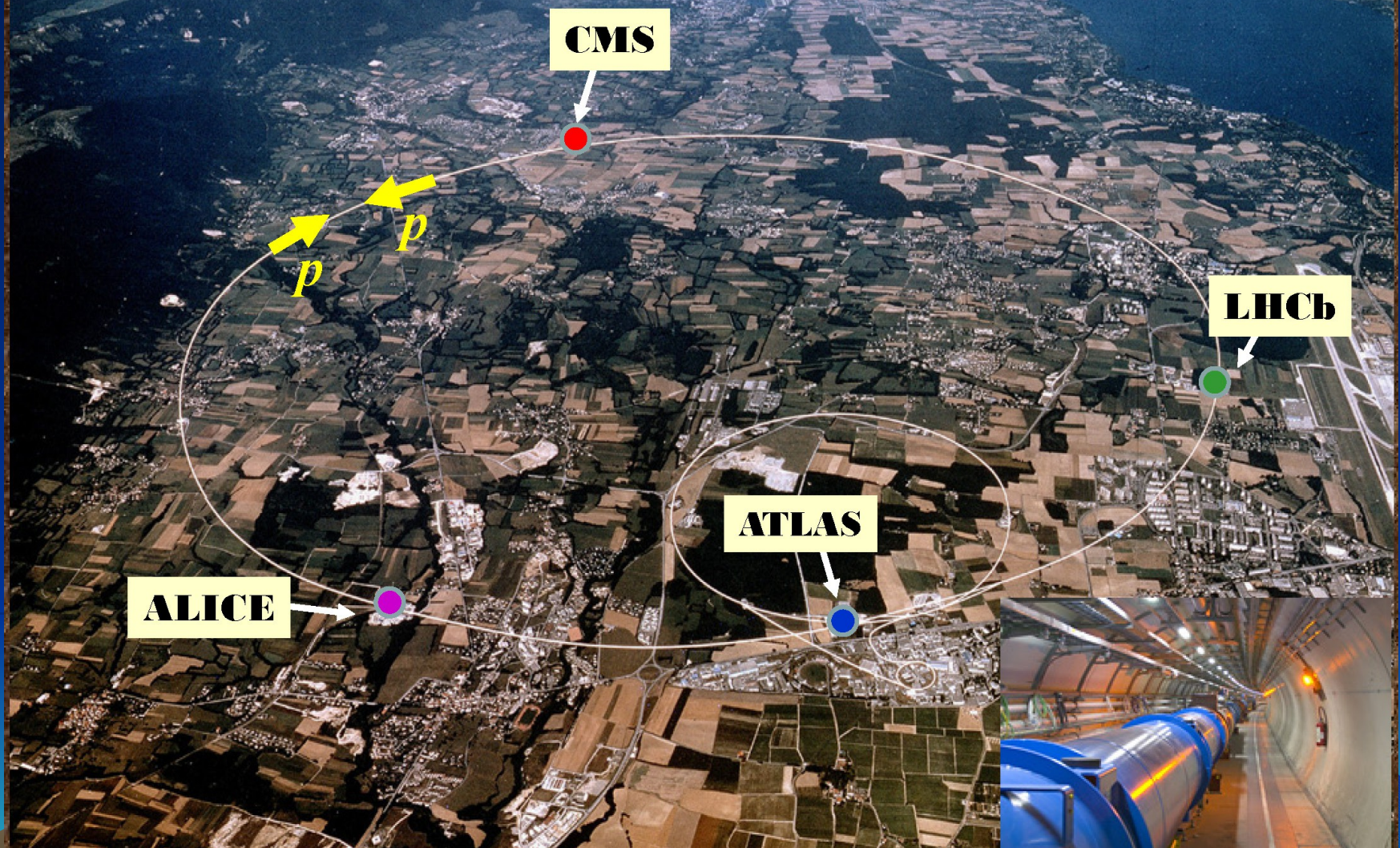


Il Modello Standard delle Particelle Elementari

Stefano Spagocci
GACB



Large Hadron Collider



Il Mondo Classico

- Fin dai tempi dell'antica Grecia, Democrito aveva supposto l'esistenza di particelle indivisibili, gli atomi, che componevano la materia.
- Il concetto fu ripreso nell'antica Roma da Lucrezio, De Rerum Natura.



La Chimica

- Solo nel XIX secolo, però, il concetto di atomo fu ripreso scientificamente.
- Si notò che gli elementi chimici si combinavano sempre in proporzioni fisse, per dare i composti.
- Questo si spiega solo con l'esistenza di atomi quali mattoncini fondamentali della materia.



La Meccanica dei Gas

- Nel XIX secolo si spiegò anche il comportamento dei gas.
- Si poterono spiegare le proprietà come pressione e temperatura, supponendo che i gas fossero formati da atomi non interagenti.



La Radioattività

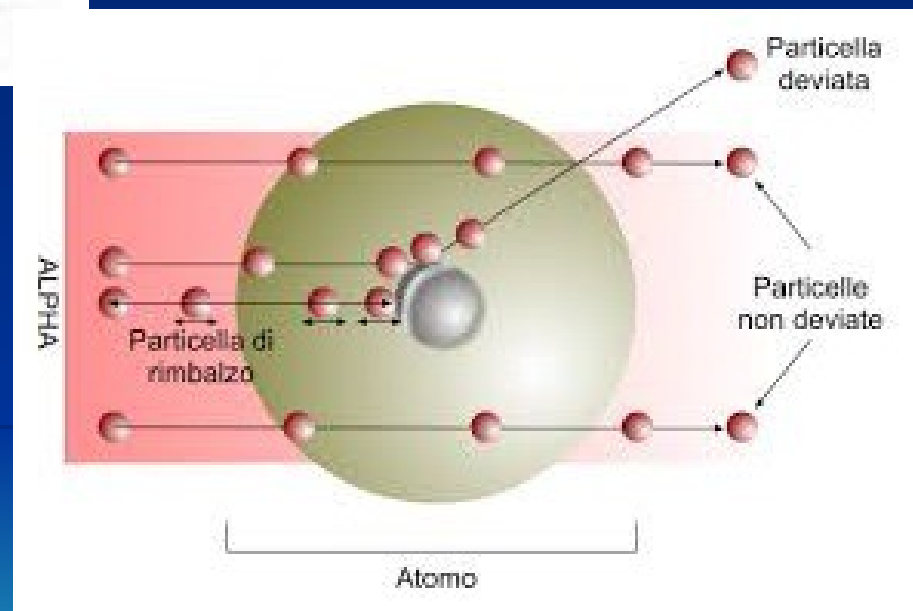
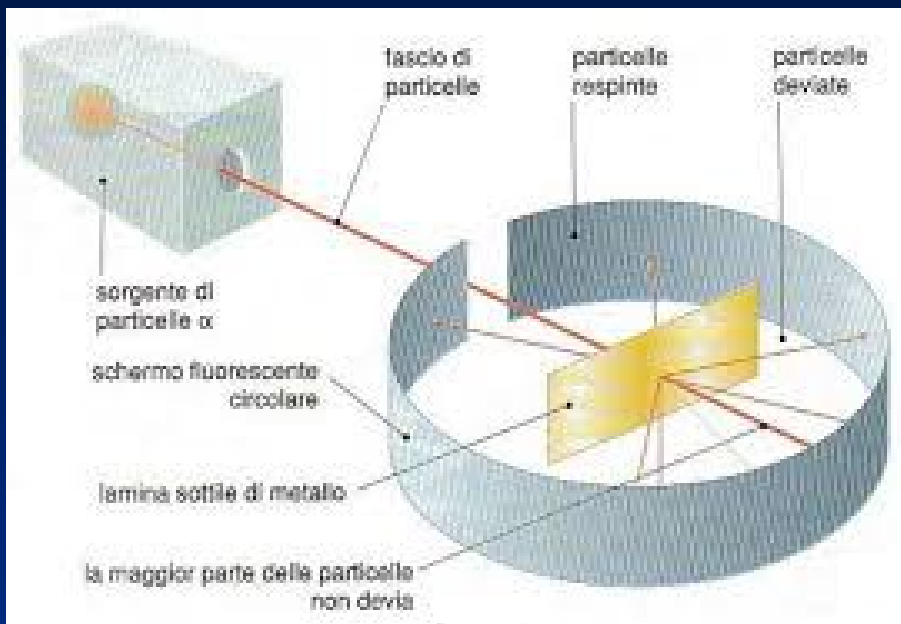
- Gli atomi in chimica o meccanica dei gas erano concepiti quali mattoncini fondamentali, non composti da particelle più piccole.
- La scoperta della radioattività suggerì che gli atomi potessero emettere particelle più piccole, quindi contenerle.
- Vi sono tre tipi di radioattività: α (nuclei di elio), β (elettroni), γ (quanti elettromagnetici), di cui parleremo in seguito.



Rutherford, Crookes, Chadwick

- Rutherford, agli inizi del XX sec., bombardando atomi con particelle α dimostrò che negli atomi c'è un nucleo con carica positiva, circondato da particelle negative.
- In effetti, per emissione da tubo catodico erano già state scoperte (Crookes) particelle negative (gli elettroni) e positive (i protoni).
- In seguito furono anche scoperte (Chadwick) particelle neutre (i neutroni).





Altre Particelle

- Era ormai chiaro che gli atomi sono composti da particelle elementari.
- Nei primi decenni del '900, nei raggi cosmici si scoprirono i muoni e i pioni.
- Nella stessa epoca si realizzarono i primi acceleratori che permisero, assieme ai raggi cosmici, di scoprire centinaia di nuove particelle.

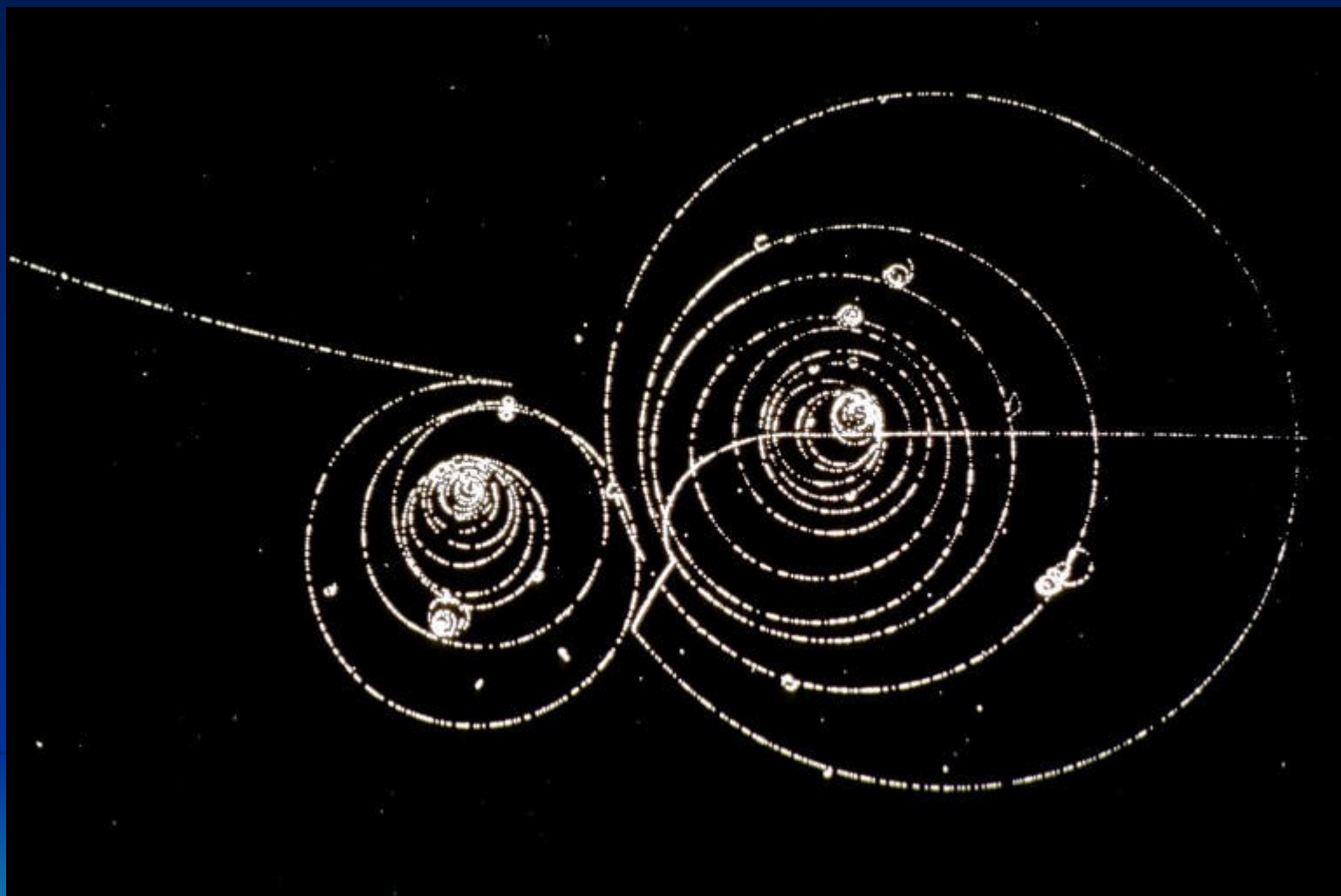




L'Antimateria

- Sempre nei primi decenni del secolo scorso, si scoprirono particelle che erano identiche ad altre particelle, tranne per l'avere carica opposta.
- Si scoprì così l'antimateria (Anderson).
- Ogni particella, in natura, possiede un'antiparticella identica ma di carica e spin opposti.





Il Modello Standard

- Abbandoniamo ora il criterio cronologico e descriviamo il modello standard delle particelle elementari, che pone ordine tra di esse.
- Elaborato da Glashow, Salam e Weinberg sul finire degli anni '60 del secolo scorso.



Proprietà di una Particella

- Massa.
- Carica elettrica.
- Spin (una sorta di rotazione a trottola).
- Numero barionico.
- Numero leptonico.
- Altri numeri quantici.
- Soggetta a forza elettromagnetica, debole o forte.



PARTICELLE DI MATERIA

QUARK

Queste particelle formano i protoni, i neutroni e un vero e proprio zoo di altre particelle meno note. Non sono mai stati osservati isolatamente.

UP



u

Carica elettrica: $+2/3$
Massa: 2 MeV
Costituente della materia ordinaria; un protone è composto da due quark up e uno down.

CHARM



c

Carica elettrica: $+2/3$
Massa: 1,25 GeV
Cugino instabile e più pesante del quark up, scoperto come costituente della particella J/ψ.

TOP

t



Carica elettrica: $+2/3$
Massa: 171 GeV
È la particella più pesante, ha massa paragonabile a un atomo di osmio e una vita media molto breve.

DOWN



d

Carica elettrica: $-1/3$
Massa: 5 MeV
Costituente della materia ordinaria; un neutrone è composto da due quark down e uno up.

STRANGE

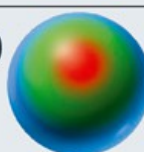


s

Carica elettrica: $-1/3$
Massa: 95 MeV
Cugino instabile e più pesante del quark down, è il costituente del più studiato kaone, altra particella.

BOTTOM

b



Carica elettrica: $-1/3$
Massa: 4,2 GeV
Altra copia instabile e ancora più pesante del quark down, è un costituente del mesone B.

LEPTONI

Queste particelle sono immuni all'interazione forte e si osservano isolatamente. Ogni neutrino mostrato qui in realtà è una combinazione di neutrini diversi, ciascuno con massa non più grande di pochi eV.

NEUTRINO ELETTRONICO



ν_e

Carica elettrica: 0
Immune sia all'elettromagnetismo che all'interazione forte, non prende parte a quasi nessuna interazione, ma è essenziale nei decadimenti radioattivi.

NEUTRINO MU



ν_μ

Carica elettrica: 0
Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i muoni.

NEUTRINO TAU



ν_τ

Carica elettrica: 0
Compare nelle reazioni deboli che coinvolgono i leptoni tau.

ELETTRONE



e

Carica elettrica: -1
Massa: 0,511 MeV
La particella più leggera dotata di carica. Trasporta la corrente elettrica e orbita intorno ai nuclei atomici.

MUONE



μ

Carica elettrica: -1
Massa: 106 MeV
Versione più pesante dell'elettrone, vita media di 2,2 microsecondi, scoperto come componente dei raggi X cosmici.

TAU



τ

Carica elettrica: -1
Massa: 1,78 GeV
Un'altra versione instabile e ancora più pesante dell'elettrone con una vita media di 0,3 picosecondi.

PARTICELLE DI FORZA

BOSONI

A livello quantistico, ognuna delle forze fondamentali è mediata da una specifica particella o insieme di particelle.

FOTONE



γ

Carica elettrica: 0
Massa: 0
Mediatore dell'elettromagnetismo, il quanto di luce agisce sulle particelle cariche elettricamente. Il suo raggio d'azione è illimitato.

BOSONE Z



Z

Carica elettrica: 0
Massa: 91 GeV
Il mediatore delle reazioni deboli che non modificano l'identità delle particelle. Il suo raggio d'azione è di appena 10^{-18} metri circa.

BOSONI W^+/W^-



W

Carica elettrica: $+1$ o -1
Massa: 80,4 GeV
Sono i mediatori dell'interazione debole, che modifica il sapore e la carica delle particelle. Il raggio d'azione di queste interazioni è di appena 10^{-18} metri circa.

GLUONI



g

Carica elettrica: 0
Massa: 0
Otto specie di gluoni mediano l'interazione forte, interagendo con i quark e con altri gluoni. Queste particelle non risentono delle interazioni elettromagnetiche e delle interazioni deboli.

HIGGS

(ancora non osservato)



H

Carica elettrica: 0
Massa: presumibilmente inferiore a 1 TeV, probabilmente tra 114 e 192 GeV
Si ritiene che il bosone di Higgs conferisca la proprietà della massa ai quark, ai leptoni e ai bosoni W e Z.

Mesoni

- π^+ = pione positivo = $u\bar{d}$, carica = 1.
- π^- = $\bar{u}d$, pione negativo, carica = -1 (antiparticella).
- Decadono in un muone.
- π^0 = pione neutro = $u\bar{u} + d\bar{d}$, carica = 0.
- Decade in due fotoni.
- ...



Barioni

- p = protone = uud , carica = 1.
- n = neutrone = udd , carica = 0.
- $\bar{p}$ = antiprotone = $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$, carica = -1.
- $\bar{n}$ = antineutrone = $\bar{u}\bar{d}\bar{d}$, carica = 0.

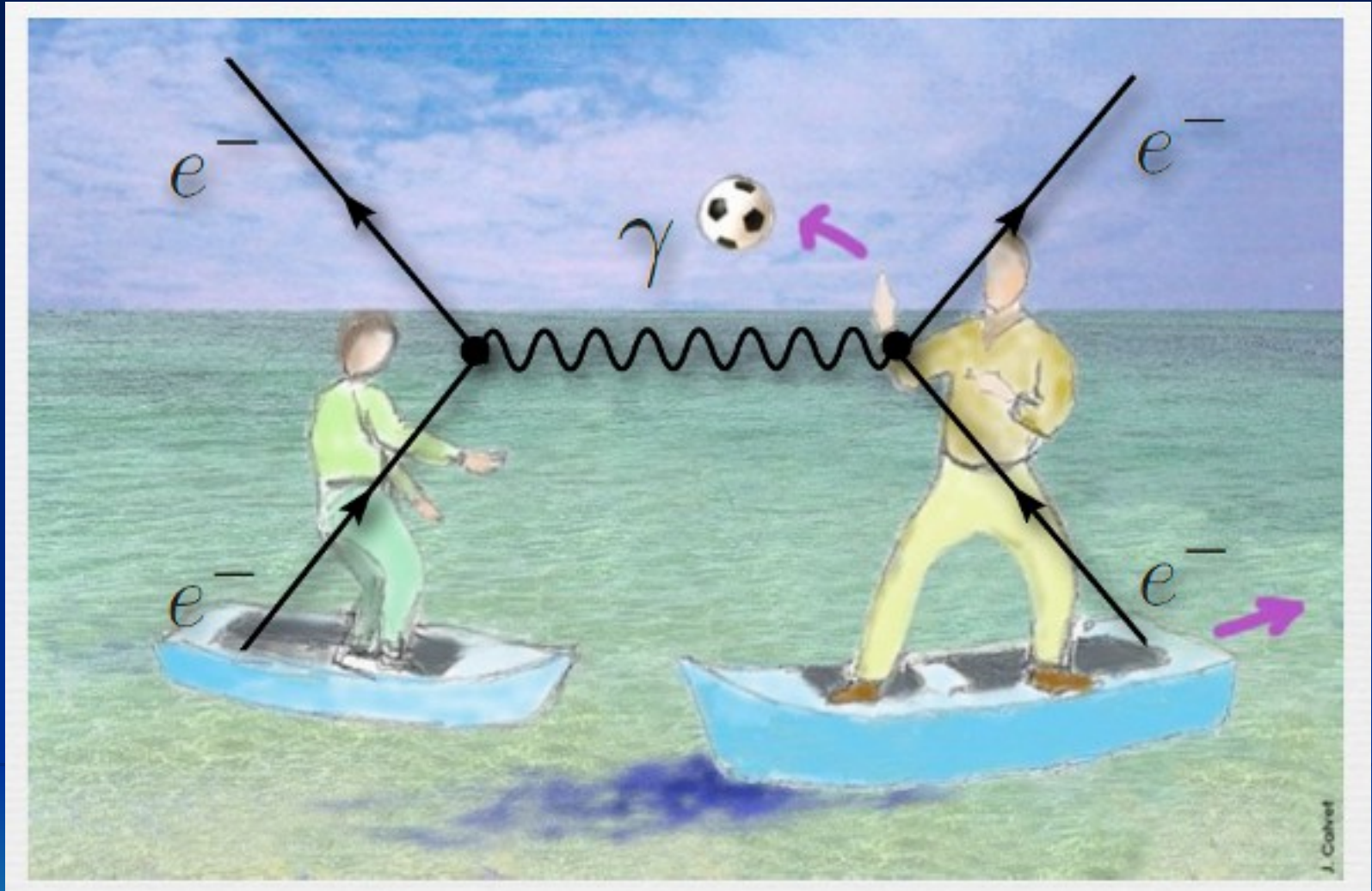
- ...



Le Forze

- Nella meccanica quantistica le forze sono viste come risultanti dello scambio di opportune particelle, i bosoni di gauge.
- Forza elettromagnetica (mediata dal fotone γ).
- Forza debole (mediata dalle particelle W^+ , positiva, W^- , negativa e Z^0 , neutra).
- Forza forte (mediate dagli 8 gluoni, ognuno dei quali ha un “colore”).





Le Forze

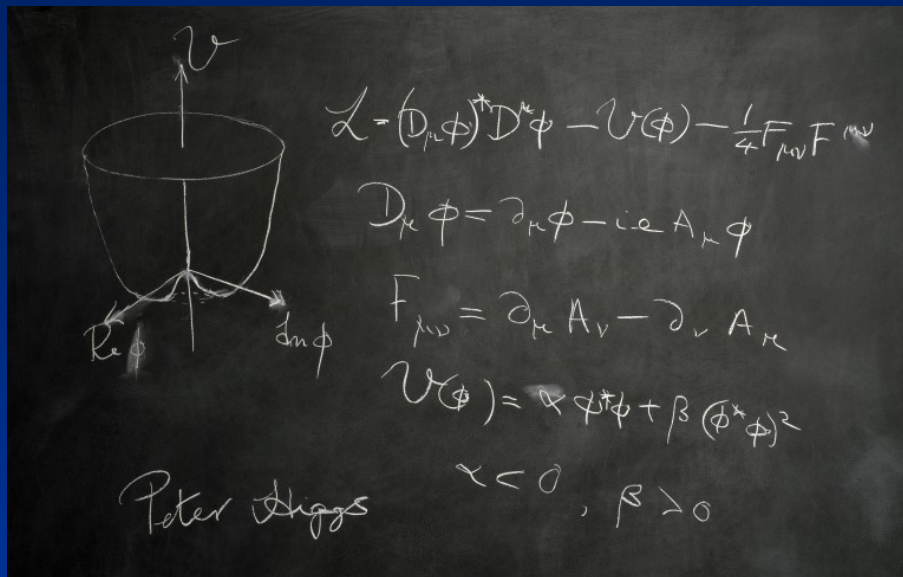
- Tutte le particelle cariche sentono la forza elettromagnetica.
- Leptoni e quark (e particelle composte da quark) sentono la forza debole.
- Solo i quark (e particelle composte da quark) sentono la forza forte.



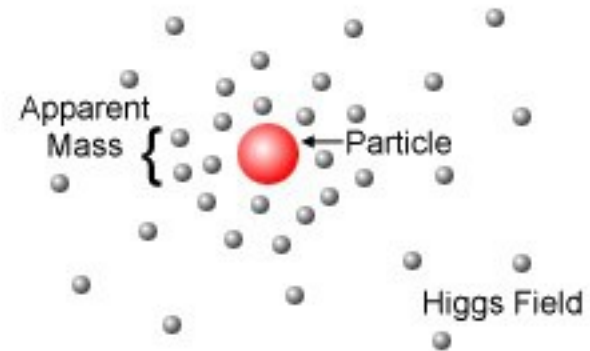
Forza Elettrodebole

- Nel modello standard si assume l'esistenza di una particella neutra, il bosone di Higgs (scoperto al CERN/LHC nel 2012).
- Ad alte energie la forza elettromagnetica e quella debole hanno lo stesso mediatore, dunque coincidono.
- A basse energie il fotone, le W e le Z interagiscono con il campo di Higgs in maniera differente e dunque si differenziano.

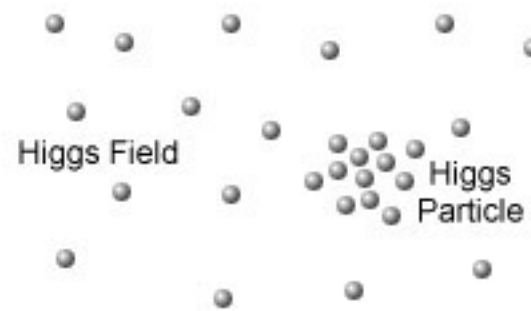




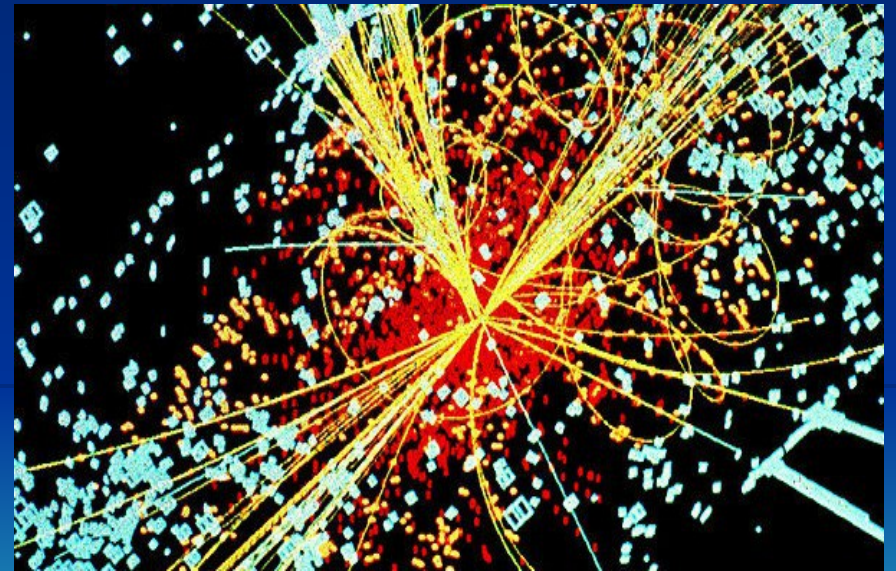
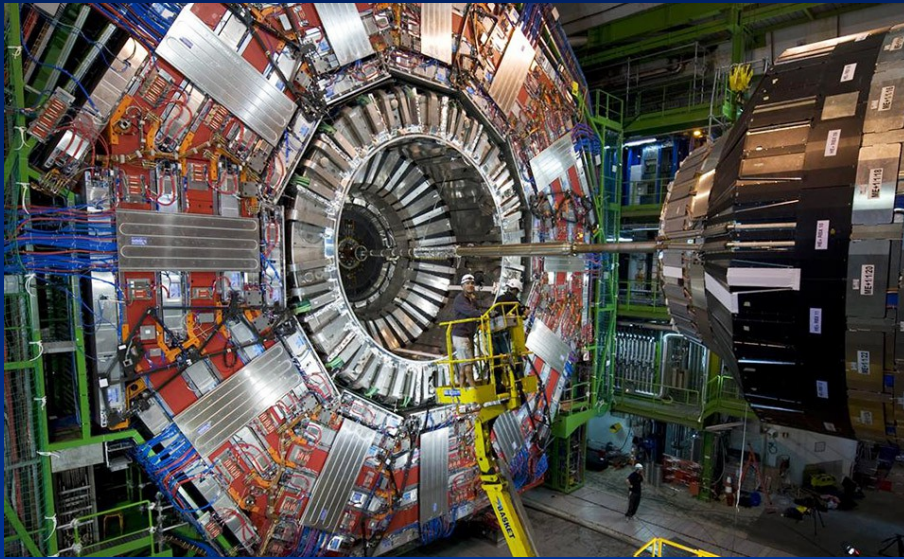
Higgs Mechanism



Higgs Particles



La Scoperta dell'Higgs

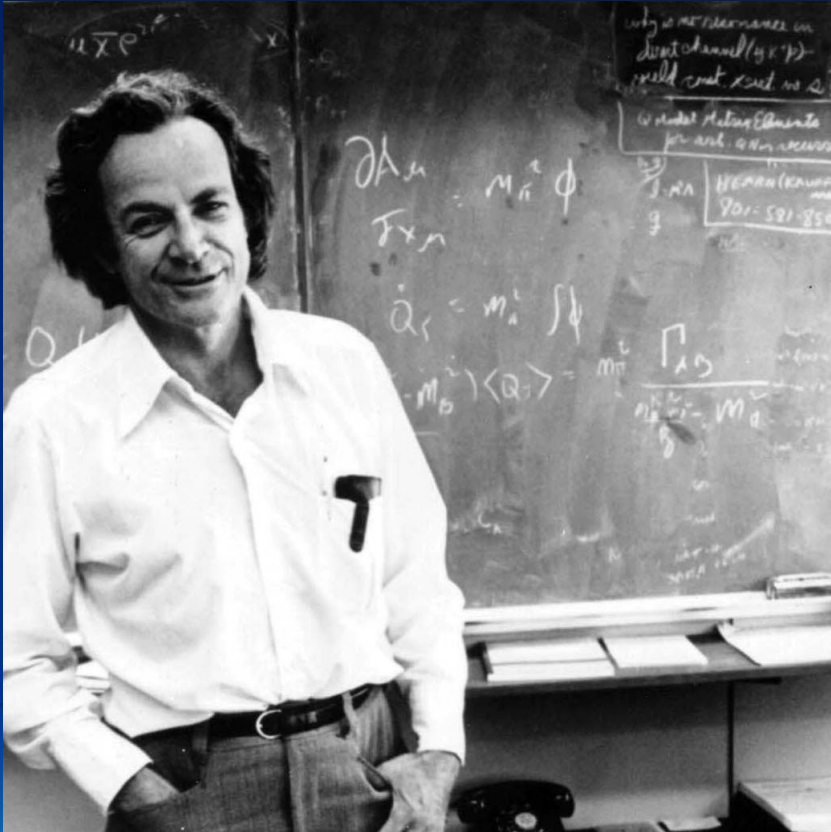


L'Unificazione delle Forze

- La forza forte, nel modello standard, non è unificata con la elettrodebole.
- Tuttavia teorie più avanzate del modello standard (quali la supersimmetria, non ancora verificata o smentita sperimentalmente) includono anche la forza forte.
- Altre teorie (stringhe, gravità a loop), difficilmente verificabili sperimentalmente nel prossimo futuro, includono anche la gravità.

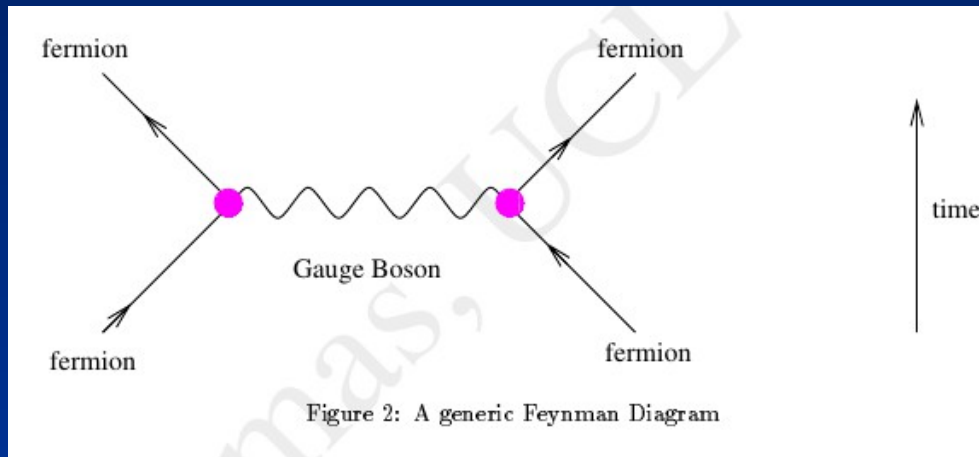


Lagrangiana e Diagrammi di Feynman



- La lagrangiana del modello standard è sostanzialmente l'energia (per unità di volume) contenuta in una certa zona di spazio-tempo, in funzione dell'intensità dei vari campi (quali quello elettromagnetico). Ogni particella o forza ha un campo associato.

Lagrangiana e Diagrammi di Feynman



- Dall'espressione per la lagrangiana è immediato ricavare le regole per la costruzione dei diagrammi di Feynman.
- I diagrammi di Feynman, al livello più basso, sono rappresentazioni pittoriche e intuitive dei processi di interazione tra particelle.
- A un livello più alto, dai diagrammi di Feynman per un processo si ricavano subito le regole per calcolare la probabilità del processo stesso (tali diagrammi si possono quindi considerare una sorta di stenografia).

The Lagrangian of the Standard Model

$$\mathcal{L}_{\text{gauge}} = -\frac{1}{4}G_{\mu\nu}^a G^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}W_{\mu\nu}^a W^{a\mu\nu} - \frac{1}{4}B_{\mu\nu}B^{\mu\nu} \quad \text{describe massless gauge bosons}$$

$$\mathcal{L}_{\text{Fermion}} = \sum_{\text{quarks}} i\bar{q}\gamma^\mu D_\mu q + \sum_{\psi_L} i\bar{\psi}_L\gamma^\mu D_\mu \psi_L + \sum_{\psi_R} i\bar{\psi}_R\gamma^\mu D_\mu \psi_R \quad \text{describe massless fermions and their interactions with gauge bosons}$$

only left-handed fermions

all fermions carrying a $U(1)_Y$ charge
i.e. all Standard Model fermions

$$D_\mu \psi_R = [\partial_\mu + ig'YB_\mu] \psi_R$$

$$\mathcal{L}_{\text{Higgs}} = (D_\mu \Phi)^\dagger D_\mu \Phi + \mu^2 \Phi^\dagger \Phi - \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \quad \text{gives mass to EW gauge bosons}$$

$$D_\mu \Phi = \left[\partial_\mu - i\frac{g}{\sqrt{2}}(\tau^+ W_\mu^+ + \tau^- W_\mu^-) - i\frac{g}{2}\tau_3 W_\mu^3 + i\frac{g'}{2}B_\mu \right] \Phi$$

$$\mathcal{L}_{\text{Yukawa}} = -Y_l \bar{L} \Phi \ell_R - Y_d \bar{Q} \Phi d_R - Y_u \bar{Q} \bar{\Phi} u_R + \text{h.c.} \quad \text{gives mass to fermions}$$

$$SU(3) \times SU(2)_L \times U(1)_Y \longrightarrow SU(3) \times U(1)_{em}$$

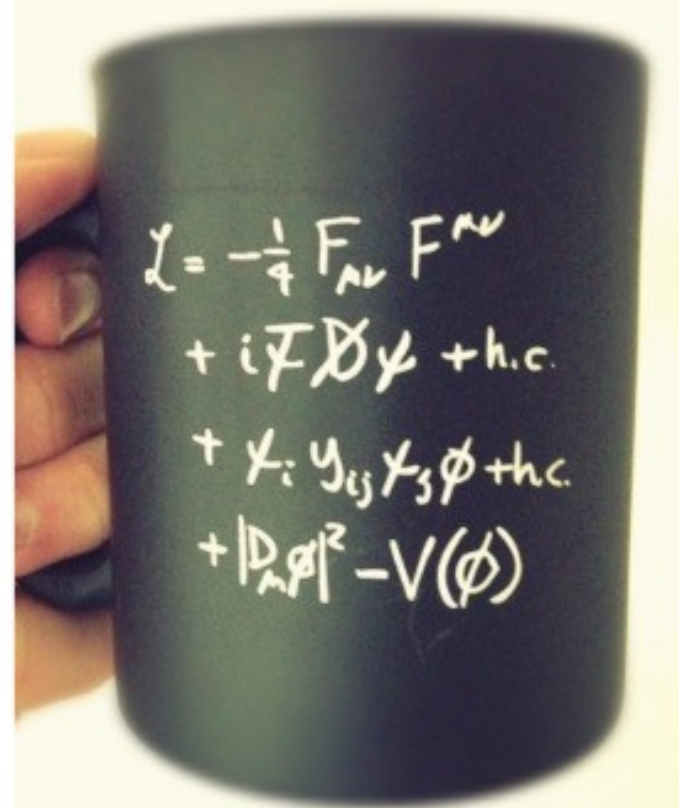
8 massless
gluons

3 massive gauge bosons
 $W^+ W^- Z_0$

8 massless
gluons

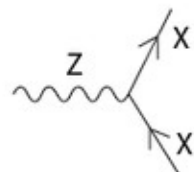
1 massless photon γ





$$\begin{aligned}
 \alpha \longrightarrow \beta &\rightarrow \left(\frac{i}{\not{p} - m + i\varepsilon} \right)_{\beta\alpha} \\
 \mu \text{ wavy} \nu &\rightarrow \frac{-i\eta_{\mu\nu}}{p^2 + i\varepsilon} \\
 \begin{array}{c} \beta \\ \nearrow \\ \alpha \end{array} \text{ wavy} \mu &\rightarrow -ie\gamma_{\beta\alpha}^{\mu} (2\pi)^4 \delta^{(4)}(p_1 + p_2 + p_3).
 \end{aligned}$$

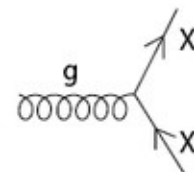
Standard Model Interactions (Forces Mediated by Gauge Bosons)



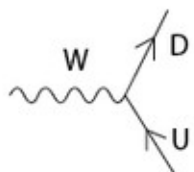
X is any fermion in the Standard Model.



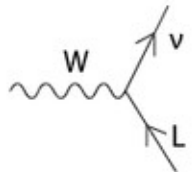
X is electrically charged.



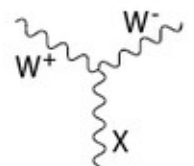
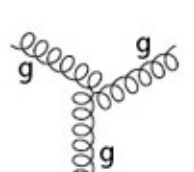
X is any quark.



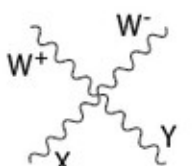
U is a up-type quark;
D is a down-type quark.



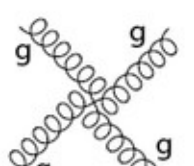
L is a lepton and ν is the corresponding neutrino.



X is a photon or Z-boson.



X and Y are any two electroweak bosons such that charge is conserved.



Conclusioni

- Il modello standard ha un'importanza fondamentale per la fisica delle particelle.
- Tuttavia esso lascia fuori dall'unificazione le forze forti e non spiega le diverse masse e cariche delle particelle.
- Vi sono teorie più avanzate che suppliscono alle sue mancanze ma per ora non sono verificate. L'acceleratore LHC forse ci permetterà di progredire nella ricerca.



WHAT PART OF

$$\begin{aligned} & -\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}^\sigma \gamma^\mu q^\sigma) g_\mu \\ & \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu 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}{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 [\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-)] + \frac{2M}{g^2} \alpha_h - ig_{c_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_\mu^0 W_\nu^- - Z_\mu^0 Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - \\ & A_\mu A_\mu W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w A_\mu Z_\nu^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}{2}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] - g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w} 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}ig [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}{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}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-] - \\ & \frac{1}{2}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^2} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \\ & \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w^2} 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^2}{c_w^2} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- - 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 - d_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu [- (e^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \\ & \frac{1}{3}(d_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)] + \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (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) + (d_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ [(\nu^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) e^\lambda) - (u_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \\ & \gamma^5) C_{\lambda k} d_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)] + \frac{ig}{2\sqrt{2}} \frac{m_e}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1 - \\ & \gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (e^\lambda (1 + \gamma^5) \nu^\lambda)] - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} [H (e^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (e^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_h^2 (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 - \\ & \gamma^5) d_j^\lambda) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda k} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda) + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_h^2 (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda k}^\dagger (1 - \\ & \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (u_j^\lambda u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{m_h^2}{M} H (d_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (u_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_h^2}{M} \phi^0 (d_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \\ & X^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + X^- (\partial^2 - M^2) X^- + X^0 (\partial^2 - M^2) X^0 + Y \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu X^0 X^- - \\ & \partial_\mu X^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu X^+ \bar{Y}) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + \\ & ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu X^- Y - \partial_\mu Y X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu X^+ X^+ - \partial_\mu X^- X^-) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu X^+ X^+ - \\ & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{2}\bar{X}^0 X^0 H] + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \\ & X^- X^0 \phi^-] + \frac{1}{2c_w} ig M [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + ig M s_w [X^0 X^- \phi^+ - X^0 X^+ \phi^-] + \\ & \frac{1}{2}ig M \bar{X}^+ X^+ \phi^0 - X^- X^- \phi^0] \end{aligned}$$

**DO YOU NOT
UNDERSTAND?**