, nello spazio tempo, è la superficie di equazione

$$c^2 \Delta t^2 = \Delta \vec{r}^2$$

Un evento **S** esterno al cono luce è separato dall'osservatore, nell'origine, da un intervallo di "tipo spazio":

$$S^2 = c^2 t_S^2 - \vec{r}_S^2 < 0$$

L'osservatore non può comunicare con **S**!



Le quantità invarianti per trasformazioni di Galileo sono, **indipendentemente**, gli intervalli: $\Delta \vec{r}$ e Δt

Nel caso relativistico, avendo unificato spazio e tempo, la quantità che si conserva per trasformazioni di Lorentz è:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta \vec{r}^2$$

Il **cono luce**, nello spazio tempo, è la superficie di equazione

$$c^2 \Delta t^2 = \Delta \vec{r}^2$$

Un evento **S** esterno al cono luce è separato dall'osservatore, nell'origine, da un intervallo di "tipo spazio":

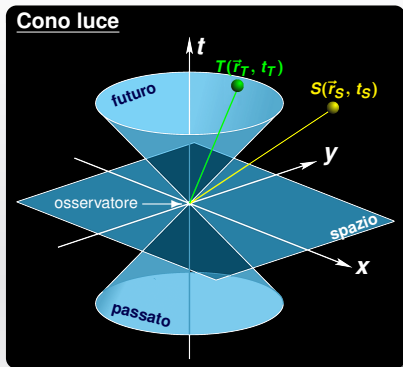
$$S^2 = c^2 t_S^2 - \vec{r}_S^2 < 0$$

L'osservatore non può comunicare con **S**!

Un evento **T** interno al cono luce è separato dall'osservatore, nell'origine, da un intervallo di "tipo tempo":

$$T^2 = c^2 t_T^2 - \vec{r}_T^2 > 0$$

L'osservatore può comunicare con **T**!



Le quantità invarianti per trasformazioni di Galileo sono, **indipendentemente**, gli intervalli: $\Delta \vec{r}$ e Δt

Nel caso relativistico, avendo unificato spazio e tempo, la quantità che si conserva per trasformazioni di Lorentz è:

$$\Delta s^2 = c^2 \Delta t^2 - \Delta \vec{r}^2$$

Il **cono luce**, nello spazio tempo, è la superficie di equazione

$$c^2 \Delta t^2 = \Delta \vec{r}^2$$

Esercizio. Calcolare l'ampiezza (massima) del cono luce della terra. Il massimo Δx sulla terra è pari al semidiametro, quindi il Δt corrisponde è

$$\Delta t_{\max} = \frac{\Delta x_{\max}}{c} = \frac{\pi R_{\text{terra}}}{c} \simeq \frac{\pi 6.4 \times 10^6 \text{ m}}{3.0 \times 10^8 \text{ m/s}} = 0.07 \text{ s.}$$

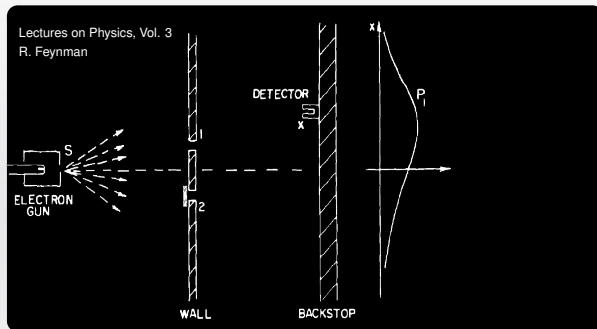
Due eventi che si verificano sulla terra con $\Delta t = 0.07 \text{ s}$, sono sempre separati da un **intervallo di tipo tempo**.



La Meccanica Quantistica

Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it.

N. Bohr



Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector

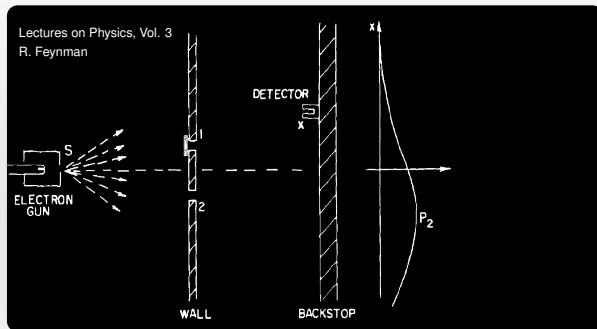
Il detector misura **singoli** elettroni

Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**

Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione **coincide con quella di probabilità $P_{1,2,12}$**

Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it.

N. Bohr



Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector

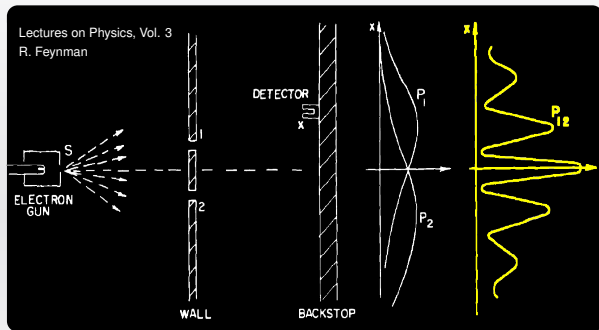
Il detector misura **singoli** elettroni

Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**

Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione **coincide con quella di probabilità $P_{1,2,12}$**

Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it.

N. Bohr



Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector

Il detector misura **singoli** elettroni

Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**

Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione **coincide con quella di probabilità $P_{1,2,12}$**

- Con una singola fenditura il comportamento è quello tipico di una **particella**.
- Quando entrambe le fenditure sono aperte la distribuzione misurata non è semplicemente la somma: **$P_{12} \neq P_1 + P_2!$**
- Si osserva, sorprendentemente, una **figura di interferenza** tipica delle onde!

Il principio di minima azione

In **meccanica classica** la legge oraria, $\vec{r} = \vec{r}(t)$, che descrive ad esempio la traiettoria di una particella, può essere ricavata usando due procedure equivalenti

equazioni del moto di Newton



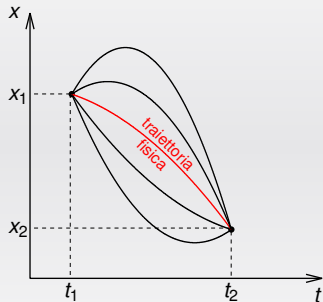
principio di minima azione

Cos'è l'azione?

$$\text{Azione} \equiv S = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right) dt$$

“Discretizzando”, l'azione rappresenta la somma su tutti gli intervalli di tempo Δt della differenza tra energia cinetica e potenziale

$$S = \sum_{\Delta t} (E_{\text{cin}} - E_{\text{pot}}) \Delta t$$



Ogni traiettoria che unisce i punti (t_1, x_1) e (t_2, x_2) ha associato un valore dell'azione

La traiettoria seguita dalla particella coincide con quella che **minimizza l'azione** ovvero che minimizza lo scambio di energia tra termine cinetico e energia potenziale

Il metodo dell'**integrale sui cammini** è stato sviluppato da Feynman da un'idea di Dirac. I concetti fondamentali sono quelli di **traiettoria (cammino)** e **azione** che, a differenza di quello di equazioni del moto Newtoniane, non perdono significato nel passaggio

meccanica classica



meccanica quantistica

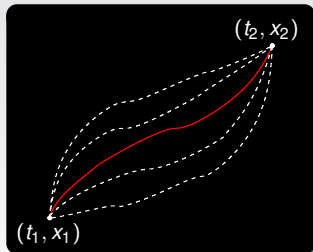
Postulati della meccanica quantistica

- Non è possibile calcolare in modo **deterministico** l'evoluzione di un sistema quantistico
- La probabilità, $P(x_1, x_2)$, che una particella vada da (t_1, x_1) a (t_2, x_2) si ottiene come modulo quadro di una ampiezza **complessa** $A(x_2, x_1)$

$$P(x_2, x_1) = |A(x_2, x_1)|^2$$

- L'ampiezza $A(x_2, x_1)$ si ottiene sommando su tutti i possibili cammini ciascuno pesato con un **fattore di fase** che tiene conto della relativa azione in unità della costante di Planck \hbar

$$A(x_2, x_1) = \sum_{\text{cammini}} \kappa e^{iS/\hbar}$$



La Meccanica Quantistica₃

La probabilità è

$$P(x_2, x_1) = \left| \sum_{\text{cammini}} \mathcal{K} e^{iS/\hbar} \right|^2 = \left[\sum_{\text{cammini}} \mathcal{K} \cos \left(\frac{S}{\hbar} \right) \right]^2 + \left[\sum_{\text{cammini}} \mathcal{K} \sin \left(\frac{S}{\hbar} \right) \right]^2$$

Nei processi **classici** $S \gg \hbar$ le funzioni trigonometriche hanno comportamenti **fortemente oscillanti appena ci si allontana dalla traiettoria classica**

$$\left| \sum_{\text{cammini non classici}} \mathcal{K} e^{iS/\hbar} \right|^2 \simeq 0$$

$$\left| \sum_{\text{cammino classico}} \mathcal{K} e^{iS/\hbar} \right|^2 \simeq 1$$

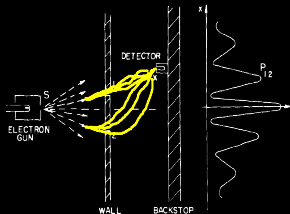
Nei casi in cui $S \sim \hbar$ non è più possibile definire una traiettoria in senso classico

Nell'esperimento della doppia fenditura, la probabilità che un elettrone arrivi in x sullo schermo si ottiene sommando su tutti i possibili cammini

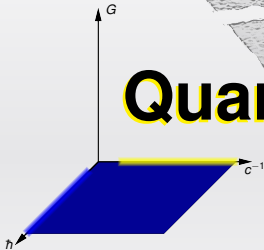
⇒ **fenomeno d'interferenza**

Principio di indeterminazione:

$$S \sim \Delta E \Delta t \sim \Delta x \Delta p \sim \hbar$$



La Teoria Quantistica dei Campi



La Teoria Quantistica dei Campi₀

- 1860'  James Clerk Maxwell formula la teoria dell'elettromagnetismo unificando campo elettrico e magnetico
- 1896  Henri Becquerel, Marie Curie e Pierre Curie scoprono la radioattività (interazioni deboli) 
- 1934  Enrico Fermi formula la teoria dei decadimenti radioattivi (interazione corrente-corrente) 
- 40'  Sin-Itiro Tomonaga, Julian Schwinger, Richard P. Feynman formulano l'elettrodinamica quantistica (QED) 
- 60'  Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg formulano il Modello Standard 
- '60-'70  Scoperta dei quark e sviluppo della Cromodinamica quantistica (QCD interazioni forti)
- 1983  Carlo Rubbia, Simon van der Meer scoprono i bosoni intermedi 
- 90'  Si osserva che i neutrini hanno massa (Bruno Pontecorvo *et al.*)

La Teoria Quantistica dei Campi₁

La meccanica quantistica è stata sviluppata in approssimazione **Galileiana!**

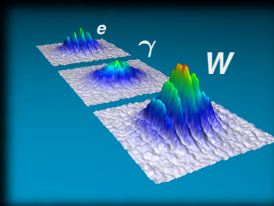
Includendo la relatività ristretta si ottiene la Teoria Quantistica dei Campi

$$[\Delta E \Delta t > \hbar] + [E = mc^2] \longrightarrow \text{Teoria Quantistica dei Campi}$$

Il concetto di particella come entità "indistruttibile" deve essere abbandonato e sostituito da quello di **campo**: il campo dell'elettrone ψ , del fotone A_μ , ecc.

Le particelle sono **eccitazioni** dei campi quantistici

Stimolando o smorzando tali eccitazioni è possibile, matematicamente, **creare** o **distruggere** particelle in ogni punto dello spazio-tempo e con qualsiasi velocità

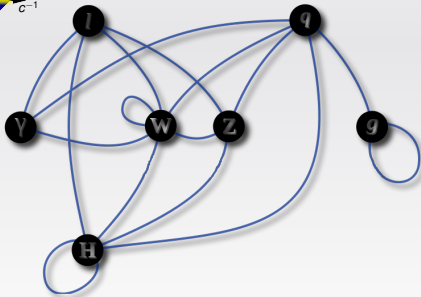
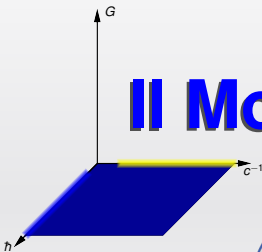


- Campo libero \longrightarrow particella in moto uniforme
- Campi interagenti \longrightarrow creazione e distruzione di particelle

La teoria quantistica dei campi contiene come costanti fondamentali sia c che \hbar .
Con la notazione: $\mathbf{c = \hbar = 1}$ tutte le grandezze fondamentali possono essere espresse in termini dell'energia o del suo inverso

$$[M] = [E]/c^2 \quad [T] = \hbar/[E] \quad [L] = \hbar c/[E]$$

Il Modello Standard



Il Modello Standard₁

Materia

- campi con $\text{spin} = 1/2$
- Tre generazioni di coppie di quark
- Tre generazioni di coppie di leptoni

Portatori dell'interazione

- campi con $\text{spin} = 1$
- Interazione elettromagnetica: fotone γ
massa nulla \rightarrow raggio d'azione infinito
- Interazione debole: bosoni W^\pm e Z^0
massa grande \rightarrow corto raggio d'azione
- Interazione forte: gluone g

		Generazioni				
		I	II	III		
quark	u	2.4 MeV/c ² 2/3 1/2 up	1.27 GeV/c ² 2/3 1/2 charm	171.2 GeV/c ² 2/3 1/2 top	Y photon	
	d	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 bottom		g gluon
	leptoni	ν_e	<2.2 eV/c ² 0 1/2 electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 muon neutrino		
e	0.511 MeV/c ² -1 1/2 electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 tau	W [±] W boson		
		portatori dell'interazione				

Le proprietà delle interazioni sono determinate dalle **simmetrie** della teoria

- simmetria di "colore" \rightarrow **interazione forte**
- simmetria "elettro-debole" \rightarrow **interazione elettromagnetica e debole**

Il Modello Standard₂: i quark

Quark

- Sei particelle in tre generazioni: “up” e “down”
- spin = 1/2
- Carica up = 2/3, carica down = -1/3
- Ogni quark q ha un'antiparticella \bar{q} con la stessa massa ma cariche opposte

Generazioni

	I	II	III	
quark	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 Y photon
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 Z boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm W boson

Il Modello Standard₂: i quark

Quark

- Sei particelle in tre generazioni: “up” e “down”
- spin = 1/2
- Carica up = 2/3, carica down = -1/3
- Ogni quark q ha un'antiparticella \bar{q} con la stessa massa ma cariche opposte

I quark hanno carica elettrica, di colore e debole sono quindi soggetti a tutte le interazioni del Modello Standard

Generazioni

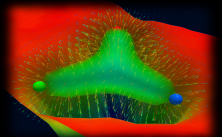
	I	II	III	
quark	2.4 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	1.27 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	171.2 GeV/c ² 2/3 1/2 t top	0 0 1 Y photon
	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon
	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν _e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν _μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν _τ tau neutrino	0 0 1 Z ⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	80.4 GeV/c ² -1 1 W [±] W boson
				portatori dell'interazione

L'intensità e le proprietà di simmetria dell'interazione forte sono responsabili del fenomeno detto

confinamento
dei quark



non esistono
quark liberi



Leptoni

- Sei particelle in tre generazioni: **neutrino e leptone carico**
- **spin = 1/2**
- **Carica neutrino = 0, leptone carico = -1**
- Ogni leptone l o ν ha un'antiparticella \bar{l} o $\bar{\nu}$ con la **stessa massa ma cariche opposte**

Generazioni

	I	II	III	
leptoni	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 γ photon
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z^0 Z boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm W boson

Il Modello Standard₃: i leptoni

Leptoni

- Sei particelle in tre generazioni: **neutrino e leptone carico**
- **spin = 1/2**
- **Carica neutrino = 0, leptone carico = -1**
- Ogni leptone l o ν ha un'antiparticella \bar{l} o $\bar{\nu}$ con la **stessa massa ma cariche opposte**

I leptoni carichi non hanno carica di colore, interagiscono attraverso le interazioni elettromagnetica e debole

		Generazioni				
		I	II	III		
leptoni	2.4 MeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	u up	1.27 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	171.2 GeV/c ² $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	γ photon
	4.8 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	d down	104 MeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	4.2 GeV/c ² $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0 0 1	g gluon
	<2.2 eV/c ² 0 $\frac{1}{2}$	ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 $\frac{1}{2}$	<15.5 MeV/c ² 0 $\frac{1}{2}$	0 0 1	Z^0 Z boson
	0.511 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$	e electron	105.7 MeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$	1.777 GeV/c ² -1 $\frac{1}{2}$	80.3 GeV/c ² -1 1	W^\pm W boson
		μ muon		τ tau		

portatori dell'interazione

Il Modello Standard₃: i leptoni

Leptoni

- Sei particelle in tre generazioni: **neutrino e leptone carico**
- **spin = 1/2**
- **Carica neutrino = 0, leptone carico = -1**
- Ogni leptone l o ν ha un'antiparticella \bar{l} o $\bar{\nu}$ con la **stessa massa ma cariche opposte**

I leptoni carichi non hanno carica di colore, interagiscono attraverso le interazioni elettromagnetica e debole

I neutrini non hanno né carica di colore né carica elettrica, interagiscono solo attraverso l'interazione debole

		Generazioni				
		I	II	III		
leptoni	2.4 MeV/c ² 2/3 1/2	u up	1.27 GeV/c ² 2/3 1/2	171.2 GeV/c ² 2/3 1/2	0 0 1	γ photon
	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2	d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2	0 0 1	g gluon
	<2.2 eV/c ² 0 1/2	ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2	ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2	ν_τ tau neutrino
	0.511 MeV/c ² -1 1/2	e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2	μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2	τ tau
					80.4 GeV/c ² -1 1	Z^0 Z boson
					80.4 GeV/c ² -1 1	W^\pm W boson

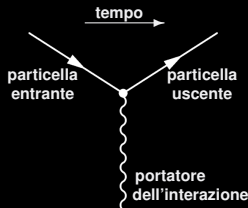
portatori dell'interazione

I grafici di Feynman₁

I was sort of half-dreaming, like a kid would... that it would be funny if these funny pictures turned out to be useful, because the damned Physical Review would be full of these odd-looking things. And that turned out to be true.
R. Feynman

- Le interazioni fondamentali possono essere descritte usando un simbolo detto **vertice di Feynman**
- Questo simbolo **schematizza la procedura matematica** che permette di calcolare la probabilità che l'interazione avvenga
- Nel Modello Standard ci sono **tre vertici fondamentali** uno per ogni interazione

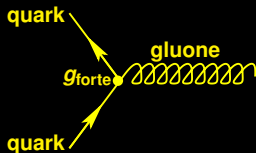
- ● particella di materia entrante o antiparticella uscente, spin=1/2
($q, l, \nu, \bar{q}, \bar{l}, \bar{\nu}$)
- ← ● particella di materia uscente o antiparticella entrante, spin=1/2
($q, l, \nu, \bar{q}, \bar{l}, \bar{\nu}$)
- ~~~~~ portatore dell'interazione, spin=1
(γ, W^\pm, Z^0)



Importante: i grafici di Feynman sono soltanto dei **simboli!**
Non rappresentano le traiettorie delle particelle nello spazio-tempo!

I grafici di Feynman₂

Interazione forte

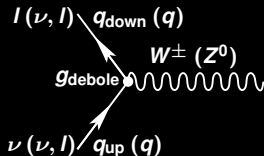


Intensità dell'interazione forte

$$g_{\text{forte}}(1 \text{ GeV}) \sim 3$$

$$g_{\text{forte}}(100 \text{ GeV}) \sim 1.2$$

Interazione debole

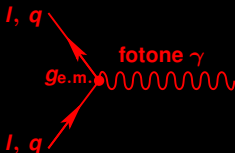


Intensità dell'interazione debole

$$g_{\text{debole}}(1 \text{ GeV}) \sim 0.01$$

$$g_{\text{debole}}(100 \text{ GeV}) \sim 0.4$$

Interazione elettromagnetica



Intensità dell'interazione elettromagnetica

$$g_{\text{e.m.}}(1 \text{ GeV}) \sim 0.2$$

$$g_{\text{e.m.}}(100 \text{ GeV}) \sim 0.3$$

I grafici di Feynman₃: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Consideriamo il decadimento β del neutrone

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

Sappiamo che:

Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono "composti" da quark $|p\rangle = |uud\rangle$ e $|n\rangle = |udd\rangle$ (infatti, sommando le cariche...)

Sia l'elettrone che l'antineutrino **sono particelle elementari**

Poiché il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un "portatore" del tipo W^\pm o Z^0 che fa un vertice con i leptoni

Poiché un quark d con carica $-1/3$ si converte in un quark u con carica $+2/3$ si deve avere l'emissione di un bosone con carica -1 , ovvero W^-

I grafici di Feynman₃: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Consideriamo il decadimento β del neutrone

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

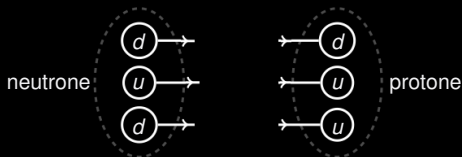
Sappiamo che:

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono “composti” da quark $|p\rangle = |uud\rangle$ e $|n\rangle = |udd\rangle$ (infatti, sommando le cariche...)

Sia l'elettrone che l'antineutrino **sono particelle elementari**

Poiché il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un “portatore” del tipo W^\pm o Z^0 che fa un vertice con i leptoni

Poiché un quark d con carica $-1/3$ si converte in un quark u con carica $+2/3$ si deve avere l'emissione di un bosone con carica -1 , ovvero W^-



I grafici di Feynman₃: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Consideriamo il decadimento β del neutrone

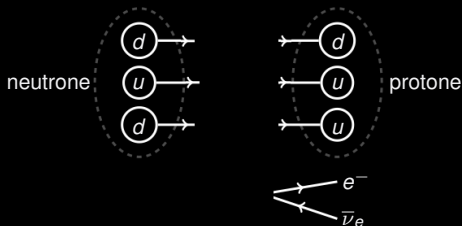
$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Sappiamo che:

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono “composti” da quark $|p\rangle = |uud\rangle$ e $|n\rangle = |udd\rangle$ (infatti, sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino **sono particelle elementari**

Poiché il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un “portatore” del tipo W^\pm o Z^0 che fa un vertice con i leptoni

Poiché un quark d con carica $-1/3$ si converte in un quark u con carica $+2/3$ si deve avere l'emissione di un bosone con carica -1 , ovvero W^-



I grafici di Feynman₃: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

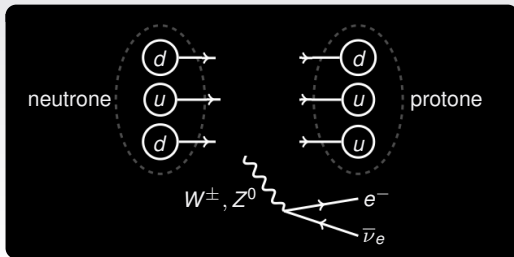
Consideriamo il decadimento β del neutrone

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

Sappiamo che:

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono “composti” da quark $|p\rangle = |uud\rangle$ e $|n\rangle = |udd\rangle$ (infatti, sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino **sono particelle elementari**
- Poiché il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un “portatore” del tipo W^\pm o Z^0 che fa un vertice con i leptoni

Poiché un quark d con carica $-1/3$ si converte in un quark u con carica $+2/3$ si deve avere l'emissione di un bosone con carica -1 , ovvero W^-



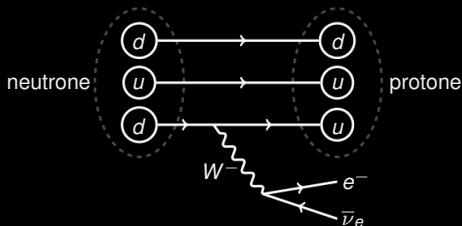
I grafici di Feynman₃: $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

Consideriamo il decadimento β del neutrone

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

Sappiamo che:

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono “composti” da quark $|p\rangle = |uud\rangle$ e $|n\rangle = |udd\rangle$ (infatti, sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino **sono particelle elementari**
- Poiché il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un “portatore” del tipo W^\pm o Z^0 che fa un vertice con i leptoni
- Poiché un quark **d** con carica **-1/3** si converte in un quark **u** con carica **+2/3** si deve avere l'emissione di un bosone con carica **-1**, ovvero W^-



Il mistero della massa₁

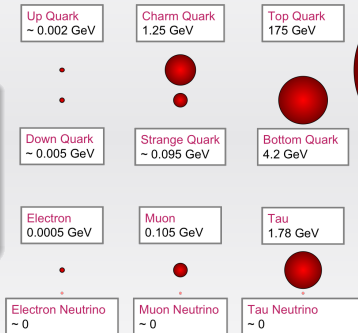
Le **simmetrie** che sono alla base del Modello Standard sono **violate** da campi con masse diverse da zero



Tutte le particelle elementari devono avere **massa nulla**

Sperimentalmente, invece, le masse sono non nulle

Le tre "generazioni" si differenziano **solo** per le masse (**crescenti**)

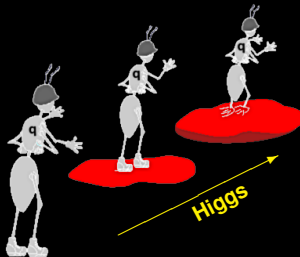


Per preservare il Modello Standard è necessario trovare un metodo che "generi" le masse senza **rompere le simmetrie fondamentali**

Il mistero della massa₂: il campo di Higgs

Nel Modello Standard il problema della massa è risolto introducendo un nuovo campo, detto, **campo di Higgs** (dal nome del fisico Peter Higgs)

- Il campo di Higgs è **scalare**, cioè ha **spin = 0** ed è l'unico del Modello Standard
- È un campo **diffuso** ed ha un valore costante in tutto lo spazio
- Le particelle che si muovono “attraverso” tale campo interagiscono con esso come se fosse un **fluido resistente**
- L'**inerzia** dovuta a tale interazione si traduce in massa per le particelle



Nessun esperimento ha fino ad ora prodotto oscillazioni evidenti del campo di Higgs ovvero non c'è stata ancora nessuna **osservazione certa**.
Comunque LHC sembra abbastanza vicino. . .



- **Oscillazioni e quindi masse dei neutrini**

Il Modello standard non prevede masse per i neutrini, l'osservazione di oscillazioni è la prima evidenza di "fisica oltre il Modello Standard".

- **Materia ed energia oscura**

Il Modello Standard spiega solo il 4% della massa-energia dell'Universo. Il rimanente 96% si pensa costituito da materia oscura (24%) ed energia oscura (72%).

- **Asimmetria materia - antimateria**

Il Modello Standard prevede la creazione di uguali quantità di materia e antimateria, ma l'Universo sembra costituito da un solo tipo...

- ...

- **Supersimmetria**

È un'estensione del Modello Standard che introduce nuove particelle partner di quelle note, che hanno differenti valori dello spin.

- **Teoria delle Stringhe**

La teoria del "Tutto" per unificare le teorie di campo e la Relatività Generale?

- ...

*It is more important to have **beauty** in one's equations than to have them to fit experiment. . . because the discrepancy may be due to minor features that are not properly taken into account and that will get cleared up with further developments of the theory. . . It seems that if one is working from the point of view of getting **beauty** in one's equations, and if one has really a sound insight, one is on a sure line of progress.*

P. A. M. Dirac

