

# INTRODUZIONE ALLA FISICA DELLE PARTICELLE

IL MODELLO STANDARD E IL BOSONE DI HIGGS

Gabriele D'Anniballe

28/02/2025

INTERNATIONAL



**MASTERCLASSES**

hands on particle physics



# INTRODUZIONE

- Fisica delle particelle
- Studia la Natura al livello più fondamentale
  - Quali sono i costituenti della materia?
  - Quali sono le loro interazioni?

# INTRODUZIONE

- Fisica delle particelle
- Studia la Natura al livello più fondamentale
  - Quali sono i costituenti della materia?  
Particelle elementari
  - Quali sono le loro interazioni?  
Interazioni fondamentali

# INTRODUZIONE

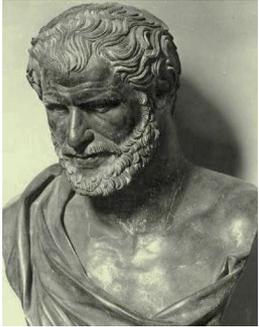
- Fisica delle particelle
- Studia la Natura al livello più **fondamentale**
  - Quali sono i costituenti della materia?  
**Particelle elementari**
  - Quali sono le loro interazioni?  
**Interazioni fondamentali**

FONDAMENTALI?

# UN PO' DI STORIA

la materia è fatta da  
costituenti indivisibili

ἄτομος = indivisibile



~400 A.C.

**Democrito:**

Nascita dell'idea di  
atomo

# UN PO' DI STORIA

Suddividendo la materia con reazioni successive si osservano sostanze **elementari** con *proprietà distinte*



Oxígeno



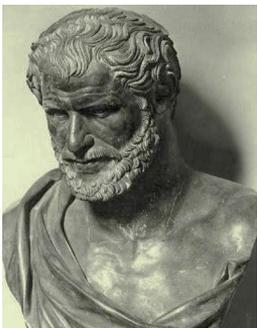
Hidrógeno



Nitrógeno



Carbono



Atomo = sfera indivisibile con **proprietà specifiche** specifiche  
Un atomo per ogni elemento

~400 A.C.

**Democrito:**

Nascita dell'idea di atomo

1808

**Dalton:**

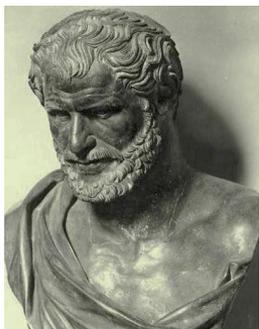
Prima formulazione di una Teoria Atomica

# UN PO' DI STORIA

1 H Hydrogen 1.008																	2 He Helium 4.003	
3 Li Lithium 6.94	4 Be Beryllium 9.012																	10 Ne Neon 20.180
11 Na Sodium 22.990	12 Mg Magnesium 24.305																	18 Ar Argon 39.948
19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.078	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.887	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.933	28 Ni Nickel 58.693	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.38	31 Ga Gallium 69.723	32 Ge Germanium 72.630	33 As Arsenic 74.922	34 Se Selenium 78.97	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.798	
37 Rb Rubidium 85.468	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.224	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.93	43 Tc Technetium [97]	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.906	46 Pd Palladium 106.42	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.818	50 Sn Tin 118.710	51 Sb Antimony 121.757	52 Te Tellurium 127.60	53 I Iodine 126.905	54 Xe Xenon 131.29	
55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.327	* 57-70	71 Lu Lutetium 174.967	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.207	76 Os Osmium 190.23	77 Ir Iridium 192.225	78 Pt Platinum 195.084	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.592	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.980	84 Po Polonium [209]	85 At Astatine [210]	86 Rn Radon [222]
87 Fr Francium [223]	88 Ra Radium [226]	** 89-102	103 Lr Lawrencium [262]	104 Rf Rutherfordium [261]	105 Db Dubnium [262]	106 Sg Seaborgium [266]	107 Bh Bohrium [264]	108 Hs Hassium [277]	109 Mt Meitnerium [276]	110 Ds Darmstadtium [285]	111 Rg Roentgenium [284]	112 Cn Copernicium [285]	113 Nh Nihonium [286]	114 Fl Flerovium [289]	115 Mc Moscovium [288]	116 Lv Livermorium [293]	117 Ts Tennessine [294]	118 Og Oganesson [294]
*Lanthanide series			57 La Lanthanum 138.905	58 Ce Cerium 140.116	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium [145]	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.964	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.501	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.257	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.054		
**Actinide series			89 Ac Actinium [227]	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.029	93 Np Neptunium [237]	94 Pu Plutonium [244]	95 Am Americium [243]	96 Cm Curium [247]	97 Bk Berkelium [247]	98 Cf Californium [251]	99 Es Einsteinium [252]	100 Fm Fermium [257]	101 Md Mendelevium [258]	102 No Nobelium [259]		

Atomic Number: 6  
 Symbol: C  
 Name: Carbon  
 Average Atomic Mass: 12.011

metals ■  
 nonmetals ■  
 metalloids ■



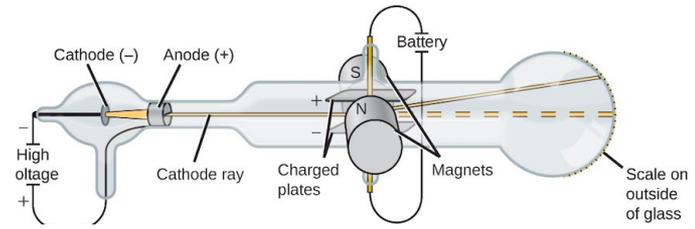
Le proprietà degli elementi si ripetono periodicamente

~400 A.C.  
**Democrito:**  
 Nascita dell'idea di atomo

1808  
**Dalton:**  
 Prima formulazione di una Teoria Atomica

1869  
**Mendeleev:**  
 Tavola periodica degli elementi

# UN PO' DI STORIA



I raggi catodici hanno carica elettrica negativa e una massa molto piccola (rapporto  $q/m$  molto grande)

Nuove particelle! Chiamati **elettroni**



1869

**Mendeleev:**

Tavola periodica degli elementi



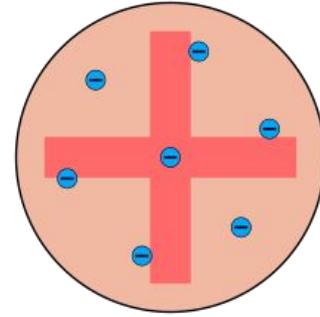
1887

**Thomson:**

Scoperta dell'elettrone

# UN PO' DI STORIA

Atomo: sfera carica uniformemente (+) con cariche negative, globalmente neutro



1869

**Mendeleev:**

Tavola periodica degli elementi



1887

**Thomson:**

Scoperta dell'elettrone

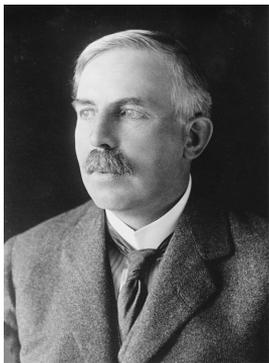
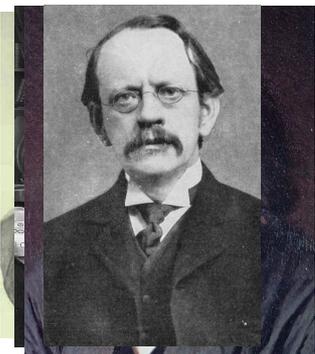
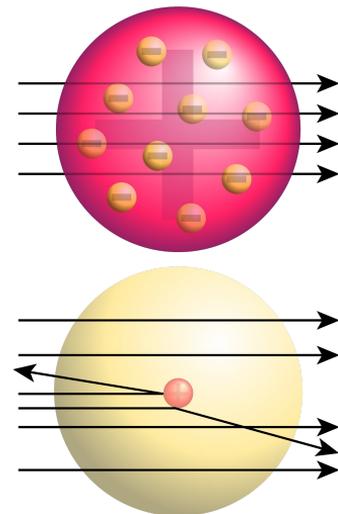
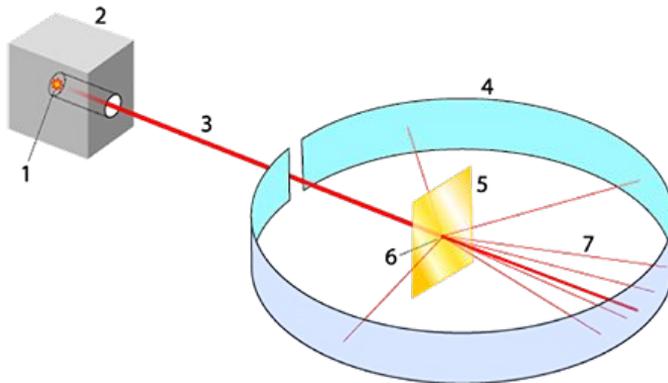


1904

**Thomson:**

Modello "a panettone"

# UN PO' DI STORIA



La carica positiva dell'atomo deve essere racchiusa in un volume molto ristretto.

“Nucleo”

1904

**Thomson:**

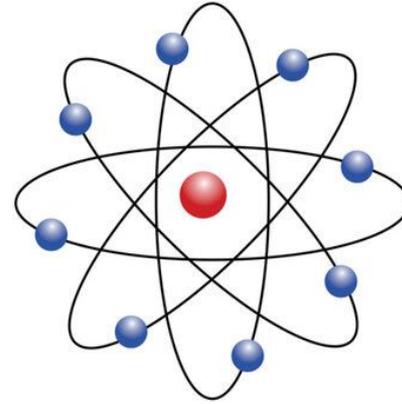
Modello “a panettone”

1911

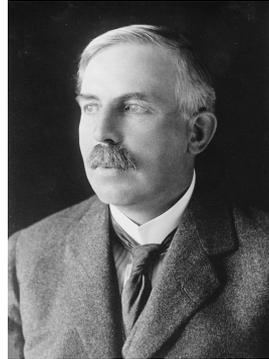
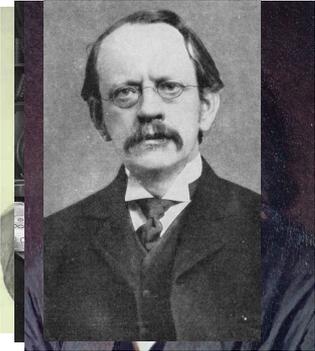
**Rutherford:**

Scoperta del nucleo atomico

# UN PO' DI STORIA



Gli elettroni orbitano attorno al nucleo attratti dal suo campo elettrico.



1904

**Thomson:**

Modello “a panettone”

1911

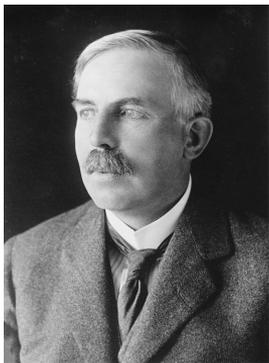
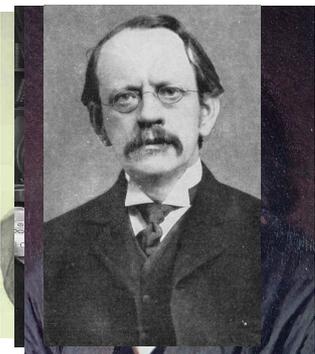
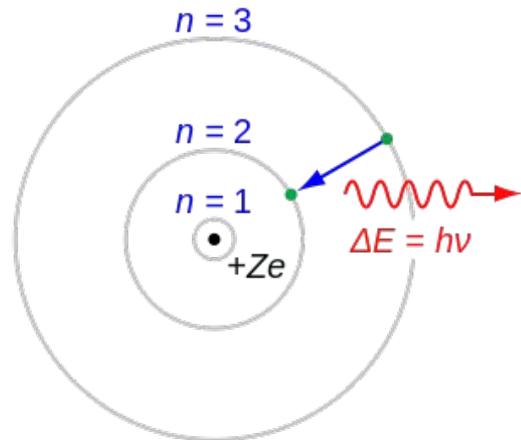
**Rutherford:**

Scoperta del nucleo atomico  
Modello “planetario”

# UN PO' DI STORIA

Gli elettroni ruotano intorno al nucleo su orbite con livelli di energia discreti.

Passaggio da un livello all'altro mediante emissione/assorbimento di **quanti** di energia (fotoni).



1904

**Thomson:**

Modello "a panettone"

1911

**Rutherford:**

Scoperta del nucleo atomico  
Modello "planetario"

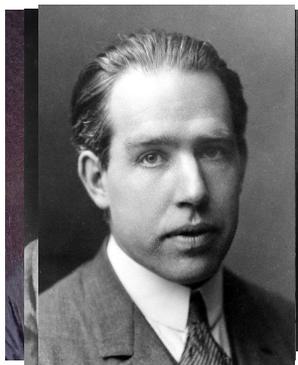
1913

**Bohr:**

Modello di atomo  
quantistico

# UN PO' DI STORIA

Lo **stato** dell'elettrone è descritto da una **funzione d'onda**  $\psi$



1913

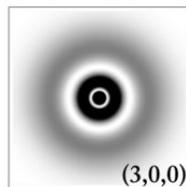
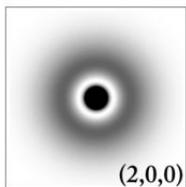
**Bohr:**

Modello di atomo  
quantistico

1926

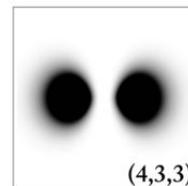
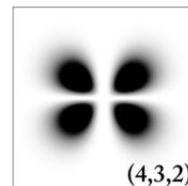
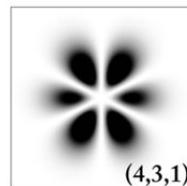
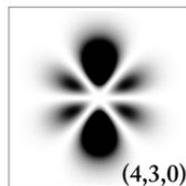
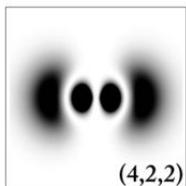
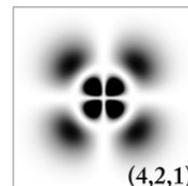
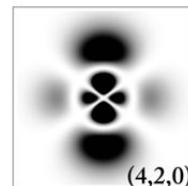
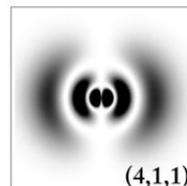
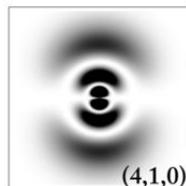
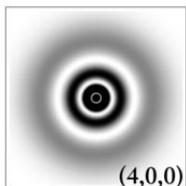
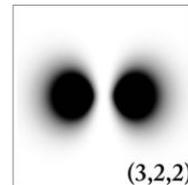
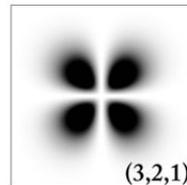
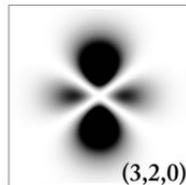
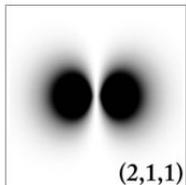
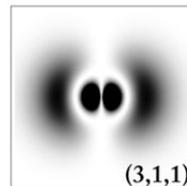
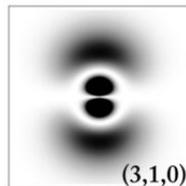
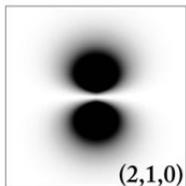
**Schrödinger:**

Teoria quantistica  
dell'atomo.



$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi$$

$$\psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$



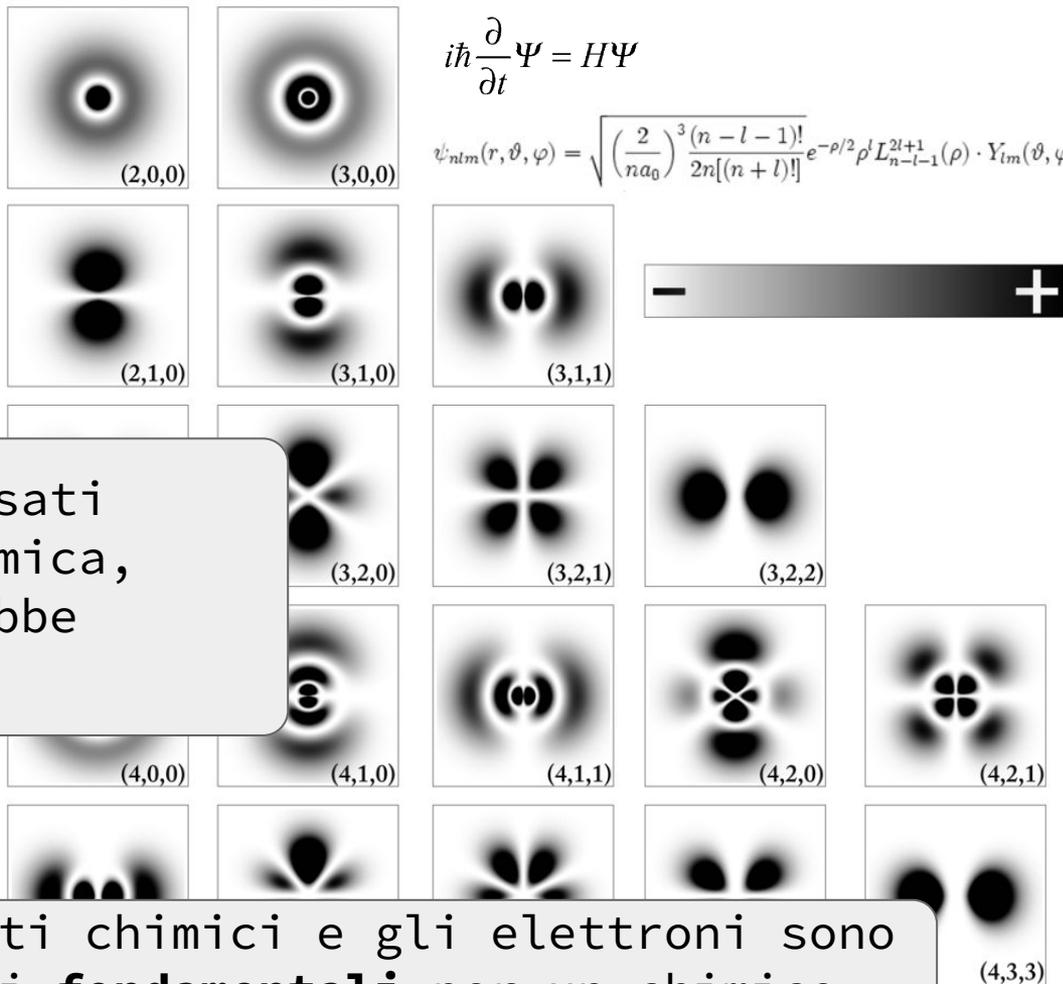
# UN PO' DI STORIA

Lo **stato** dell'elettrone è descritto da una **funzione d'onda**  $\psi$

**N.B.** Se fossimo interessati esclusivamente alla chimica, questa trattazione sarebbe sufficiente!

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = H\Psi$$

$$\psi_{nlm}(r, \vartheta, \varphi) = \sqrt{\left(\frac{2}{na_0}\right)^3 \frac{(n-l-1)!}{2n[(n+l)!]}} e^{-\rho/2} \rho^l L_{n-l-1}^{2l+1}(\rho) \cdot Y_{lm}(\vartheta, \varphi)$$



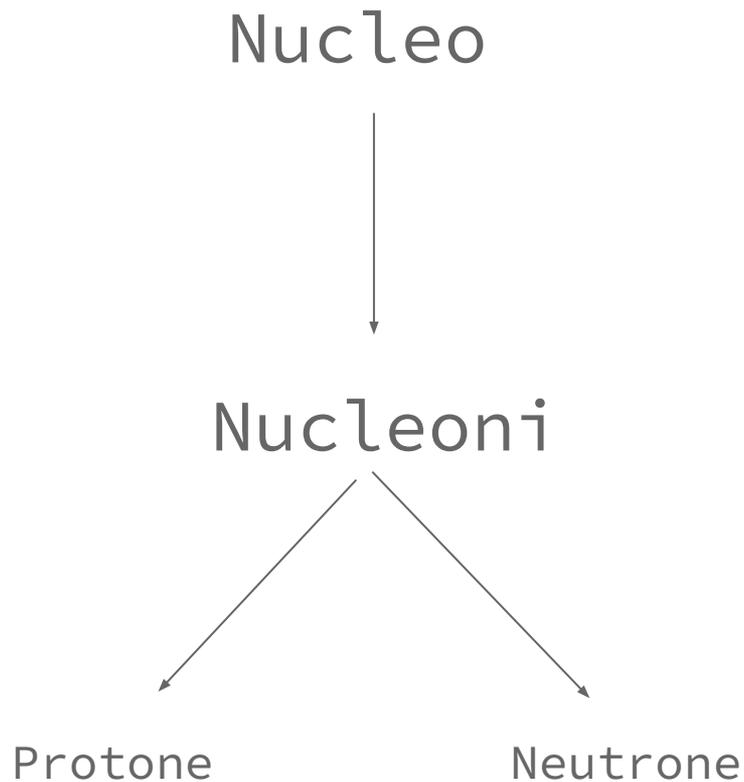
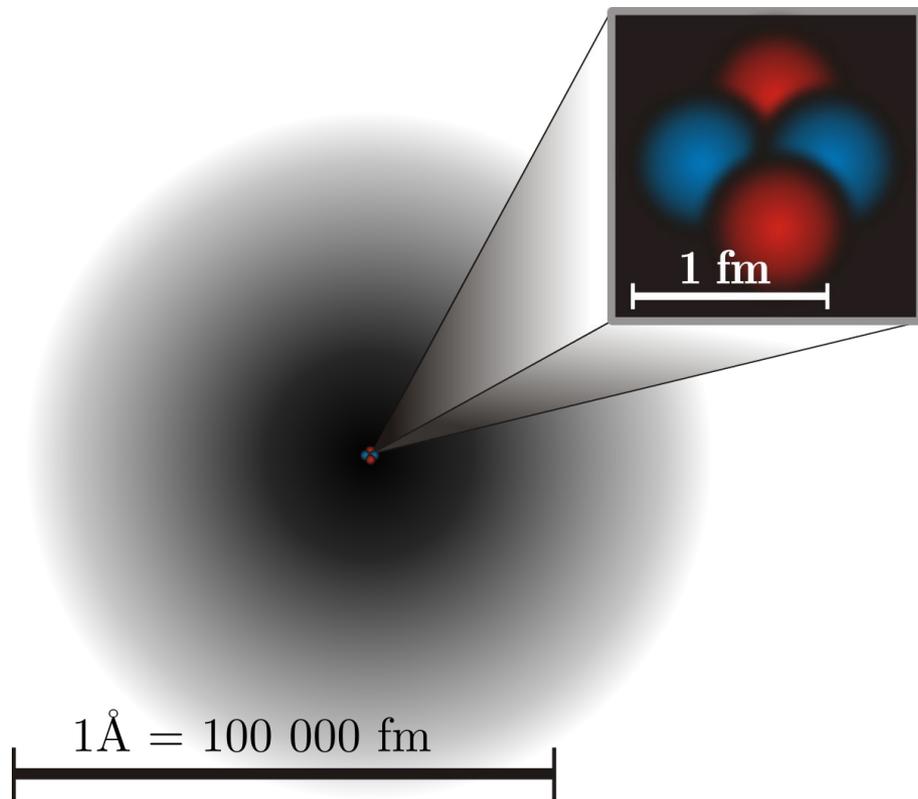
Gli elementi chimici e gli elettroni sono gli oggetti **fondamentali** per un chimico

1913

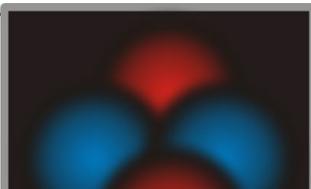
**Bohr:**  
Modello di atomo  
quantistico

**Schrödinger:**  
Teoria dell'atomo

# È IL NUCLEO?



# E IL NUCLEO?

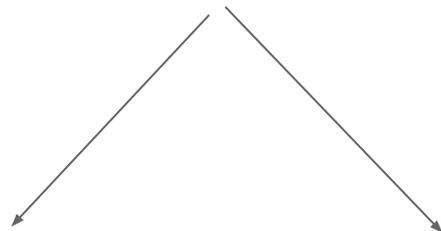


**N.B.** Se fossimo interessati esclusivamente alla fisica nucleare, questa trattazione sarebbe sufficiente!

Nucleo



Nucleoni



Protone

Neutrone

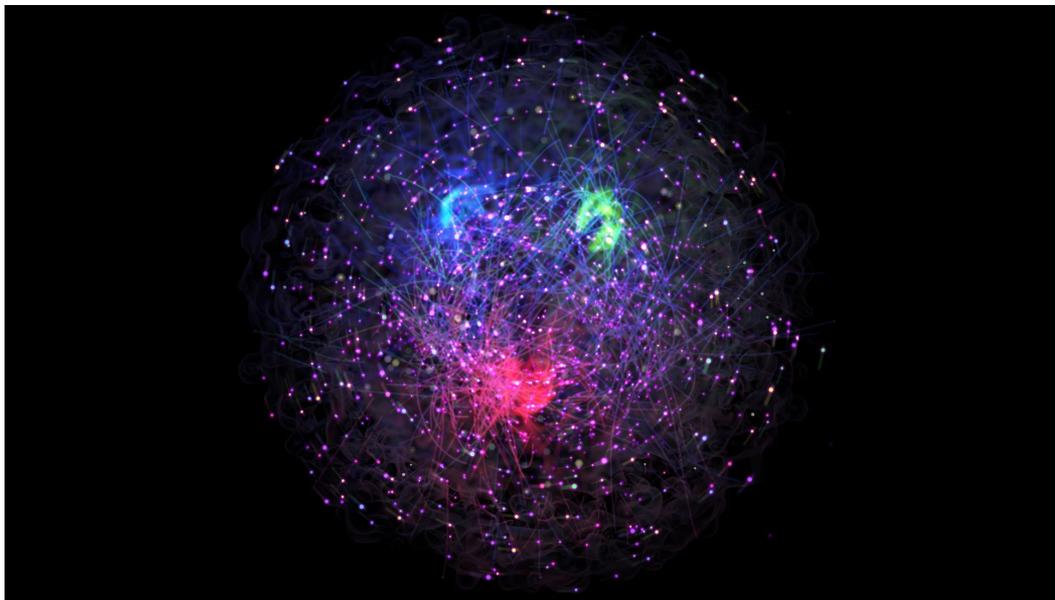
$1\text{\AA} = 100\,000\text{ fm}$



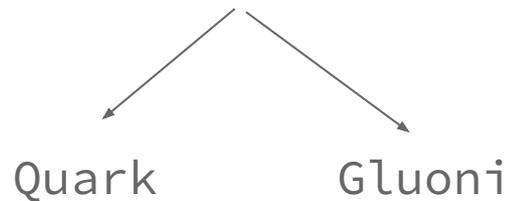
Protoni e neutroni **fondamentali** per un fisico nucleare!

# È SE VOLESSIMO ANDARE OLTRE I NUCLEONI?

Se riuscissimo a “zoomare” all’interno del protone e del neutrone vedremmo che essi presentano una **sottostruttura**:



Gli oggetti che compongono i nucleoni prendono il nome di **partoni**.



# IL MODELLO STANDARD DELLE INTERAZIONI FONDAMENTALI

tre generazioni della materia (fermioni)			mediatori delle forze / interazioni (bosoni)		
	I	II	III		
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
QUARK	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluone	<b>H</b> higgs
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> fotone	BOSONI SCALARI
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b>Z</b> bosone Z	
<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b>W</b> bosone W		
LEPTONI	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	$\pm 1$	
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	
					BOSONI DI GAUGE BOSONI VETTORI

Attualmente la teoria “più fondamentale”

Due tipologie di particelle:

- **Fermioni**: spin  $\frac{1}{2}$ , (materia)
- **Bosoni**: spin 0,1 (mediatori delle interazioni)

Sono gli oggetti fondamentali dei fisici delle particelle

# PARTICELLE E INTERAZIONI

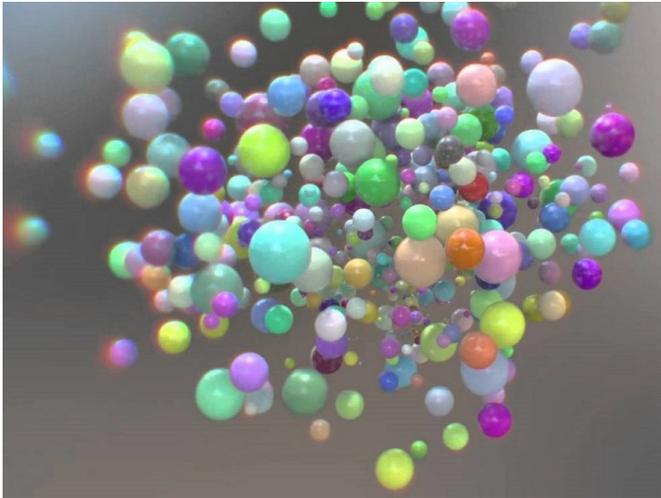
?

- Fisica delle **Particelle** elementari

??

Una particella, per poter essere considerata fondamentale, deve essere descritta come **puntiforme**.

Tutte le sue proprietà devono essere **localizzate in un punto dello spazio e del tempo**.



# PARTICELLE?

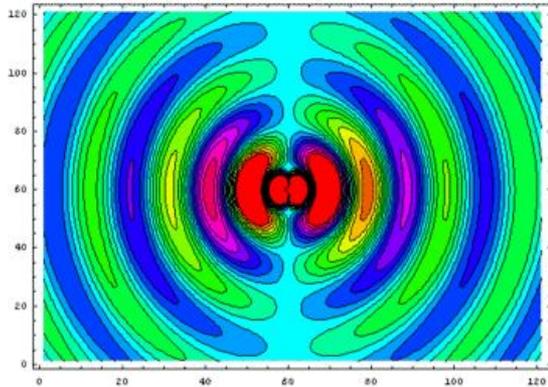
Per descrivere una particella in Fisica Moderna si utilizza il concetto di **campo**.

Esempi di campi?

# PARTICELLE?

Per descrivere una particella in Fisica Moderna si utilizza il concetto di **campo**.

Esempi di campi?

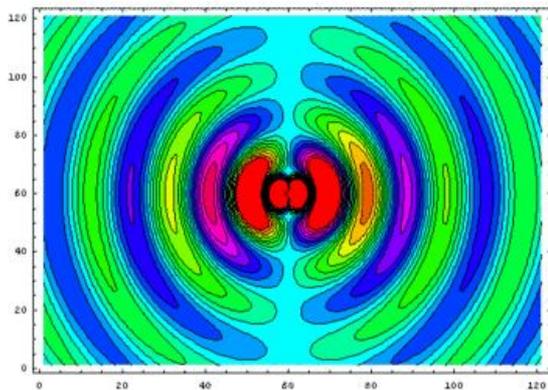


Campo elettrico

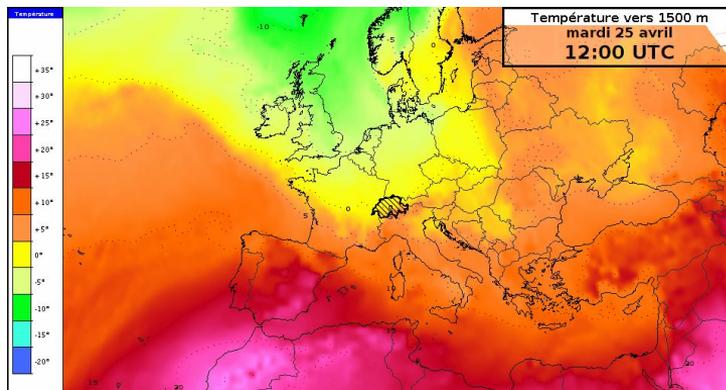
# PARTICELLE?

Per descrivere una particella in Fisica Moderna si utilizza il concetto di **campo**.

Esempi di campi?



Campo elettrico



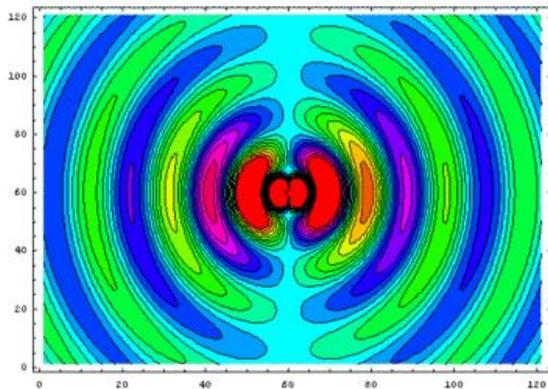
Temperatura

# PARTICELLE?

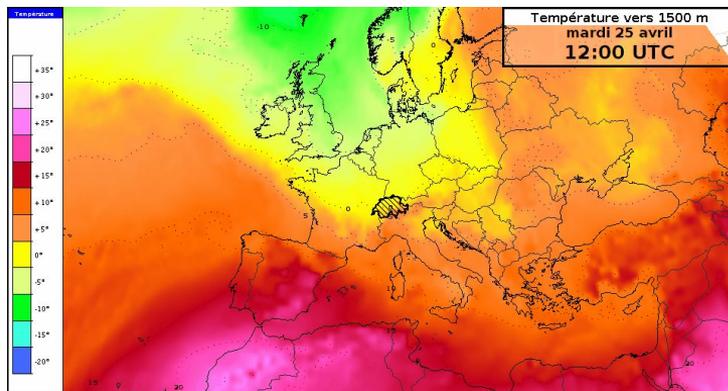
Per descrivere una particella in Fisica Moderna si utilizza il concetto di **campo**.

Esempi di campi?

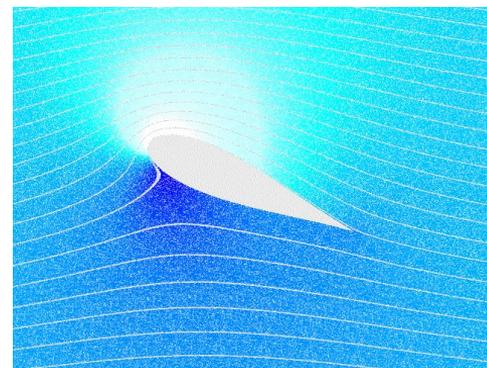
Descrivono qualcosa in ogni punto



Campo elettrico



Temperatura

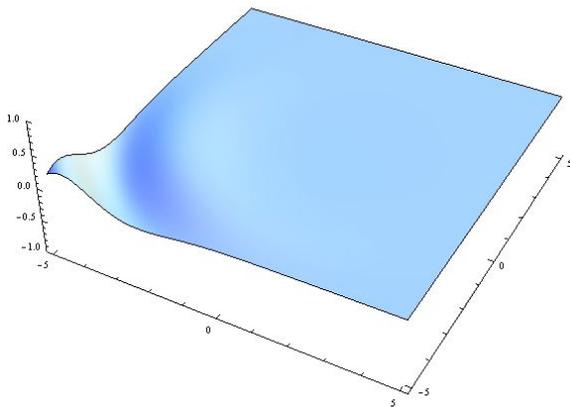


Velocità

# PARTICELLE?

Per descrivere una particella in Fisica Moderna si utilizza il concetto di **campo**.

Esempi di campi?

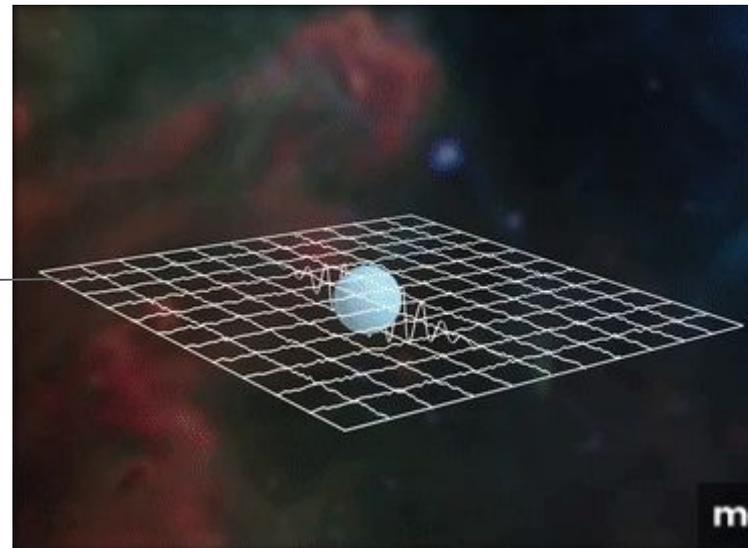


Ogni particella è descritta come una **fluttuazione localizzata di uno specifico campo**.

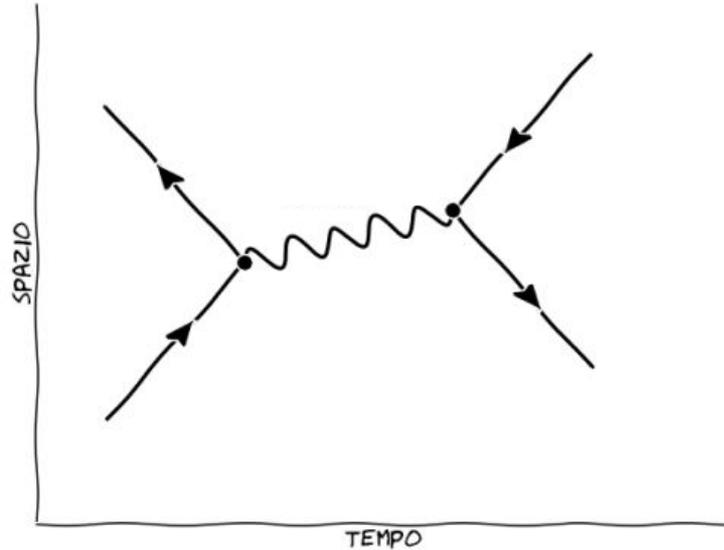
# UN CAMPO PER OGNI PARTICELLA

I veri oggetti **fondamentali** della Fisica delle Particelle sono i campi!

	I	II	III		
massa	$=2.2 \text{ MeV}/c^2$	$=1.28 \text{ GeV}/c^2$	$=173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$=124.97 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluone	<b>H</b> higgs
<b>QUARK</b>	$=4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$=96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	$=4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$	0	
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b><math>\gamma</math></b> fotone	
	$=0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$=105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$=1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$	$=91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b>Z</b> bosone Z	
<b>LEPTONI</b>	$<1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$<18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ 1	
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b>W</b> bosone W	
				<b>BOSONI DI GAUGE</b> <b>BOSONI VETTORI</b>	<b>BOSONI SCALARI</b>



# INTERAZIONI



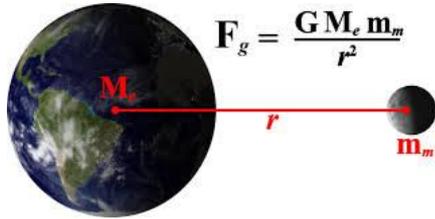
In Fisica delle Particelle, le interazioni della natura sono descritte come **scambio di particelle mediatrici**

Nel Modello Standard i mediatori sono i “**bosoni vettoriali**”

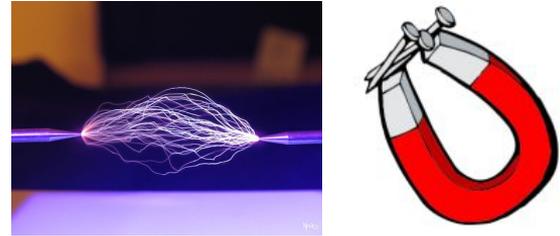
# INTERAZIONI FONDAMENTALI

In Natura, esistono 4 diversi tipi di interazioni:

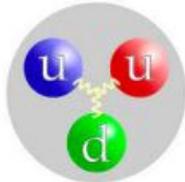
## Gravitazionale



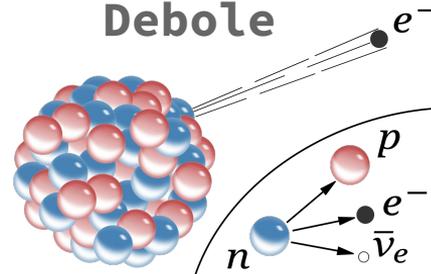
## Elettromagnetica



## Forte



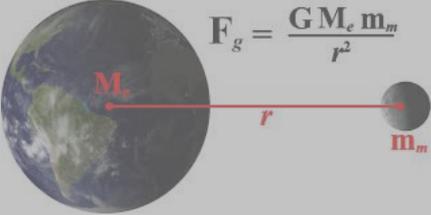
## Debole



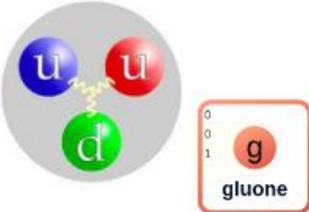
# INTERAZIONI FONDAMENTALI

Il Modello Standard ne include 3:

**Gravitazionale**

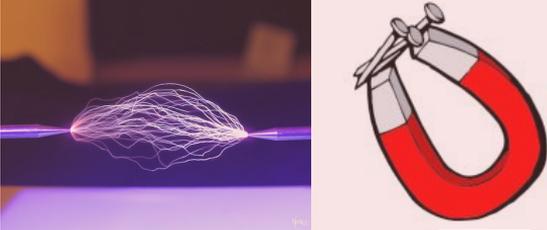

$$F_g = \frac{G M_c m_m}{r^2}$$

**Forte**                      **Elettrodebole**

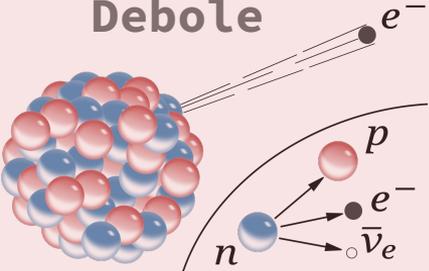


g  
gluone

**Elettromagnetica**



**Debole**



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

$\gamma$   
fotone

$=91.19 \text{ GeV}/c^2$   
 $Z$   
bosone Z

$=80.39 \text{ GeV}/c^2$   
 $W$   
bosone W

# IL BOSONE DI HIGGS

# ALCUNI PROBLEMI

Per poter avere una Teoria funzionante, **occorrerebbe che tutte le particelle del Modello Standard fossero prive di massa.**

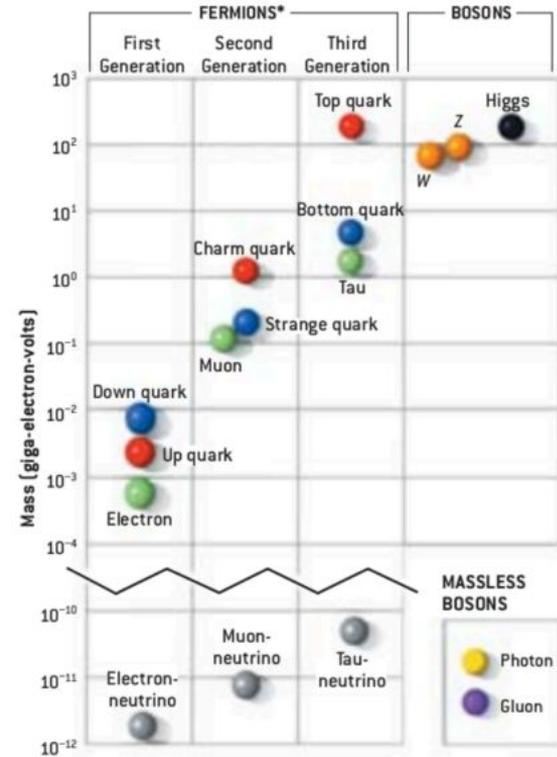
Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa→	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica→	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin→	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome→	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> fotone
Quark	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluone
Leptoni	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico	<b><math>Z^0</math></b> forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone	<b><math>W^\pm</math></b> forza debole

Bosoni di gauge

# ALCUNI PROBLEMI

Per poter avere una Teoria funzionante, **occorrerebbe che tutte le particelle del Modello Standard fossero prive di massa.**



Sperimentalmente si osserva che non è così.

Ordini di grandezza di differenza tra le masse!

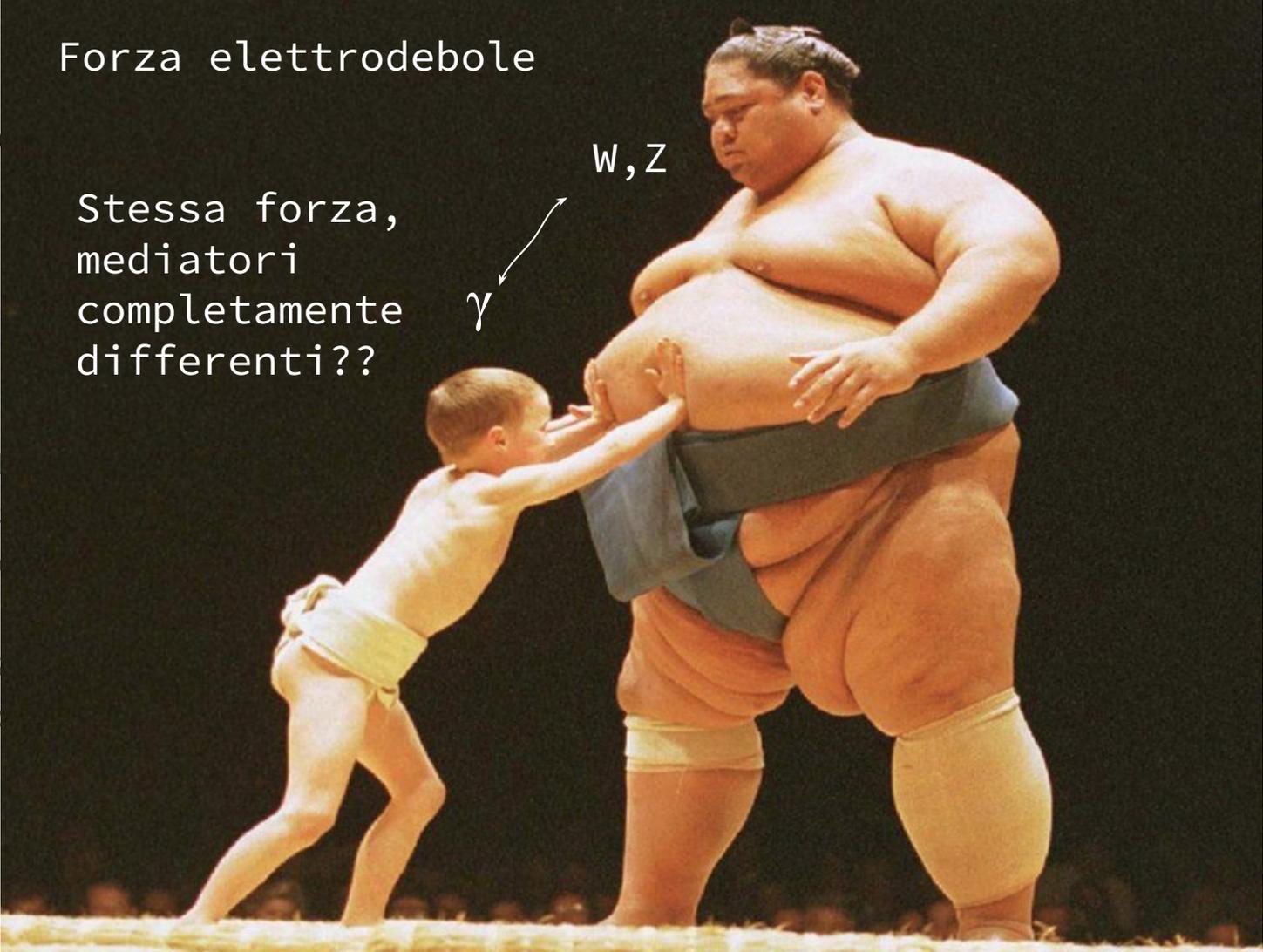
ALCUN

Forza elettrodebole

Stessa forza,  
mediatori  
completamente  
differenti??

$W, Z$   
 $\gamma$

Pe  
fu  
ri  
oc  
pa  
St  
ma



Sperime  
è così.

i  
se!

# IL MECCANISMO DI HIGGS

Idea: **la massa è una proprietà dinamica**

Le particelle elementari **sono prive di massa** ma la acquistano mediante un'interazione aggiuntiva



P.Higgs



R.Brout



F.Englert

# IL MECCANISMO DI HIGGS



P.Higgs

R.Brout

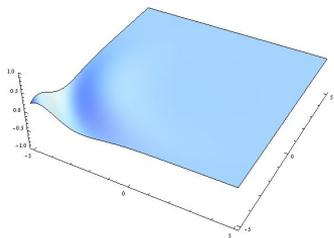
F.Englert

Idea: **la massa è una proprietà dinamica**

Le particelle elementari **sono prive di massa** ma la acquistano mediante un'interazione aggiuntiva

Interazione aggiuntiva = Campo aggiuntivo! **Campo di Higgs**

Campo aggiuntivo = Particella aggiuntiva! **Bosone di Higgs**



Tanto più la particella interagisce col campo di Higgs, tanto più diviene massiva.

# COME FARE PER TROVARLO?

Il meccanismo di Higgs è stato proposto nel 1964.

Prevede l'esistenza di una particella aggiuntiva, ma **non dà nessuna previsione sulla sua massa.**

**Molte masse possibili = molti possibili comportamenti diversi**

# COME FARE PER TROVARLO?

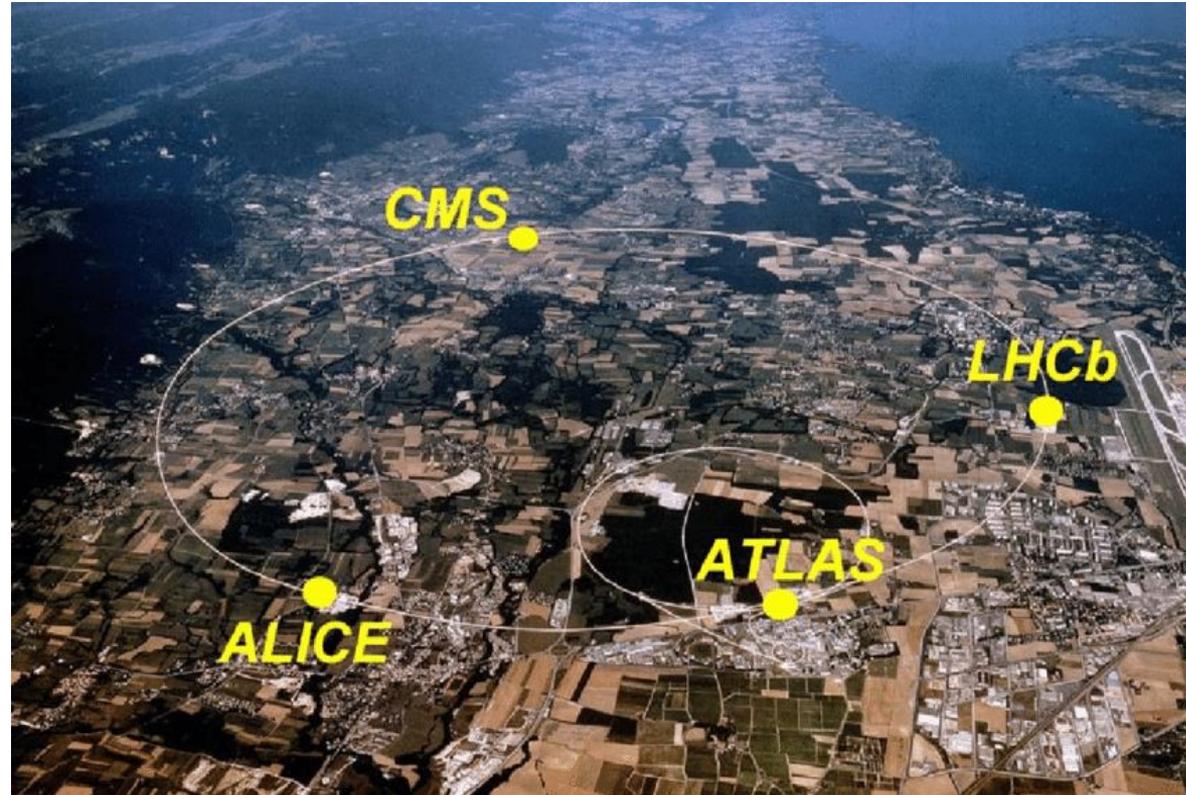
Il meccanismo di Higgs è stato proposto nel 1964.

Prevede l'esistenza di una particella aggiuntiva, ma **non dà nessuna previsione sulla sua massa.**

**Molte masse possibili = molti possibili comportamenti diversi**

Nel 1994 il CERN approva la costruzione di un **nuovo acceleratore (LHC) per mettere fine alla questione dell'esistenza del bosone di Higgs.**

# LHC : LARGE HADRON COLLIDER

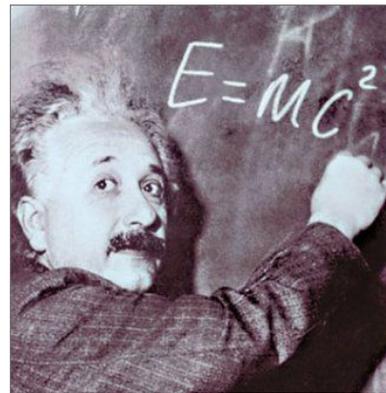
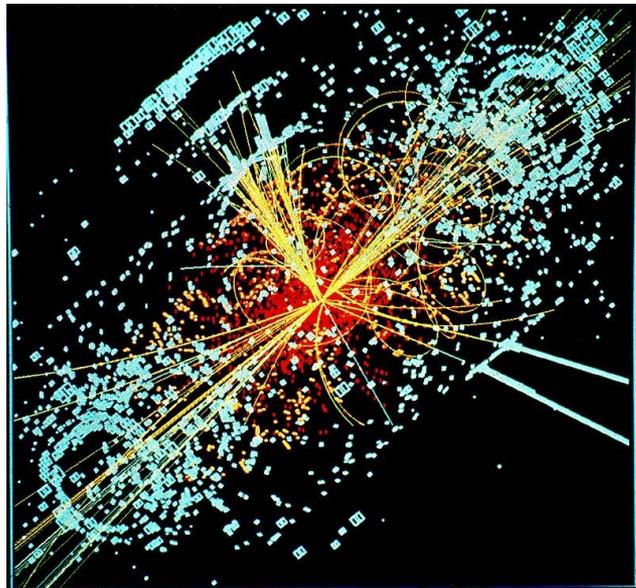


IDEA: fare  
collidere fasci  
**molto energetici**  
di protoni



Perché?

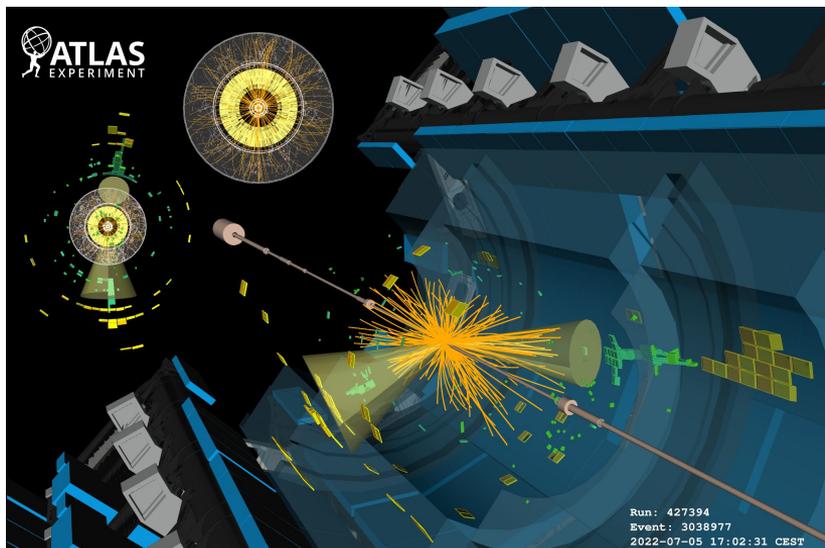
# COLLISIONI AD ALTA ENERGIA?



- l'energia delle particelle che si scontrano (protoni) si trasforma in massa, **creando particelle pesanti**
- Possiamo studiare particelle pesanti, come i bosoni Z, H e **cercare particelle ancora non osservate**

# RISONANZE!

Le particelle sono perturbazioni di campi.  
Per creare una particella occorre far vibrare il  
rispettivo campo!  
Occorre energia!

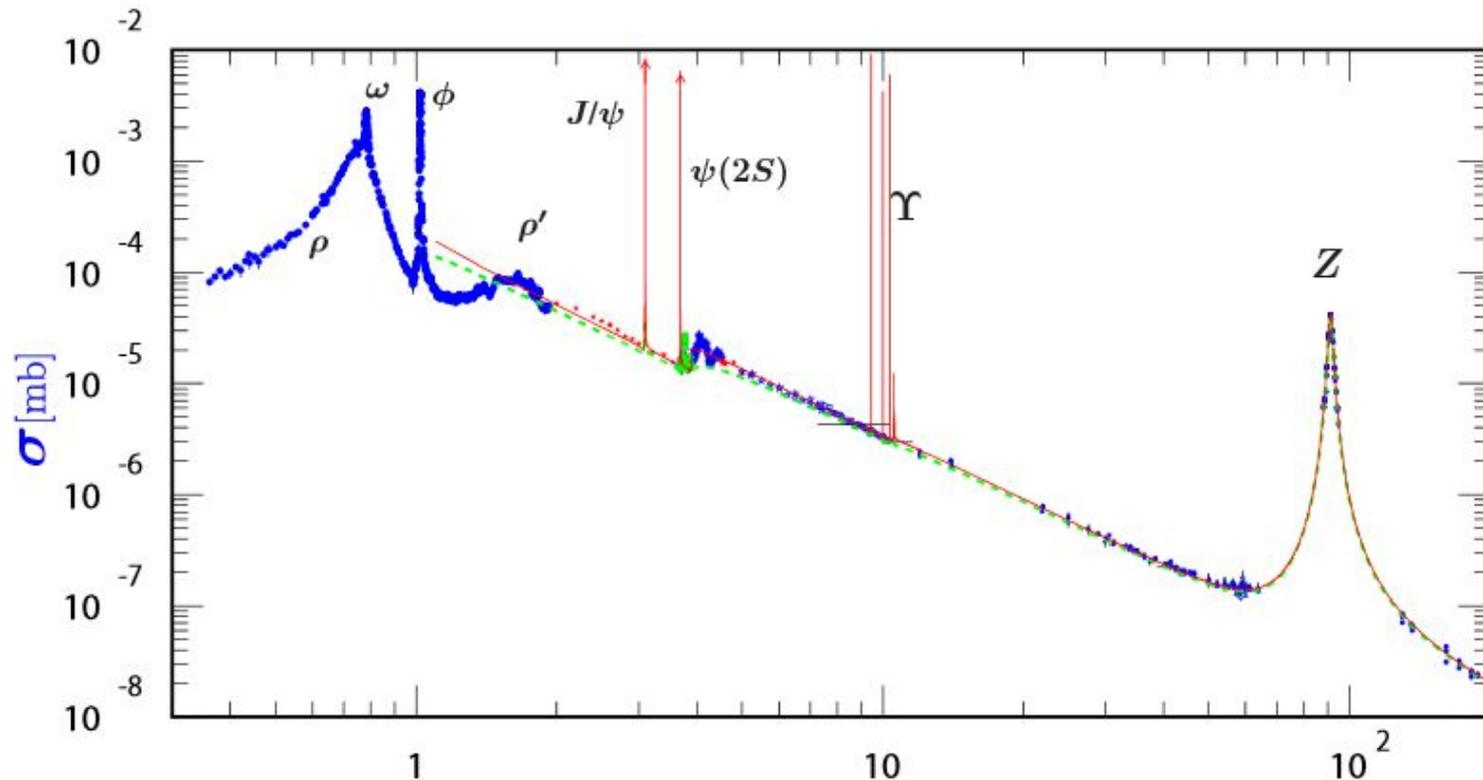


=



# RISONANZE!

Fenomeno fisico del tutto simile a quello delle risonanze!





# DECADIMENTI

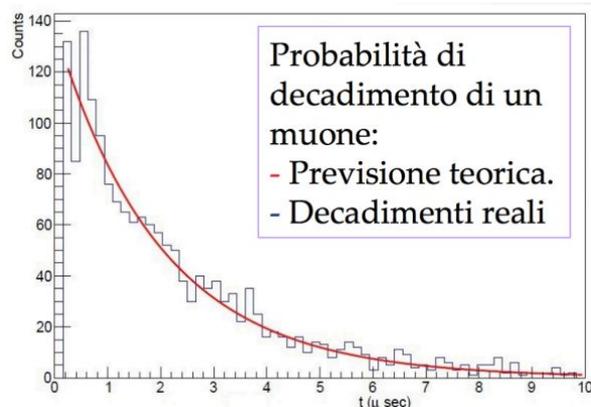
Gran parte delle particelle a cui siamo interessati **decadono** in altre particelle (prodotti di decadimento) **molto prima di poter essere rivelate**.

È un evento **probabilistico** che avviene dopo un certo tempo. Il valor medio di questo tempo si chiama **vita media** della particella

Esempi:

Vita media del bosone Z:  $0.2 \times 10^{-24}$  s

Vita media del muone:  $2.2 \times 10^{-6}$  s



è un processo **esponenziale**

# DECADIMENTI

Gran parte delle particelle a cui siamo interessati **decadono** in altre particelle (prodotti di decadimento) **molto prima di poter essere rivelate**.

È un evento **probabilistico** che avviene dopo un certo tempo. Il valor medio di questo tempo si chiama **vita media** della particella

Esempi:

Vita media del bosone Z:  $0.2 \times 10^{-24}$  s → Decade in media dopo  $0.1 \times 10^{-15}$  m

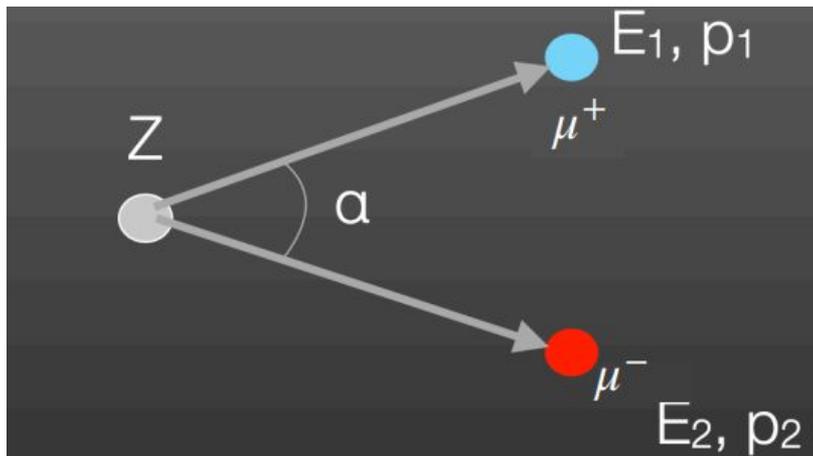
Vita media del muone:  $2.2 \times 10^{-6}$  s → Decade in media dopo **650 km**

Lo strato di rivelatore più vicino si trova a circa **1 cm ...**

**Per trovare la Z occorre misurare le proprietà dei prodotti di decadimento**

# LA MASSA INVARIANTE

Se misuriamo l'energia e l'impulso dei prodotti di decadimento, possiamo calcolare il **valore della massa della particella madre**

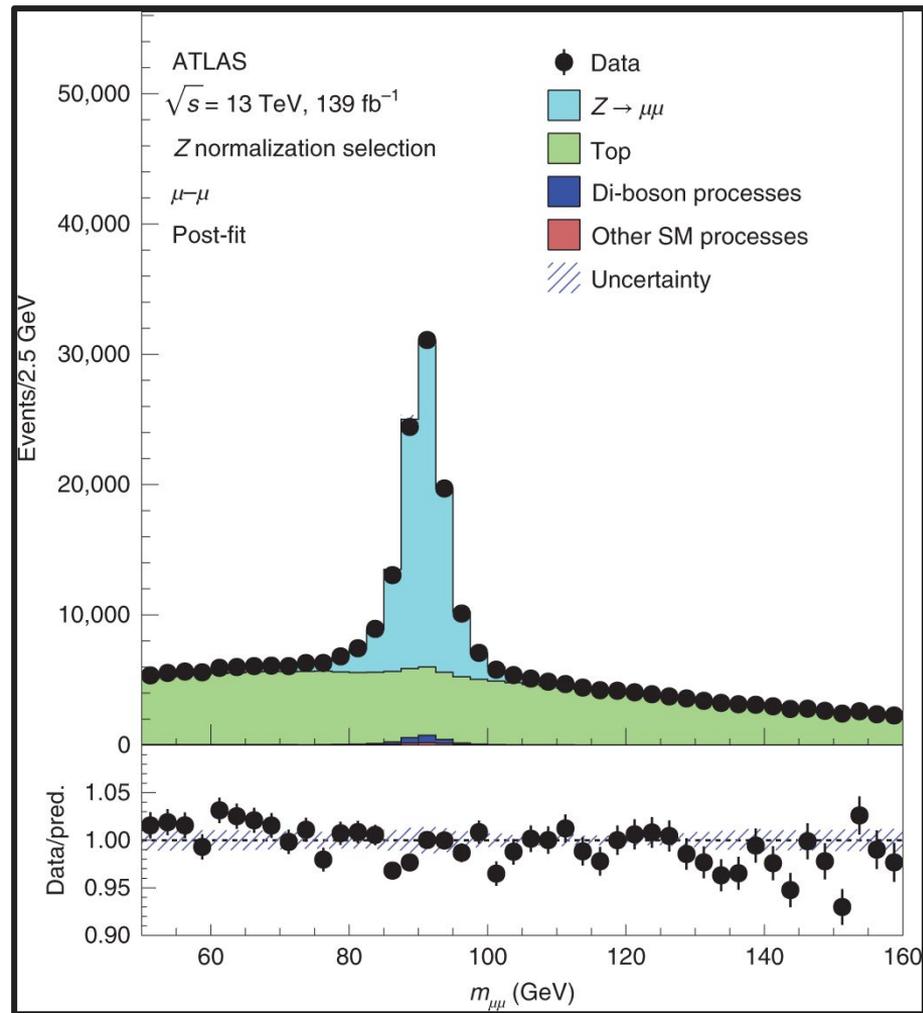


Ad esempio:  $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Ingredienti:

- Conservazione dell'energia
- Conservazione dell'impulso
- $E^2 = m^2 c^4 + |\mathbf{p}|^2 c^2$  (Dalla relatività)

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2 \frac{E_1 E_2}{c^4} - 2 \frac{|\mathbf{p}_1| |\mathbf{p}_2|}{c^2} \cos \alpha} \quad (\text{per completezza})$$



Ad esempio:  $Z \rightarrow \mu^+\mu^-$

Ingredienti:

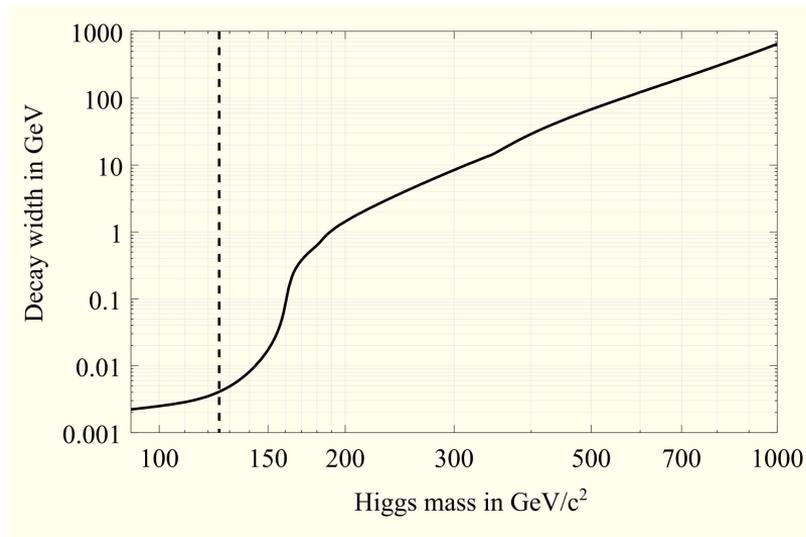
- Conservazione dell'energia
- Conservazione dell'impulso
- $E^2 = m^2c^4 + |\mathbf{p}|^2c^2$  (Dalla relatività)

Arma molto potente per distinguere il **segnale** dal **fondo**

$$m = \sqrt{m_1^2 + m_2^2 + 2\frac{E_1E_2}{c^4} - 2\frac{|\mathbf{p}_1||\mathbf{p}_2|}{c^2} \cos \alpha} \quad (\text{per completezza})$$

# E IL BOSONE DI HIGGS?

Il bosone di Higgs è una particella instabile. **La sua vita media dipende dalla sua massa** (che era *ignota!*).



# E IL BOSONE DI HIGGS?

Il bosone di Higgs è una particella instabile. **La sua vita media dipende dalla sua massa** (che era ignota!).

Occorreva controllare un **gran numero di decadimenti possibili** molto diversi da loro

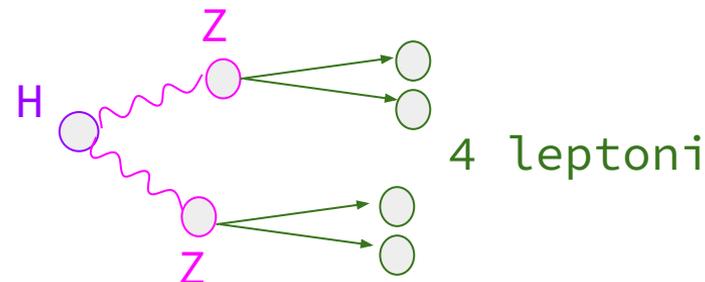
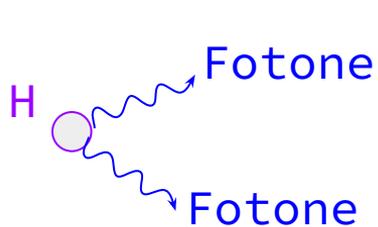
Più promettenti: (molto rari ma i più facili da ricostruire!)

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$$

$$\rightarrow \mu^+\mu^-e^+e^-$$

$$\rightarrow \mu^+\mu^-\mu^+\mu^-$$

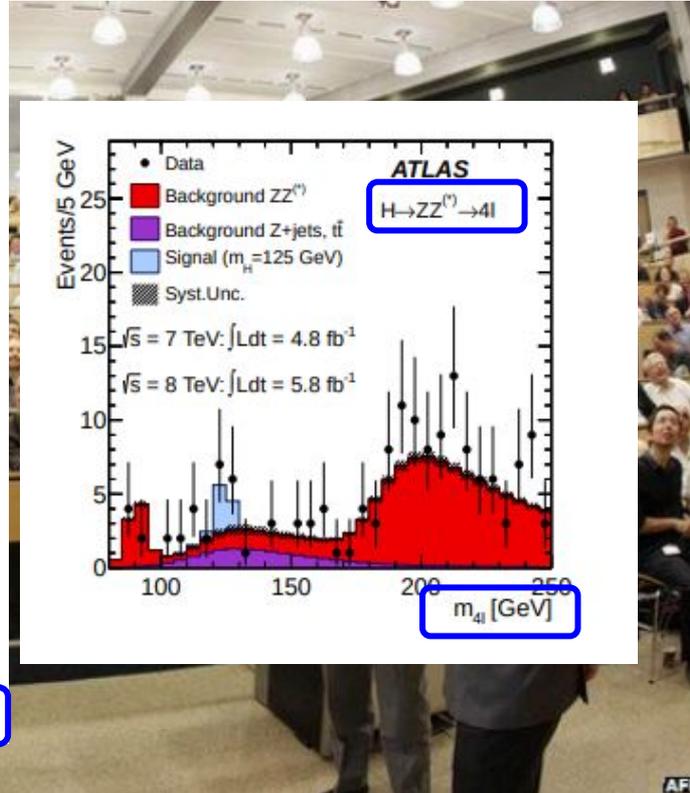
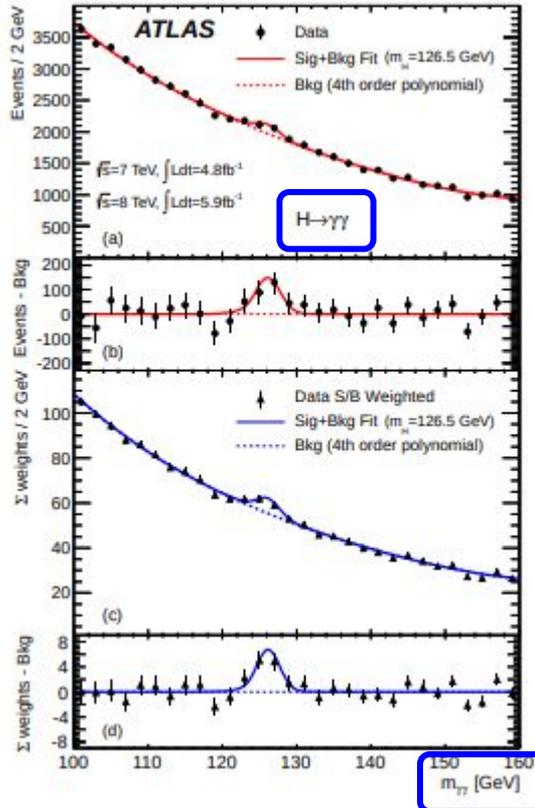


# 4 LUGLIO 2012: ANNUNCIO DELLA SCOPERTA!



ATLAS e CMS  
annunciano di  
aver osservato  
una nuova  
particella  
compatibile con  
quella prevista  
dal modello di  
Higgs, con una  
massa di circa  
125 GeV

# 4 LUGLIO 2012 - ANNUNCIO DELLA SCOPERTA!



ATLAS e CMS annunciano di aver osservato una nuova particella compatibile con quella prevista dal modello di Higgs, con una massa di circa 125 GeV



# THE NOBEL PRIZE IN PHYSICS 2013

4 HIGGINS ?

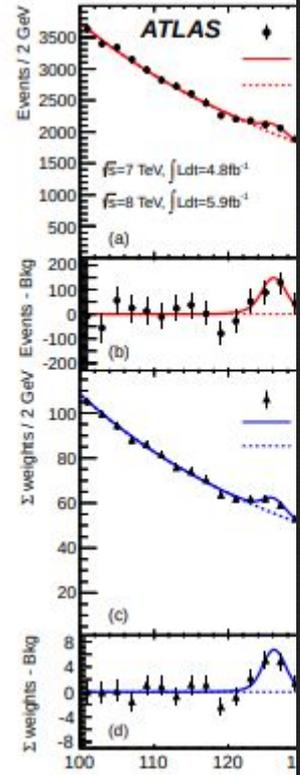


Photo: A. Mahmoud



**François Englert**  
Prize share: 1/2

Photo: A. Mahmoud



**Peter Higgs**  
Prize share: 1/2

*"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider".*

e CMS  
iano di  
sservato  
ova  
ella  
ibile con  
prevista  
dello di  
con una  
di circa  
V

E ORA?

# ABBIAMO CHIUSO UN CICLO...

	I	II	III	
massa	=2.2 MeV/c <sup>2</sup>	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0
carica	2/3	2/3	2/3	0
spin	1/2	1/2	1/2	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluone
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>γ</b> fotone
	<b>e</b> elettrone	<b>μ</b> muone	<b>τ</b> tauone	<b>Z</b> bosone Z
	<b>ν<sub>e</sub></b> neutrino elettronico	<b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonico	<b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauonico	<b>W</b> bosone W
				<b>H</b> higgs

**QUARK** (vertical label on the left side of the quark section)

**LEPTONI** (vertical label on the left side of the lepton section)

**BOSONI DI GAUGE** (vertical label on the right side of the gauge boson section)

**BOSONI VETTORI** (vertical label on the right side of the vector boson section)

**BOSONI SCALARI** (vertical label on the right side of the scalar boson section)

Per la prima volta, abbiamo una Teoria che è in grado di spiegare con estrema precisione le osservazioni sperimentali al livello più fondamentale.

È quanto di più vicino ad una “teoria del tutto” che l’umanità abbia mai creato!

# SE NE APRONO TANTI ALTRI...

NB: lista non  
esaustiva!

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era di ricerca in Fisica delle Particelle.

Tanti nuovi ambiti su cui indagare:

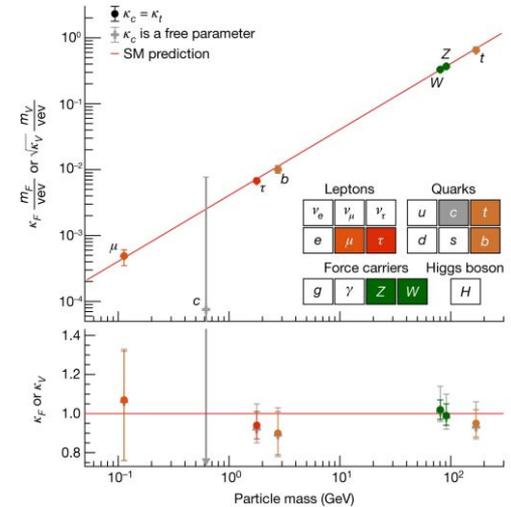
# SE NE APRONO TANTI ALTRI...

NB: lista non esaustiva!

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era di ricerca in Fisica delle Particelle.

Tanti nuovi ambiti su cui indagare:

- La particella che abbiamo visto possiede tutte le proprietà attese del Modello Standard?



# SE NE APRONO TANTI ALTRI...

NB: lista non  
esaustiva!

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era di ricerca in Fisica delle Particelle.

Tanti nuovi ambiti su cui indagare:

- La particella che abbiamo visto possiede tutte le proprietà attese del Modello Standard?
- Esiste un unico bosone di Higgs o fa parte di una famiglia più grande?



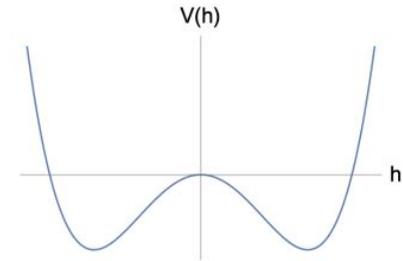
# SE NE APRONO TANTI ALTRI...

NB: lista non  
esaustiva!

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era di ricerca in Fisica delle Particelle.

Tanti nuovi ambiti su cui indagare:

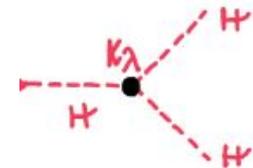
- La particella che abbiamo visto possiede tutte le proprietà attese del Modello Standard?
- Esiste un unico bosone di Higgs o fa parte di una famiglia più grande?
- Interagisce con sé stesso?



$$V(\Phi) = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

$$V(\Phi) = V_0 + \frac{1}{2} m_H^2 H^2 + \lambda H^3 + \frac{1}{4} \lambda H^4$$

$$m_H = \sqrt{2\mu}$$



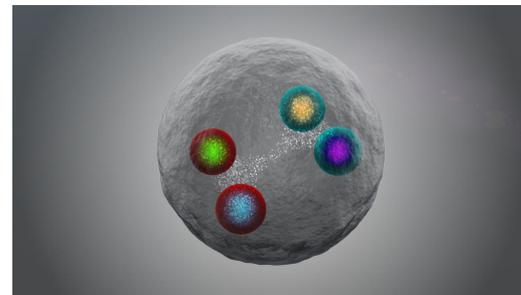
# SE NE APRONO TANTI ALTRI...

NB: lista non  
esaustiva!

La scoperta del bosone di Higgs ha aperto una nuova era di ricerca in Fisica delle Particelle.

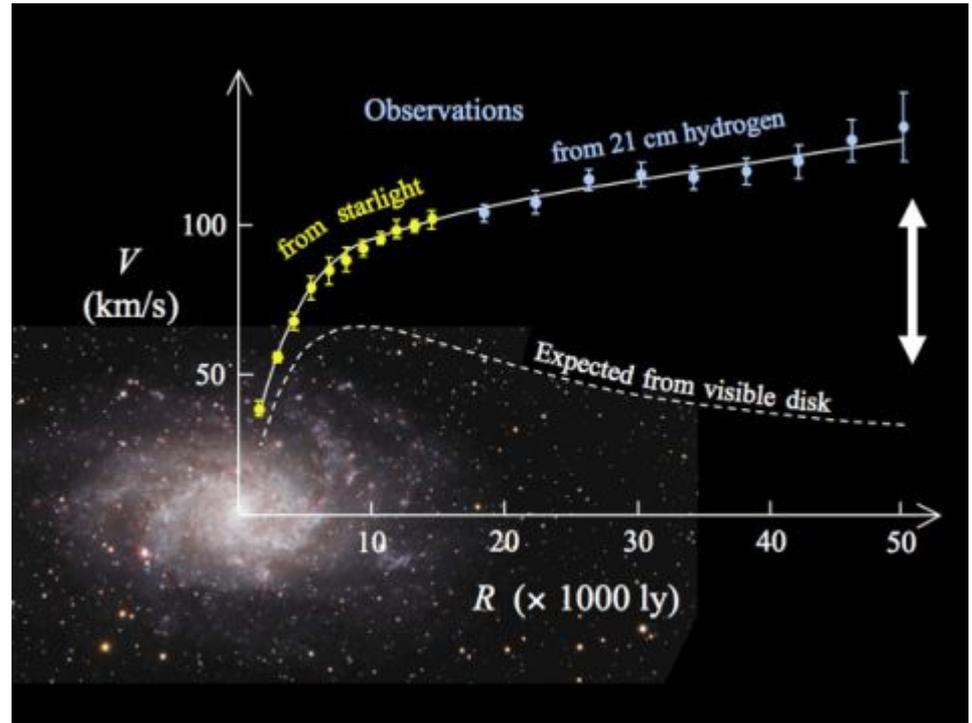
Tanti nuovi ambiti su cui indagare:

- La particella che abbiamo visto possiede tutte le proprietà attese del Modello Standard?
- Esiste un unico bosone di Higgs o fa parte di una famiglia più grande?
- Interagisce con sé stesso?
- È una particella fondamentale o è formato da altre particelle?



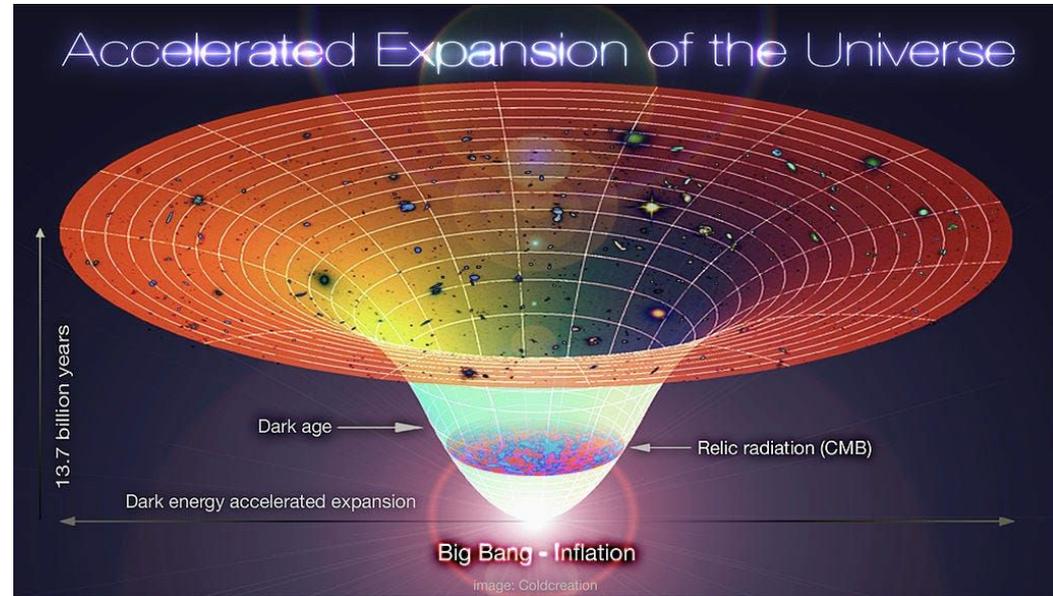
# ... E MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?



# ... E MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?
- Che cos'è l'energia oscura?

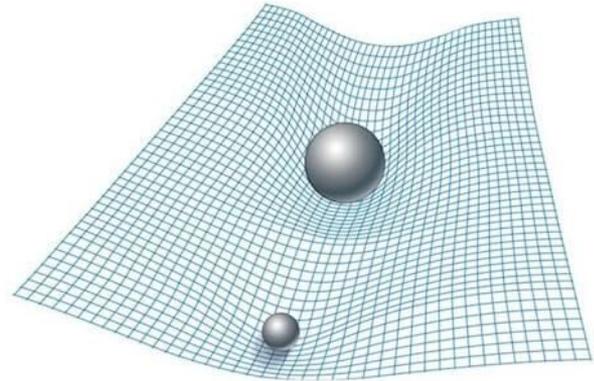


$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

## ... È MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?
- Che cos'è l'energia oscura?
- ... E la gravità??

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



# ... E MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?
- Che cos'è l'energia oscura?
- ... E la gravità??
- Perché tre generazioni? C'è una sottostruttura?

	I	II	III
massa	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$
carica	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
<b>QUARK</b>	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$
	-1	-1	-1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b>e</b> elettrone	<b><math>\mu</math></b> muone	<b><math>\tau</math></b> tauone
<b>LEPTONI</b>	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$
	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$
	<b><math>\nu_e</math></b> neutrino elettronico	<b><math>\nu_\mu</math></b> neutrino muonico	<b><math>\nu_\tau</math></b> neutrino tauonico

# ... E MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?
- Che cos'è l'energia oscura?
- ... E la gravità??
- Perché tre generazioni? C'è una sottostruttura?
- Interazioni aggiuntive?



# ... E MOLTI ALTRI RIMANGONO APERTI

- Di cosa è fatta la Materia oscura?
- Che cos'è l'energia oscura?
- ... E la gravità??
- Perché tre generazioni? C'è una sottostruttura?
- Interazioni aggiuntive?



... E molto di più

# IN CONCLUSIONE

- Lo studio della fisica delle particelle ci permette di capire l'Universo al livello più fondamentale.
- Nonostante il successo del Modello Standard, ci sono ancora molte domande a cui rispondere

# IN CONCLUSIONE

- Lo studio della fisica delle particelle ci permette di capire l'Universo al livello più fondamentale.
- Nonostante il successo del Modello Standard, ci sono ancora molte domande a cui rispondere

= tante possibilità di ricerca!

Spetta a noi!

*That's all Folks!*

BACKUP

# DECADIMENTI

Gran parte delle particelle a cui siamo interessati **decadono** in altre particelle (prodotti di decadimento) **molto prima di poter essere rivelate**.

È un evento **probabilistico** che avviene dopo un certo tempo. Il valor medio di questo tempo si chiama **vita media** della particella

Esempi:

Vita media del bosone Z:  $0.2 \times 10^{-24}$  s

Vita media del muone:  $2.2 \times 10^{-6}$  s

distanza media percorsa:  $d = \frac{p}{m} c \tau$

$$p \sim 10^2 \text{ GeV}$$

$$m_Z = 90 \text{ GeV} \longrightarrow 0.1 \times 10^{-15} \text{ m}$$

$$m_\mu = 0.1 \text{ GeV} \longrightarrow 660 \text{ km}$$

Lo strato di rivelatore più vicino si trova a circa **1 cm**

I muoni vengono considerati stabili. **Per trovare la Z occorre misurare le proprietà dei prodotti di decadimento**

# UN CAMPO PER OGNI PARTICELLA

I veri oggetti **fondamentali** della Fisica delle Particelle sono i campi!

	I	II	III		
massa	=2.2 MeV/c <sup>2</sup>	=1.28 GeV/c <sup>2</sup>	=173.1 GeV/c <sup>2</sup>	0	=124.97 GeV/c <sup>2</sup>
carica	2/3	2/3	2/3	0	0
spin	1/2	1/2	1/2	1	0
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b>g</b> gluone	<b>H</b> higgs
<b>QUARK</b>	=4.7 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>d</b> down	=96 MeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>s</b> strange	=4.18 GeV/c <sup>2</sup> -1/3 1/2 <b>b</b> bottom	0 0 1 <b>γ</b> fotone	
	=0.511 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>e</b> elettrone	=105.66 MeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>μ</b> muone	=1.7768 GeV/c <sup>2</sup> -1 1/2 <b>τ</b> tauone	=91.19 GeV/c <sup>2</sup> 0 1 <b>Z</b> bosone Z	
<b>LEPTONI</b>	<1.0 eV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>e</sub></b> neutrino elettronico	<0.17 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>μ</sub></b> neutrino muonico	<18.2 MeV/c <sup>2</sup> 0 1/2 <b>ν<sub>τ</sub></b> neutrino tauonico	=80.39 GeV/c <sup>2</sup> ±1 1 <b>W</b> bosone W	<b>BOSONI DI GAUGE</b> <b>BOSONI VETTORI</b>
					<b>BOSONI SCALARI</b>

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\
 & + i\bar{\psi}D\psi + h.c. \\
 & + \bar{\psi}_i y_{ij} \psi_j \phi + h.c. \\
 & + |D_{\mu}\phi|^2 - V(\phi)
 \end{aligned}$$