

LNF, 15 marzo 2017

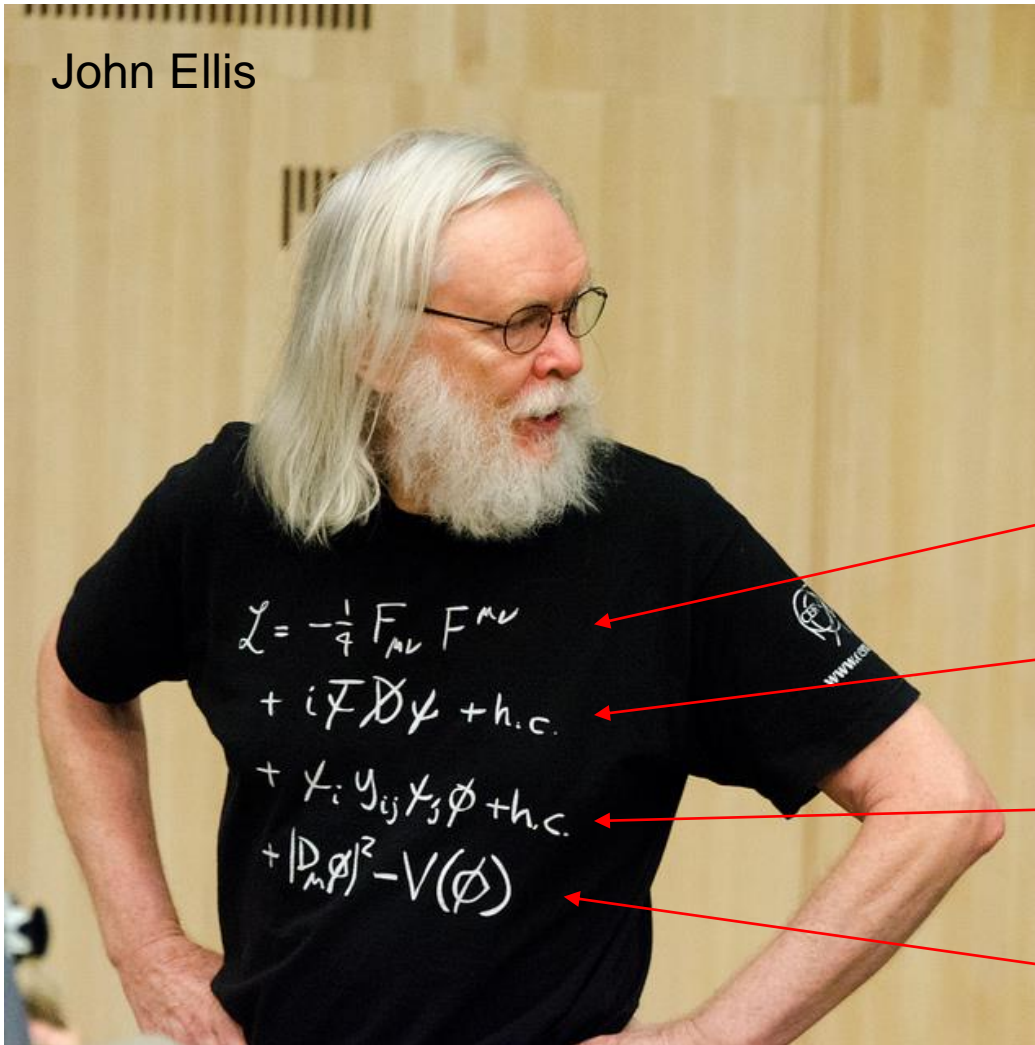
Le basi del Modello Standard

Vincenzo Barone



Il Modello Standard: una **teoria quantistica di campo** di **tre** delle quattro **interazioni fondamentali**, basata su **simmetrie**

John Ellis



$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi}\not{D}\psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi)\end{aligned}$$

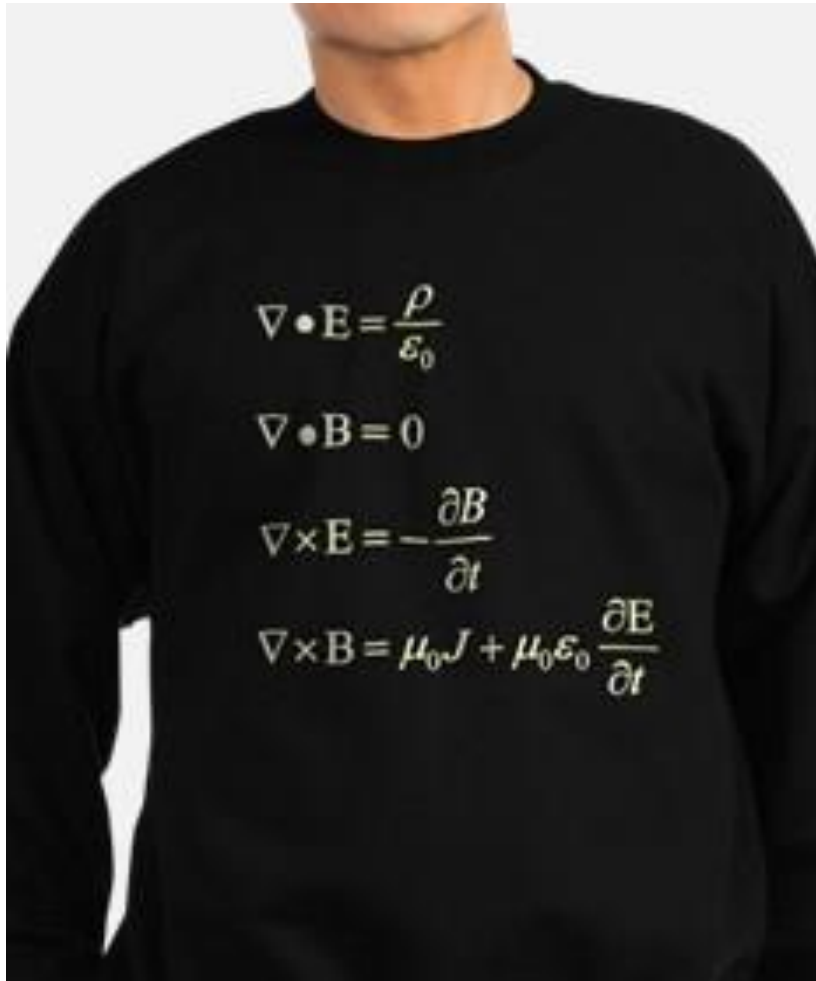
Particelle di forza
(fotoni, W, Z, gluoni)

Particelle di materia
(quark e leptoni)

Termine di massa per
le particelle di materia

Termine di massa per
le particelle di forza
Rottura spontanea

Un precedente: la teoria di Maxwell dell'elettromagnetismo



Lagrangiana: campo em + materia

$$\mathcal{L}_{\mathcal{EM}} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F_{\mu\nu} + \frac{1}{c}j_{\mu}A_{\mu}$$

- Una sola interazione (em)
- Equazioni lineari
- Campi classici

Cronologia del Modello Standard

- 1930-40: Interazioni subatomiche, forte e debole
- 1949-50: Elettrodinamica quantistica, QED
(Feynman, Schwinger, Tomonaga, Dyson)
- 1954: Teorie di gauge (Yang e Mills)
- 1961: Teoria elettrodebole (Glashow)
- 1964: Meccanismo di Higgs (Higgs, Brout e Englert)
- 1967: Modello Standard elettrodebole (Salam, Weinberg)
- 1973: Cromodinamica quantistica
(Fritzsch, Gell-Mann, Gross, Wilczek, Politzer)
- 1973: Correnti deboli neutre
- 1983: Bosoni W e Z
- 2012: Bosone di Higgs

Meccanica quantistica

Le particelle sono onde, di lunghezza d'onda (de Broglie)

$$\lambda = \frac{h}{p} \approx \frac{hc}{E}$$

Possiamo usare le particelle di alta energia per esplorare lo spazio
La risoluzione è proporzionale all'energia

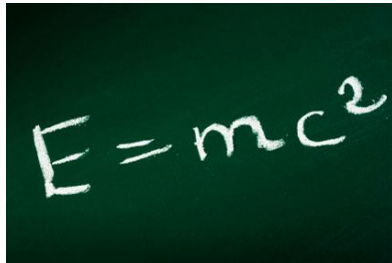
Per esempio:

1 GeV \rightarrow 10^{-15} metri = 1 fermi (raggio del protone)

10 TeV \rightarrow 10^{-19} metri (attuale limite osservativo)

Relatività speciale

La massa è energia (Einstein)

A photograph of a chalkboard with the equation $E=mc^2$ written in white chalk. The chalkboard is dark green and the equation is centered.

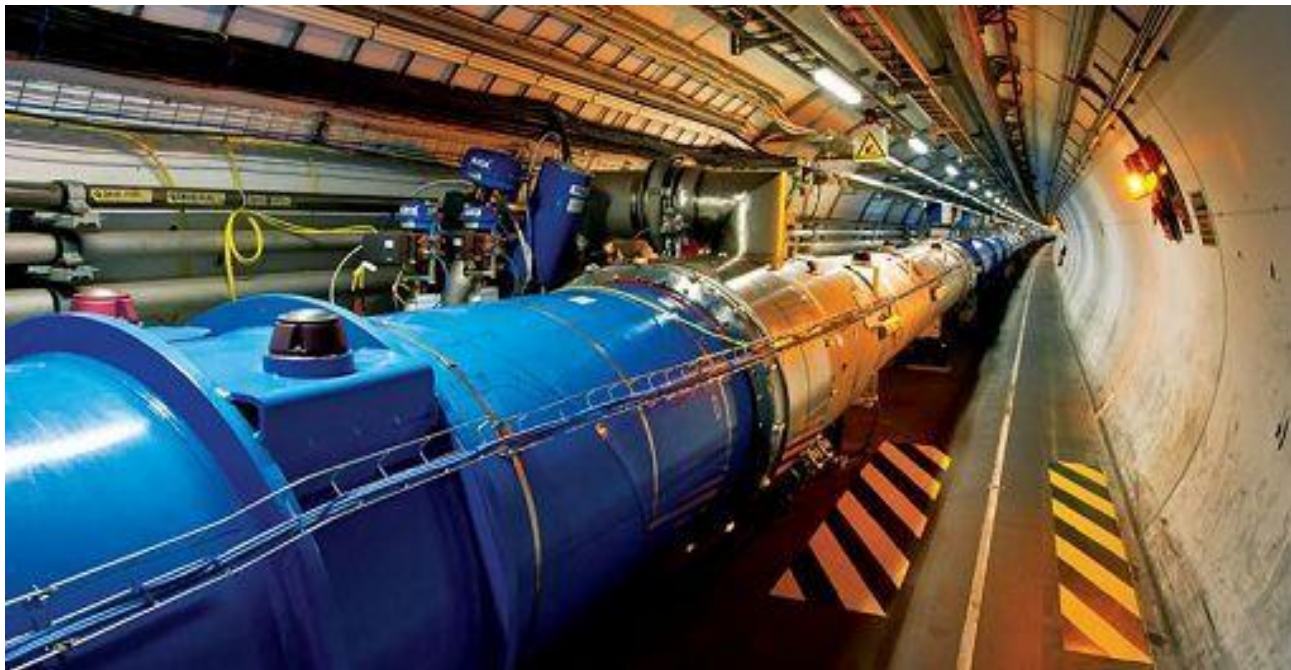
Possiamo convertire l'energia cinetica in energia di massa e produrre particelle

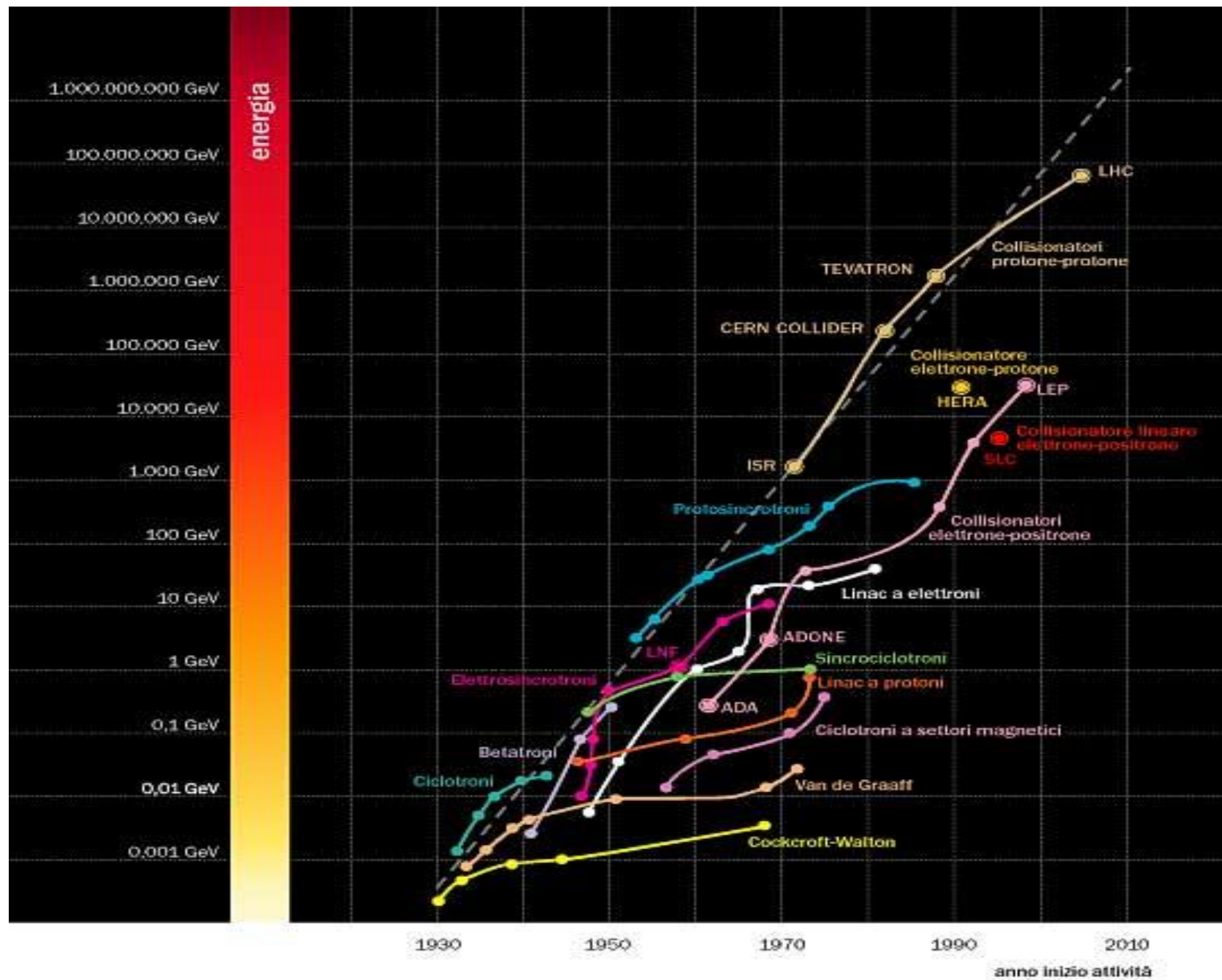
Per esempio:

$$p + p \rightarrow p + p + \bar{p} + p \quad (\text{produzione dell'antiprotone})$$

Gli **acceleratori di particelle** come **microscopi quantistici**
e **fabbriche relativistiche**

Esplorano lo spazio (e l'interno della materia) e producono particelle,
e sono tanto più efficaci quanto più alta è la loro energia





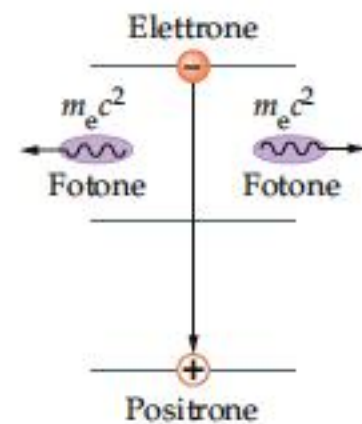
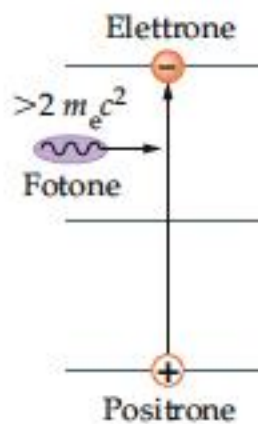
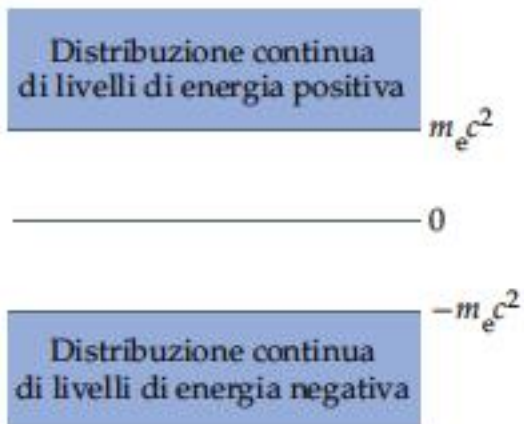


L'equazione di Dirac

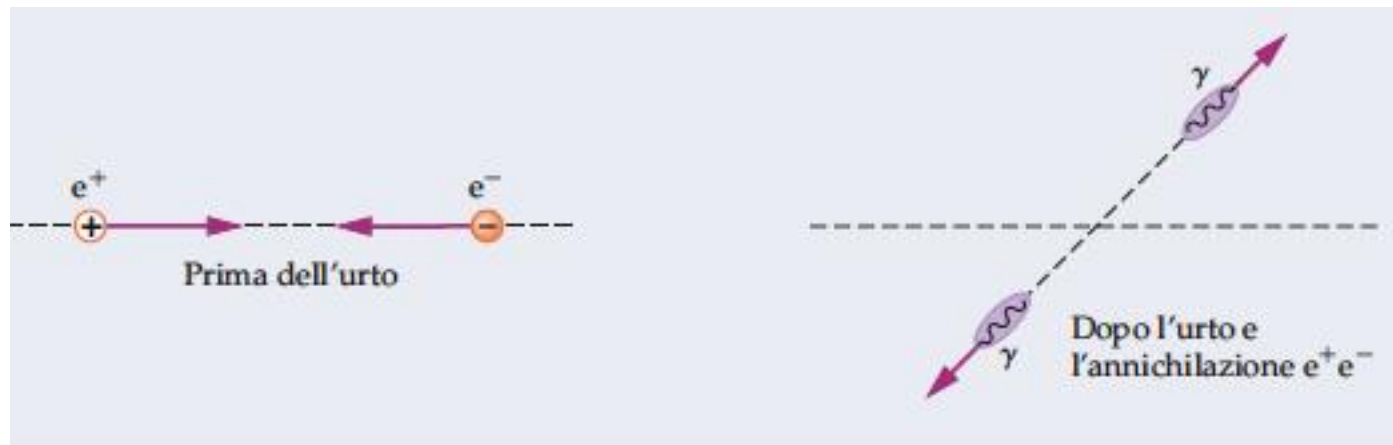
$$i\gamma \cdot \partial \psi = m\psi$$

Spin dell'elettrone e antiparticelle (positroni)

$$E = \pm \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4}$$



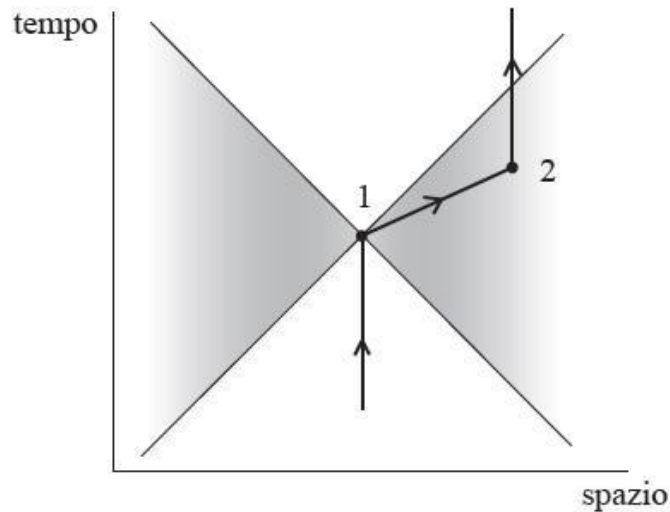
Annichilazione e creazione di coppie elettrone-positrone



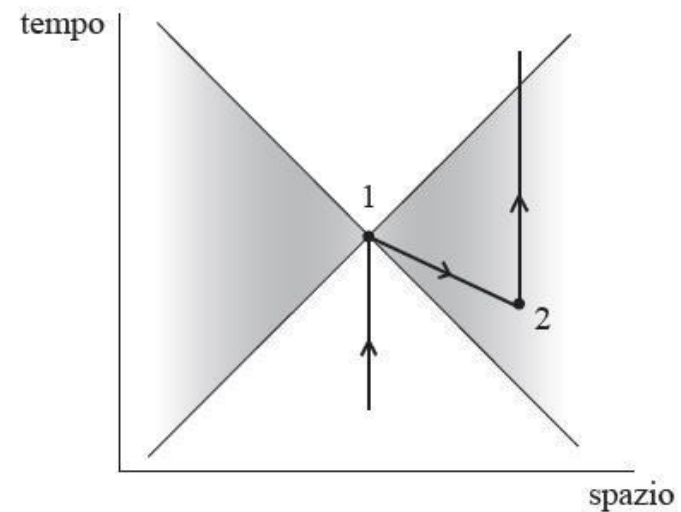
Per la conservazione della quantità di moto e dell'energia, l'annichilazione deve produrre due fotoni reali

Viceversa, due fotoni reali possono produrre una coppia e^+e^-

Meccanica quantistica + Relatività speciale = Teoria quantistica dei campi

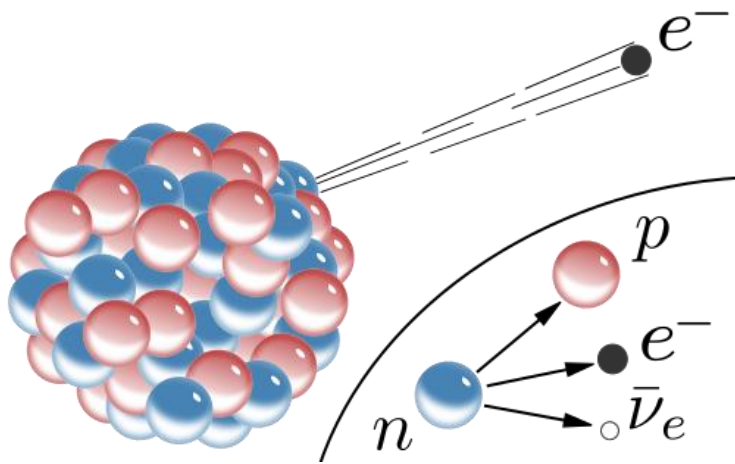


Una particella si propaga da 1 a 2



Una coppia particella-antiparticella
si crea in 2 e si annichila in 1

Il numero di particelle non è conservato: una «meccanica»
quantistica e relativistica non basta



Esempio: decadimento del neutrone

Processo governato dall'interazione debole
In cui sono creati un elettrone e un antineutrino

Fermi (1934): prima teoria
dell'interazione debole (e
prima teoria di campo di
un processo fisico)

ANNO IV - VOL. II - N. 12

QUINDICINALE

31 DICEMBRE 1933 - XII

LA RICERCA SCIENTIFICA

ED IL PROGRESSO TECNICO NELL'ECONOMIA NAZIONALE

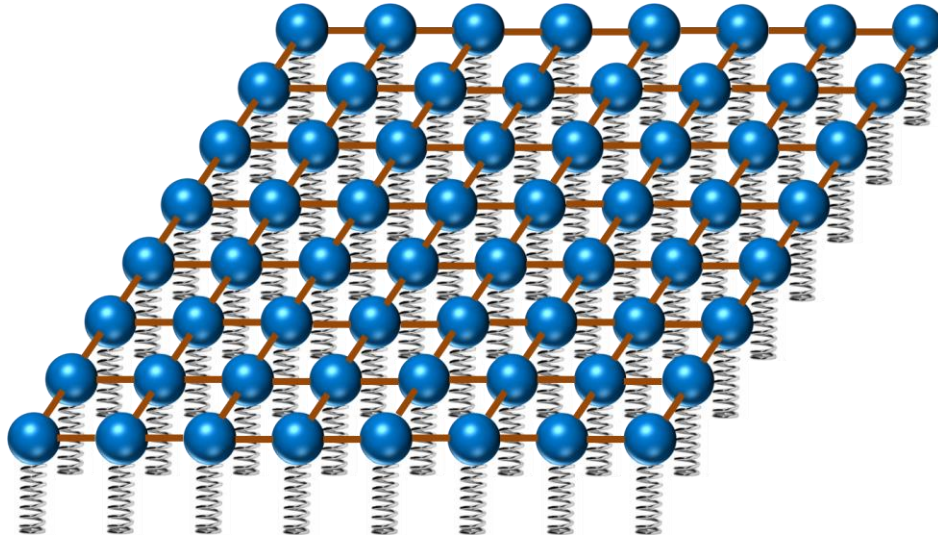
Tentativo di una teoria dell'emissione dei raggi "beta"

Nota del prof. ENRICO FERMI

Riassunto: Teoria della emissione dei raggi β delle sostanze radioattive, fondata sull'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengano formati, insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo. Confronto della teoria con l'esperienza.

Che cos'è un campo quantistico

Un insieme di infiniti oscillatori quantizzati



Quando tutti gli oscillatori sono nello stato fondamentale si ha il **vuoto**
(L'energia di punto zero del vuoto può generare forze)

Quando un oscillatore salta in uno stato eccitato si crea una particella
Le particelle sono eccitazioni dei campi quantistici che si propagano

Superamento del dualismo particelle-campi

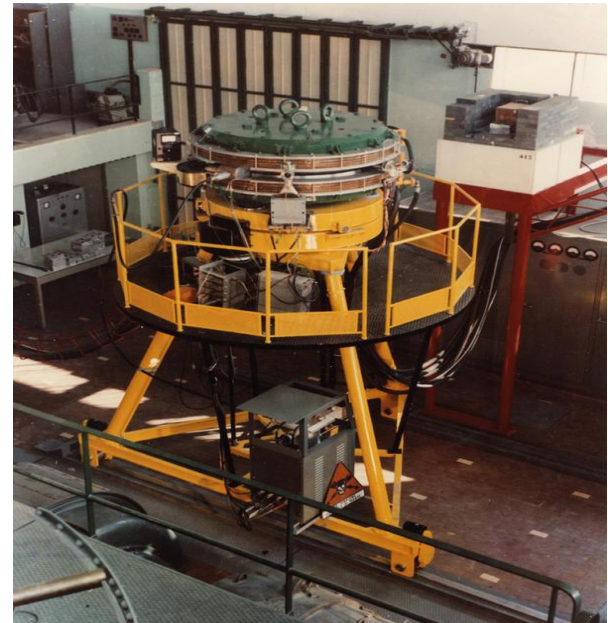
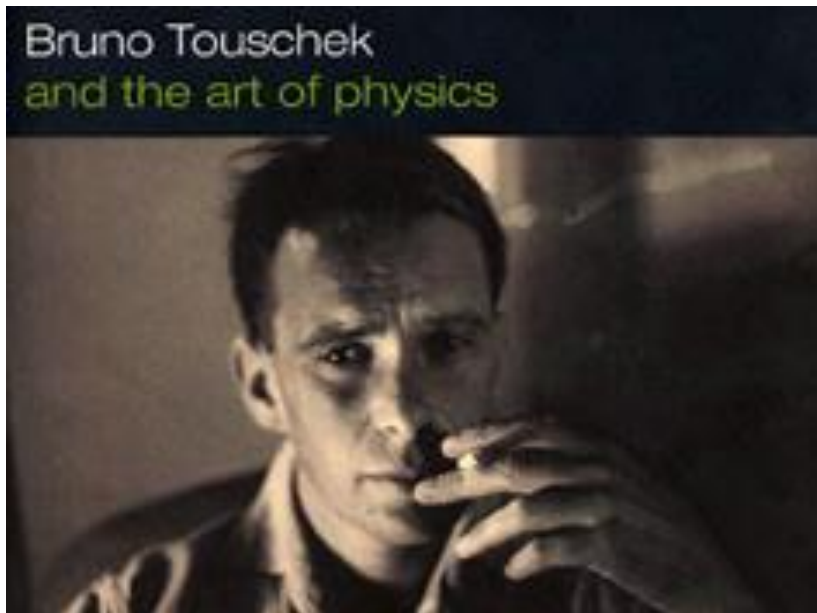
Il vuoto quantistico

Non è «vuoto», possiede un'energia, può non essere unico

I **collisori di particelle** come **eccitatori del vuoto** (Touschek)

$$e^+ e^- \rightarrow \text{fotone virtuale} \rightarrow ???$$

AdA 1961



Le entità fisiche

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$	0	0
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS

LEPTONS

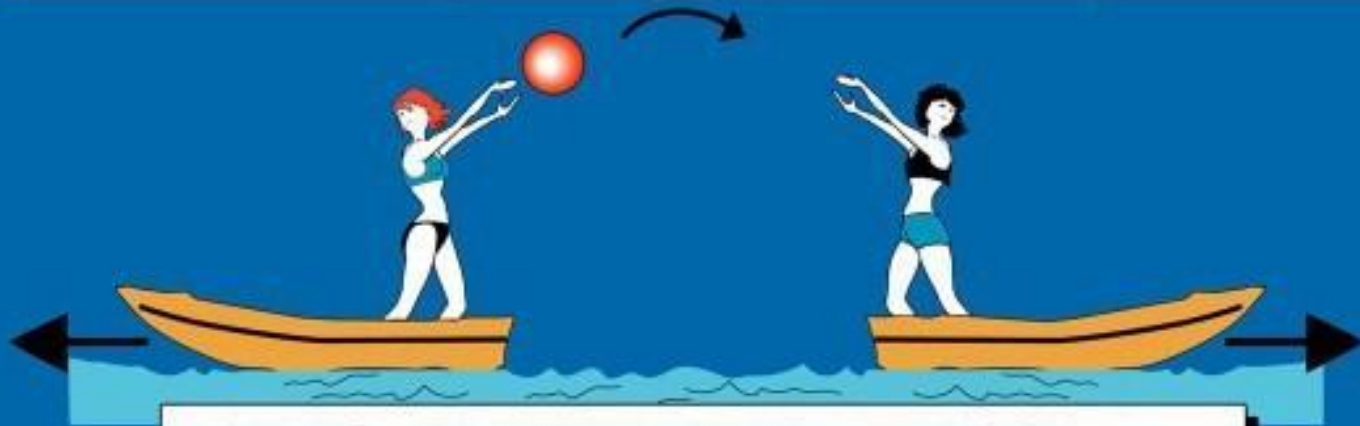
GAUGE BOSONS

Campi/particelle di interazione (bosoni)

Campi/particelle di materia (fermioni)

Le quattro interazioni fondamentali

Interazione	Intensità	Mediatori	Raggio
Forte	1	Gluoni	10^{-15} m
Elettromagnetica	10^{-2}	Fotone	∞
Debole	10^{-5}	Bosoni W, Z	10^{-18} m
Gravitazionale	10^{-38}	Gravitone	∞



Le interazioni sono dovute allo scambio di particelle

«Interazione» vs «Forza»

Fisica elementare:

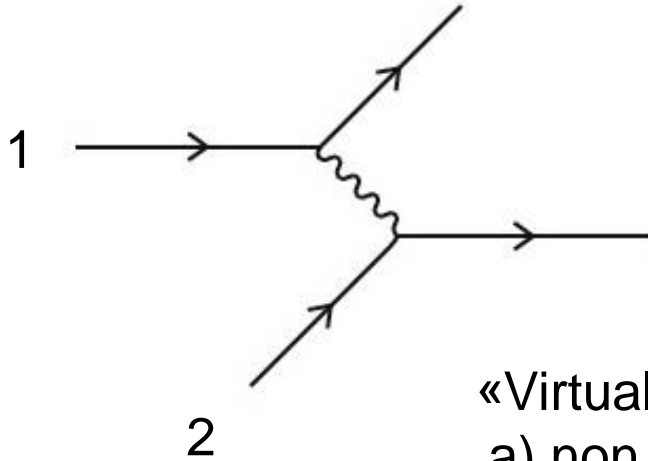
Forza come grandezza che causa una variazione dello stato di moto

Manteniamo questa accezione ristretta e usiamo il termine *interazione* per indicare qualcosa di più generale

Un'*interazione* può manifestarsi in vari modi:

- Forza tra particelle (processi d'urto, stati legati, ecc.)
- Trasformazioni e decadimenti di particelle
- Creazione e distruzione di particelle

Interazione come scambio di particelle



Le particelle di materia 1 e 2 interagiscono scambiandosi una «particella di forza» virtuale

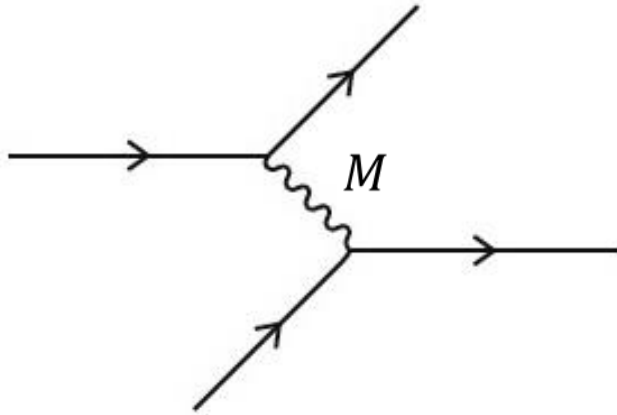
«Virtuale» significa che:

- a) non vale la consueta relazione energia-momento
- b) nel vertice è violata la conservazione dell'energia
- c) la particella «vive» per un tempo limitato

Poiché le particelle di materia sono fermioni e devono preservare questa loro proprietà nell'interazione, le particelle di forza devono essere **bosoni**

Il numero e le proprietà delle particelle di forza sono determinati dalle **simmetrie**

Raggio di interazione



Scambio di una particella virtuale
di massa M

Violazione della conservazione
dell'energia al vertice: $\Delta E \geq Mc^2$

permessa per un tempo $\tau \sim \hbar/\Delta E \sim \hbar/Mc^2$

la particella scambiata si propaga per una distanza massima

Lunghezza d'onda Compton
della particella scambiata



$$R = c\tau \sim \hbar/Mc$$

Raggio dell'interazione inversamente proporzionale
alla massa della particella scambiata

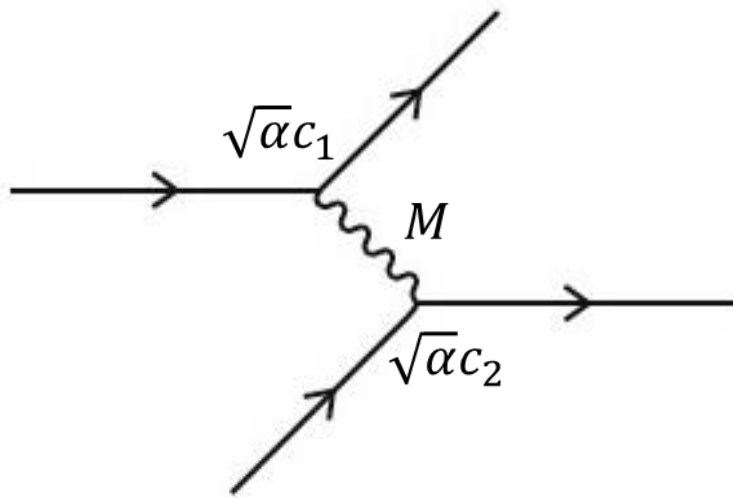
$$R = \hbar/Mc$$

Cariche: sorgenti dell'interazione

Per es.: i quark hanno carica elettrica, debole e forte
i neutrini hanno solo carica debole

Le cariche sono quantizzate, additive e conservate

Costanti di accoppiamento: misurano l'intensità dell'interazione



$$\hbar c \approx 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

Potenziale d'interazione (a piccole distanze)

$$V(r) \sim (\hbar c) \propto \frac{c_1 c_2}{r} e^{-\left(\frac{c}{\hbar}\right) M r}$$

Cariche

Costante di
accoppiamento

Raggio di
interazione

Interazione elettromagnetica

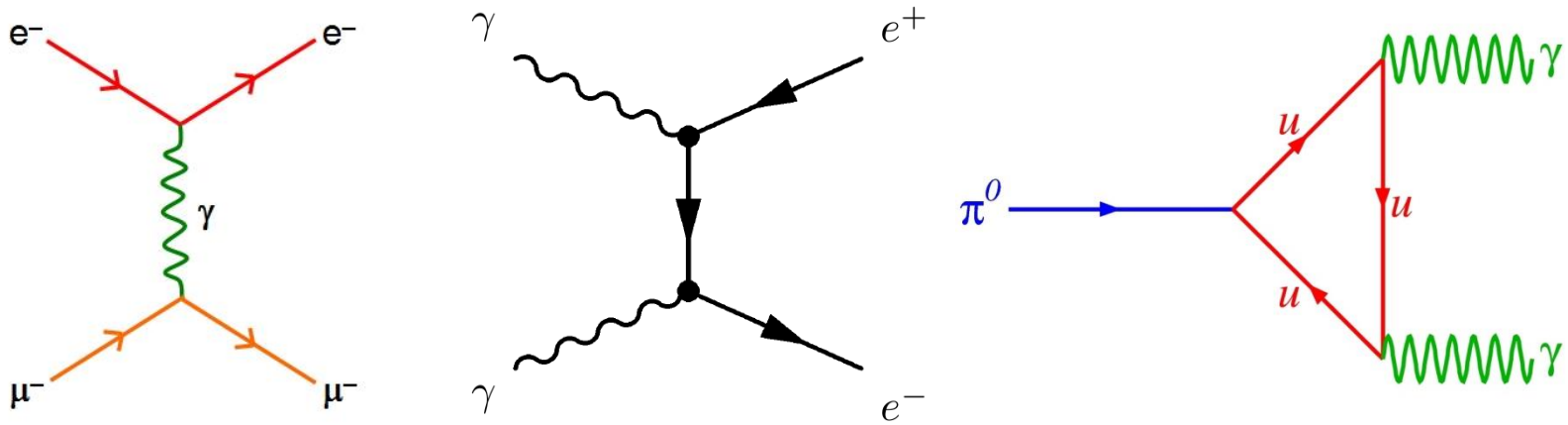
Struttura atomica e molecolare

Emissione e assorbimento della radiazione

Urti tra particelle cariche: es. $e^- + \mu^- \rightarrow e^- + \mu^-$

Produzione e annichilazione di coppie $e^- + e^- \leftrightarrow 2\gamma$

Decadimenti: es. $\pi^0 \leftrightarrow 2\gamma$



La particella di forza dell'elettromagnetismo è il **fotone**, di **massa nulla**

Il **raggio di interazione** è **infinito**

Le **cariche elettriche** in unità di e sono intere (leptoni, ± 1)
o frazionarie (quark, $+\frac{2}{3}, -\frac{1}{3}$)

$$V_{em}(r) \sim (\hbar c) \alpha_{em} \frac{q_1 q_2}{r}$$

$$\alpha_{em} = \frac{e^2}{\hbar c} \approx 0.007$$

Interazione debole

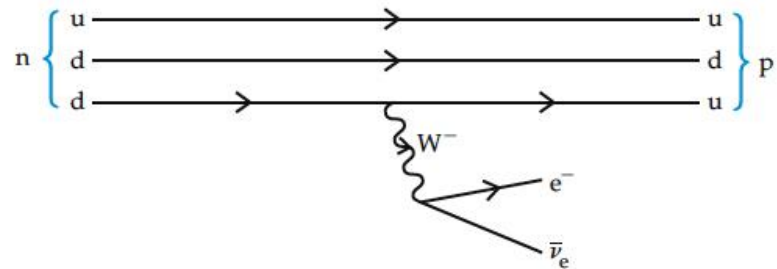
Non è una forza di legame

Decadimenti: es.

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

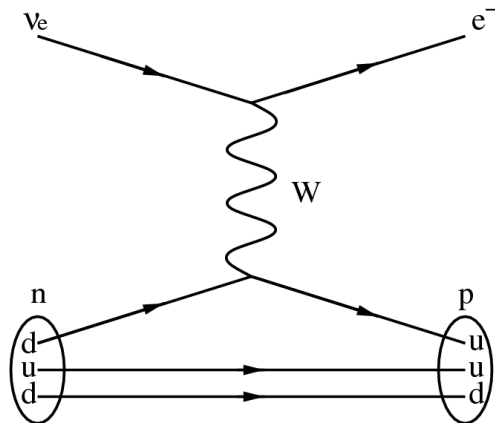
$$\mu^- \rightarrow \nu_\mu + e^- + \bar{\nu}_e$$

Decadimento beta

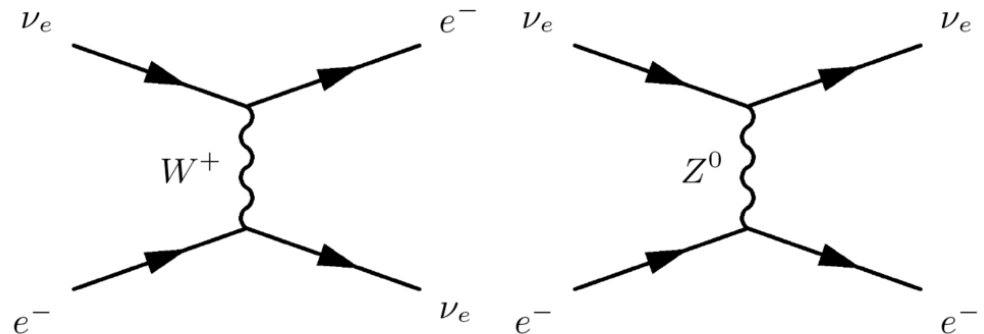


Processi con neutrini: es.

$$\nu_e + n \rightarrow p + e^-$$



$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



Le particelle di forza dell'interazione debole sono i **bosoni** W^+, W^-, Z^0

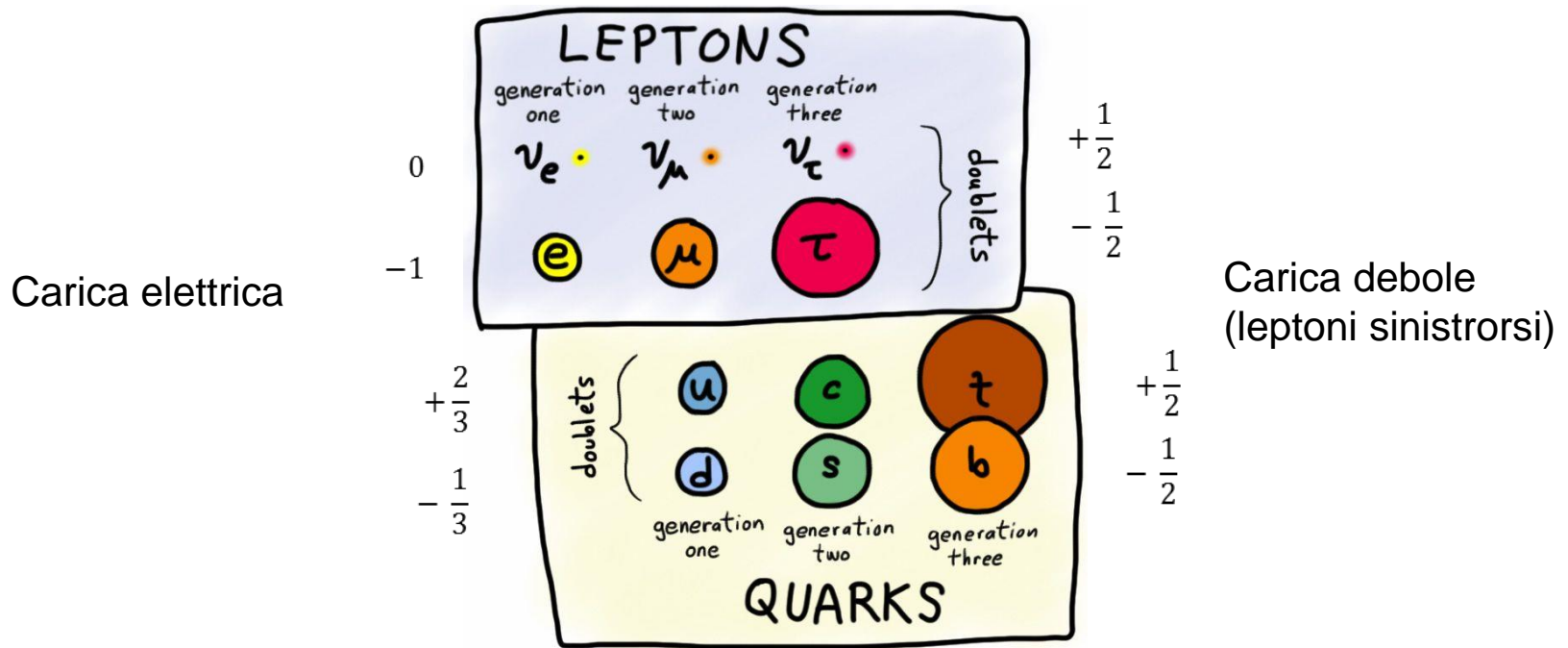
Masse $M_W = 80 \text{ GeV}/c^2$ $M_Z = 91 \text{ GeV}/c^2$

Raggio di interazione $R_W \sim 0.002 \text{ fm}$

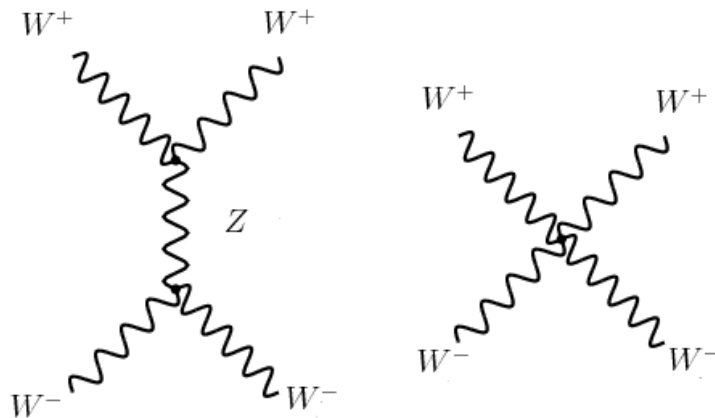
La **carica debole** è la terza componente dell'isospin debole I

Costante di accoppiamento $\alpha_W \approx 0.004$

$$V_W(r) \sim (\hbar c) \alpha_W \frac{I_1 I_2}{r} e^{-\frac{r}{R_W}}$$

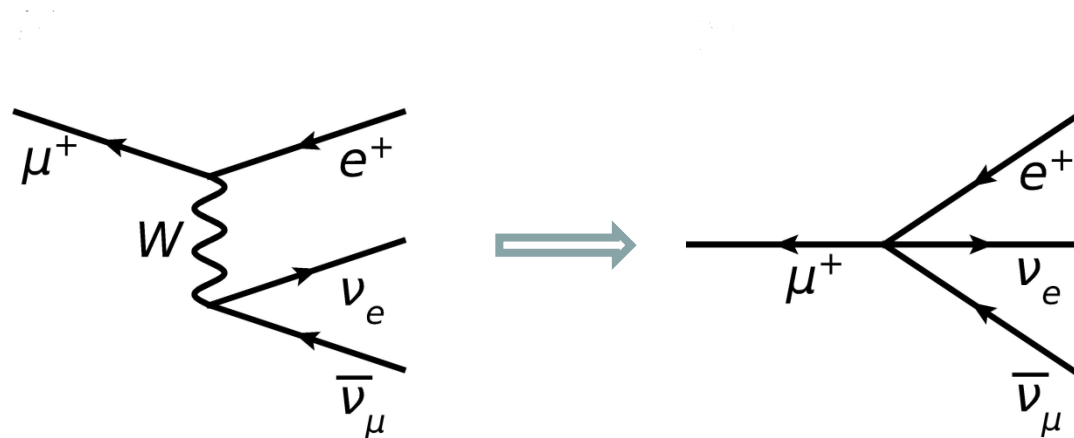


La novità rispetto al caso elettromagnetico è che anche le particelle di forza hanno carica debole, quindi possono interagire tra loro



Vertici a tre e a quattro bosoni

A basse energie le lunghezze d'onda di de Broglie $\hbar c/E$ delle particelle interagenti sono molto più grandi del raggio di interazione
 → L'interazione appare **puntiforme**



$$V_W(r) \sim (\hbar c)^3 \frac{4\pi\alpha_W}{(M_W c^2)^2} I_1 I_2 \delta(\mathbf{r})$$

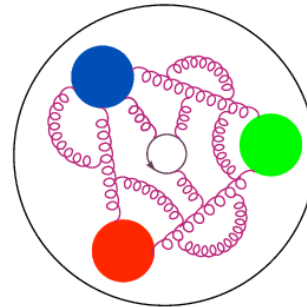
Costante di Fermi G_F

$10^{-5}/\text{GeV}^2$

L'interazione appare debole perché la sua costante di accoppiamento è divisa per la grande massa dei bosoni scambiati

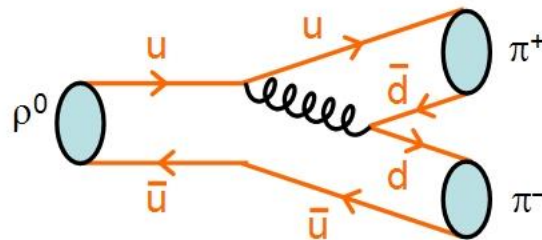
Interazione forte

Struttura nucleare e adronica
(barioni, qqq , mesoni, $q\bar{q}$)



Interazioni adroniche: es. $\pi^- + p \rightarrow \pi^+ + n$

Decadimenti: es. $\rho^0 \rightarrow \pi^+ + \pi^-$



Le particelle di forza dell'interazione forte sono i **gluoni** (8), di **massa nulla**

Il raggio di interazione è infinito, ma quark e gluoni sono **confinati**

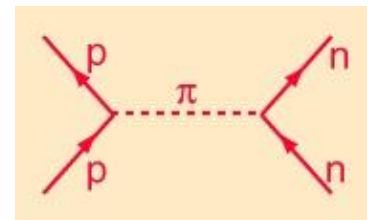
$$V(r) \sim (\hbar c) \alpha_s \frac{C_1 \cdot C_2}{r} + k r$$

Effetto del confinamento

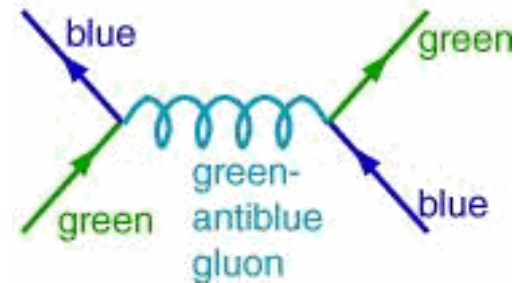
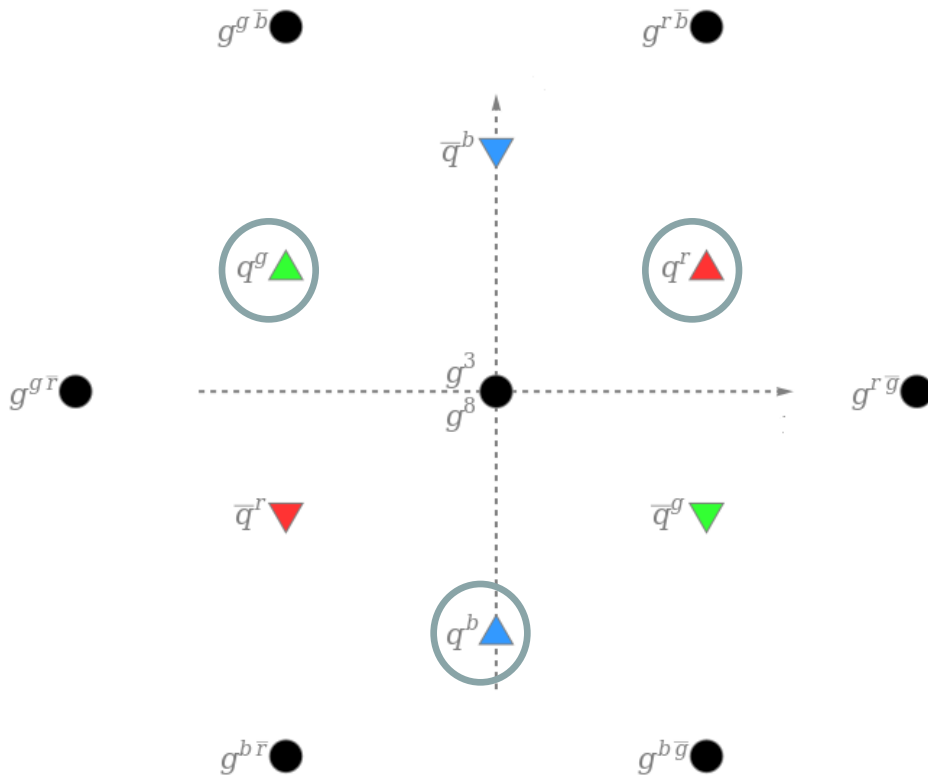
Il raggio effettivo dell'interazione è di circa **1 fm**, la tipica scala adronica

Costante di accoppiamento $\alpha_s \approx 1$

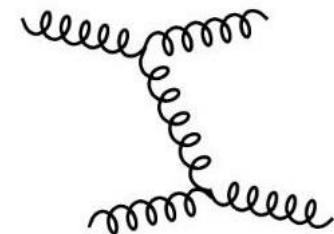
A «grandi» distanze l'interazione è modellizzata dallo scambio di mesoni



La carica forte è il «colore», espresso matematicamente da due quantità numeriche, e indicato discorsivamente con **rosso**, **verde**, **blu**



Anche i gluoni hanno colore



Vertici a tre e quattro gluoni

Il caso dell'interazione gravitazionale

$$V_g(r) \sim (\hbar c) \alpha_g \frac{g_1 g_2}{r}$$

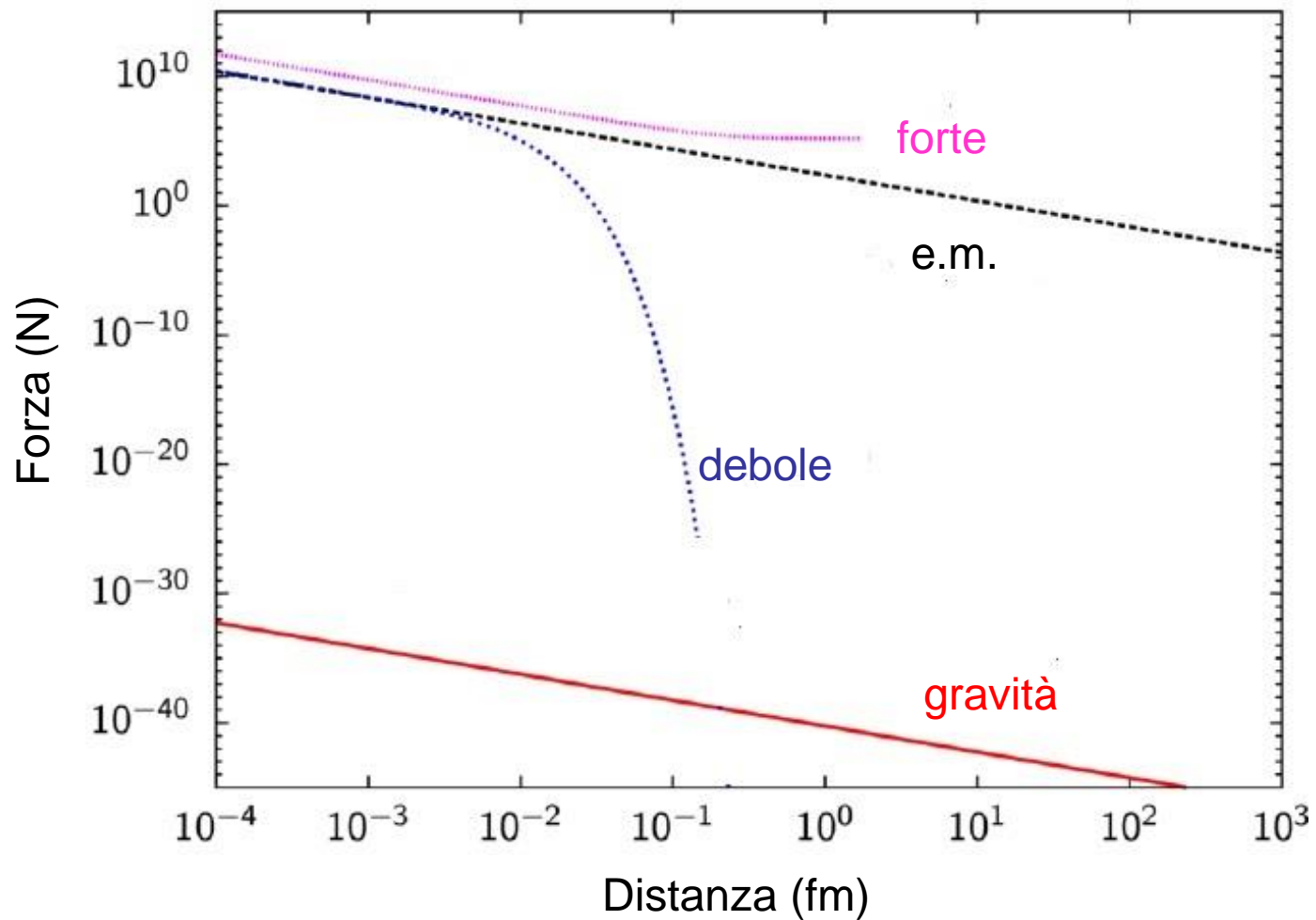
$$\text{«carica gravitazionale» } g = \frac{\text{massa della particella}}{\text{massa di riferimento}}$$

Prendendo come massa di riferimento quella del protone $m = 1 \text{ GeV}/c^2$

$$\alpha_g = \frac{G m^2}{\hbar c} = \frac{m^2}{M^2} \approx 10^{-38} \quad \begin{array}{l} \text{Decine di ordini di grandezza} \\ \text{più debole delle altre tre interazioni} \end{array}$$


$$\text{Massa di Planck } M = \sqrt{\frac{\hbar c}{G}} = 10^{19} \text{ GeV}/c^2$$


L'andamento delle forze



Simmetrie

Simmetria = Invarianza rispetto a una trasformazione


delle leggi fisiche

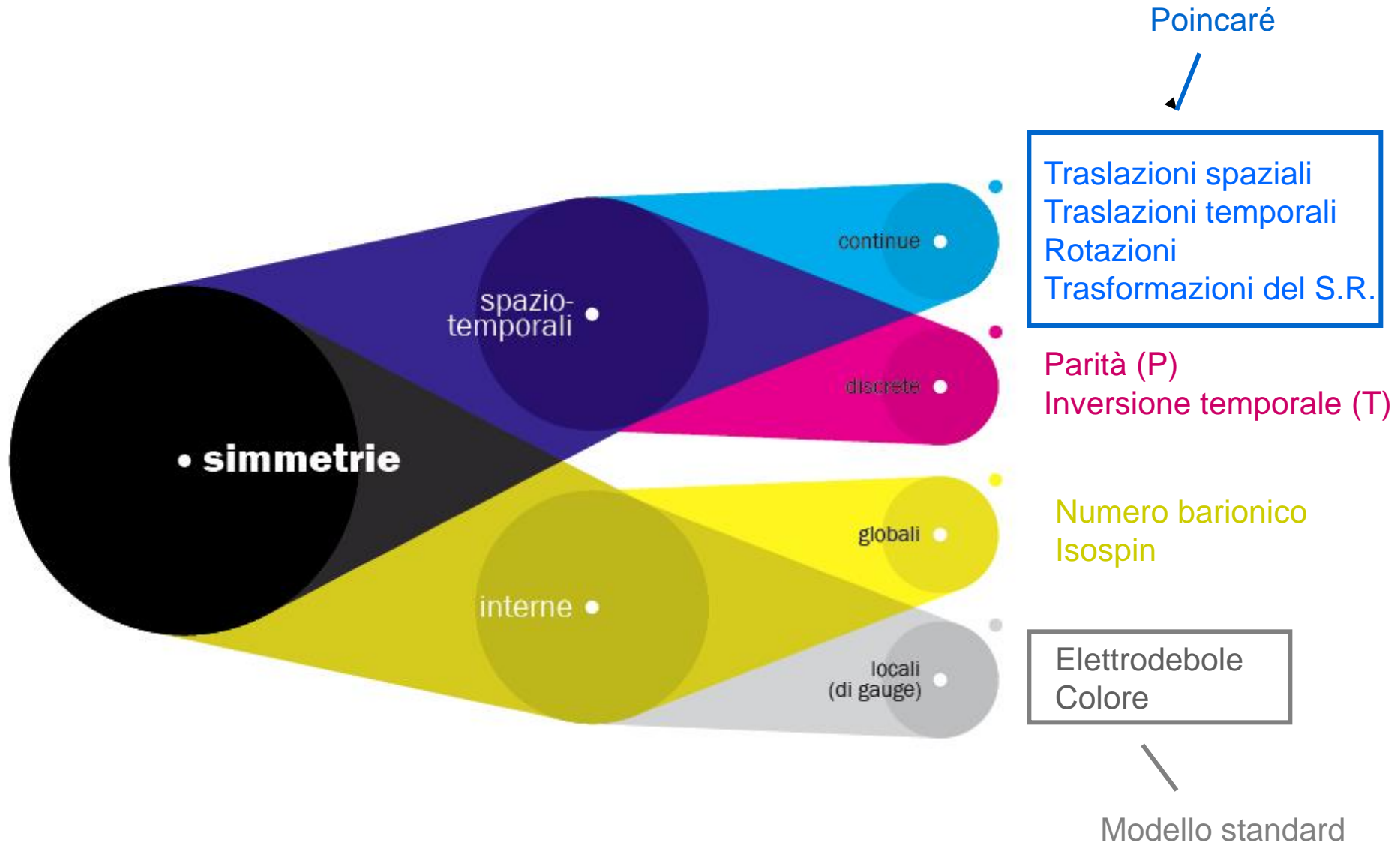

spazio-temporale o interna

Le trasformazioni di simmetria sono trasformazioni che lasciano inalterati i fenomeni fisici

Dal punto di vista matematico, le trasformazioni di simmetria formano dei gruppi

Le simmetrie implicano delle leggi di conservazione
(simmetrie continue - teorema di Noether)

Le simmetrie fondamentali dell'universo



Simmetrie esatte

- Simmetria di Poincaré
 - La più generale simmetria dello spazio-tempo (piatto)
- Simmetria CPT
- Simmetrie di gauge elettromagnetica e di colore (forte)

Simmetrie rotte

- Simmetrie P (parità), T (inversione temporale), C (coniugazione di carica)
 - Sono violate dalle interazioni deboli

Simmetrie “nascoste”, o “spontaneamente rotte”

- Simmetria di gauge elettrodebole
 - Meccanismo di Brout-Englert-Higgs

Simmetrie discrete

Lee

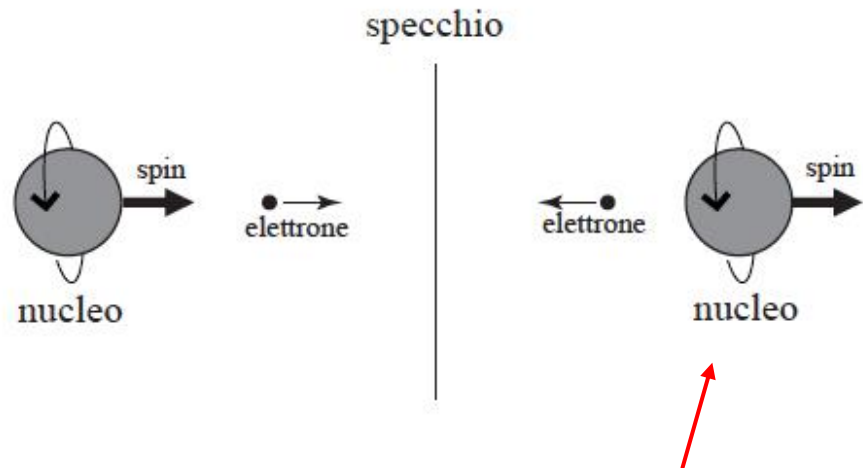
Yang



Nel 1956 C.N. Yang e T.D. Lee ipotizzano che la **simmetria di parità** sia rotta nei processi governati dalla forza debole



Esperimento di Madame Wu (1957)



**Solo l'immagine di destra
si realizza in natura**

L'interazione debole distingue tra **destra** e **sinistra** (violazione di P)



Non è possibile che la **destra per le particelle** sia equivalente alla **sinistra per le antiparticelle** (simmetria CP)?

La risposta è **no**. Anche **la simmetria CP è violata**

Esperimenti di Fitch e Cronin sui kaoni neutri (1964)

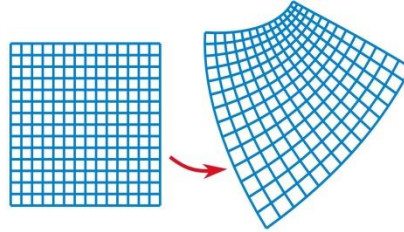
Se la simmetria CPT è esatta, e CP è violata, anche T è violata

I fenomeni deboli non sono invarianti rispetto all'inversione temporale

Esiste una **freccia microscopica del tempo** (non ha niente a che vedere con quella macroscopica, che è un fenomeno statistico)

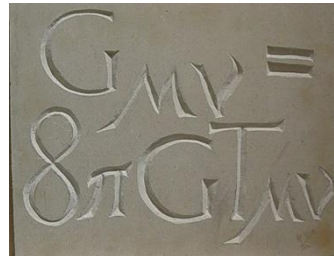
Simmetrie come principi delle teorie: Relatività generale

Simmetria generale
delle coordinate

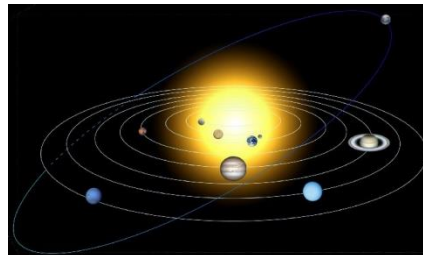
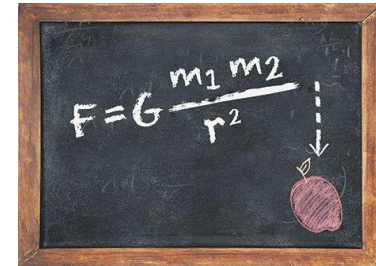


(Invarianza rispetto a una generica
trasformazione delle coordinate)

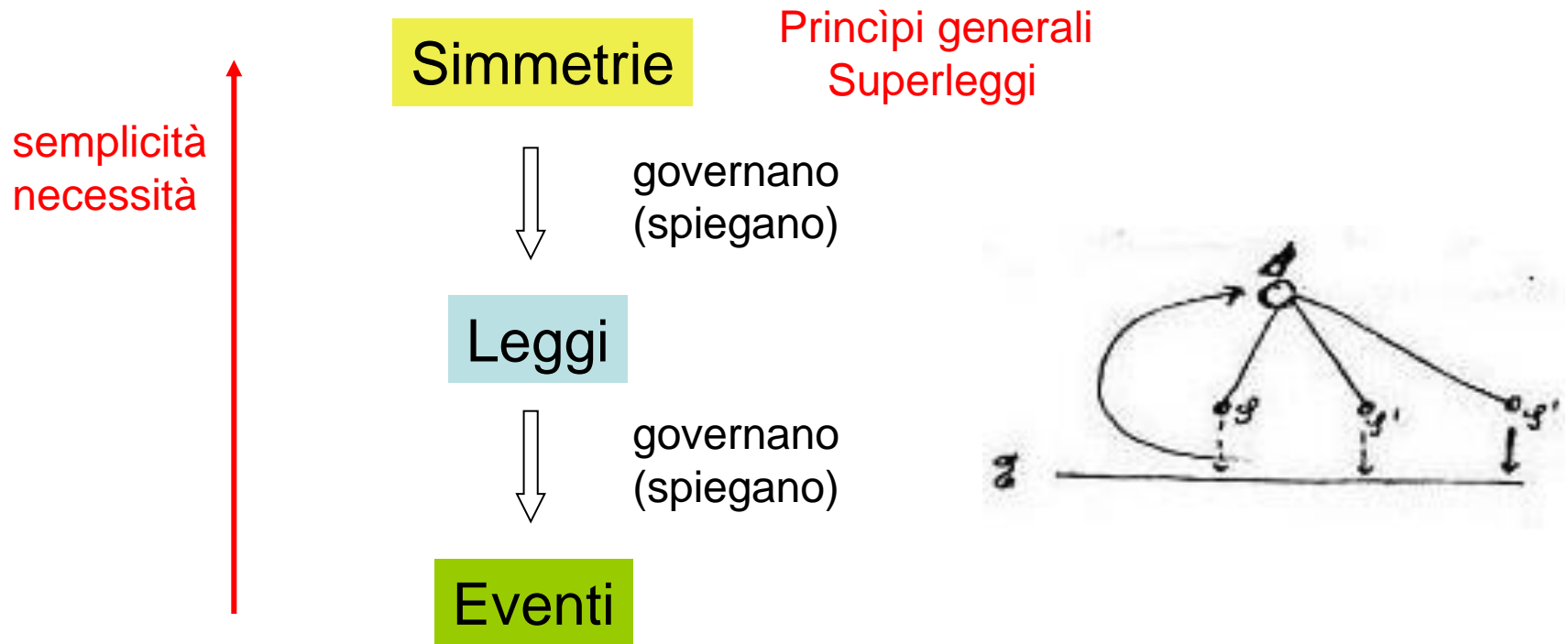
Equazione di Einstein
(Relatività generale)



caso
particolare



La rivoluzione einsteiniana: un nuovo livello di comprensione della Natura



I **principi di simmetria** danno struttura e coerenza alle **leggi della natura** proprio come le leggi della natura danno struttura e coerenza alla serie degli **eventi** (E. Wigner)

La simmetria di gauge

Hermann Weyl (1929)

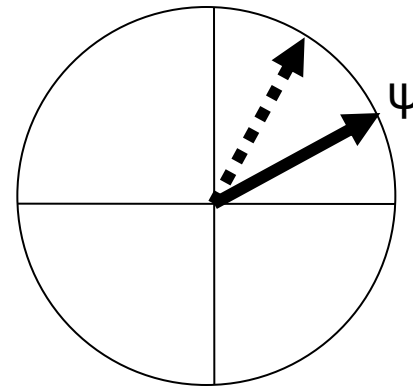
Simmetria di “gauge”



Interazione elettromagnetica

E' una simmetria **interna** e **locale**
che determina direttamente l'interazione

La trasformazione di gauge è una rotazione della funzione d'onda, o del campo, nel piano complesso



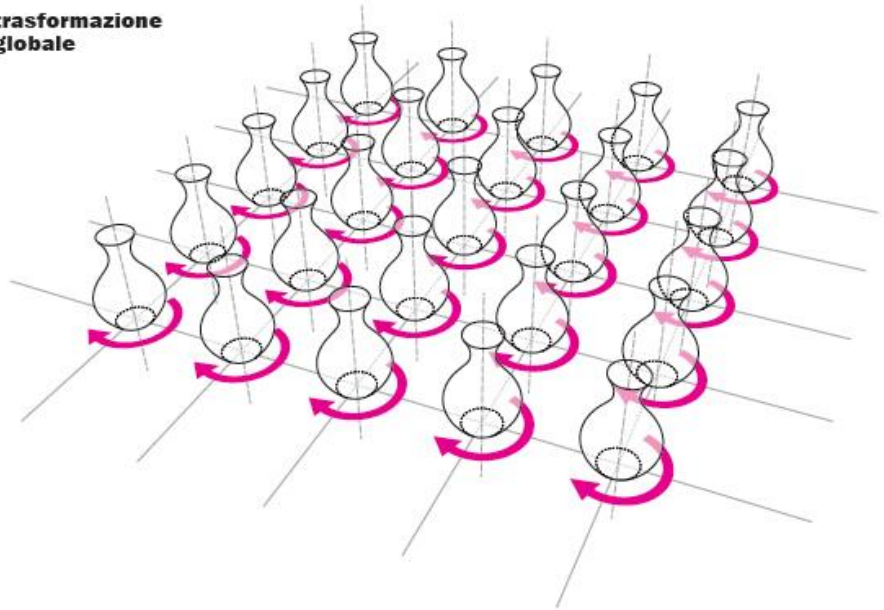
Gruppo di simmetria $U(1)$

Globale vs. Locale

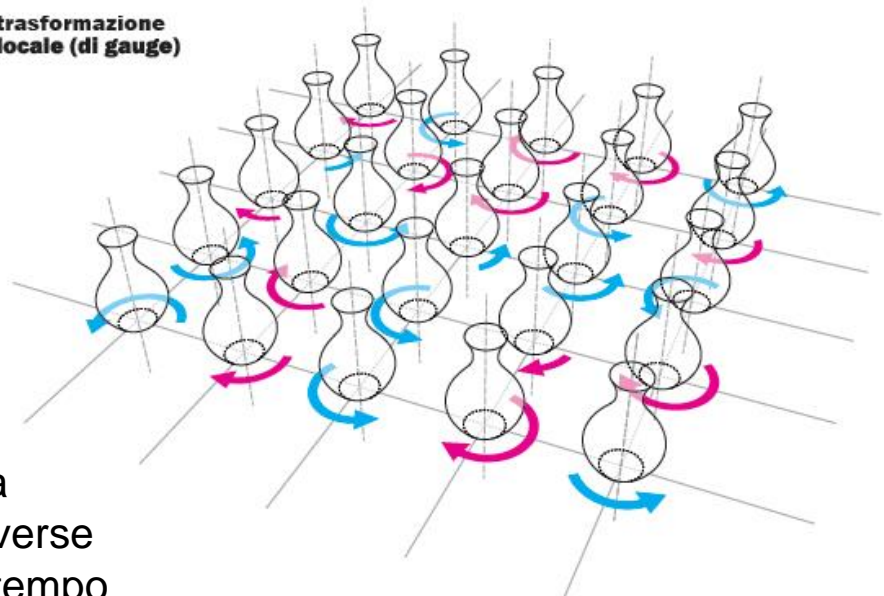
GLOBALE

Trasformazione uguale
in tutti i punti

trasformazione
globale



trasformazione
locale (di gauge)



LOCALE

Trasformazione diversa
da punto a punto

Una simmetria locale richiede la presenza
di un **campo di gauge** che compensi le diverse
trasformazioni nei vari punti dello spazio-tempo

L'idea di Yang e Mills

(Yang e Mills, 1954)

Una **simmetria di gauge** (interna e locale) per determinare completamente le leggi dell'interazione forte e di quella debole

Il **gruppo di simmetria** deve essere più ampio di quello dell'elettromagnetismo, del tipo $SU(n)$

Le particelle appartengono a rappresentazioni di questo gruppo

Le teorie di gauge prevedono l'esistenza di un certo numero di particelle (**i bosoni di gauge**) che mediano le forze

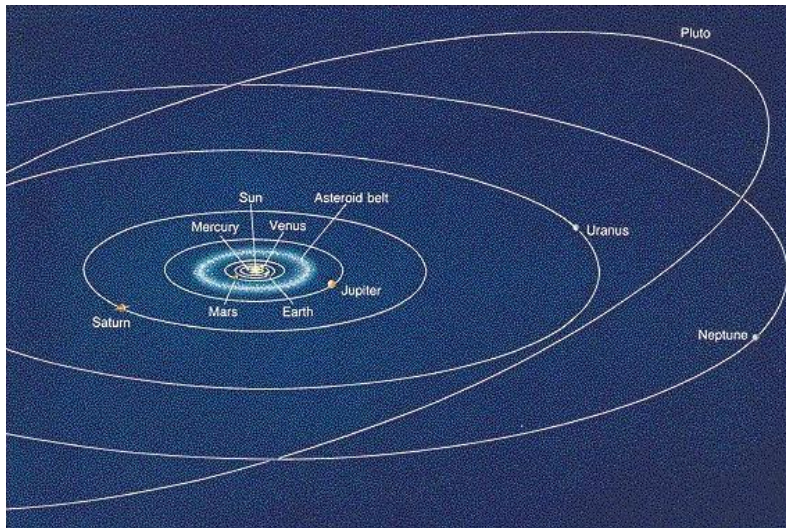
Ma c'è un problema: i bosoni di gauge hanno massa nulla e quindi generano forze di raggio infinito

→ Rottura spontanea della simmetria

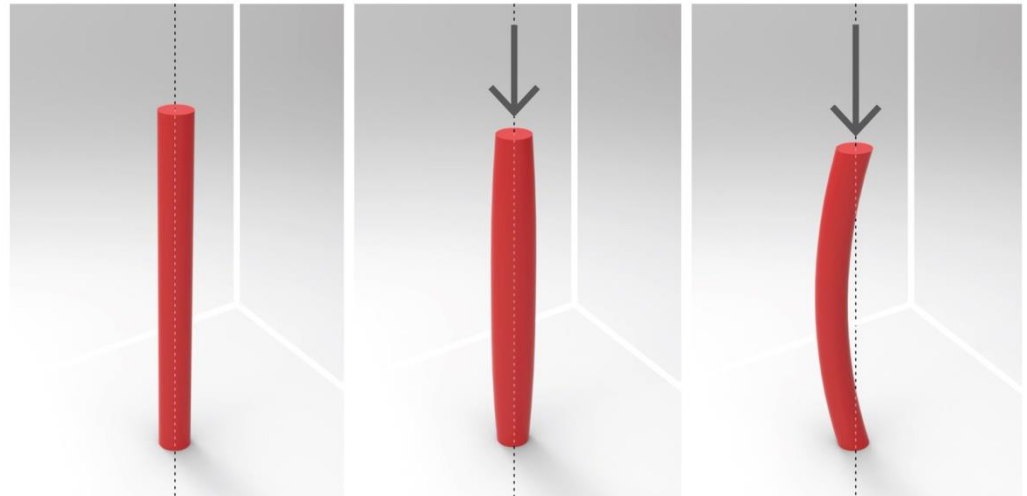
Simmetrie nascoste (o spontaneamente rotte)

E' possibile che le leggi fisiche siano simmetriche, ma che lo stato fondamentale dell'universo (il "vuoto") non lo sia (**rottura spontanea di simmetria**)

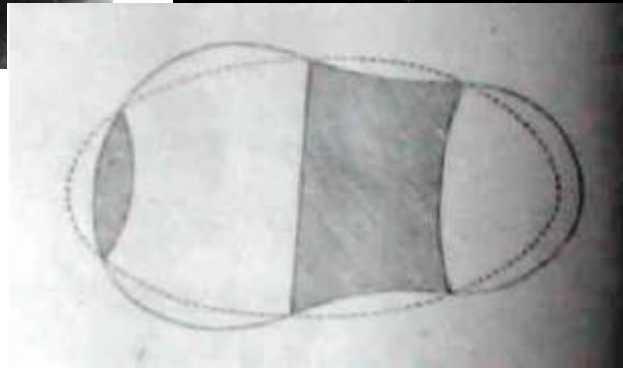
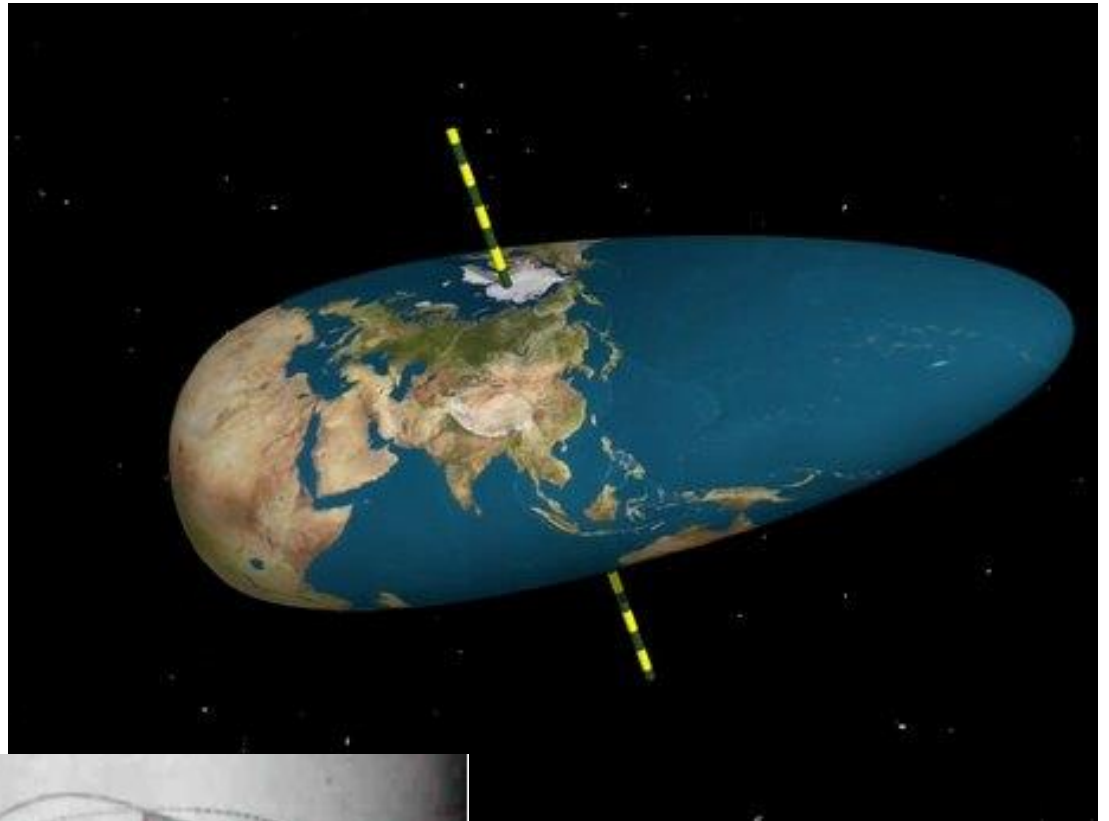
Le orbite planetarie



La "trave di Eulero"

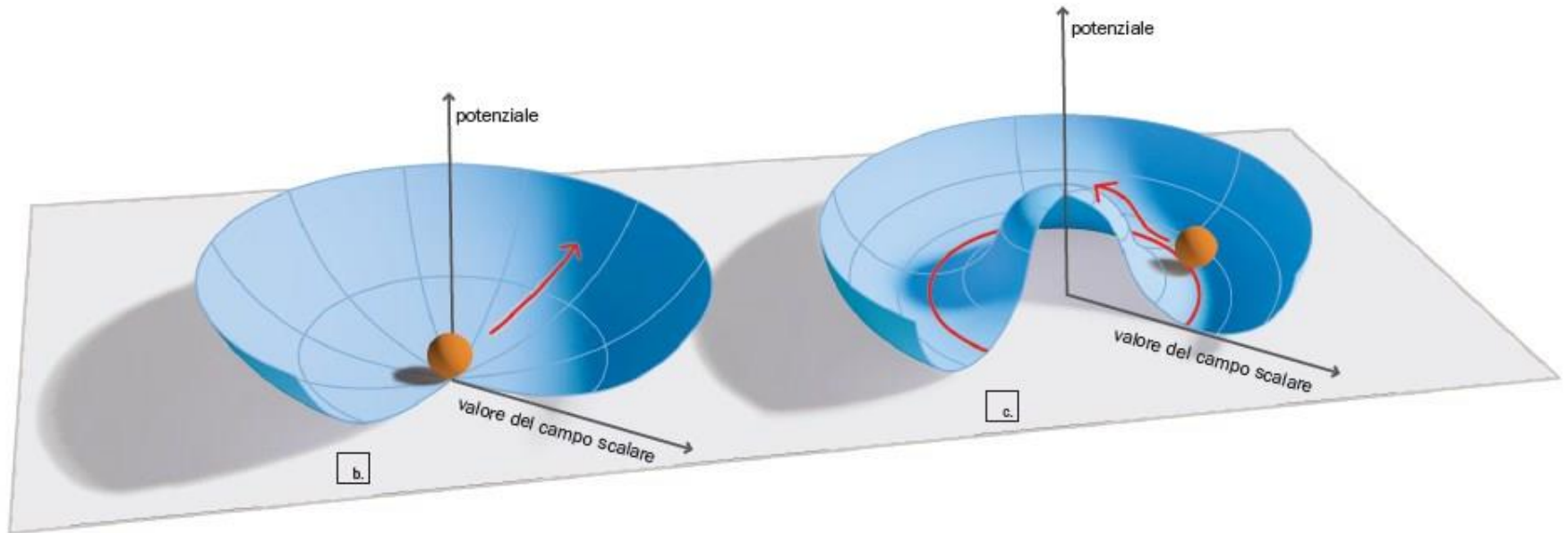


La Terra a forma di pera



Anderson, Nambu, Jona-Lasinio, Goldstone (1960-61)

La simmetria è spontaneamente rotta da un campo di valore non nullo che riempie il vuoto



Nel 1961 Goldstone mostra che se si rompe spontaneamente una simmetria globale, le eccitazioni quantistiche del campo che riempie il vuoto sono particelle di spin zero (bosoni) e massa nulla

Ma non si conoscono particelle di spin zero e massa nulla

Nel 1964 Brout e Englert, e indipendentemente Higgs, scoprono che se la simmetria rotta spontaneamente è una simmetria di gauge (locale), le particelle di gauge acquistano massa e le eccitazioni quantistiche del campo del vuoto sono bosoni di massa non nulla



Risolto il problema delle teorie di gauge
Possono descrivere forze a corto raggio



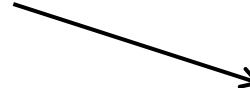
Prevista una nuova particella:
il “bosone di Higgs”

Modello standard: settore elettrodebole

(Glashow, Weinberg, Salam, 1961-67)

Interazione elettromagnetica e interazione debole descritte e unificate sotto una simmetria di gauge

$$SU(2) \times U(1)_Y$$



Simmetria di isospin debole

Simmetria di ipercarica debole

Particelle sinistrorse:
doppietti di $SU(2)$
 $I = \pm 1/2$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix}_L \quad \begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}_L$$

Le trasformazioni di $U(1)_Y$ ruotano i campi nel piano complesso

Particelle destrorse:
singoletti di $SU(2)$, $I = 0$

Le trasformazioni di $SU(2)$ mescolano le componenti dei doppietti

Bosoni di gauge	$SU(2)$	\rightarrow	W^+, W^-, W^0	} Massa nulla
	$U(1)_Y$	\rightarrow	B	

Il campo di Higgs $\phi(x)$ si accoppia ai bosoni di gauge e ai campi di materia

L'autointerazione fa sì che il campo di Higgs abbia un valore non nullo nel vuoto, $\phi = v$, e rompa spontaneamente la simmetria di gauge

$$\begin{aligned} Z^0 &= \cos \theta_W W^0 - \sin \theta_W B \\ A &= \sin \theta_W W^0 + \cos \theta_W B \end{aligned} \quad \text{(angolo di Weinberg)}$$

W^+, W^-, Z^0 acquistano massa, A (fotone) rimane privo di massa

$SU(2) \times U(1)_Y$ è spontaneamente rotta in $U(1)_{em}$

Emerge la carica elettrica $Q = I + \frac{Y}{2}$

Le particelle di materia acquistano una massa $m = gv$



Costante di accoppiamento
con l'Higgs

Tre parametri indipendenti: α_{em}, α_w, v (oppure M_Z)

Altri parametri: massa dell'Higgs, costanti di accoppiamento, ecc.

Modello standard: settore forte

L'interazione forte è descritta da una teoria di gauge, la QCD (cromodinamica quantistica), basata sulla simmetria SU(3) di colore

La QCD prevede l'esistenza di 8 particelle di forza, i gluoni

$$\begin{pmatrix} u_B \\ u_R \\ u_G \end{pmatrix}$$

Ogni quark è un tripletto di SU(3)



La simmetria di colore è esatta

La QCD è completamente priva di parametri arbitrari; è **totalmente determinata dalla simmetria**

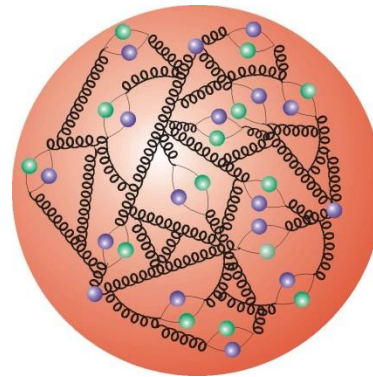
L'origine della massa

Il bosone di Higgs dà massa alle particelle elementari (quark e leptoni)

Ma le masse di queste particelle rappresentano appena l'**1%** della massa della materia ordinaria (costituita prevalentemente da protoni e neutroni)

Da dove viene il **99%** della massa?

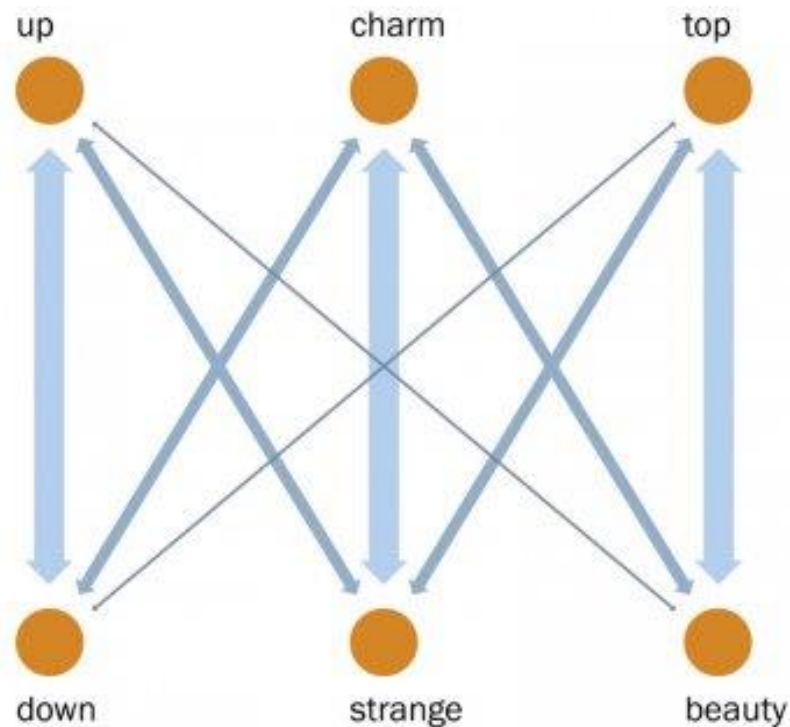
Dall'energia dei quark e dei gluoni



A stylized, 3D graphic of the equation $E=mc^2$. The letters are colorful and blocky, with a reflection effect below them.

Tuttavia il contributo dell'Higgs è determinante perché, per esempio, fa sì che il **protone** sia appena **più leggero del neutrone** e quindi stabile, il che permette l'esistenza dell'idrogeno

Un altro ingrediente del Modello Standard: **il mescolamento dei sapori**



I quark d, s, b si mescolano tra loro per accoppiarsi a u, c, t
(Meccanismo CKM, **Cabibbo – Kobayashi – Maskawa**)

Un parametro nella matrice CKM produce una **violazione di CP**

Il Modello Standard funziona alla perfezione ma non può essere la fine della storia

«Una teoria davvero razionale deve derivare le particelle, non porle in partenza» (A. Einstein)

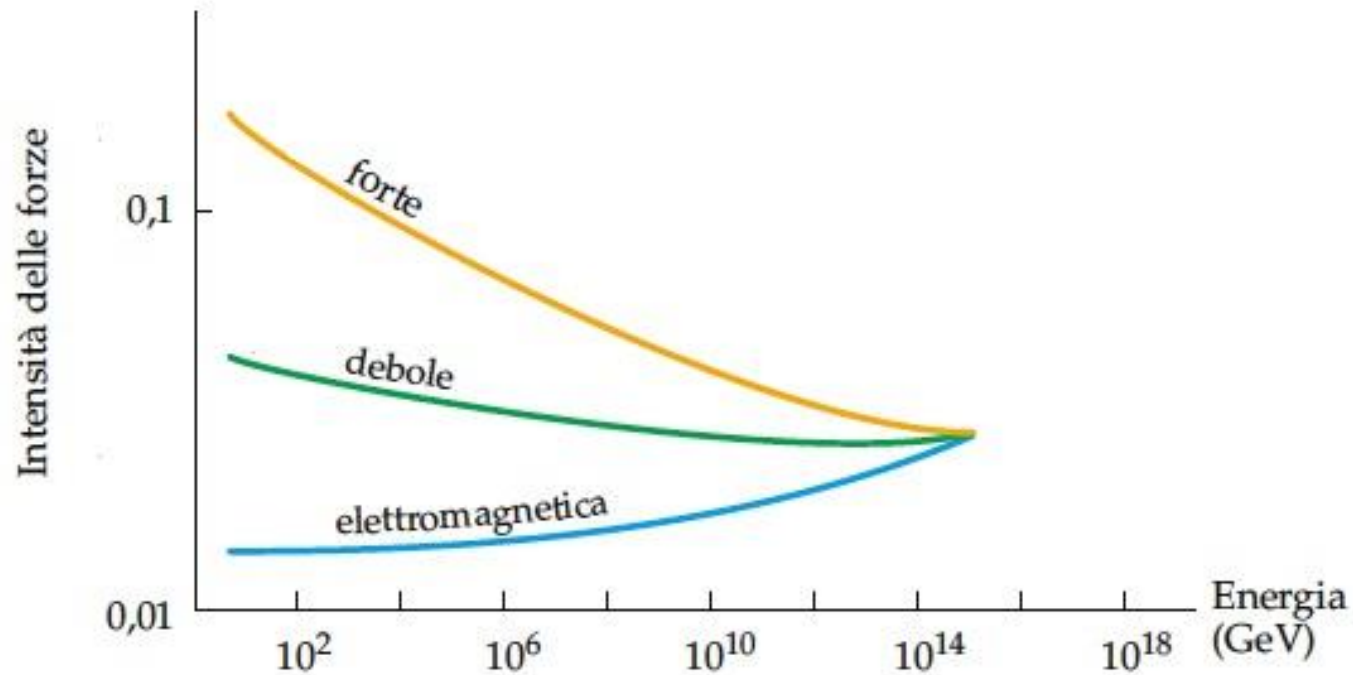
Il MS è una teoria «poco razionale» nel senso einsteiniano del termine, perché le proprietà delle particelle non sono predette

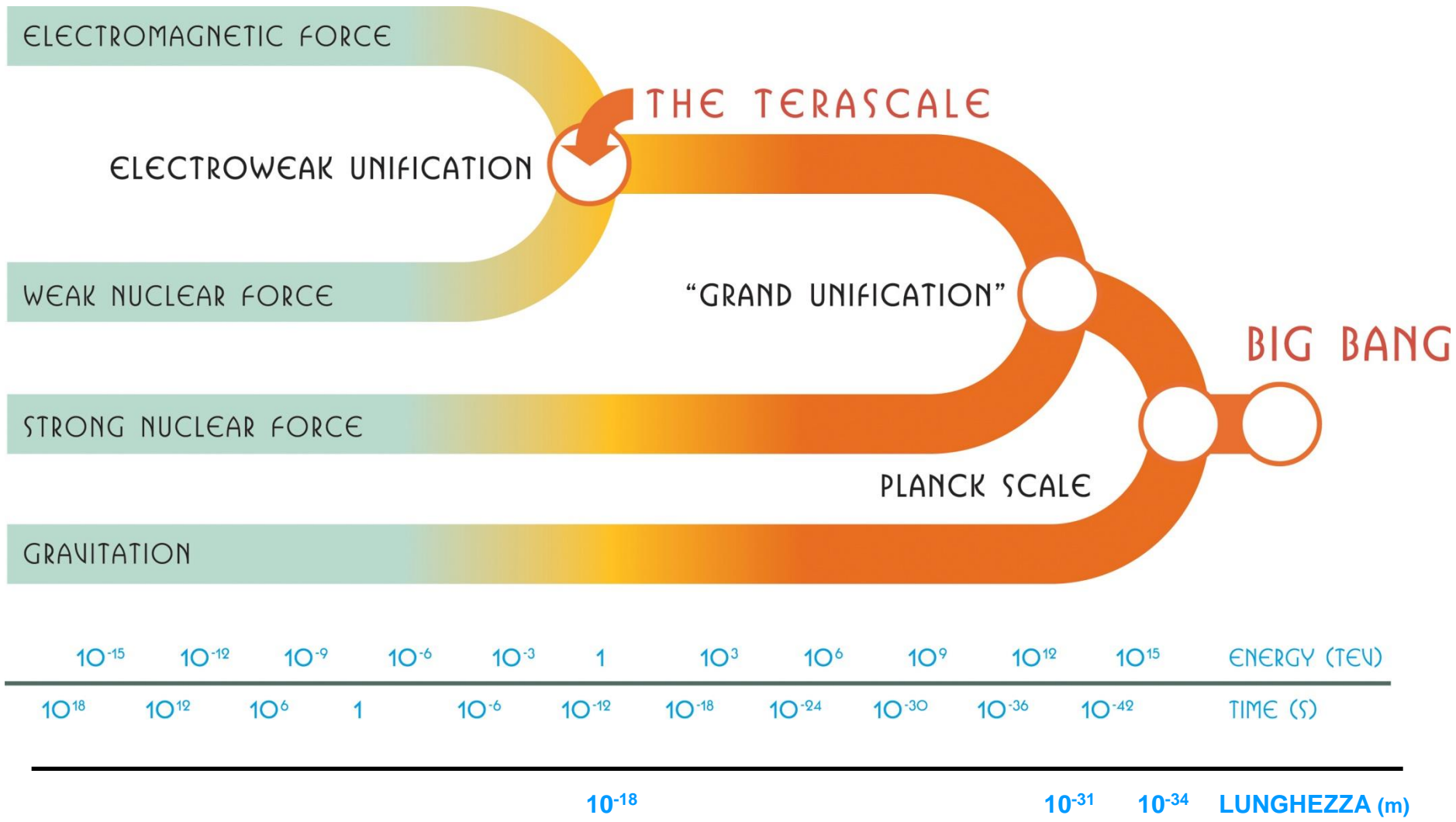
- Molti parametri arbitrari
- Non dà conto delle masse dei neutrini
- Non ha candidati per la materia oscura
- Prevede un'insufficiente violazione di CP
- Non incorpora la gravità

Il MS è probabilmente un'approssimazione di «bassa energia» di una teoria più generale

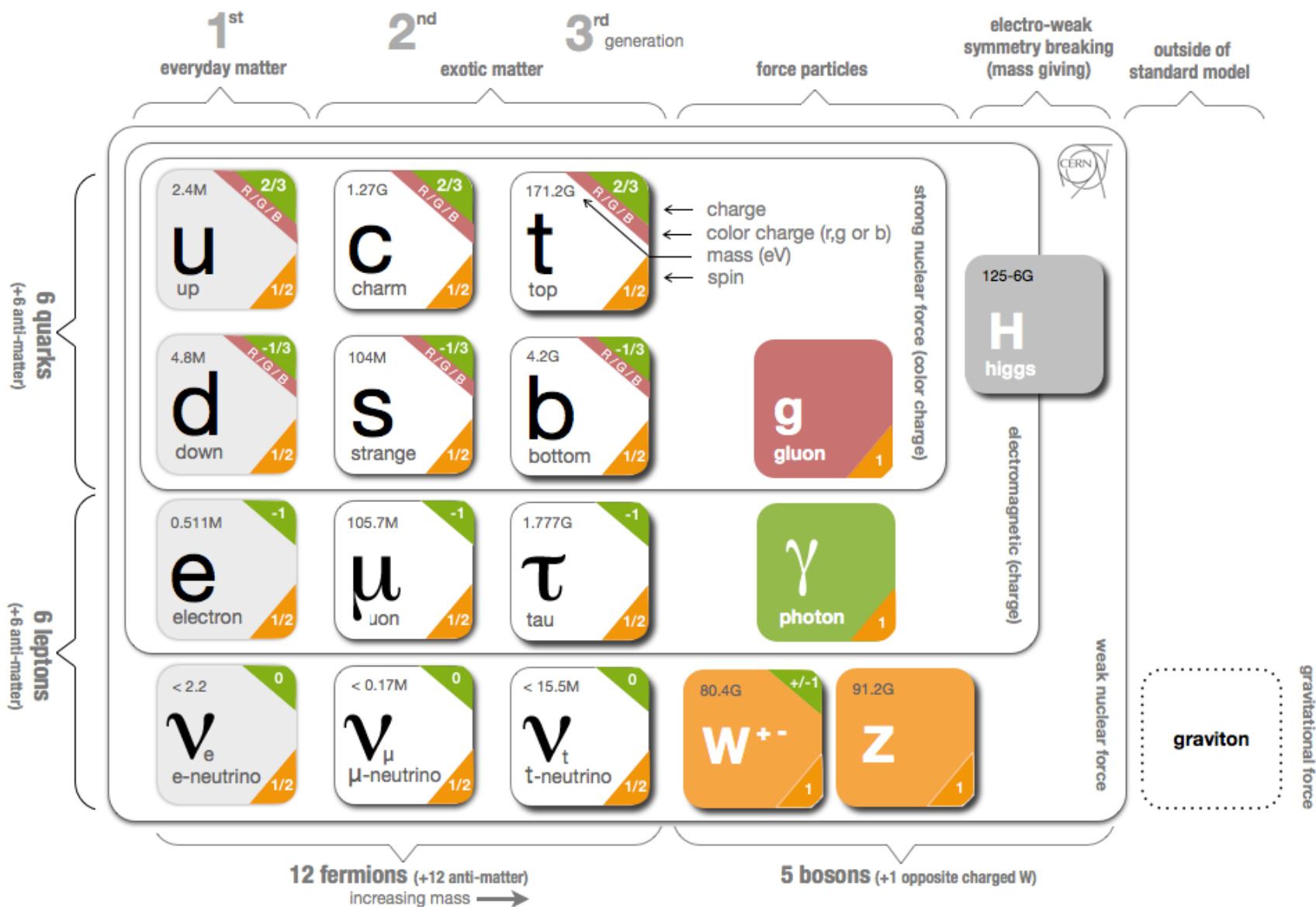
Le costanti di accoppiamento delle tre interazioni variano con l'energia e tendono a convergere a energie molto elevate

Segnale di una grande unificazione



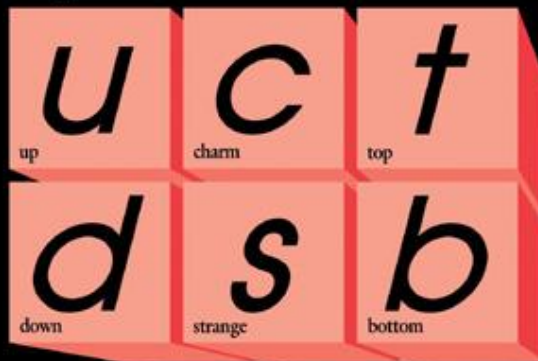


Backup Slides

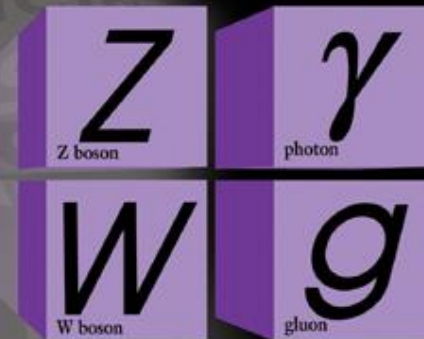


Il Modello Standard: le particelle

Quarks



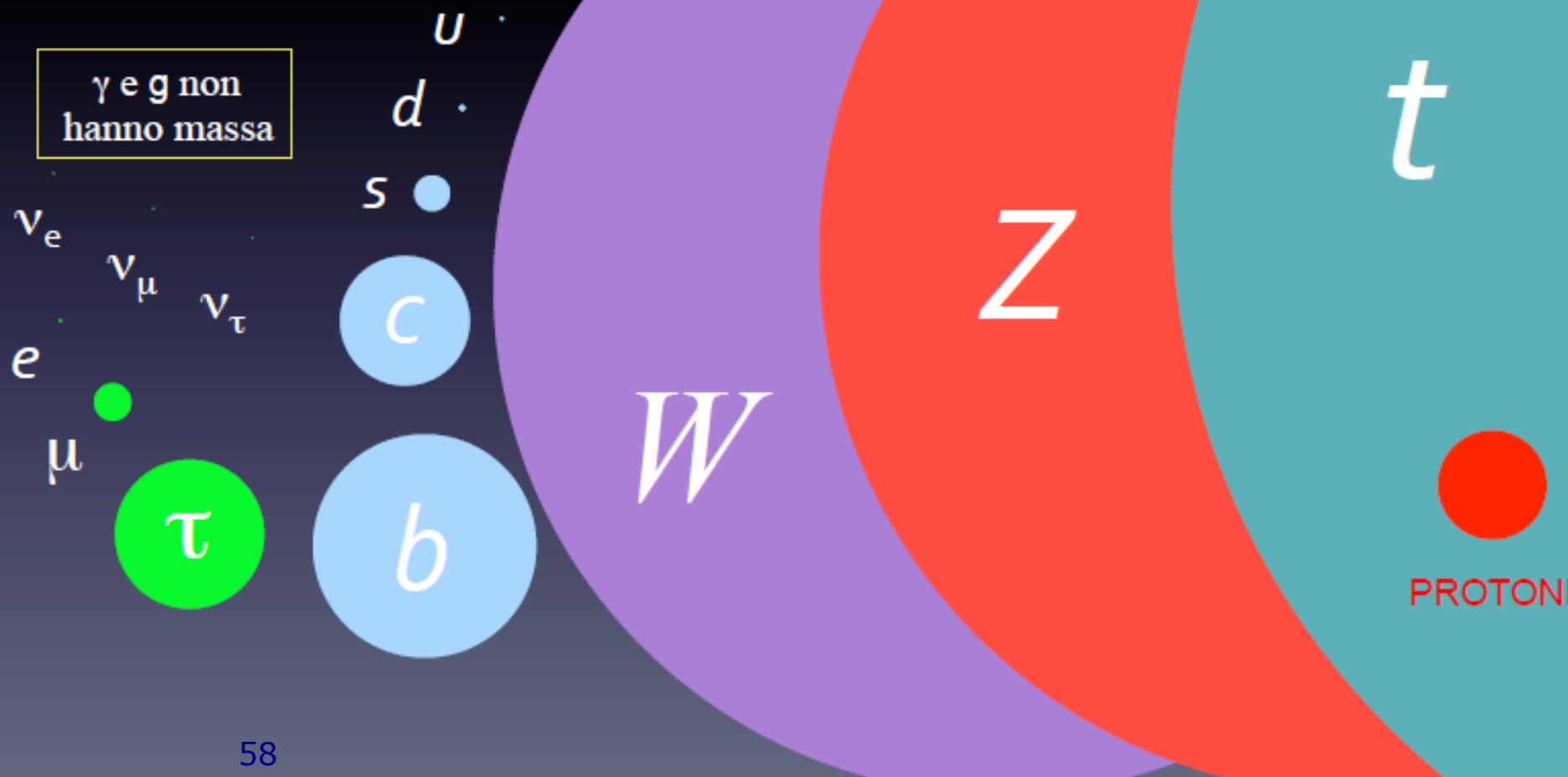
Forces



Leptons

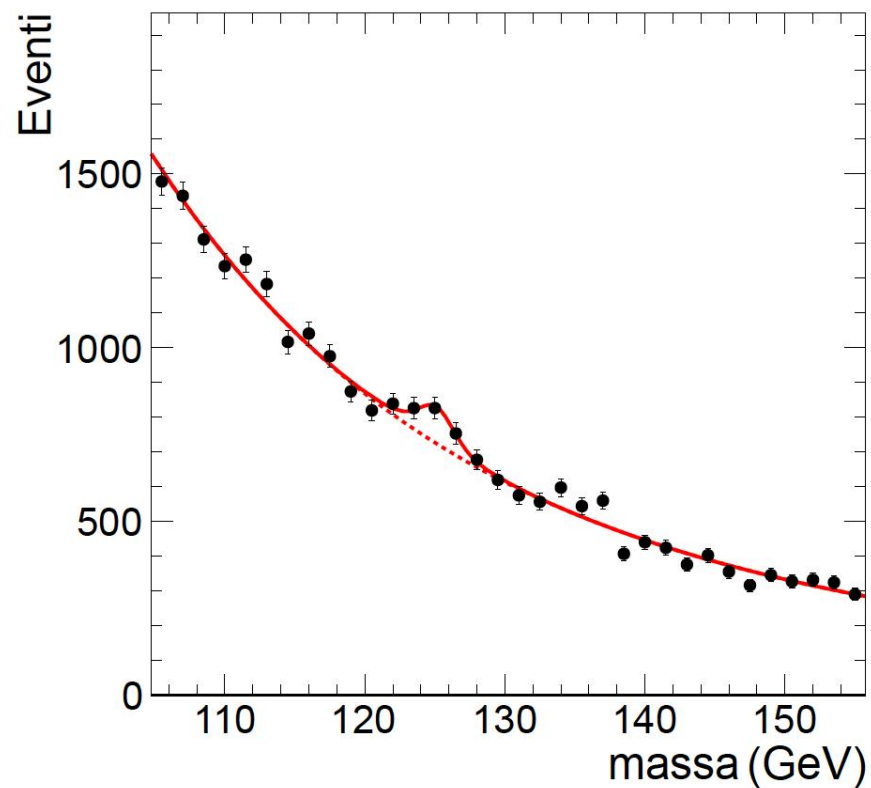
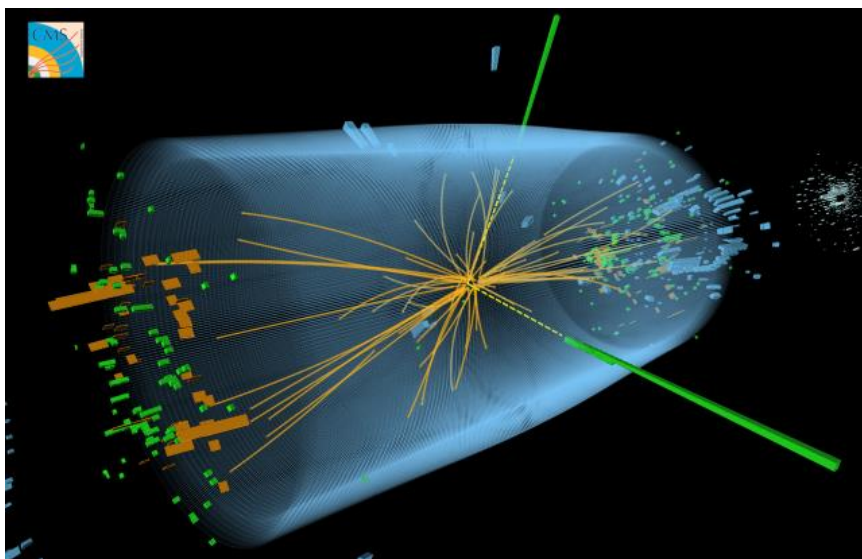


Il problema della massa



La scoperta del bosone di Higgs (CMS, ATLAS, 2012)

$H \rightarrow 2 \text{ fotoni}$



Una particella *sui generis*:
massa 126 GeV, spin zero

