

# Un viaggio nel Modello Standard e dintorni

C.M. Carloni Calame

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare  
Sezione di Pavia

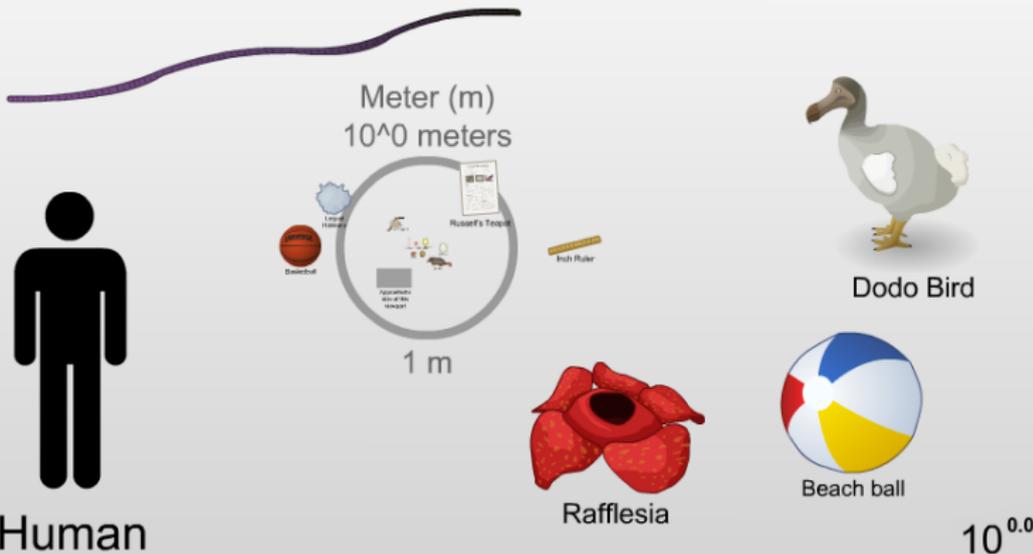


Incontri del martedì

6 dicembre 2016



## Giant Earthworm



Copyright © 2012 Cary and Michael Huang (<http://htwins.net>)

$$\text{Energia caratteristica} = 246 \text{ GeV} \sim 3.94 \times 10^{-8} \text{ J} \rightsquigarrow \lambda = \frac{hc}{E} \simeq 5 \times 10^{-18} \text{ m}$$

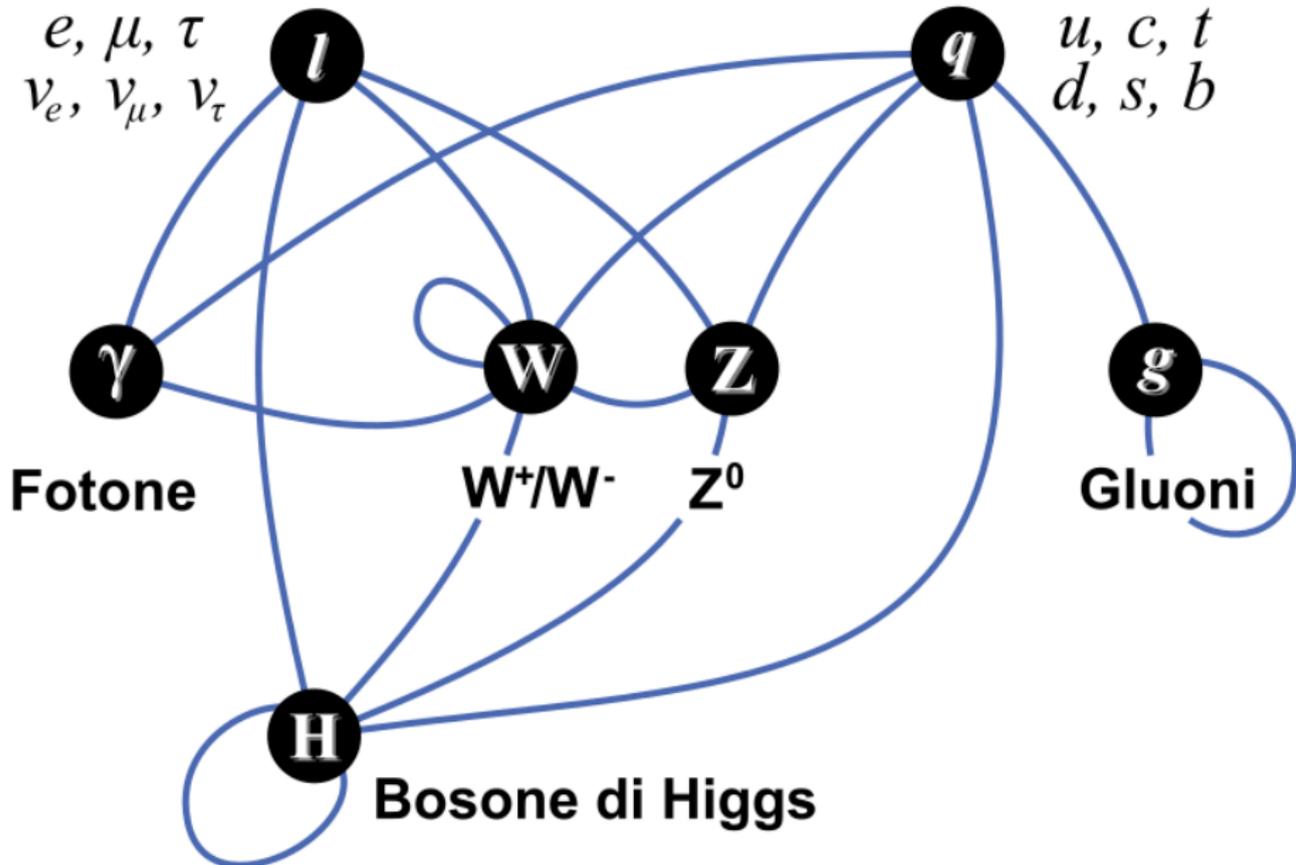
	<p>mass → <math>\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>u</b></p> <p>up</p>	<p>mass → <math>\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>c</b></p> <p>charm</p>	<p>mass → <math>\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>2/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>t</b></p> <p>top</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p><b>g</b></p> <p>gluon</p>	<p>mass → <math>\approx 126 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>0</p> <p>0</p> <p>0</p> <p><b>H</b></p> <p>Higgs boson</p>
<b>QUARKS</b>	<p>mass → <math>\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>d</b></p> <p>down</p>	<p>mass → <math>\approx 95 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>s</b></p> <p>strange</p>	<p>mass → <math>\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1/3</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>b</b></p> <p>bottom</p>	<p>0</p> <p>0</p> <p>1</p> <p><b><math>\gamma</math></b></p> <p>photon</p>	
	<p>mass → <math>0.511 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b>e</b></p> <p>electron</p>	<p>mass → <math>105.7 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\mu</math></b></p> <p>muon</p>	<p>mass → <math>1.777 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>-1</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\tau</math></b></p> <p>tau</p>	<p>mass → <math>91.2 \text{ GeV}/c^2</math></p> <p>0</p> <p>1</p> <p><b>Z</b></p> <p>Z boson</p>	<b>GAUGE BOSONS</b>
	<b>LEPTONS</b>	<p>mass → <math>&lt; 2.2 \text{ eV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_e</math></b></p> <p>electron neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 0.17 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\mu</math></b></p> <p>muon neutrino</p>	<p>mass → <math>&lt; 15.5 \text{ MeV}/c^2</math></p> <p>charge → <math>0</math></p> <p>spin → <math>1/2</math></p> <p><b><math>\nu_\tau</math></b></p> <p>tau neutrino</p>	

**Leptoni**

$e, \mu, \tau$   
 $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$

**Quark**

$u, c, t$   
 $d, s, b$

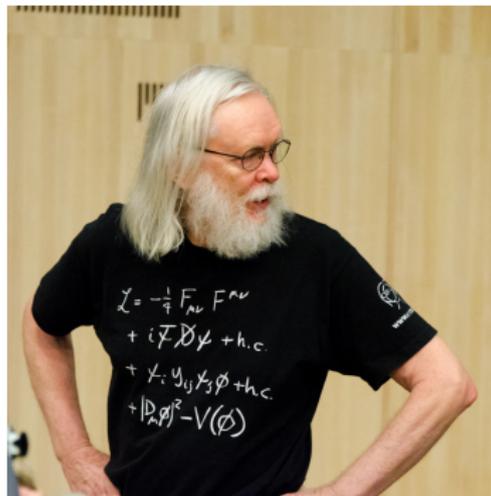
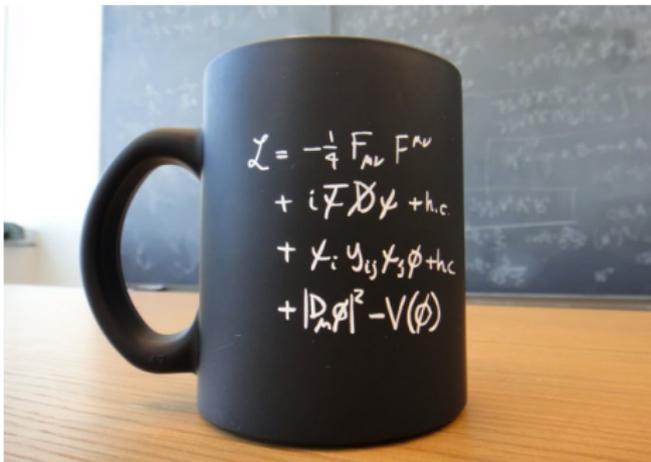


# Campi e particelle

- Nel linguaggio moderno, le particelle elementari sono interpretate come eccitazioni dei rispettivi campi, obbedendo alla meccanica quantistica
- La teoria quantistica dei campi fornisce il formalismo necessario
- La dinamica dei campi e delle loro interazioni è contenuta nella densità di Lagrangiana  $\mathcal{L}$
- *Diagrammi di Feynman*

# Campi e particelle

- Nel linguaggio moderno, le particelle elementari sono interpretate come eccitazioni dei rispettivi campi, obbedendo alla meccanica quantistica
- La teoria quantistica dei campi fornisce il formalismo necessario
- La dinamica dei campi e delle loro interazioni è contenuta nella densità di Lagrangiana  $\mathcal{L}$
- *Diagrammi di Feynman*



John Ellis, CERN

# Campi e parti

- Nel linguaggio eccitazioni d
- La teoria qu
- La dinamica Lagrangiana
- Diagrammi c



$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c - \frac{1}{2}g^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^a g_\nu^b g_\mu^c g_\nu^d - \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 - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\mu^- W_\nu^+) - Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\nu^- - W_\nu^- \partial_\mu 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_\nu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\nu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\nu^+ W_\mu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\nu^+ Z_\nu^0 W_\mu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) + 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_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^- W_\mu^-) - 2A_\nu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\mu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left( \frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^2}{g^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 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_\nu^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) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{2M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M_\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}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\nu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{2c_w}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{2c_w}{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{2c_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\nu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig s_w \lambda_{ij}^a (q_i^\dagger \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{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) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{2}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}_{\lambda e} e^\lambda) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda d} d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\kappa e} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda C_{\kappa d}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda e} (1 - \gamma^5) e^\lambda) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}_{\lambda e} (1 + \gamma^5) e^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda e} (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) - m_\nu^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep\dagger}_{\lambda e} (1 - \gamma^5) \nu^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{M}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda e}^\nu (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda e}^\nu (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda d} (1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda d} (1 + \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda d}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) - m_u^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda d}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\lambda) - \frac{g}{2} \frac{M}{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{C}^a \partial^2 C^a + g_s f^{abc} \bar{G}^a C^b g_\mu^c + \\
 & \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}^- 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}ig M (\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} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

interpretate come  
ca quantistica

ssario  
i nella densità di



CERN

# Sotto l'incantesimo delle simmetrie di gauge

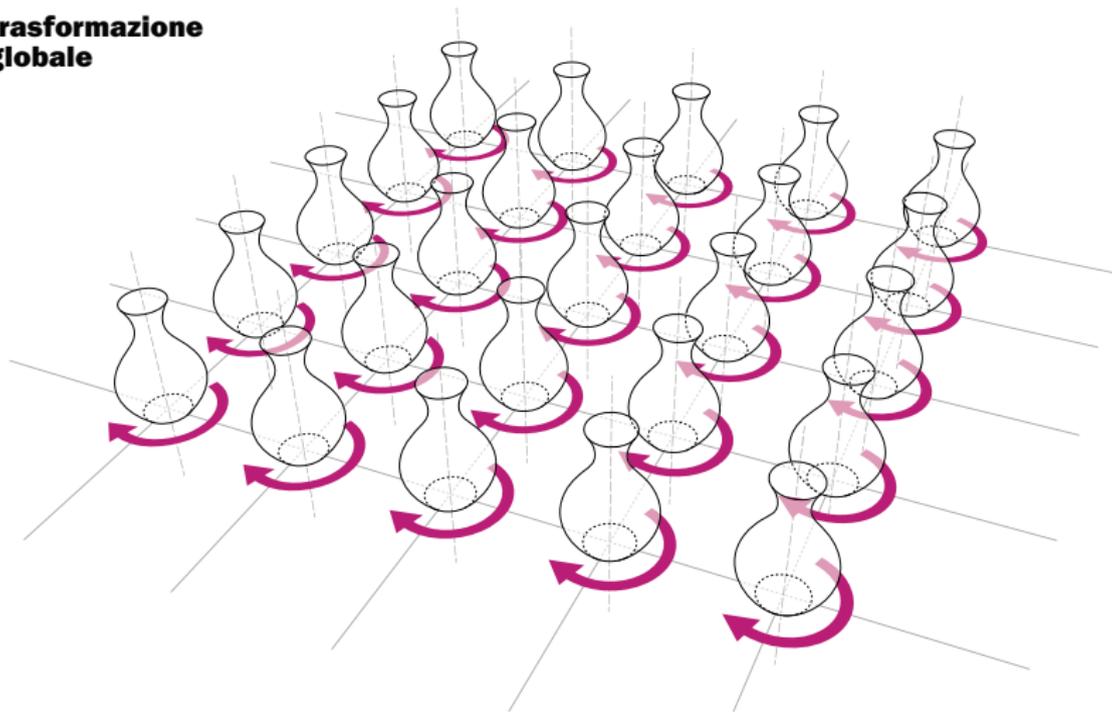
- Esiste un legame profondo fra leggi di conservazione e simmetrie della lagrangiana.
- Ad esempio, la conservazione dell'impulso-energia deriva dall'invarianza spazio-temporale delle equazioni fisiche.
- Tutte le interazioni possono essere derivate dalla richiesta che i sistemi fisici siano invarianti sotto opportune operazioni di simmetria.
- Le simmetrie che generano le interazioni nel Modello Standard sono **simmetrie locali**, dette **simmetrie di gauge**.
- Le simmetrie di gauge riflettono la conservazione della carica, intesa in senso generalizzato.
- La prima, e "prototipica", teoria di gauge è stata l'elettrodinamica quantistica (QED).



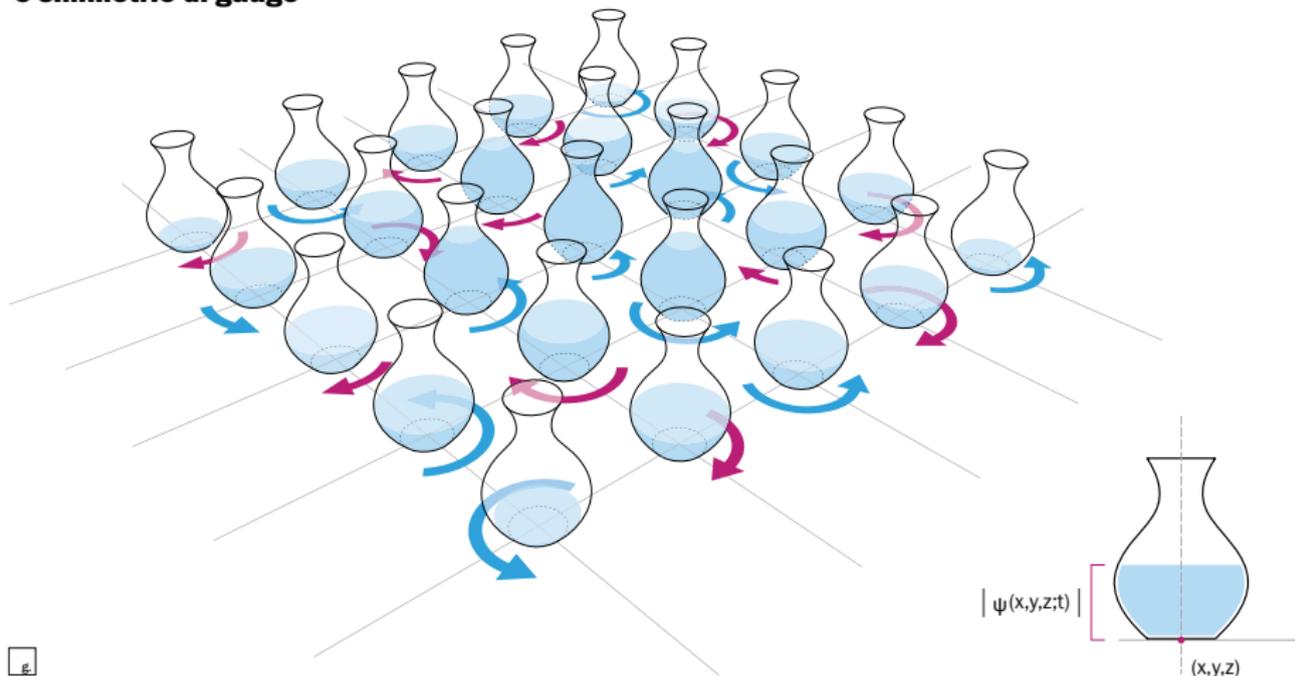
Emmy Noether, 1882-1935

*Fräulein Noether was the most significant creative mathematical genius thus far produced since the higher education of women began. A. Einstein, NYT*

## trasformazione globale



## funzione d'onda e simmetrie di gauge



e.

# La simmetria di gauge del Modello Standard

- Per descrivere le interazioni debole, elettromagnetica e forte, il Modello Standard è fondato sulla simmetria

$$[U(1)_Y \otimes SU(2)_L]_{\text{ElectroWeak}} \otimes [SU(3)_C]_{\text{QCD}}$$

- Ad ogni gruppo di simmetria sono associati bosoni vettoriali, mediatori delle interazioni fra campi di materia
  - $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \mapsto$  **due neutri** ( $\gamma$  e  $Z^0$ )
  - $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \mapsto$  **due carichi** ( $W^+$  e  $W^-$ )
  - $SU(3)_{\text{QCD}} \mapsto$  **otto gluoni "colorati"**
- In assenza di un meccanismo opportuno, le particelle sono **tutte prive di massa**.
- Pur essendo  $\mathcal{L}$  invariante, lo *stato di vuoto* (assenza di eccitazioni dei campi, minimo dell'energia del sistema) può non esserlo.
- Rottura spontanea della simmetria del vuoto, conservando le "buone" proprietà della teoria.
- **Meccanismo di Higgs:** per mezzo della RSS nel settore EW è possibile generare una massa per **tutte le particelle elementari**.

# La simmetria di gauge del Modello Standard

- Per descrivere le interazioni debole, elettromagnetica e forte, il Modello Standard è fondato sulla simmetria

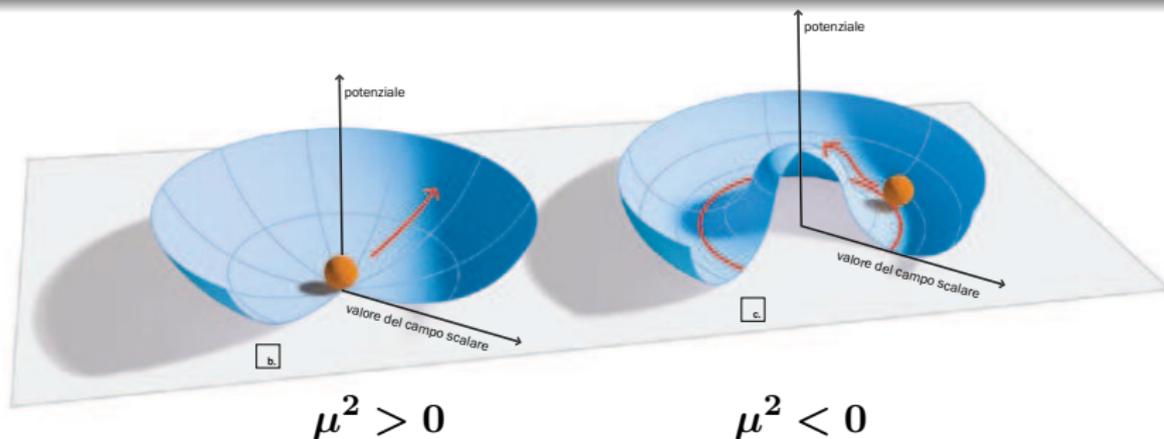
$$[U(1)_Y \otimes SU(2)_L]_{\text{ElectroWeak}} \otimes [SU(3)_C]_{\text{QCD}}$$

- Ad ogni gruppo di simmetria sono associati bosoni vettoriali, mediatori delle interazioni fra campi di materia
  - $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \mapsto$  **due neutri** ( $\gamma$  e  $Z^0$ )
  - $U(1)_Y \otimes SU(2)_L \mapsto$  **due carichi** ( $W^+$  e  $W^-$ )
  - $SU(3)_{\text{QCD}} \mapsto$  **otto gluoni “colorati”**
- In assenza di un meccanismo opportuno, le particelle sono **tutte prive di massa**.
- Pur essendo  $\mathcal{L}$  invariante, lo *stato di vuoto* (assenza di eccitazioni dei campi, minimo dell'energia del sistema) può non esserlo.
- Rottura spontanea della simmetria del vuoto, conservando le “buone” proprietà della teoria.
- **Meccanismo di Higgs:** per mezzo della RSS nel settore EW è possibile generare una massa per **tutte le particelle elementari**.

**Il “vuoto” è pervaso da un campo scalare  $\langle \phi_0 \rangle = 246 \text{ GeV}$**

# Rottura spontanea della simmetria

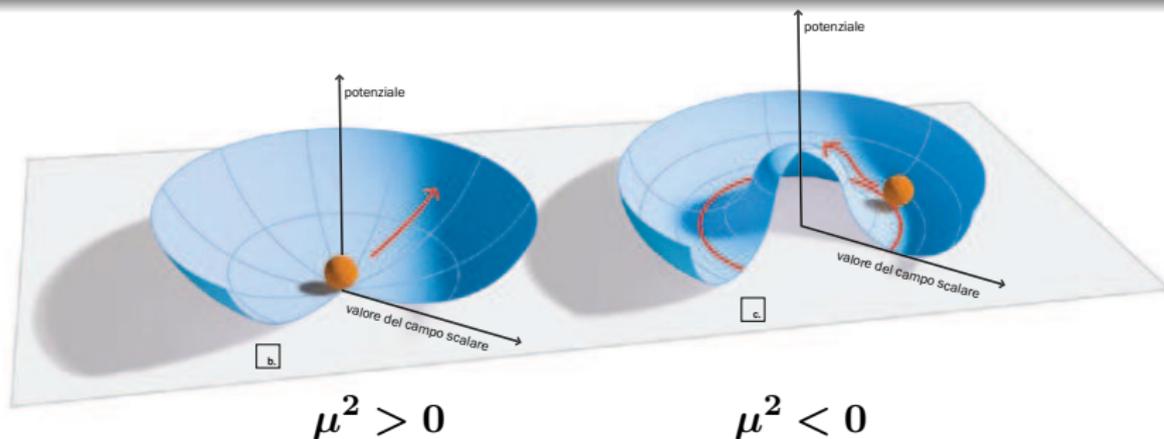
$$\text{Potenziale del campo di Higgs: } V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2$$



$$\langle \phi_0 \rangle^2 = v^2 = \frac{-\mu^2}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}G_{\text{Fermi}}} \quad \leadsto \quad v = 246 \text{ GeV}$$
$$M_H = \sqrt{-2\mu^2} = \sqrt{2\lambda}v$$

# Rottura spontanea della simmetria

$$\text{Potenziale del campo di Higgs: } V(\phi) = \mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda(\phi^\dagger \phi)^2$$



$$\langle \phi_0 \rangle^2 = v^2 = \frac{-\mu^2}{\lambda} = \frac{1}{\sqrt{2}G_{\text{Fermi}}} \quad \rightsquigarrow \quad v = 246 \text{ GeV}$$

$$M_H = \sqrt{-2\mu^2} = \sqrt{2\lambda}v$$

Per ogni particella elementare:    **massa  $\propto v$**

# Il bosone di Higgs e la massa delle particelle elementari

## Come funziona il campo di Higgs

Alla ricerca della particella che dà la massa alla materia

Il campo **permea tutto l'universo**.  
Le particelle che lo attraversano  
avvertono ognuna  
una resistenza diversa.  
Questa **resistenza** è quella  
che chiamiamo **massa**



Per spiegare come mai  
la materia abbia massa,  
il fisico Peter Higgs  
nel 1960 ha ipotizzato  
l'esistenza del bosone  
di Higgs.

Il bosone di Higgs  
è la particella che dà  
la massa a tutte le altre.  
Ciò avviene quando queste  
interagiscono col campo  
prodotto dall'Higgs.

Provare l'esistenza  
dell'Higgs è uno degli  
obiettivi principali  
di LHC, in particolare  
degli esperimenti ATLAS  
e CMS.

Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

CERN/INFSI

# I "padri" del settore elettro-debole del Modello Standard



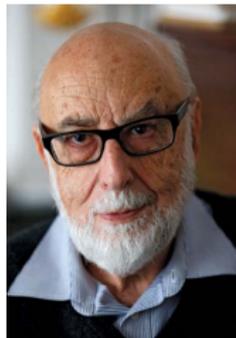
Feynman, Schwinger, Tomonaga  
*Elettrodinamica Quantistica*  
Nobel 1965

Glashow, Salam, Weinberg  
*Teoria unificata elettrodebole*  
Nobel 1979



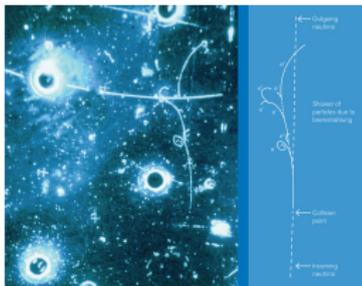
't Hooft, Veltman  
*Rinormalizzabilità del Modello Standard*  
Nobel 1999

Brout, Englert, Higgs  
*Meccanismo di rottura spontanea delle simmetrie*  
Nobel 2013

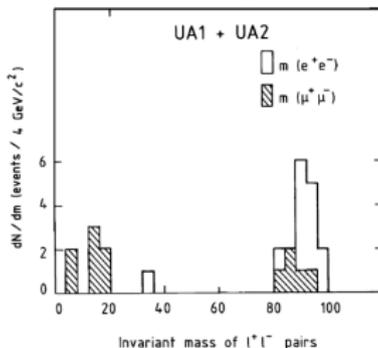
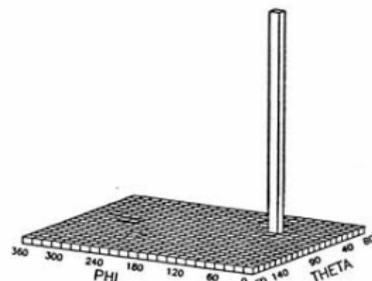


# Una storia di predizioni: bosoni vettori $Z^0$ e $W^\pm$

- La scoperta dell'Higgs è solo l'ultimo tassello.
- Le predizioni del Modello Standard hanno guidato la ricerca in fisica delle alte energie per 40+ anni.

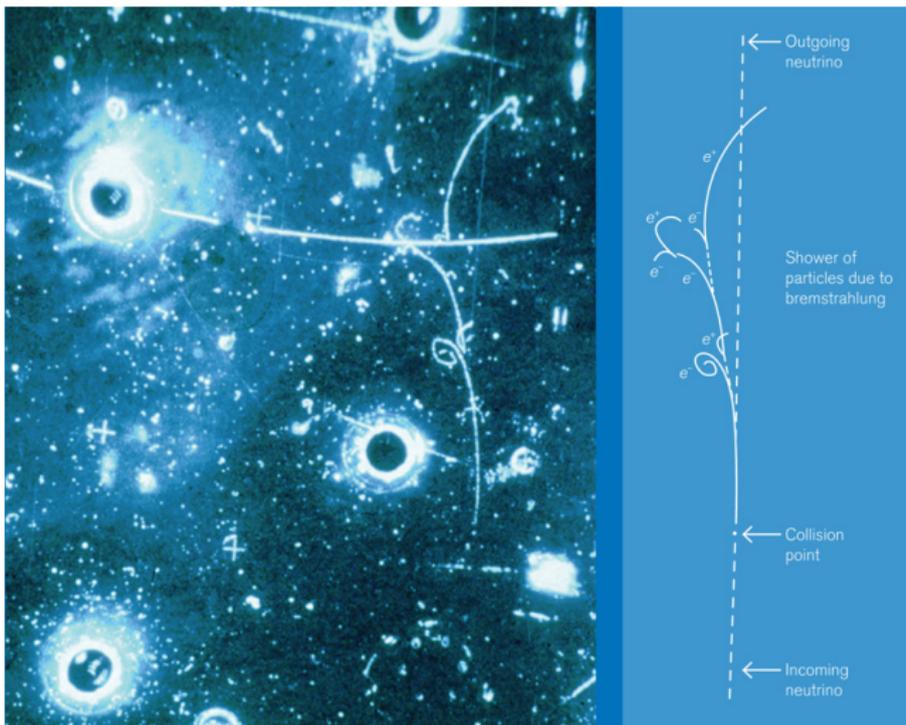


Camera a bolle **Gargamelle**, CERN, 1973  
Evidenza di corrente neutra debole, scattering  $\nu e \rightarrow \nu e$



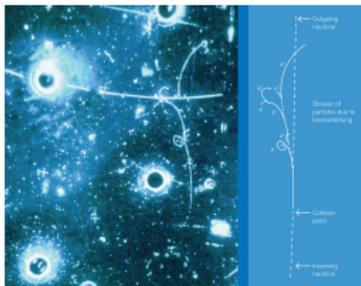
Esperimenti **UA1** e **UA2**, Cern, 80s.  
Evento di decadimento  $W \rightarrow \ell \nu$  e misura della massa della  $Z^0$  in collisioni  $p\bar{p}$

# Una storia di predizioni: bosoni vettori $Z^0$ e $W^\pm$

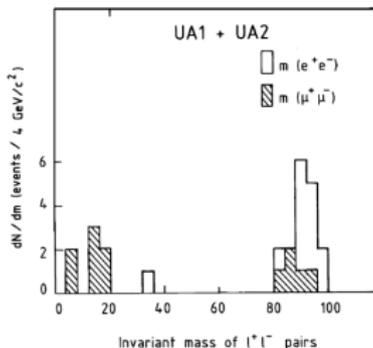
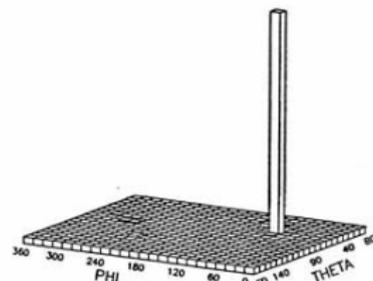


# Una storia di predizioni: bosoni vettori $Z^0$ e $W^\pm$

- La scoperta dell'Higgs è solo l'ultimo tassello.
- Le predizioni del Modello Standard hanno guidato la ricerca in fisica delle alte energie per 40+ anni.



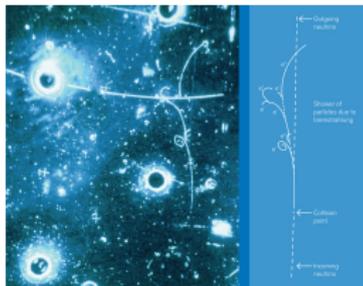
Camera a bolle **Gargamelle**, CERN, 1973  
Evidenza di corrente neutra debole, scattering  $\nu e \rightarrow \nu e$



Esperimenti **UA1** e **UA2**, Cern, 80s.  
Evento di decadimento  $W \rightarrow \ell \nu$  e misura della massa della  $Z^0$  in collisioni  $p\bar{p}$

# Una storia di predizioni: bosoni vettori $Z^0$ e $W^\pm$

- La scoperta dell'Higgs è solo l'ultimo tassello.
- Le predizioni del Modello Standard hanno guidato la ricerca in fisica delle alte energie per 40+ anni.



Camera a bolle **Gargamelle**, CERN, 1973  
Evidenza di corrente neutra debole, scattering  $\nu e \rightarrow \nu e$



Rubbia e van der Meer, Nobel 1984

## QUANTUM BEAUTY III: BEAUTY AT THE CORE OF NATURE 267

tric charge must be zero, because it's got to look like a quantum of "nothing." Since we knew what we were looking for, it was possible to design an intelligent strategy to search for the Higgs particle. The key process, through which the Higgs particle was discovered, is depicted in figure 36.

The first step is to produce it. The dominant production mechanism is quite remarkable. Ordinary matter couples very feebly to the Higgs particle  $H$ . (That is why electrons and protons can be much lighter than

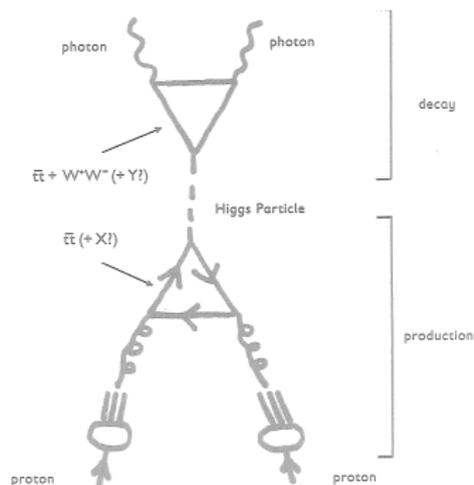
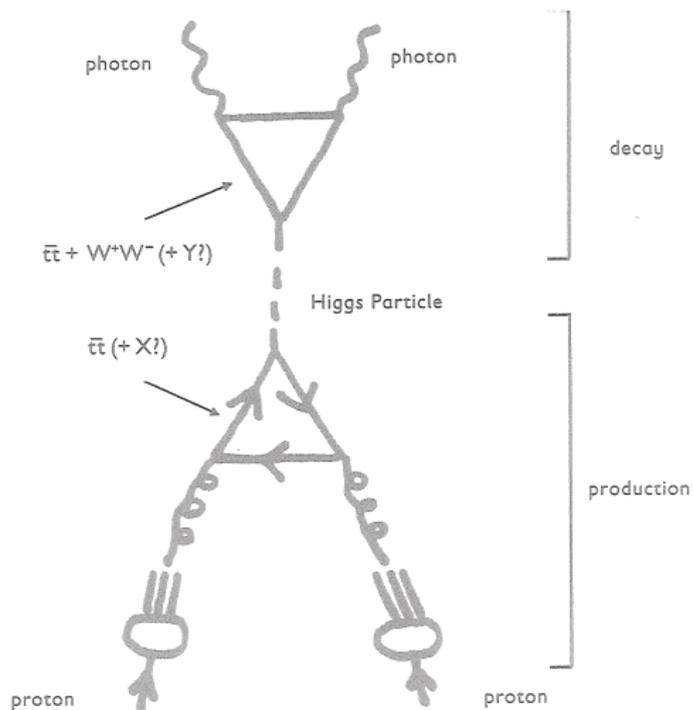


FIGURE 36. THIS SKETCH DEPICTS THE PROCESS THROUGH WHICH THE HIGGS PARTICLE WAS ACCESSED THROUGH GLUONS AND FIRST OBSERVED EXPERIMENTALLY. IT IS A TOUR DE FORCE THAT PUTS MANY ASPECTS OF THE CORE AND DEEP PRINCIPLES OF QUANTUM THEORY TO WORK SIMULTANEOUSLY.

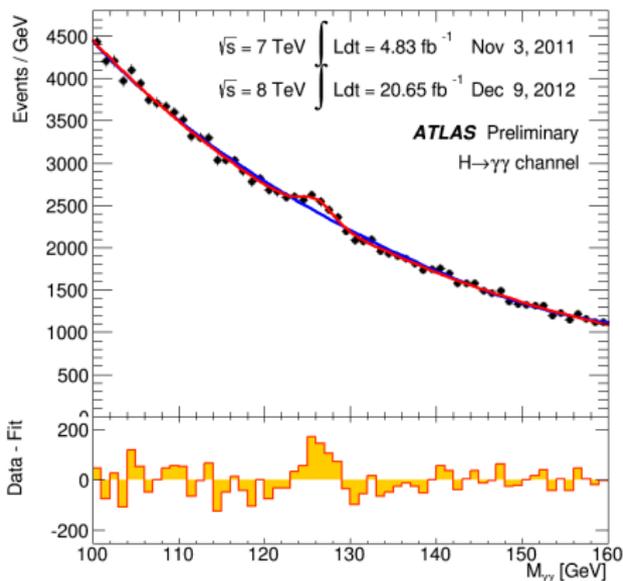
# La scoperta del bosone di Higgs



**Il Modello Standard in tutta la sua gloria!**

# Il bosone di Higgs emerge dai dati

- Il bosone di Higgs è stato rivelato direttamente all'**LHC** del **CERN**, un collisionatore protone-protone con energia di  $7 \rightsquigarrow 8 \rightsquigarrow 13$  TeV, **(anche) nel canale predominante di produzione con fusione gluone-gluone, e successivo decadimento in due fotoni!**



Citation: C. Patrignani et al. (Particle Data Group), Chin. Phys. C, **40**, 100001 (2016)

**H<sup>0</sup>**

J = 0

In the following  $H^0$  refers to the signal that has been discovered in the Higgs searches. Whereas the observed signal is labeled as a spin 0 particle and is called a Higgs Boson, the detailed properties of  $H^0$  and its role in the context of electroweak symmetry breaking need to be further clarified. These issues are addressed by the measurements listed below.

Concerning mass limits and cross section limits that have been obtained in the searches for neutral and charged Higgs bosons, see the sections "Searches for Neutral Higgs Bosons" and "Searches for Charged Higgs Bosons ( $H^\pm$  and  $H^{\pm\pm}$ )", respectively.

## H<sup>0</sup> MASS

VALUE (GeV)

**125.09 ± 0.21 ± 0.11**

DOCUMENT ID

1,2 AAD

TECN

15B LHC

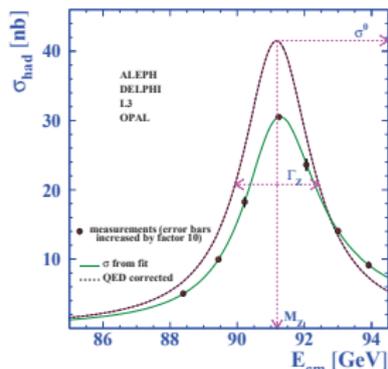
COMMENT

pp, 7, 8 TeV

Particle Data Group, 2016

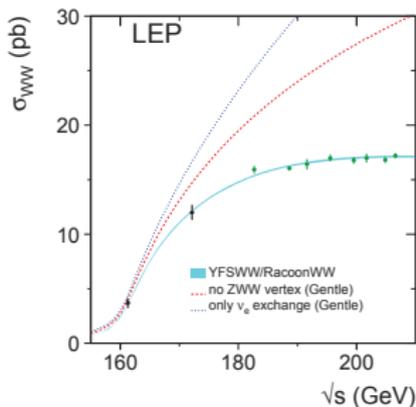
# Fisica di precisione: l'era di LEP al CERN

- Il **Large Electron-Positron collider** (1989-2000) era un acceleratore  $e^+e^-$  con energia  $91 \sim 209$  GeV, **realizzato (principalmente) per misure di precisione dei bosoni  $Z^0$  e  $W^\pm$ .**

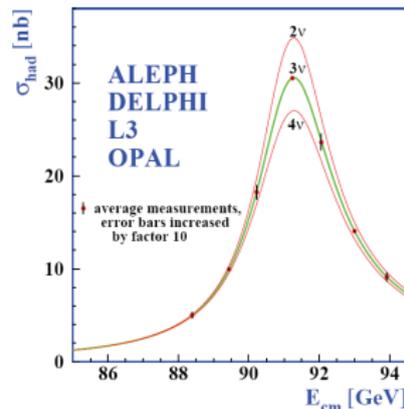


Sezione d'urto

$$e^+e^- \rightarrow Z^0 \rightarrow \text{adroni}$$



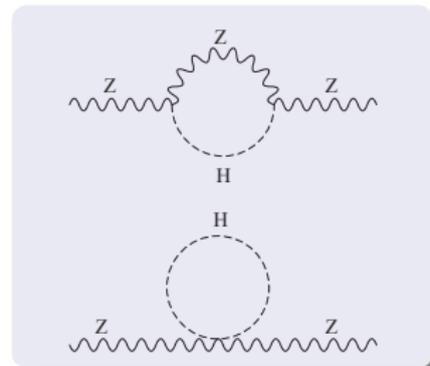
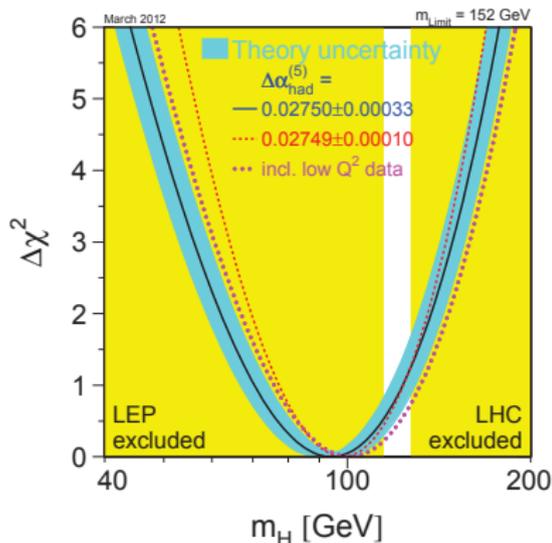
Sezione d'urto  $e^+e^- \rightarrow W^+W^-$



Conteggio del numero di neutrini leggeri

# Fisica di precisione: la *Blue Band* e il bosone di Higgs

- Sapevamo “dov’era” l’Higgs, *prima della scoperta*? **Sì!**
- Le osservabili *di precisione* sono sensibili a correzioni dovute allo scambio di particelle virtuali.  
**Effetto puramente quantistico!**



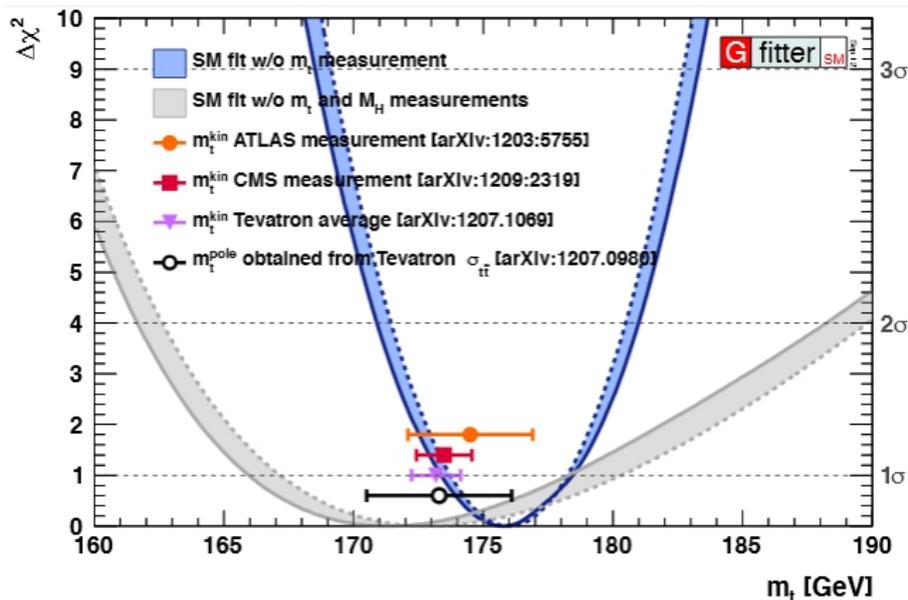
**Marzo 2012:**

$$M_H = 94_{-24}^{+29} \text{ GeV (68\% CL)}$$

$$M_H < 152 \text{ GeV (95\% CL)}$$

- Dopo 4 mesi gli esperimenti di LHC hanno annunciato la **scoperta di un bosone neutro compatibile con il bosone di Higgs dello Standard Model con massa 126 GeV, in accordo con la *Blue Band*!**

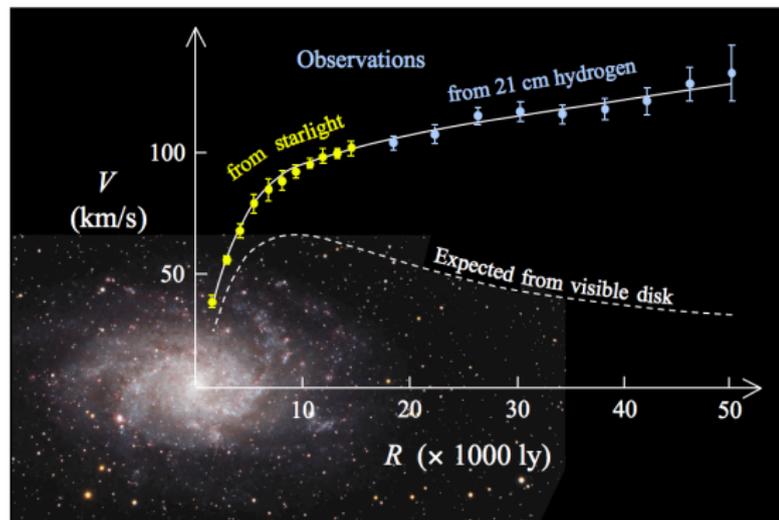
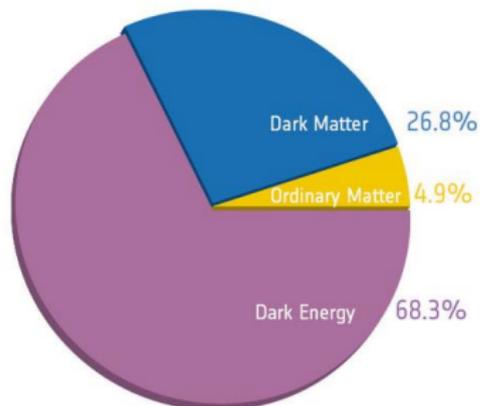
- Analogamente, la massa del *quark top* può essere predetta dai dati di precisione del Modello Standard.
- Scoperta diretta al **TeVatron** (Fermilab) nel 1995, studiato in dettaglio al TeVatron ed ora all'LHC.



# Ma allora non ci sono crepe nel Modello Standard?

*There is a crack in everything. That's how the light gets in. (Leonard Cohen)*

- Come/dove si inquadra la gravità, ovvero la relatività generale di Einstein?
- È possibile unificare lo spettro e ridurre i parametri liberi del Modello Standard? Inglobare la sua simmetria in una più generale? Unificare ulteriormente le interazioni di gauge?
- Quale meccanismo fornisce una massa ai neutrini?
- Perché i fermioni si raggruppano proprio in tre generazioni (famiglie)?
- Come si è generata l'asimmetria barionica (materia vs. anti-materia) nell'universo?
  
- Come si spiegano le evidenze di esistenza di materia oscura nell'universo?
- La discrepanza fra il valore sperimentale e teorico del momento magnetico anomalo del muone è un indizio di nuova fisica oltre il Modello Standard?



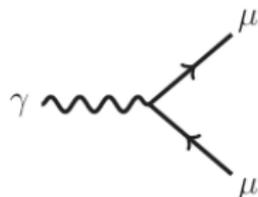
Curva della velocità di rotazione della materia visibile attorno alla galassia M33

**Nel Modello Standard non esistono “candidati” plausibili per la Dark Matter**

# Momento magnetico anomalo del muone $g-2$

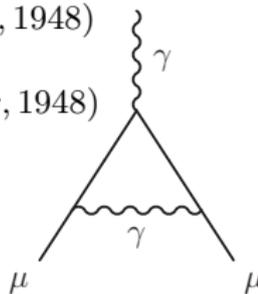
- Descrive come il fermione si accoppia con un campo magnetico, a causa del suo moto di spin.
- L'equazione di Dirac prevede che il **fattore  $g$  sia 2** (in assenza di correzioni quantistiche).

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2mc} \vec{s}, \quad a \equiv \frac{g-2}{2} \quad (\leadsto g = 2, \text{Dirac 1928})$$



$$\mu^{exp} = \frac{e\hbar}{2mc} \times (1 + 0.00119^{\pm 5}) \quad (\text{Kusch and Foley, 1948})$$

$$\mu^{teoria} = \frac{e\hbar}{2mc} \times (1 + 0.00116) = \frac{e\hbar}{2mc} \times \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right) \quad (\text{Schwinger, 1948})$$



- Oggi:

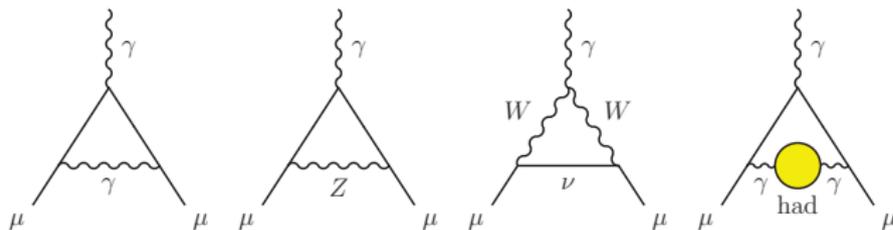
$$a_{\text{muone}}^{\text{E821}} = 116592091^{\pm 63} \times 10^{-11} \quad [0.5 \text{ ppm}]$$

$$a_{\text{muone}}^{\text{teoria}} = 116591761^{\pm 57} \times 10^{-11}$$

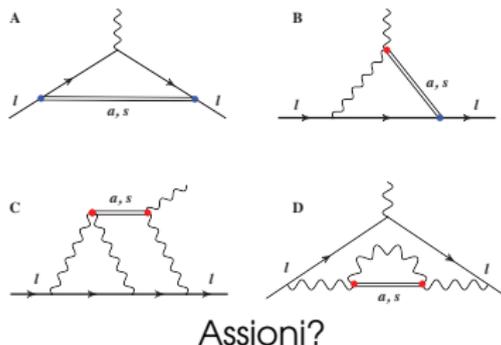
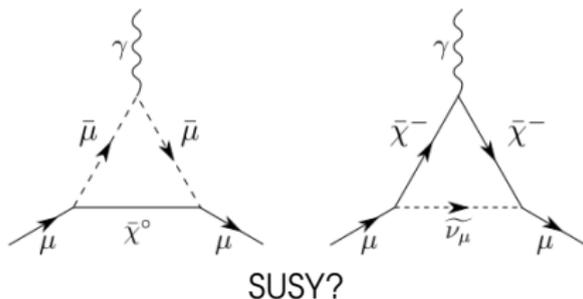
$$a_{\text{muone}}^{\text{E821}} - a_{\text{muone}}^{\text{teoria}} = 3.9\sigma$$

# Momento magnetico anomalo del muone $g-2$ : il calcolo teorico

- Da Schwinger in poi, il calcolo teorico ha raggiunto un'accuratezza incredibile ed ha richiesto un grande sforzo di tanti gruppi

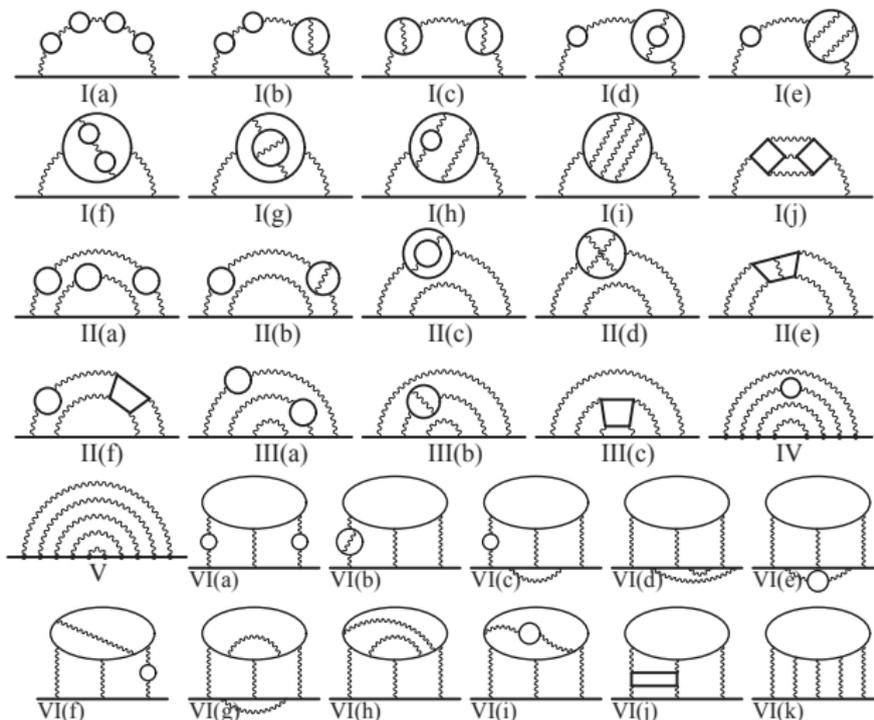


- Il contributo di QED è noto fino a 5 loop!
- La discrepanza può essere spiegata con l'esistenza di interazioni e particelle oltre quelle previste dal Modello Standard?



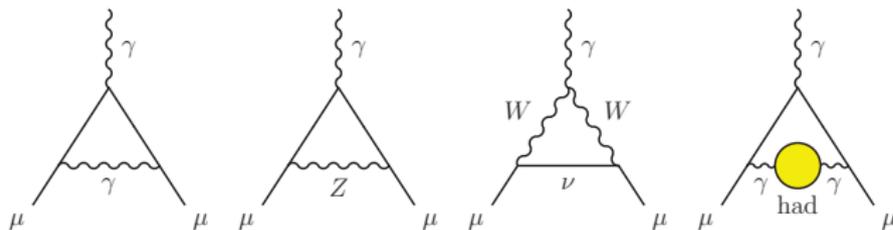
# Momento magnetico anomalo del muone $g-2$ : il calcolo teorico

- Sottoinsieme (piccolo) dei contributi di QED a 5 loop

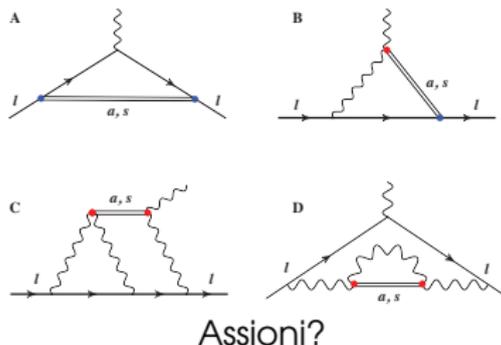
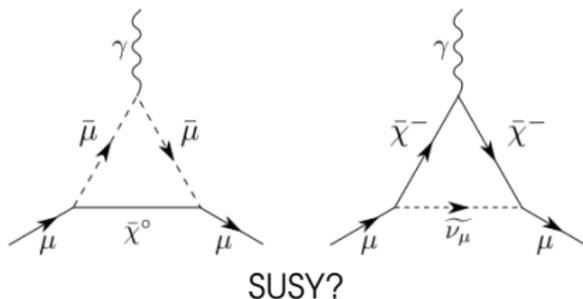


# Momento magnetico anomalo del muone $g-2$ : il calcolo teorico

- Da Schwinger in poi, il calcolo teorico ha raggiunto un'accuratezza incredibile ed ha richiesto un grande sforzo di tanti gruppi



- Il contributo di QED è noto fino a 5 loop!
- La discrepanza può essere spiegata con l'esistenza di interazioni e particelle oltre quelle previste dal Modello Standard?



- La nostra attività principale è rivolta, ma non limitata, alla **fenomenologia delle interazioni fondamentali**

↳ **Prof. Guido Montagna**

↳ **Prof. Oreste Nicosini**

↳ **Prof. Fulvio Piccinini**

↳ **Dott. Stefano Boselli**

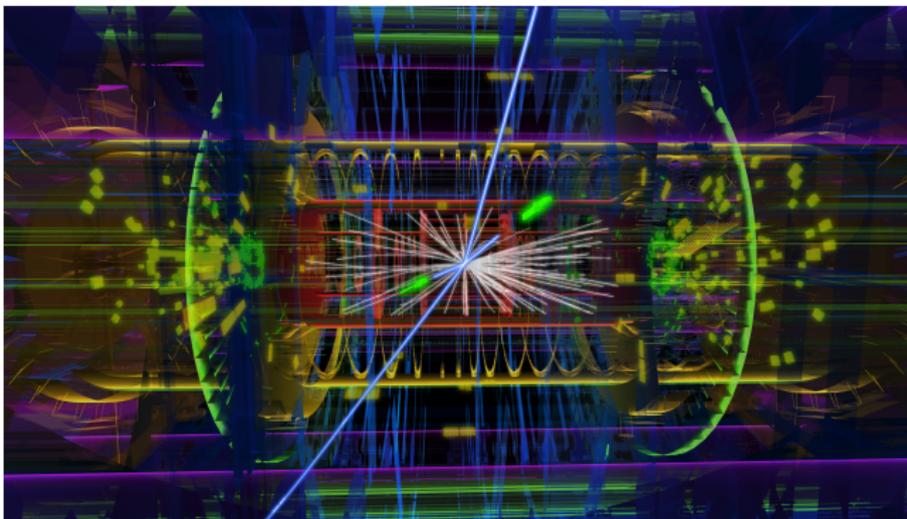
↳ **Dott. Homero Martinez**

↳ **Dott.ssa Jia Zhou**

↳ **tanti collaboratori di università, centri di ricerca, laboratori italiani e stranieri**

# Qual è il nostro lavoro di ricerca di tutti i giorni?

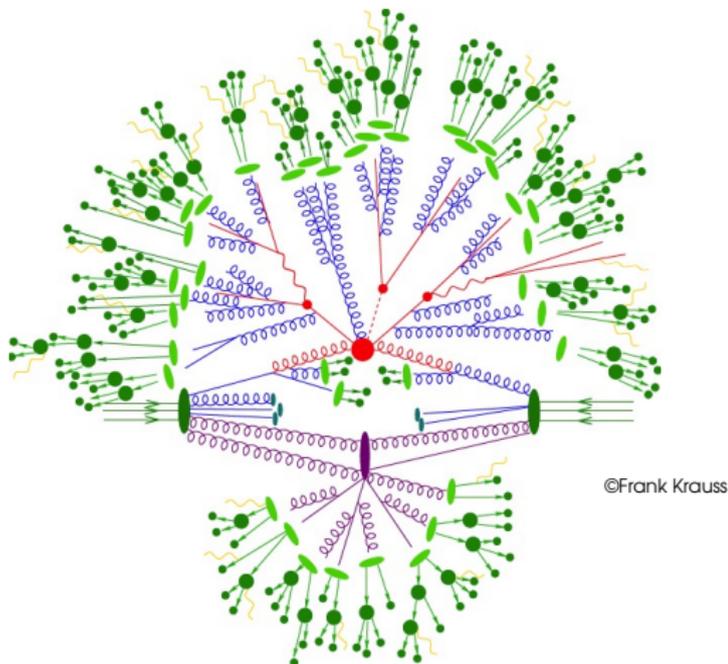
- **Creare un ponte fra teoria ed esperimento**, ovvero:
- partire da ciò che detta la lagrangiana per arrivare a predizioni che siano (quasi) direttamente confrontabili con i dati sperimentali.



Evento con  $2e2\mu$ , ATLAS Experiment@CERN, 2016

# Qual è il nostro lavoro di ricerca di tutti i giorni?

- **Creare un ponte fra teoria ed esperimento**, ovvero:
- partire da ciò che detta la lagrangiana per arrivare a predizioni che siano (quasi) direttamente confrontabili con i dati sperimentali.

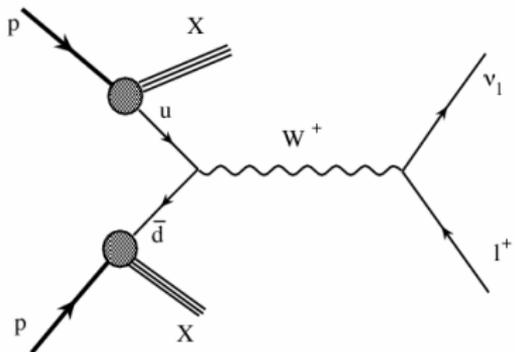


**Divide and conquer!**

# Qual è il nostro lavoro di ricerca di tutti i giorni?

- Ciò richiede lo sviluppo di programmi di *simulazione*, basati sulla tecnica numerica detta “metodo Monte Carlo”, che permettono la *generazione* di eventi.
- Il metodo Monte Carlo utilizza numeri casuali per risolvere problemi matematici. È applicato in una vastissima varietà di discipline.
- Il metodo Monte Carlo permette di risolvere problemi la cui soluzione è difficile o impossibile per via analitica, ad esempio integrazione su “spazi delle configurazioni” multi-dimensionali.
- I processi fisici sono intrinsecamente probabilistici (meccanica quantistica!).

# Dai diagrammi di Feynman agli eventi simulati



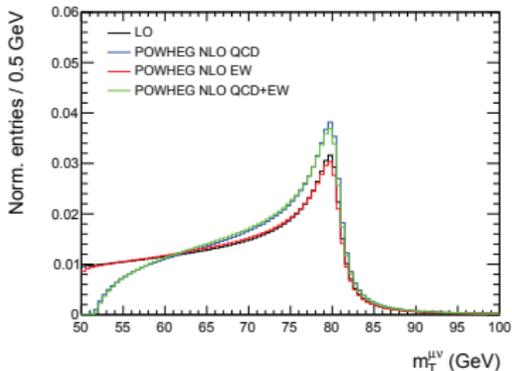
```
anum = 1.d0
n1 = nphleg(1)
n2 = nphleg(2)
n3 = nphleg(3)
n4 = nphleg(4)

if (iswitchforidpart.eq.0) then ! always the case if idpart = 0
  if (n1.ge.1) then
    do i = 1,n1
      anum = anum * 1.d0/dot(p1,qall(:,i)) *qall(0,i)*p1(0)
      mothersph(i) = 1
    enddo
  endif
  if (n2.ge.1) then
    do i = n1+1,n1+n2
      anum = anum * 1.d0/dot(p2,qall(:,i)) *qall(0,i)*p2(0)
      mothersph(i) = 2
    enddo
  endif
endif
```

calcolo simbolico e numerico



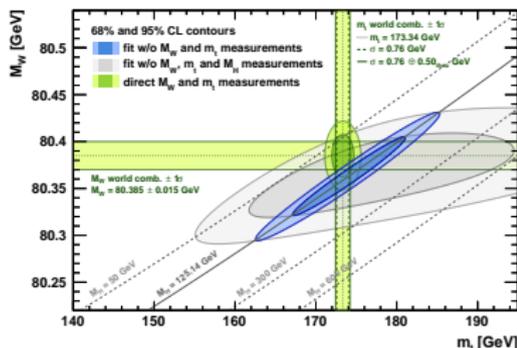
cluster HPC *Neowulf*, ~ 450 cores



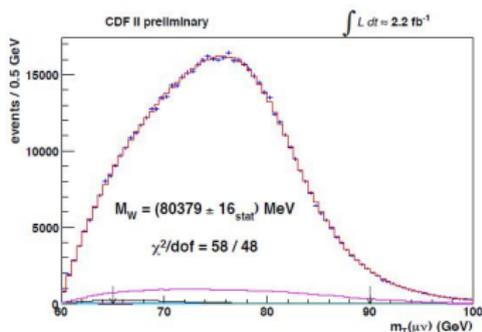
Eventi, da confrontare con i dati



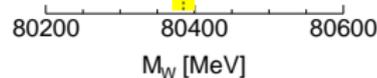
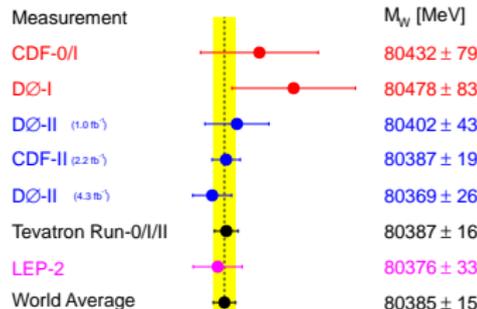
- Errore teorico nella misura della massa dei bosoni  $W^\pm$  agli acceleratori adronici.



Gfitter, EPJC 74 (2014) 3046



### Mass of the W Boson



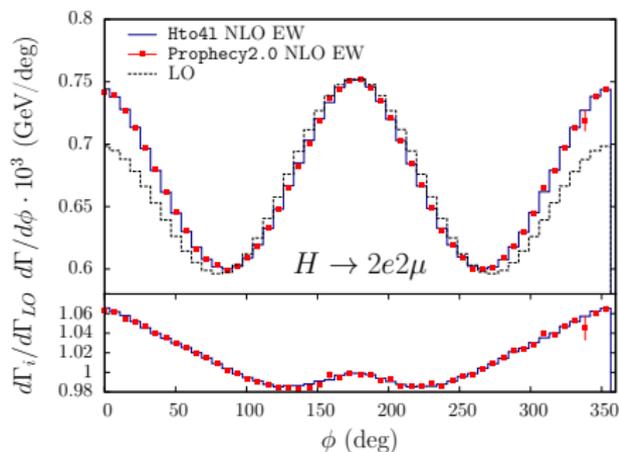
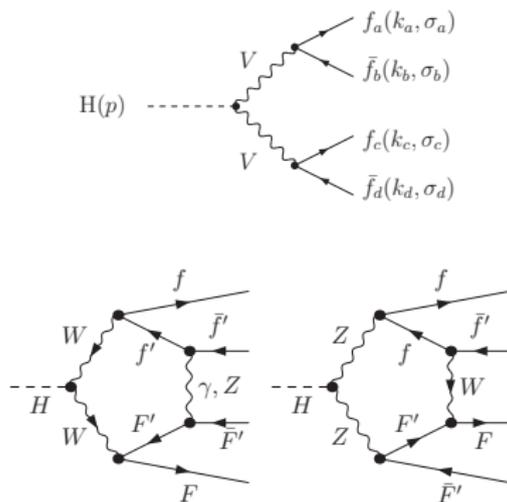
March 2012

Tevatron EWWG, arXiv:1204.0042

**HORACE, POWHEG**

# Alcuni progetti di ricerca

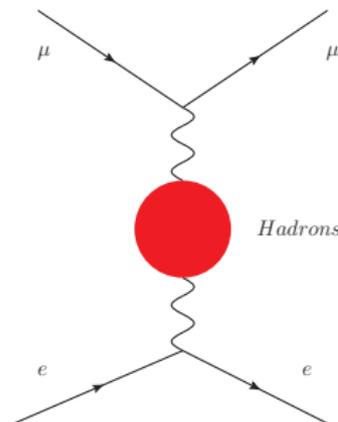
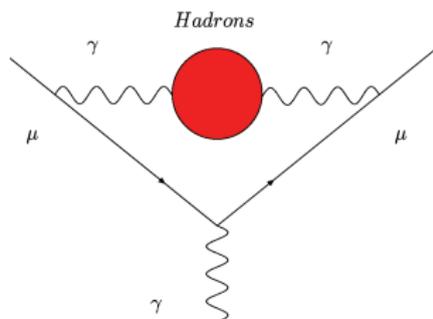
- Decadimento del bosone di Higgs in 4 leptoni carichi.
- Calcolo di precisione nel Modello Standard per misurare le proprietà intrinseche del bosone di Higgs.
- Estensione ad effetti oltre il Modello Standard nel formalismo delle *teorie di campo effettive* (EFT).



Hto41

# Alcuni progetti di ricerca

- Studio del processo  $\mu e \rightarrow \mu e$  per una determinazione teorica **indipendente** del momento magnetico anomalo del muone.
- È possibile determinare la parte *più controversa e meno precisa* di  $a_\mu$  (il contributo adronico) mediante uno studio di precisione dello scattering  $\mu e \rightarrow \mu e$ .
- La proposta è quella di utilizzare un fascio di muoni da 150 GeV, disponibile nella *North Area* del CERN, su una targhetta fissa di berillio o carbonio.



BabaYaga

**Grazie!**

**Grazie!**  
**Domande?**