

Corso di Laurea in Filosofia – Principi di Fisica

Capitolo 8 - oggi

Carlo Cosmelli

Dipartimento di Fisica, Sapienza Università di Roma

2023



DIPARTIMENTO DI FISICA

SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA



Meccanica

I principio

II : $\bar{\mathbf{F}} = m\bar{\mathbf{a}}$

III principio

+

$$\bar{\mathbf{F}}_G = -G \frac{m_1 m_2}{R^2} \hat{\mathbf{R}}$$

Termodinamica

I principio

II : $\Delta S \geq 0$

III principio

Principio zero

Elettromagnetismo

Invarianza e costanza della
carica elettrica

+

$$\bar{\mathbf{F}} = q(\bar{\mathbf{E}} + \bar{\mathbf{v}} \times \bar{\mathbf{B}})$$

$$\bar{\mathbf{E}} = k \frac{Q}{R^2} \hat{\mathbf{R}}$$

$$\bar{\mathbf{B}}(i) = \mu \frac{i}{2\pi R} \hat{\mathbf{B}}$$

+

Equazioni di Maxwell

Cosa abbiamo visto 2: Relatività Speciale (ristretta) (1905)



- **P: La velocità della luce nel vuoto c è costante, per qualunque osservatore.**
- **P: Le leggi della fisica sono le stesse in tutti i sistemi inerziali.**
- L'etere non esiste (non è necessario).
- Trasformazioni di Lorentz dello spazio-tempo.
- Spazio-tempo di Minkowski.
- Presente-Passato-Futuro- Altrove.
- Contrazione delle Lunghezze.
- Dilatazione dei tempi.
- « c » è la velocità limite... per i segnali o i corpi con massa
- Il contenuto di energia di un corpo dipende anche dalla sua massa:

$$E = \sqrt{(mc^2)^2 + (pc)^2} \quad \text{dove} \quad p = \gamma mv$$



- **P: In un corpo la massa inerziale è uguale alla massa gravitazionale: $m_i = m_g$**
- Un'accelerazione costante è equivalente alla forza di gravità,
 ➔ P: Sistemi non inerziali sono localmente equivalenti.
- **Equazioni di Einstein**
- Lo spazio-tempo, in presenza di massa (energia) è curvo.
- I corpi (con massa o senza massa) si muovono secondo delle geodetiche.
- Deflessione della luce in un campo gravitazionale... la luce «cade»
- Contrazione radiale delle lunghezze.
- Contrazione dei tempi.
- Quando una massa è grande, e sta in uno spazio molto piccolo...succedono cose strane.
- + Onde Gravitazionali (2012)

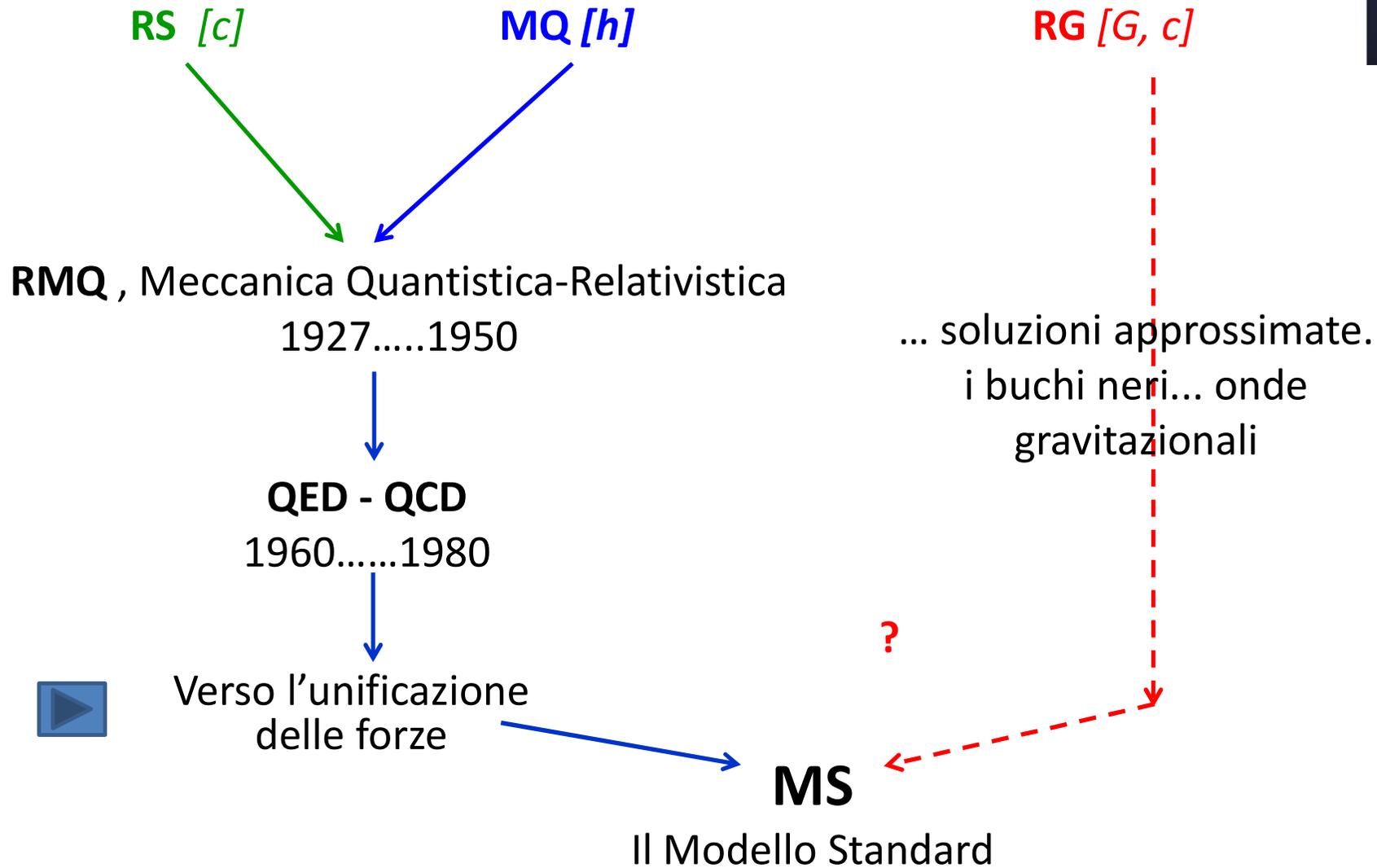
Relatività & Meccanica Quantistica - Carlo Cosmelli

Cosa abbiamo visto 4: Meccanica Quantistica «ortodossa» (Copenhagen) (1900-1927) + (Bell 1964 – Aspect 1982)

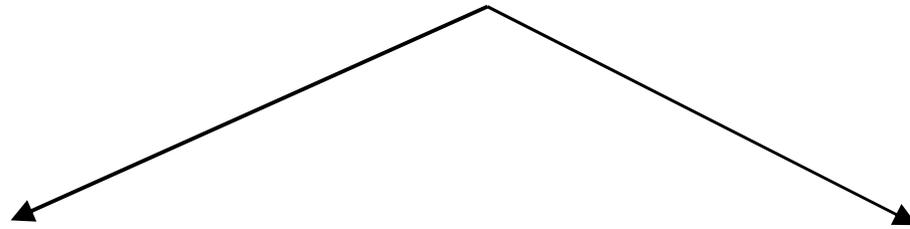


- L'energia e.m è scambiata per quanti indivisibili : $E = hf$
- **L'energia e.m. è composta di quanti indivisibili: i fotoni.**
- Le orbite atomiche sono quantizzate .
- **Ad ogni particella è «associata» un'onda di lunghezza d'onda $\lambda = h/p$.**
- **P: Ogni sistema è *completamente* descritto da una funzione d'onda $\psi(r, t)$.**
- **P: La funzione d'onda $\psi(r, t)$ è un'ampiezza di probabilità.**
- **P: L'evoluzione nel tempo e nello spazio della funzione d'onda è completamente deterministica [l'equazione di Schrödinger].**
- **P: La misura di una variabile produce il collasso della f.d.o in uno dei possibili stati del sistema**
- **P: Principio di Indeterminazione, per ogni sistema esistono coppie di grandezze che non possiedono contemporaneamente valori determinati.**
- **Vale la sovrapposizione degli stati .**
- **La realtà, per sistemi interlacciati (entangled), non è locale.**

Come si sono evolute queste tre teorie?



Quali teorie utilizziamo per descrivere il nostro universo



Il Modello Standard
la materia e tre interazioni
(forte, elettrodebole, Higgs)

+

La Relatività Generale
l'interazione delle masse con la
geometria dello Spazio-tempo

Schema concettuale delle «formule»
ciò che ci permette di fare previsioni

Fisica classica

$$\bar{\mathbf{F}} = m\bar{\mathbf{a}}$$

Meccanica Quantistica Relativistica
MQR
(QFT – Quantum Field Theory)

Relatività Generale - RG

$$\hat{H}|\psi\rangle \geq E|\psi\rangle$$

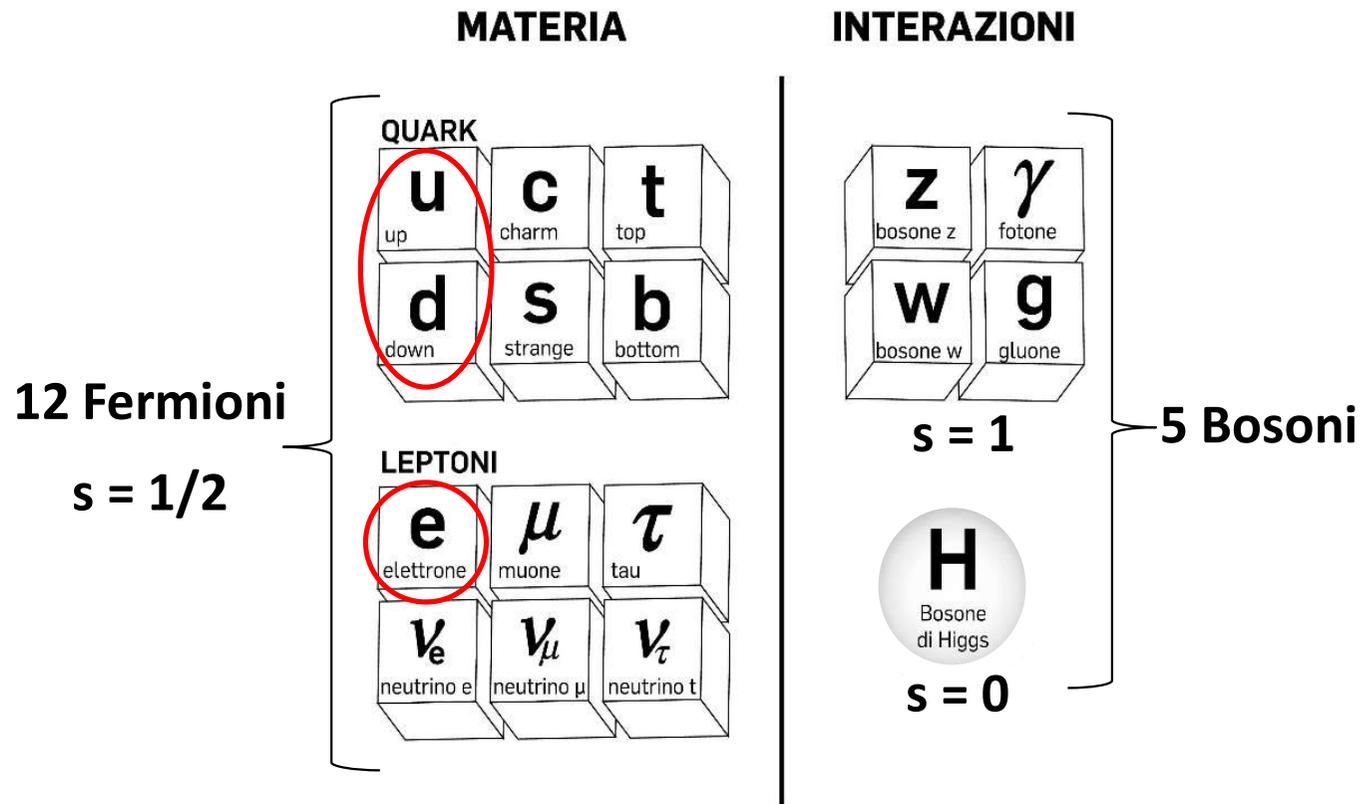
$$\hat{H} = -\frac{\hbar^2}{2m}\nabla^2 + V(r, t)$$

$$\hat{H} \text{ (MS)} \quad \text{▶}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

spazio-tempo

materia



Il Modello Standard delle **particelle elementari** e delle **interazioni**. Le particelle si dicono *elementari* perché non hanno struttura interna. Comprende i 6 quark e i 6 leptoni che costituiscono la materia, e le 5 particelle che trasportano le interazioni. La grandezza s (intera per i bosoni e semintera per i fermioni) è il cosiddetto *spin*, il momento angolare intrinseco. È uno dei numeri che caratterizzano ogni elemento del modello standard.

MATERIA

QUARKS

UP mass $2,3 \text{ MeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	CHARM mass $1,275 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	TOP mass $173,07 \text{ GeV}/c^2$ charge $\frac{2}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 
DOWN mass $4,8 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	STRANGE mass $95 \text{ MeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 	BOTTOM mass $4,18 \text{ GeV}/c^2$ charge $-\frac{1}{3}$ spin $\frac{1}{2}$ 

LEPTONS

ELECTRON mass $0,511 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 	MUON mass $105,7 \text{ MeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 	TAU mass $1,777 \text{ GeV}/c^2$ charge -1 spin $\frac{1}{2}$ 
ELECTRON NEUTRINO mass $<2,2 \text{ eV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 	MUON NEUTRINO mass $<0,17 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 	TAU NEUTRINO mass $<15,5 \text{ MeV}/c^2$ charge 0 spin $\frac{1}{2}$ 

spin=1/2

INTERAZIONI

GAUGE BOSONS

GLUON
 mass 0
 charge 0
 spin 1


HIGGS BOSON
 mass $126 \text{ GeV}/c^2$
 charge 0
 spin 0


PHOTON
 mass 0
 charge 0
 spin 1


spin=0

Z BOSON
 mass $91,2 \text{ GeV}/c^2$
 charge 0
 spin 1


W BOSON
 mass $80,4 \text{ GeV}/c^2$
 charge ± 1
 spin 1


(MEDIATORI)

spin=1

MATERIA

LEPTONI

Esistono isolati

ELECTRON 0,511 MeV/c ² -1 ½	MUON 105,7 MeV/c ² -1 ½	TAU 1,777 GeV/c ² -1 ½
ELECTRON NEUTRINO <2,2 eV/c ² 0 ½	MUON NEUTRINO <0,17 MeV/c ² 0 ½	TAU NEUTRINO <15,5 MeV/c ² 0 ½

I

II

III

UP mass 2,3 MeV/c ² charge ⅔ spin ½	CHARM 1,275 GeV/c ² ⅔ ½	TOP 173,07 GeV/c ² ⅔ ½
DOWN 4,8 MeV/c ² -⅓ ½	STRANGE 95 MeV/c ² -⅓ ½	BOTTOM 4,18 GeV/c ² -⅓ ½

I

II

III

3 FAMIGLIE

Carica elettrica -1 , massa molto diversa (1, 207, 3480) - perché?

Carica elettrica 0, massa quasi 0, asociali

QUARKS
Esistono solo a coppie o a triplette

Carica elettrica frazionaria (-1/3, 2/3), massa molto diversa (1→ 75'000) - perché?

INTERAZIONI

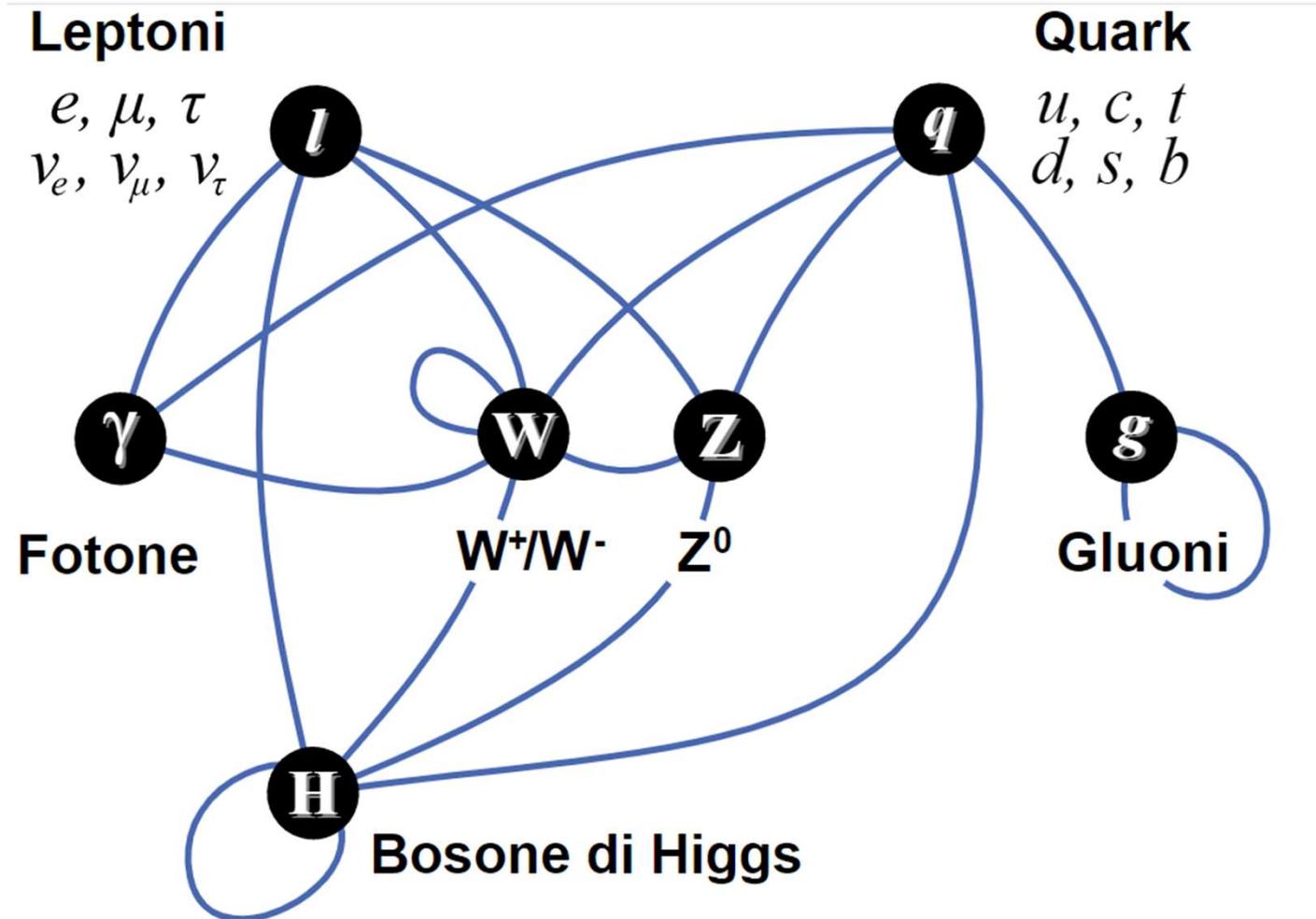
GLUON 0 0 1	g	massa 0, carica 0 interazione Forte (nucleo)
PHOTON 0 0 1	γ	massa 0, carica 0 interazione e.m.
Z BOSON 91,2 GeV/c ² 0 1	Z	massa 90 GeV/c ² , carica 0 interazione debole (radioattività)
W BOSON 80,4 GeV/c ² ±1 1	W	massa 80 GeV/c ² , carica ±1 interazione debole (radioattività)

spin=1

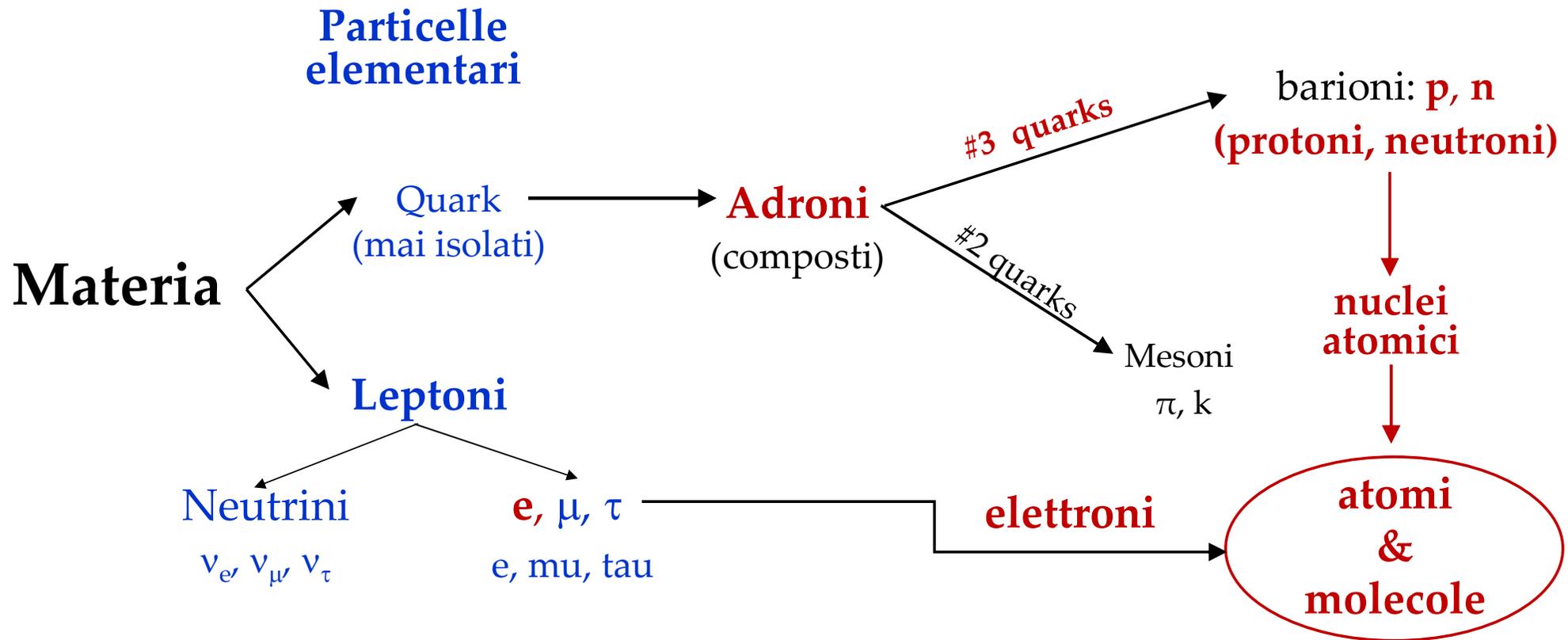
massa molto alta, carica 0
"dà" la massa

HIGGS BOSON 126 GeV/c ² 0 0	H
--	----------

Chi parla con chi e in quale lingua



La struttura della materia stabile: atomi e molecole



Schema delle principali particelle che compongono la materia stabile: protoni, neutroni ed elettroni che formano gli atomi e le molecole.

Cosa è la massa? La massa dell'elettrone

Per l'elettrone, come per ogni particella, possiamo calcolare un certo fattore – il fattore g – rapporto del momento magnetico intrinseco della particella con il suo momento angolare.

Il calcolo di g per un elettrone forniva (anni '50 del secolo scorso) il valore 2 (esatto). Ma alcune misure molto precise davano, senza ambiguità, un valore differente, non di molto (2,0024), ma sufficiente ad invalidare il calcolo.

La soluzione, arrivata da una serie di fisici teorici, fu questa: l'elettrone è una particella dotata di carica elettrica. Questa carica genera un campo e.m. nello spazio e questo campo e.m. interagisce con l'elettrone stesso scambiando fotoni (virtuali, questo è un po' complicato). Il punto chiave è che a questo scambio di fotoni corrisponde un'energia, ed a questa energia posso far corrispondere un'inerzia (ricordiamoci $m=E/c^2$), quindi una piccola massa aggiuntiva.

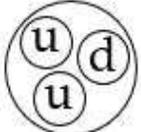
Il risultato è che **la massa dell'elettrone è in realtà la somma di due termini: la massa *nuda*** dell'elettrone considerato senza il suo campo elettromagnetico (è la vera e propria massa inerziale dovuta esclusivamente alla particella), e **la massa *elettromagnetica***, dovuta all'energia di interazione dell'elettrone con sé stesso.

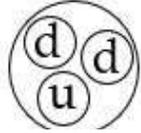
Questa massa elettromagnetica era esattamente quella che serviva per giustificare la piccola differenza del fattore g (solo lo 0,12 %) che si trovava sperimentalmente.

[Principio di censura cosmica: non esistono singolarità nude]

La massa del protone e del neutrone

Le masse del protone, dell'elettrone e dei quark di cui sono costituiti (sempre in MeV/c^2), sono:

Il protone p:  $m_p(\text{uud}) = 938,3$ ma: $m(2u+d) = 2,3 + 2,3 + 4,8 = 9,4 !!!$

Il neutrone n:  $m_n(\text{udd}) = 939,6$ ma: $m(2d+u) = 4,8 + 4,8 + 2,3 = 11,9 !!!$

Le masse dei quark che compongono il protone e il neutrone sono circa l'1% della loro massa totale.

Da dove viene il restante 99%? Ma da un'energia, è ovvio (!?).

Il fatto è che i quark possiedono una *carica di colore*, e – come l'elettrone che possedendo una carica elettrica generava un campo che poteva interagire con sé stesso e con altri elettroni – così un quark e il relativo *campo di colore* può interagire con sé stesso e con gli altri quark tramite i *gluoni* – i mediatori dell'interazione forte, anche loro con una carica di colore -.

Quindi tutti interagiscono con tutti ed a questa interazione corrisponde un'energia, una grande energia.

Questa energia costituisce il 99% della massa del protone o del neutrone!

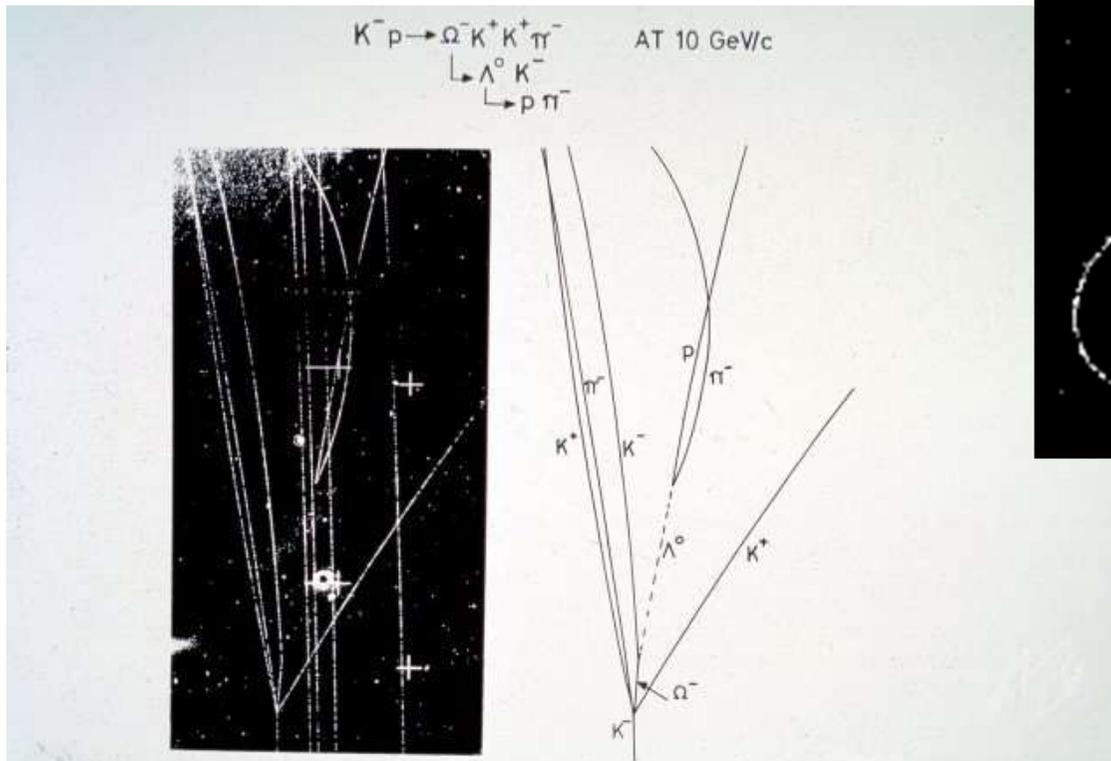
La maggior parte della massa del protone e del neutrone è dovuta all'energia delle interazioni tra i quark e i gluoni che li costituiscono.

Se ipotizzassimo dei protoni e dei neutroni con le masse *nude* portate a zero avremmo dei protoni e dei neutroni con una massa appena un po' più piccola di quella reale, ma tutta proveniente dall'energia del sistema. Una *massa senza massa* come la chiamò per primo John Wheeler e che poi fu adottata da Frank Wilczek (Wilczek, 2002).

**“La massa di qualunque corpo è il suo contenuto di Energia”
(Einstein, 1905)**

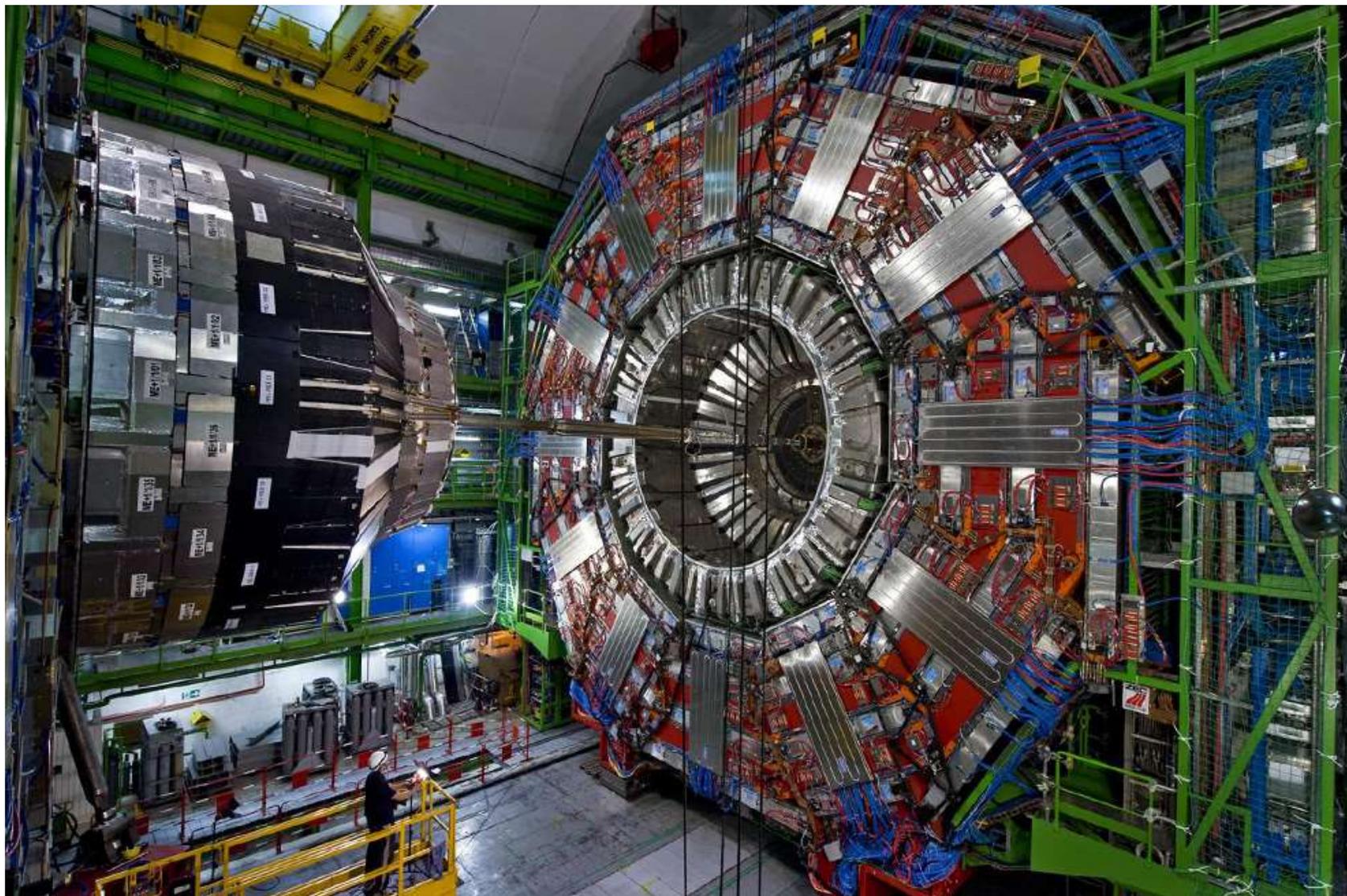
Particelle e interazioni: come si “vedono”

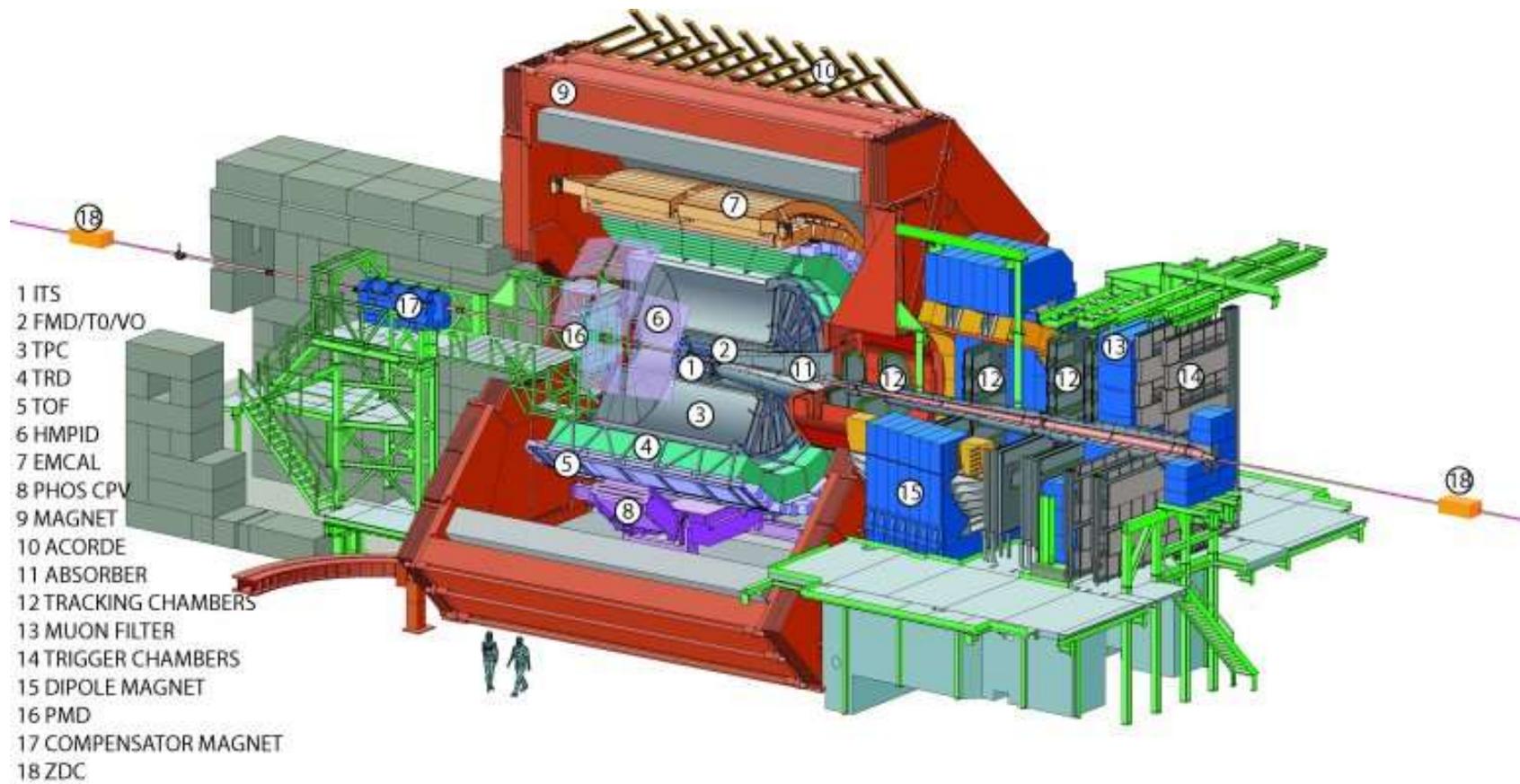
Tracce in camere a bolle

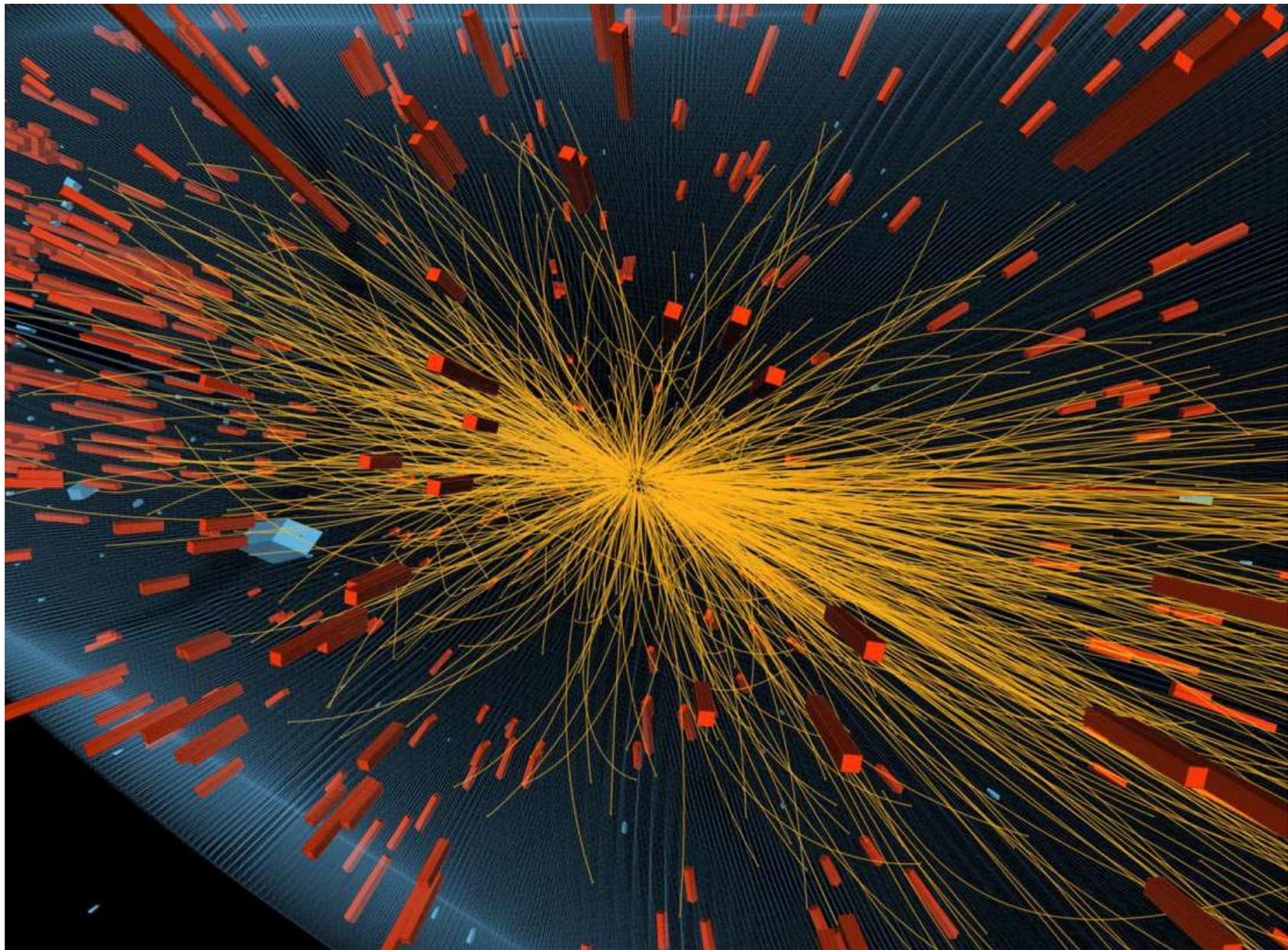


CERN – Ginevra-Prevessin









Evento simulato $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$

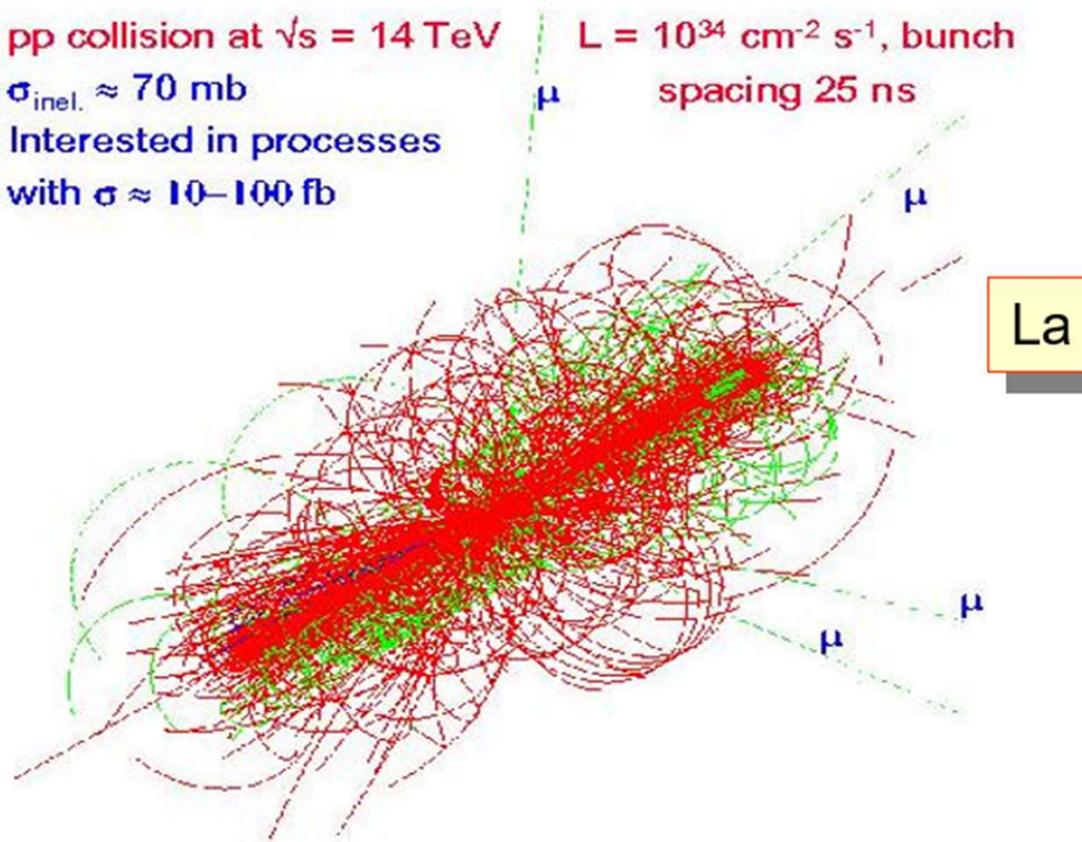
pp collision at $\sqrt{s} = 14 \text{ TeV}$

$\sigma_{\text{inel.}} \approx 70 \text{ mb}$

Interested in processes

with $\sigma \approx 10\text{--}100 \text{ fb}$

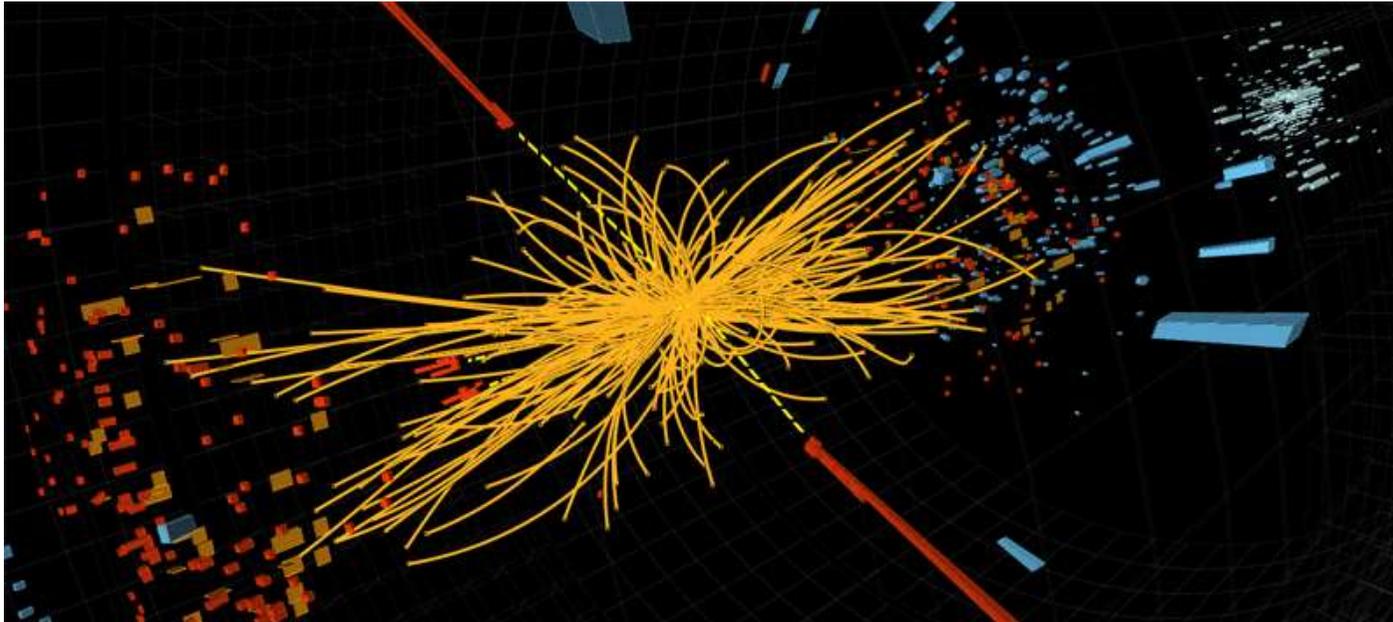
$L = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, bunch
spacing 25 ns



~ 23 eventi sovrapposti

~ 1900 particelle cariche + 1600 neutre da rivelare
contemporaneamente

Evento di un bosone di Higgs



Cosmologia

Principio Cosmologico:

L'universo è omogeneo e isotropo se osservato su di una scala abbastanza grande

Verificato sperimentalmente su scale di 0,001 K
(data la temperatura media di 2,7 K)



Cronologia/struttura dell'Universo: il modello Λ -CDM

Λ : Energia oscura – energia del vuoto – 68% del totale

CDM: Cold Dark Matter – 27%

Atomi e fotoni: 5% **NOI!**

TABELLA 8.2

Storia antica del nostro universo: dall'inizio fino a 300 000 anni

Sistema solare ~ 18 miliardi di km
Galassia ~ 10^{18} km

Nove ere	Tempo t dal Big Bang	Diametro dell'universo	Temperatura media T (K)	Cosa succede, cosa c'è
Era di Planck	$t < 10^{-43}$ s	Non ci sono teorie accettate, solo proposte; le interazioni del modello standard e l'interazione gravitazionale probabilmente sono unificate*		
Grande unificazione	$\sim 10^{-43}$ s	10^{-35} m	10^{30}	Le tre interazioni del modello standard sono unificate: esistono molti approcci differenti; poi c'è la gravità
Inflazione	$\sim 10^{-35}$ s $\sim 10^{-30}$	10^{-26} m 0,1 m	$\sim 10^{27} \div 10^{28}$	Espansione rapida dello spazio
Inizio elettrodebole	10^{-12} s	10 m	$\sim 10^{15}$	Le interazioni forte ed elettrodebole si separano; si formano gluoni e coppie quark/antiquark
Fine elettrodebole	10^{-9} s	1 miliardo di km	$\sim 10^{15}$	Le interazioni elettromagnetica e debole si separano
Adroni	10^{-6} s	100 miliardi di km	10^{13}	I quark e l'interazione forte formano gli adroni (protoni, neutroni, π , k ecc.)
Leptoni	10^{-4} s	300 (?) miliardi di km	10^{12}	Si formano i leptoni
Nucleosintesi primordiale	1'	1 000 miliardi di km 0,1 anni luce	$10^9 \div 10^{10}$	$n \rightarrow p + e$; si formano nuclei di elio/deuterio
Opacità	200 s	10-10 000 anni luce	10^8	Si formano atomi leggeri: H, He, Li
Materia	380 000 anni	100 milioni di anni luce	3 000	C'è tutto quello che serve, nasce la materia stabile: fotoni, elettroni, neutrini, neutroni, protoni

* Per la definizione del termine "unificazione" in riferimento a due interazioni, cfr. PAR. 4.5.

TABELLA 8.3

Storia moderna del nostro universo: da circa un milione di anni fino... alla fine. Le date sono indicative

Tempo dal Big Bang (anni)	Cosa succede
380 000 1 milione	Si forma l'atomo di idrogeno (un protone e un elettrone)
200 milioni	Si formano le prime grandi stelle (mega stelle); si formano i primi atomi di ossigeno, carbonio, neon, ferro, azoto ecc.
1 miliardo	Si formano le galassie
5 miliardi	Si formano le prime stelle
10 miliardi	Si forma il sistema solare
12 miliardi	Nascono le prime forme di vita microscopiche
13,7 miliardi	Voi state leggendo questo libro
14 miliardi di anni	Il Sole diventa una gigante rossa e ingloba la Terra
100 miliardi di anni	Tutte le stelle si raffreddano e muoiono (forse)

Cose che non sappiamo – dubbi.1

- 1) La natura profonda della MQ.
- 2) L'unificazione (se possibile) nel presente paradigma del mondo microscopico tra la forza gravitazionale e le altre forze del modello standard.
- 3) Le osservazioni dell'universo mostrano alcuni effetti spiegabili solo tramite un'attrazione gravitazionale di cui sarebbe responsabile una massa, chiamata *materia oscura*, che rappresenterebbe circa l'85% della massa dell'universo. Questa massa non emetterebbe radiazione elettromagnetica – per questo viene chiamata oscura – e sarebbe attualmente rilevabile solo in modo indiretto attraverso i suoi effetti gravitazionali. Non se ne conosce la natura, nessuna delle particelle conosciute sembra poter spiegare le osservazioni cosmiche di materia oscura.
- 4) Il cosiddetto *fine-tuning* dell'Universo (l'Universo *finemente regolato*). Il nostro modello di Universo è descritto dalle leggi fisiche (sperimentali) e da alcune costanti fondamentali: la costante di Gravitazione universale G , la costante di Planck h , la velocità della luce nel vuoto c e la costante di struttura fine α . Esistono poi altre costanti che entrano in modo essenziale nella descrizione dell'evoluzione del nostro Universo, per esempio la cosiddetta costante cosmologica Λ . I valori delle costanti fondamentali G , h , c ed α sembra che siano *esattamente* quelli che devono essere per permettere l'esistenza di un universo come il nostro: basta variare una delle costanti di pochissimo (poche parti percentuali) per non avere, per esempio, un universo con massa. La costante cosmologica potrebbe essere calcolata dai dati del modello standard. Il calcolo fornisce un valore 120 ordini di grandezza maggiore (quindi un fattore 10^{120}) differente da quello valutato sperimentalmente.

Cose che non sappiamo – dubbi.2

- 6) Le masse dei neutrini: nel Modello Standard i neutrini sono particelle prive di massa. Ma i risultati sperimentali attribuiscono loro una piccolissima massa. È inoltre sconosciuta la gerarchia delle loro masse, cioè si conoscono i rapporti, ma non l'ordine con cui si passa dal più leggero al più pesante.
- 7) L'asimmetria fra materia e antimateria: come mai nell'universo noto vediamo quasi solo materia, quando in principio dovrebbero essere simmetriche?
- 8) Per poter descrivere correttamente l'espansione recente dell'universo e anche l'età dell'universo (che deve essere maggiore di quella dei più antichi ammassi globulari) è necessario che la maggior parte della massa-energia dell'universo sia in una forma simile all'energia del vuoto. Ma la densità di energia del vuoto non è calcolabile con esattezza, i calcoli approssimati danno una stima 120 ordini di grandezza maggiore di quanto serve per la cosmologia, quindi si ipotizza una *energia oscura* (che non sappiamo cosa possa essere), oppure una modifica della legge di gravitazione universale a grandi distanze o a basse accelerazioni.
- 9) Per spiegare la piattezza della geometria dell'universo, l'assenza di monopoli magnetici, ed altri effetti misurati, si deve pensare ad una fase iniziale di espansione velocissima dell'universo (inflazione cosmica). Il motivo di questa espansione è ignoto (transizione di fase, grande unificazione ...?).

The map of Physics

<https://www.youtube.com/watch?v=ZihywtixUYo&t=14s>



Conclusione



Non può esserci una conclusione.

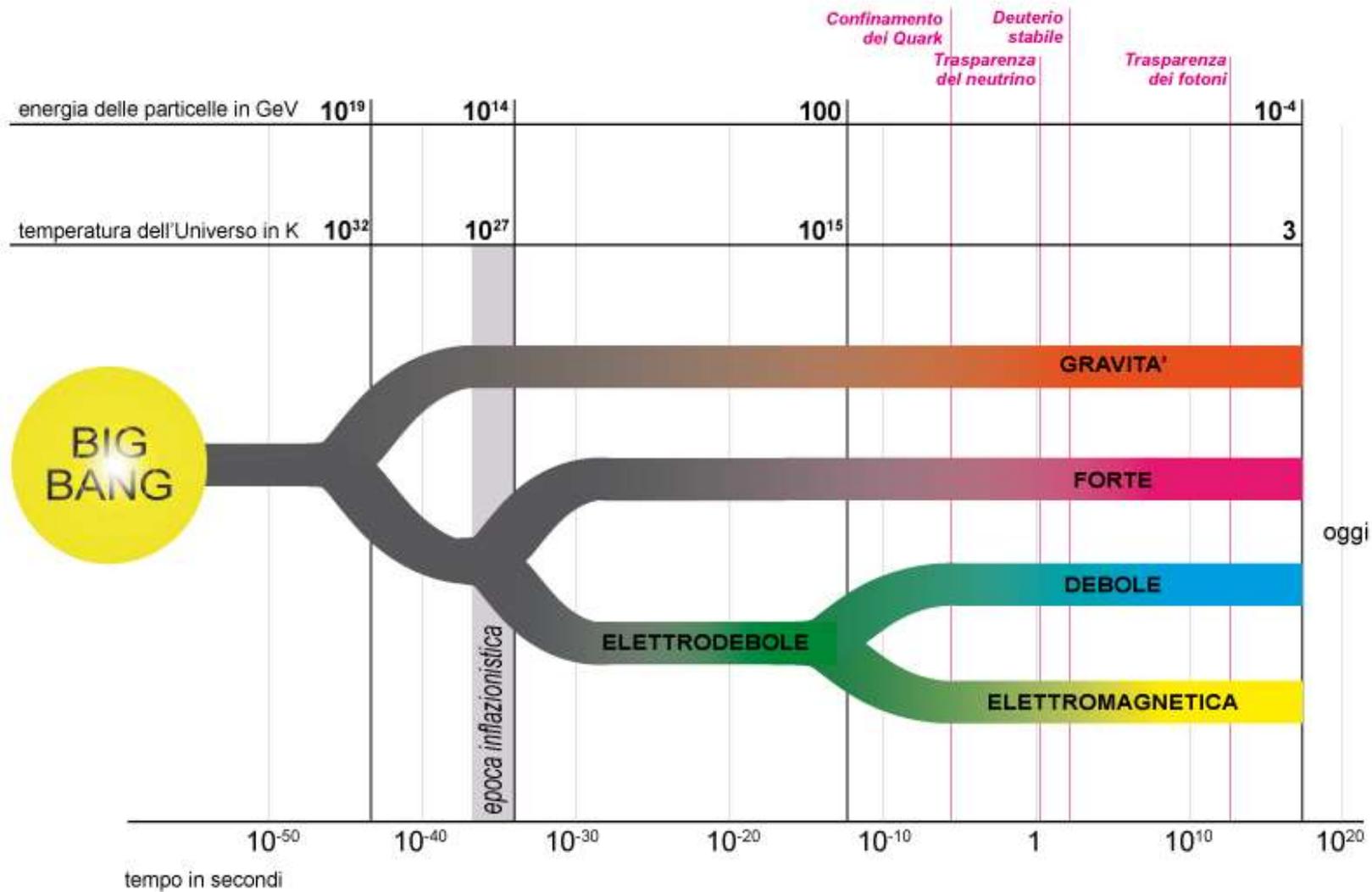
Abbiamo capito una grossa parte di come funziona il nostro mondo, ma ancora non sappiamo tante, troppe cose.



E continueremo a cercare di capirle, qualche volta scoprendo qualcosa di utile a tutta l'umanità, ma sempre spinti da quello che dice Galileo in «Vita di Galileo» di B. Brecht:

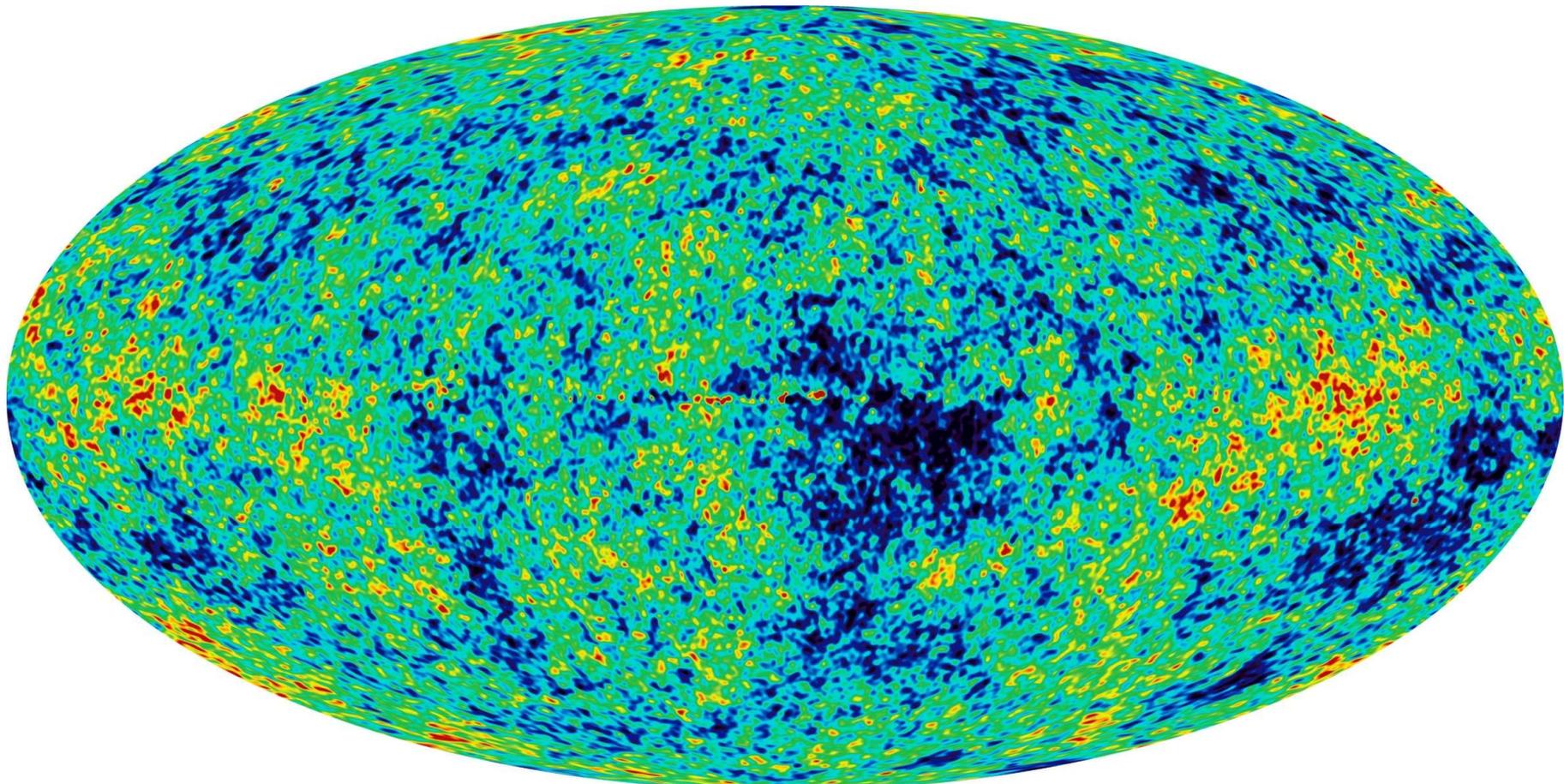
« Io devo sapere »

Tutte insieme, ma separate



CMB – Cosmic Microwave Background - $\langle T \rangle = 2,7255 \text{ K}$

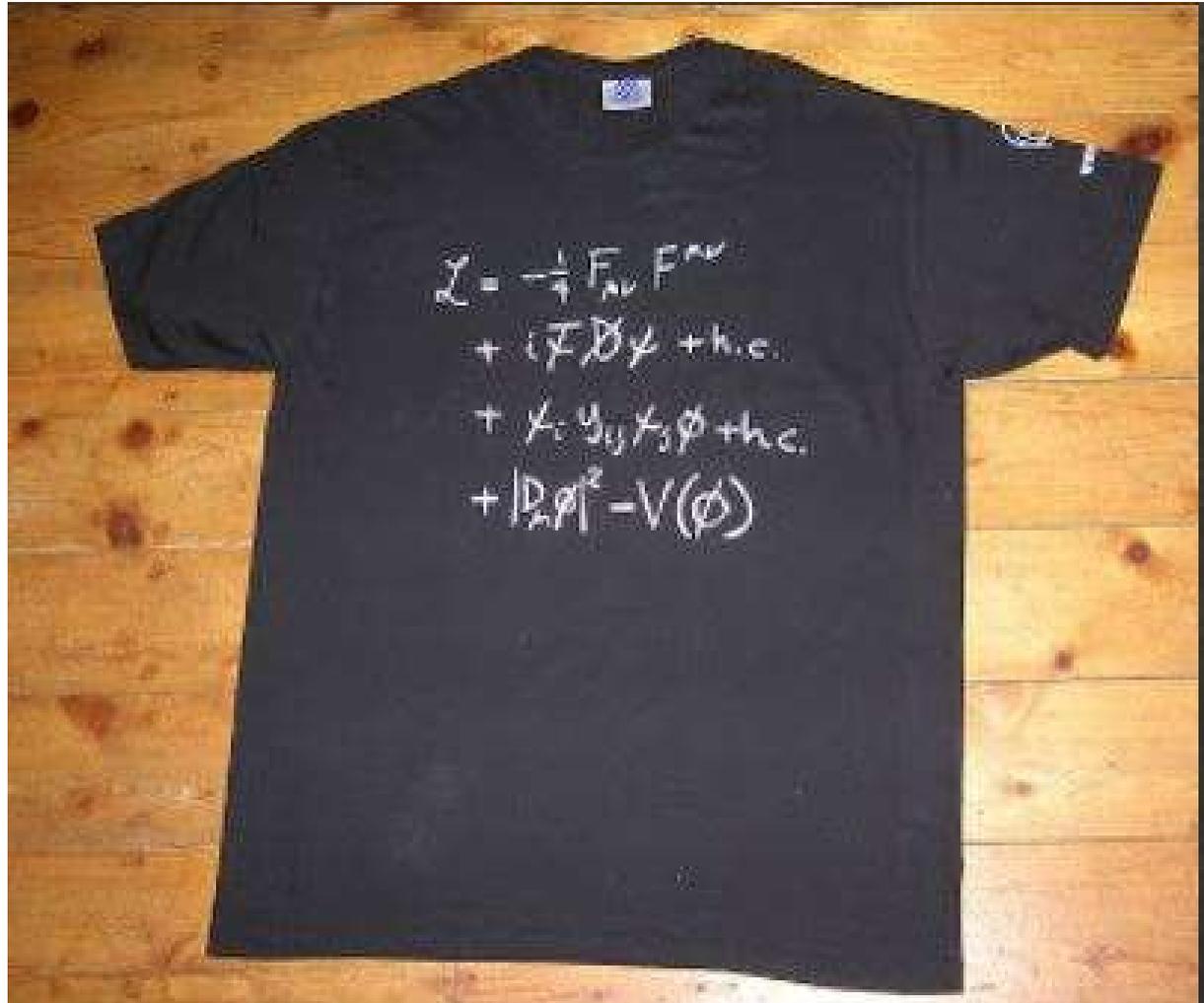
Fluttuazioni $< 0,0002 \text{ K}$



R & MQ - Carlo Cosmelli



Modello Standard semplificato



Modello Standard esteso – $\mathcal{L} = T-V$

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e + \\
 & \frac{1}{2}ig_s^2 (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
 & \frac{1}{2}m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \frac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\frac{2M^2}{g^2} + \right. \\
 & \left. \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right] + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - igc_w [\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+) - ig s_w [\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)] - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \\
 & \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^+ W_\nu^- + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + \\
 & g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-] - g\alpha [H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h [H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2] - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \frac{1}{2}ig [W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
 & W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \frac{1}{2}g [W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \\
 & \phi^+ \partial_\mu H)] + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \\
 & ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
 & ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\
 & \frac{1}{4}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-] - \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma \partial \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial +
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & m_d^\lambda \bar{d}_j^\lambda + ig s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\
 & \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\lambda\kappa}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \\
 & i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \\
 & \gamma^5) d_j^\kappa) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + \\
 & igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + \\
 & igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + \\
 & igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \\
 & \frac{1}{2}gM [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\
 & \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} igM [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + igM s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \\
 & \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \frac{1}{2}igM [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0]
 \end{aligned}$$



Le **Interazioni** fondamentali nel modello standard sono tre, ognuna trasportata da una o più **particelle**.

elettrodebole (e.m. ; debole)	//	di Higgs	//	Forte
$\gamma ; (Z^0, W^-, W^+)$	//	H	//	g
fotone ; bosoni Z e W		bosone di Higgs		gluone