

February 11, 2022  
Europe/Rome timezone

# Introduzione alla fisica delle particelle elementari

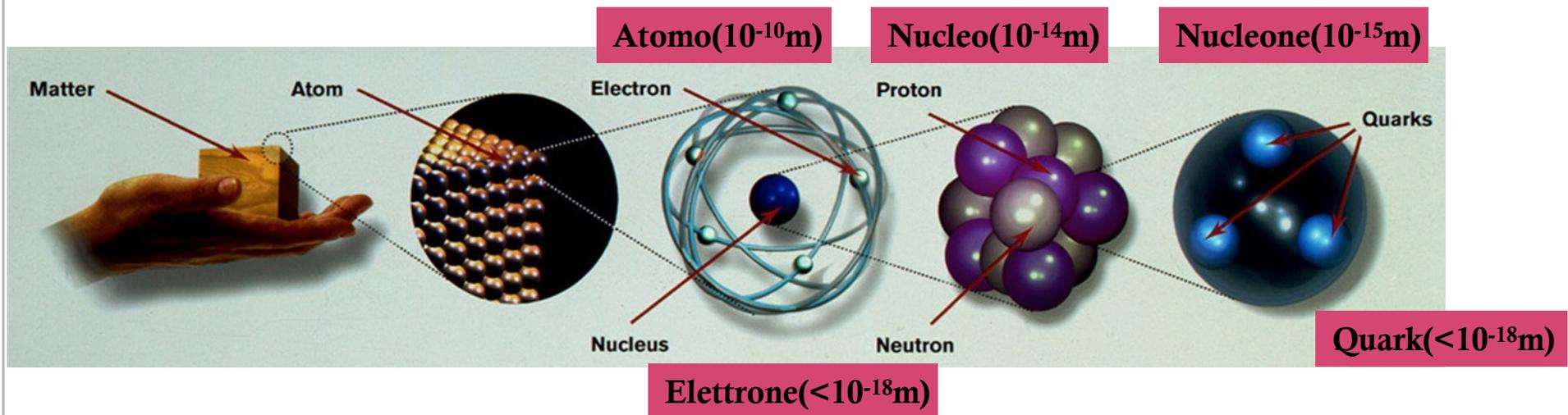
Evelin Meoni  
(Dipartimento di Fisica - UNICAL)

# Sommario

- La fisica delle particelle elementari:
  - cosa sappiamo
  - cosa non capiamo ancora
- Gli acceleratori di particelle ed LHC al CERN
- Alcuni elementi utili per l'esercitazione di oggi: analisi dati dell'esperimento ATLAS ad LHC

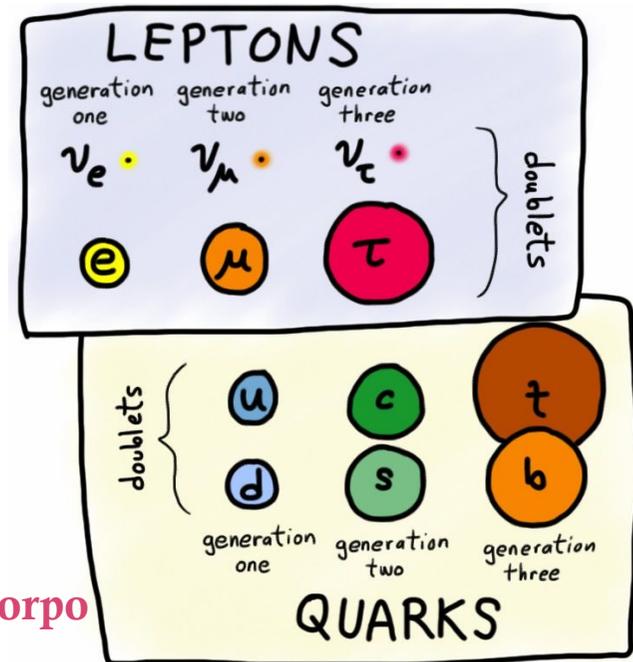
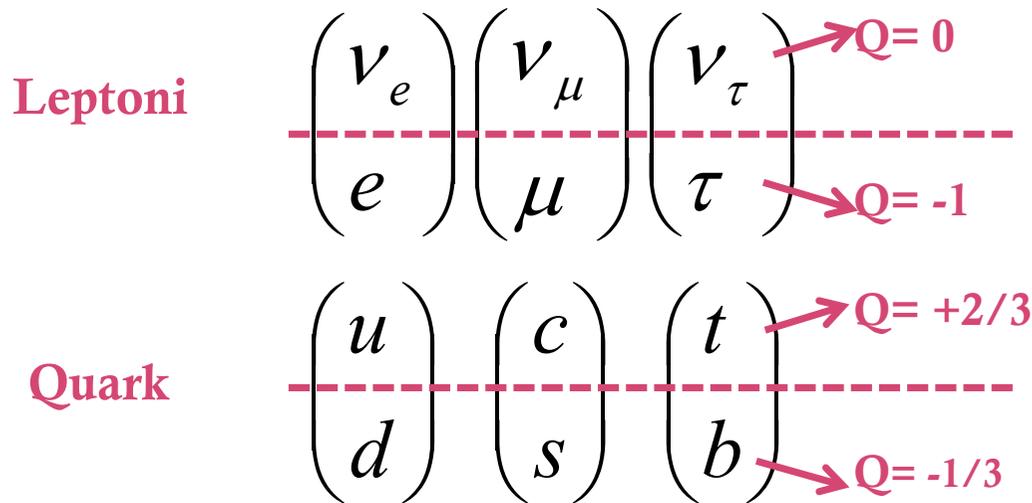
# La fisica delle particelle elementari: cosa studia?

Studia i costituenti fondamentali della materia e le forze che essi risentono.



# Cosa sappiamo oggi

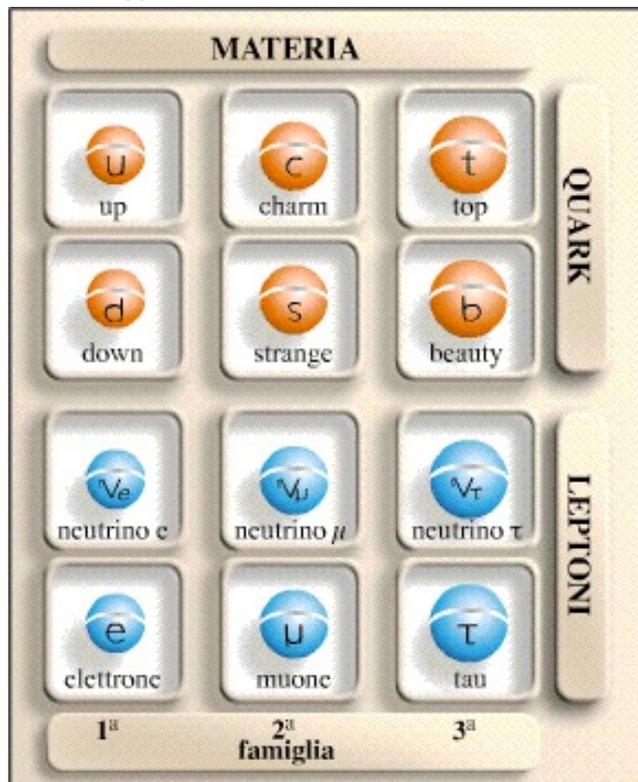
- La teoria che ad oggi meglio descrive la fenomenologia della Fisica delle Particelle Elementari è il **Modello Standard**
- Il modello prevede 12 particelle elementari+..... →



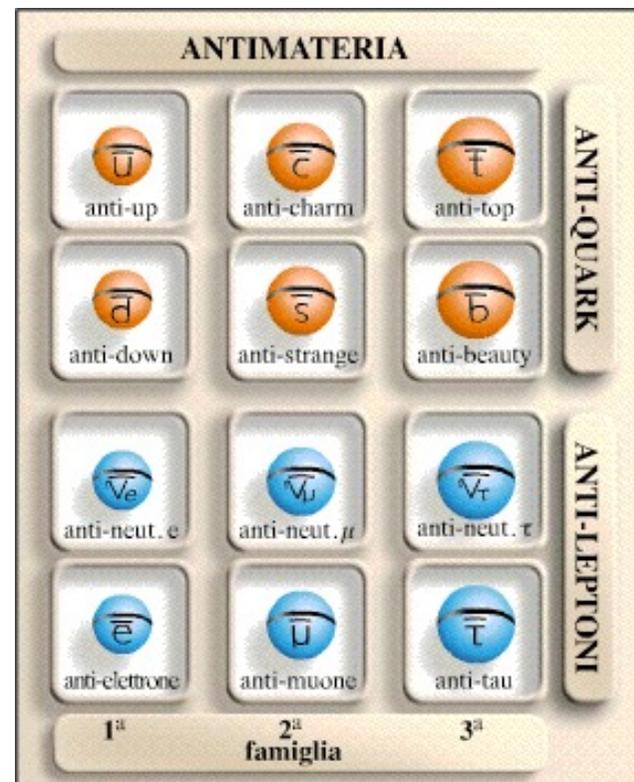
**Il quark up è il principale componente elementare del nostro corpo**  
 Occhio alla massa ed alla carica elettrica (Q)!

# Cosa sappiamo oggi

12 particelle

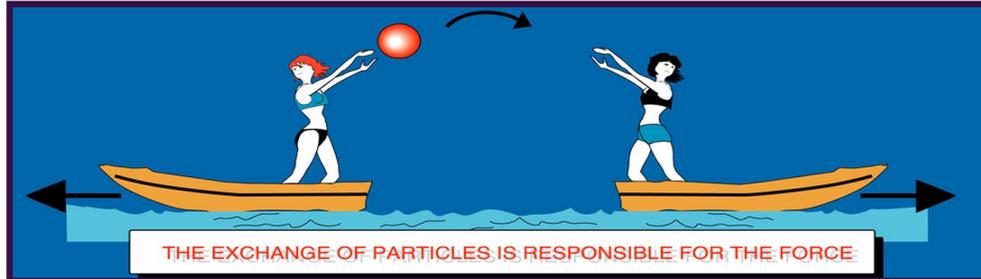


+ 12 antiparticelle



Per ogni particella esiste una corrispondente antiparticella con la stessa massa ma con carica elettrica opposta

# Cosa sappiamo oggi



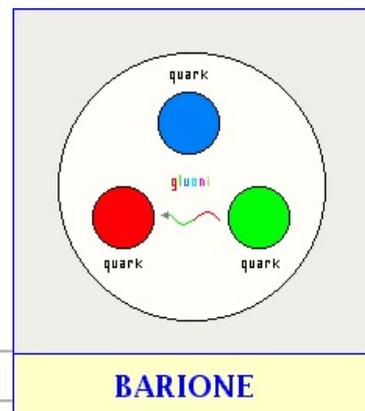
Le forze fondamentali sono 4



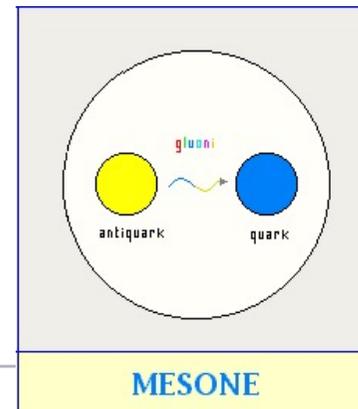
Forza	Intensità	Particella scambiata (BOSONI)	Come/dove vediamo questa forza?	Chi risente di questa forza?
<b>Forte</b>	1	<b>Gluoni</b>	Nuclei	Quark e Gluoni
<b>Elettromagnetica</b>	$\sim 10^{-3}$	<b>Fotone</b>	Elettricità e Magnetismo	Quark e leptoni carichi
<b>Debole</b>	$\sim 10^{-5}$	<b><math>W^{\pm}, Z</math></b>	Decadimento $\beta$	Quark e leptoni
<b>Gravitazionale (esclusa nel MS)</b>	$\sim 10^{-38}$	<b>gravitino</b>	I nostri piedi stanno in terra!	Tutte le particelle aventi massa

# Cosa sappiamo oggi: Chi sono le particelle composte?

- I quarks, contrariamente ai leptoni, non possono esistere come particelle libere.
- I quark formano dei sistemi legati (particelle) che prendono il nome di **Adroni**.
- La famiglia degli Adroni è ulteriormente suddivisa in
  - **Barioni**: formati da tre quarks (es. protone, neutrone)
  - **Mesoni**: formati da coppie quark-antiquark



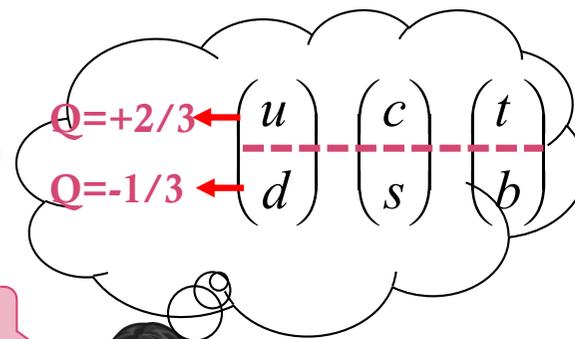
7



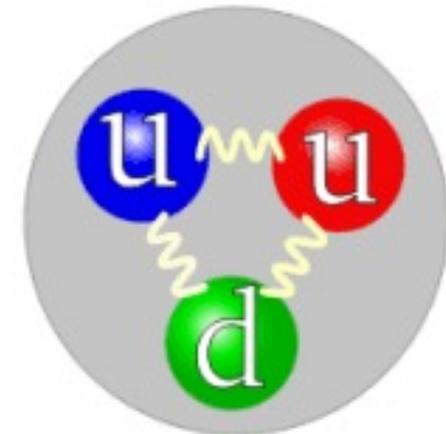
# Esempi di particelle composte

1) Il **protone** è costituito da:  
due quark up ed un quark down

Qual è la carica del protone?



Q=+1

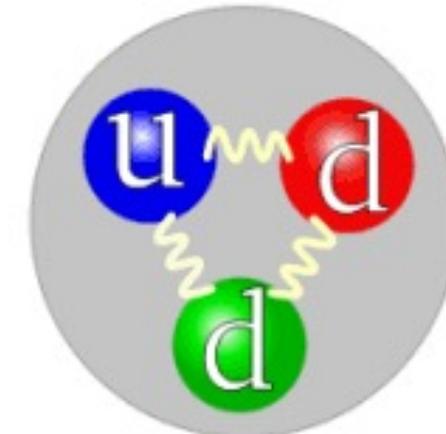


Proton

2) Il **neutrone** è costituito da:  
due quark down ed un quark up

Qual è la carica del neutrone?

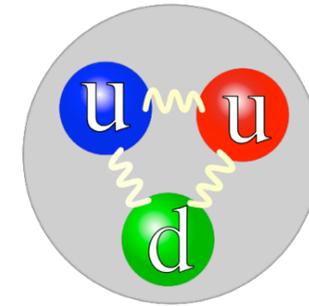
Q=0



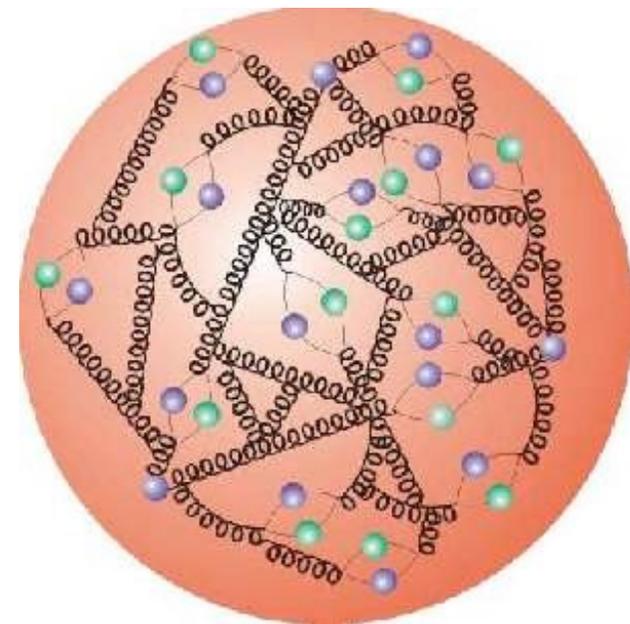
Neutron

# La struttura degli adroni

Il semplice modello del protone a tre quarks (uud) è valido solo a basse energie.



Ad alte energie il protone appare come un sistema complesso di quarks ed antiquarks in continua interazione tra di loro attraverso lo scambio di gluoni

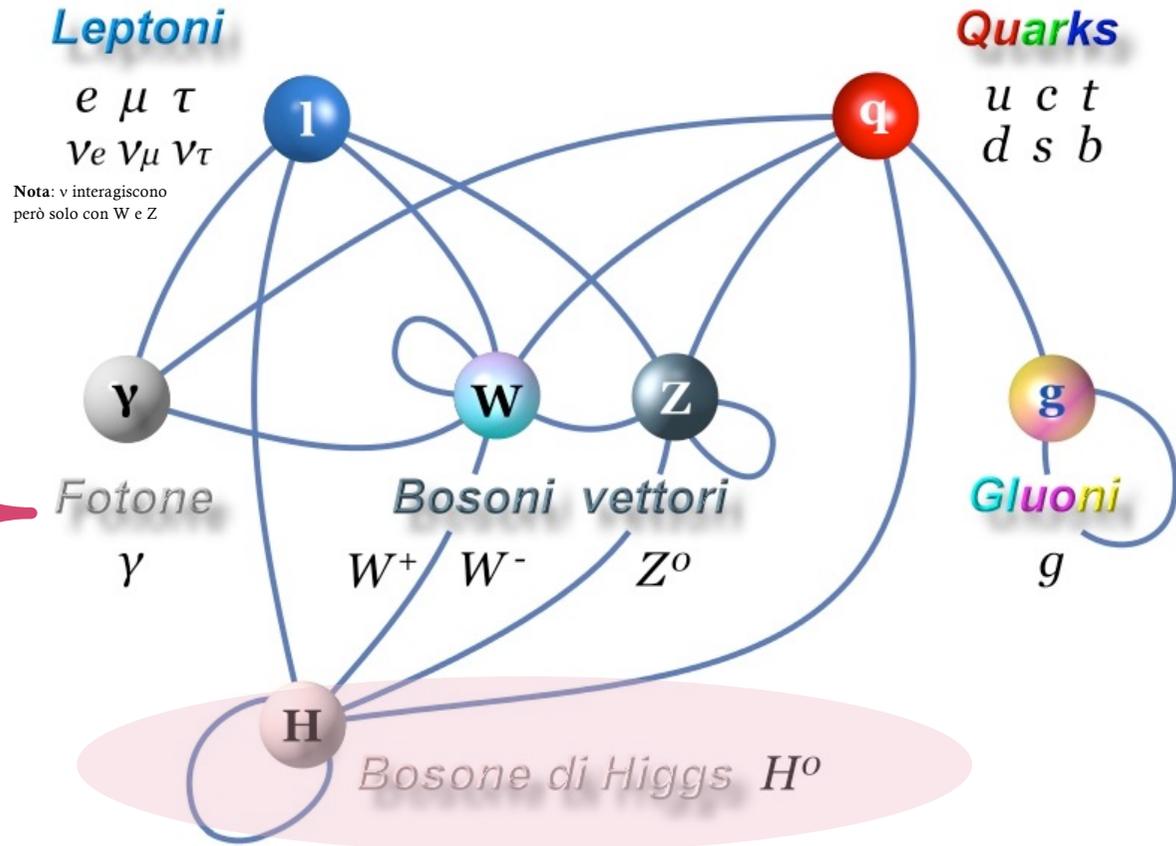


# Le interazioni nel MS

Leptoni  $\begin{pmatrix} \nu_e \\ e \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau \end{pmatrix}$

Quark  $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

Forza	Particella scambiata (BOSONI)	Chi risente di questa forza?
Forte	Gluoni	Quark e Gluoni
Elettromagnetica	Fotone	Quark e leptoni carichi
Debole	$W^\pm, Z$	Quark e leptoni



# Il bosone di Higgs

Il fisico Peter Higgs nel 1960 ha ipotizzato l'esistenza del bosone di Higgs per spiegare come mai la materia ha **massa**

Le particelle interagendo con il campo di Higgs acquistano massa

**Il 4 Luglio 2012 gli esperimenti ATLAS e CMS hanno annunciato la scoperta di una nuova particella compatibile con il bosone di Higgs.**

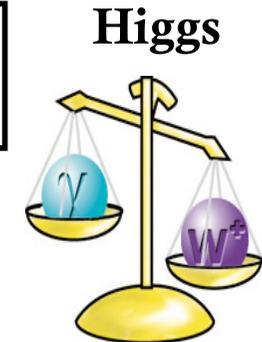
**→Premio Nobel per la Fisica 2013 assegnato a Peter Higgs e Francois Englert**

•Le **misure più recenti** ad ATLAS e CMS sembrano confermare che le proprietà di questa particella sono effettivamente quelle previste dal Modello Standard per l'Higgs

# Cosa non sappiamo ancora?



**La particella scoperta ad LHC è veramente l'Higgs del MS? Oppure è il primo segnale di nuova fisica?**



→ **Le misure dell'Higgs sono soggette ad incertezze.** Per ridurre l'incertezza statistica è necessario raccogliere più dati ed analizzarli



Perchè si parla di nuova fisica oltre il Modello Standard?

Esistono importanti osservazioni sperimentali che non sono spiegate dal Modello Standard che ci fanno capire che esso non è il modello onnicomprensivo della fisica delle particelle elementari

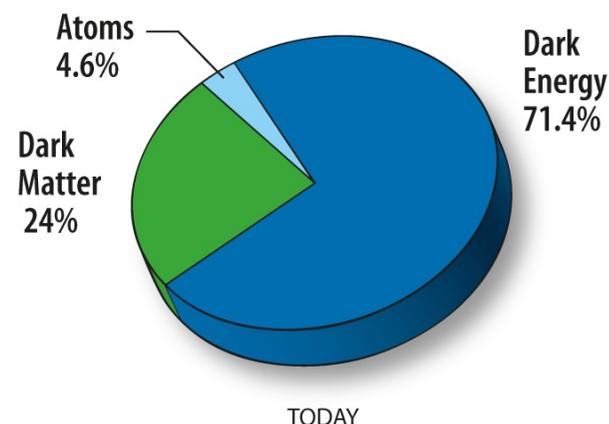


# Cosa ancora non sappiamo?

I movimenti delle galassie regolati dalla forza di gravità non possono essere spiegati sulla base della quantità di materia osservata → **Esiste materia oscura nell'universo**

Da dati sperimentali si deduce che:

→ **Non sappiamo nulla della composizione del 95% del cosmo**



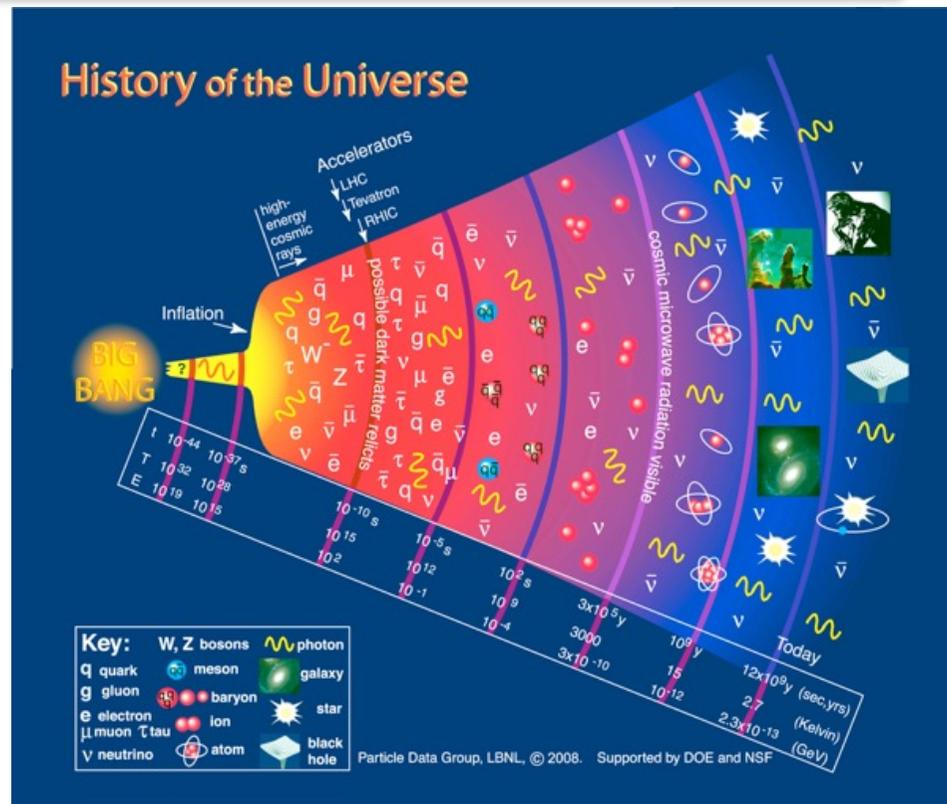
Cos'è la materia oscura?

Non lo sappiamo ancora e il MS non la spiega. Esistono teorie più generali che inglobano il MS, che prevedono una moltitudine di altre particelle, alcune delle quali potrebbero essere candidati di materia oscura. Ad LHC nessuna evidenza di tali particelle è stata ancora trovata

# Cosa ancora non sappiamo?



Com'era l'universo alla sua nascita?



Le interazioni tra particelle negli acceleratori riproducono le stesse condizioni presenti nei primissimi istanti di vita dell'universo



Hmm..gli esperimenti di LHC e gli esperimenti su acceleratori futuri forniranno alcune delle risposte a questi interrogativi negli anni a venire..

# Perché la fisica delle particelle elementari è detta fisica delle alte energie?

*Ogni particella ha anche una natura ondulatoria*

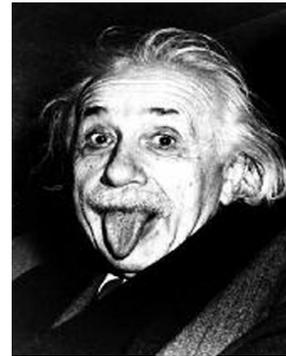
$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{hc}{E}$$



de Broglie

*La massa è una forma di energia*

$$E = mc^2$$



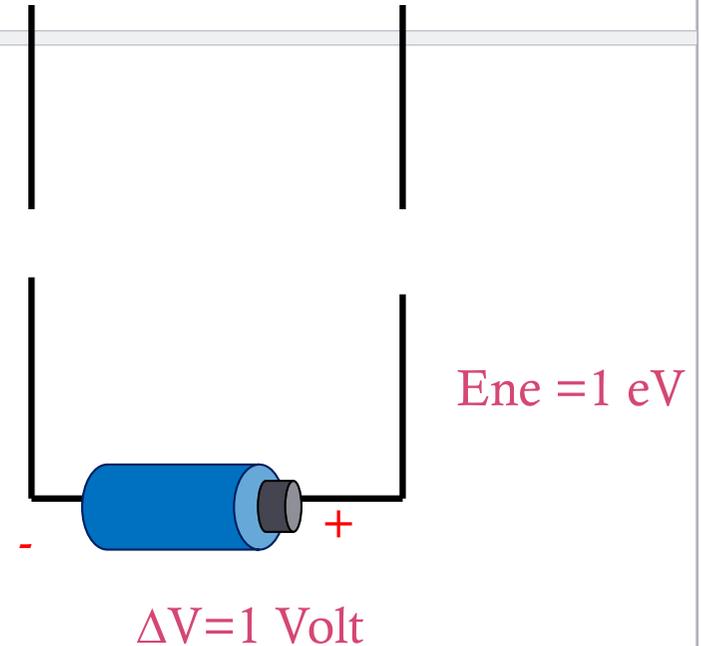
Einstein

Se acceleriamo particelle (elettroni o protoni) ad alte energie e le facciamo collidere possiamo studiare la struttura intima della materia (protoni → quark, gluoni)

Se l'energia di collisione è molto alta, l'energia si converte in materia → produzione di nuove particelle

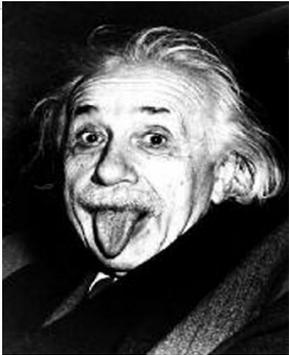
# Unità di energia

Un elettron-volt (eV) è la quantità di energia acquistata da un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di un volt.



Scala di Energia	Dove la troviamo?
Pochi eV	Processi atomici (reazioni chimiche o emissione di luce)
Pochi MeV (1MeV=10 <sup>6</sup> eV)	Energie dei processi nucleari (fissione nucleare o decadimento radioattivo)
<b>Alcuni TeV</b> (1TeV=10 <sup>12</sup> eV)	Acceleratori: Tevatron (FermiLab), <b>LHC (Cern)</b>

# Energia e massa



**Einstein**

*La massa è una  
forma di energia*

$$E=mc^2$$

Per produrre una particella di massa  $m$  l'energia di collisione dei 2 partoni (energia del centro di massa) deve essere  $\geq mc^2$

## Examples of the Energy Equivalent of Mass

0.000000511 TeV	Electron
0.000938 TeV	Proton
0.08 TeV	W particle
0.1 - 1.0 TeV	Higgs and other new particles

## Note

0.5 MeV

1000 MeV = 1 GeV

80 GeV

125 GeV (Higgs)

# CERN ed LHC

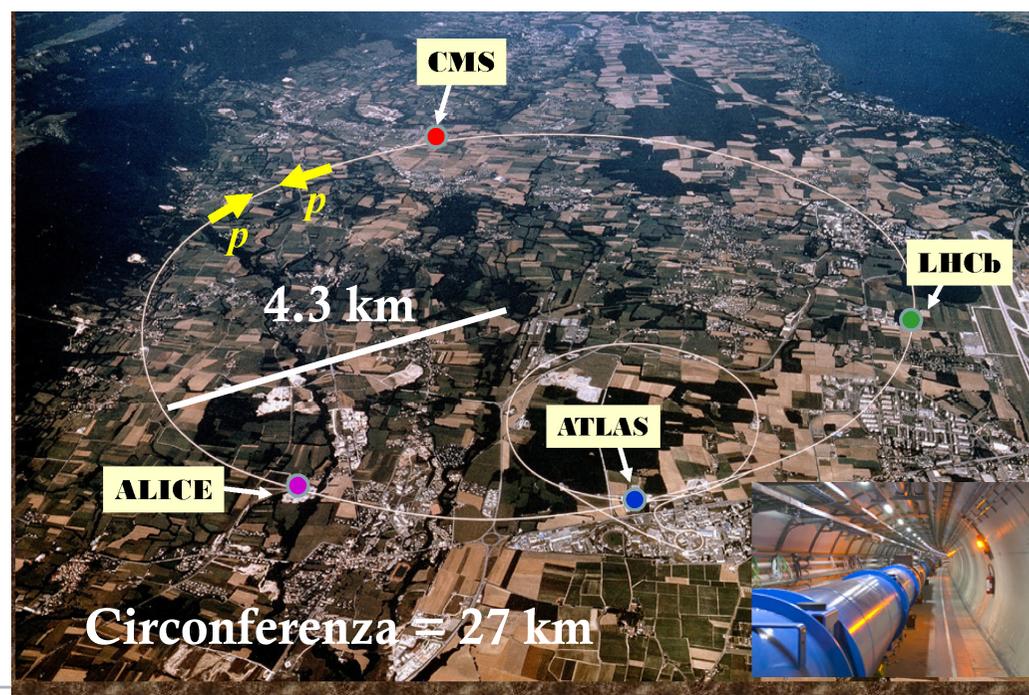
## CERN

Fondato nel 1954 da 12 Paesi fra cui l'Italia. Oggi più di 20 stati membri.  
Più di 12000 scienziati da tutto il mondo afferiscono al CERN.

→ Gli studi fatti al CERN sono stati cruciali per svariate invenzioni:  
il Web, gli scanner PET, i touch screen

## LHC

- Collisionatore protone-protone
- Lungo 27 km, 100 m sotto terra
- Energia di collisione dei protoni fino 13 TeV :6.5 TeV + 6.5 TeV  
(energia di progetto 14 TeV)



# LHC al CERN (1/2)

- **Velocità dei protoni**= 99,9998 % della velocità della luce ( $c = 3 \times 10^8$  m/s)

→ Un protone in orbita in LHC per 10h percorre una distanza pari al tragitto di andata e ritorno tra la Terra e Nettuno!

- **9300 magneti superconduttori**, raffreddati a  $-271,3^{\circ}\text{C}$  (= 1.9 K)
- **Pressione all'interno del tubo**=  $10^{-13}$  atm (1 decimo che sulla luna)

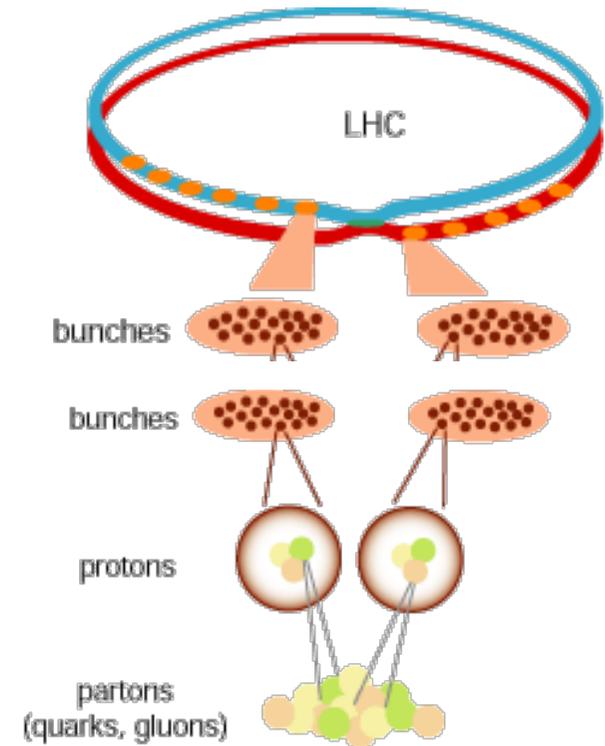


# LHC al CERN (2/2)

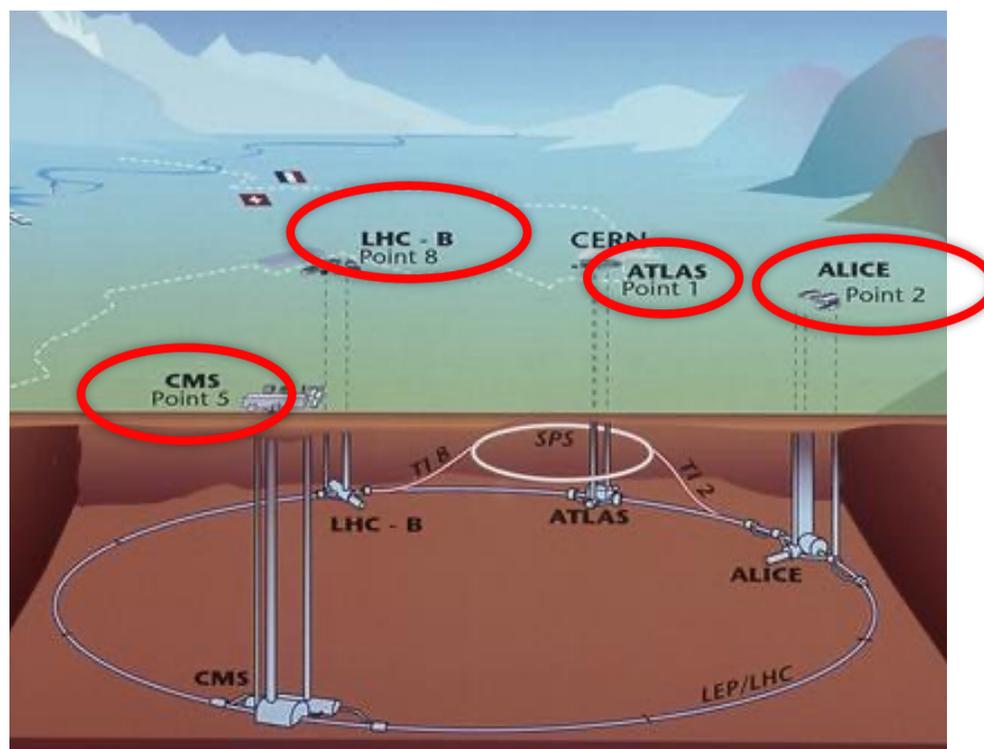
- **Densità dei pacchetti**  
1 pacchetto =  $10^{11}$  protoni
- **Frequenza di collisione** = 40 milioni al secondo

→ La densità di energia è quella dell'universo un miliardesimo di secondo dopo il Big Bang

→ Il consumo di potenza è equivalente al consumo familiare dell'area del cantone di Ginevra



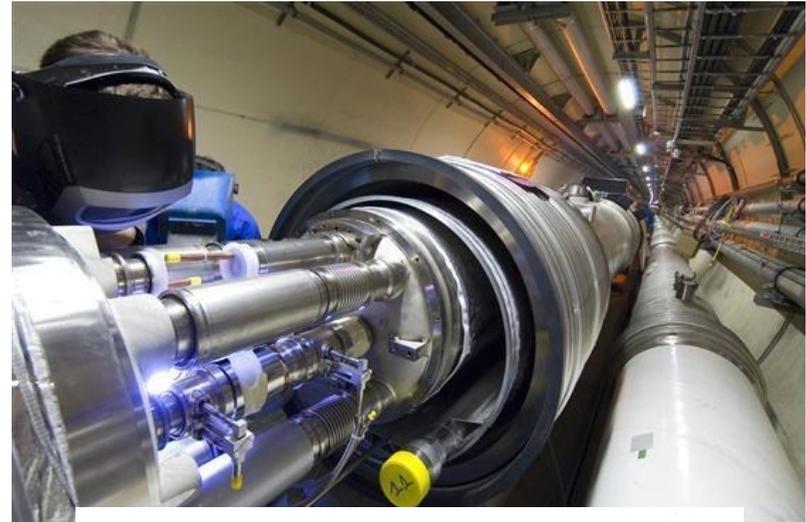
# Gli esperimenti di LHC



# I rivelatori sugli acceleratori

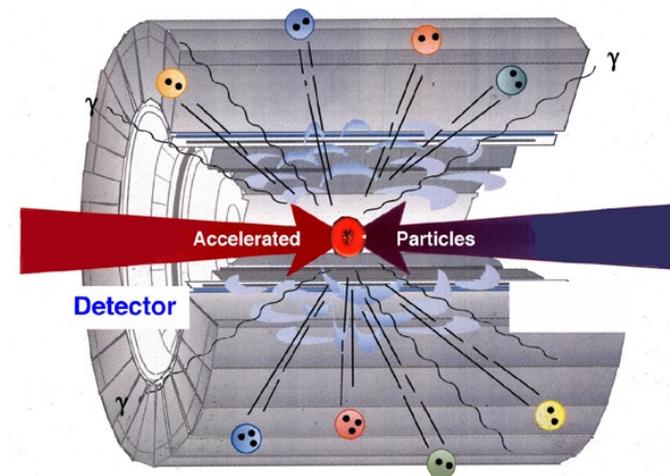
Per accelerare le particelle,  
farle collidere e crearne nuove

↪ **Acceleratori**



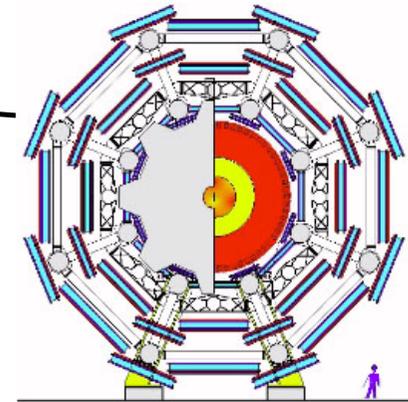
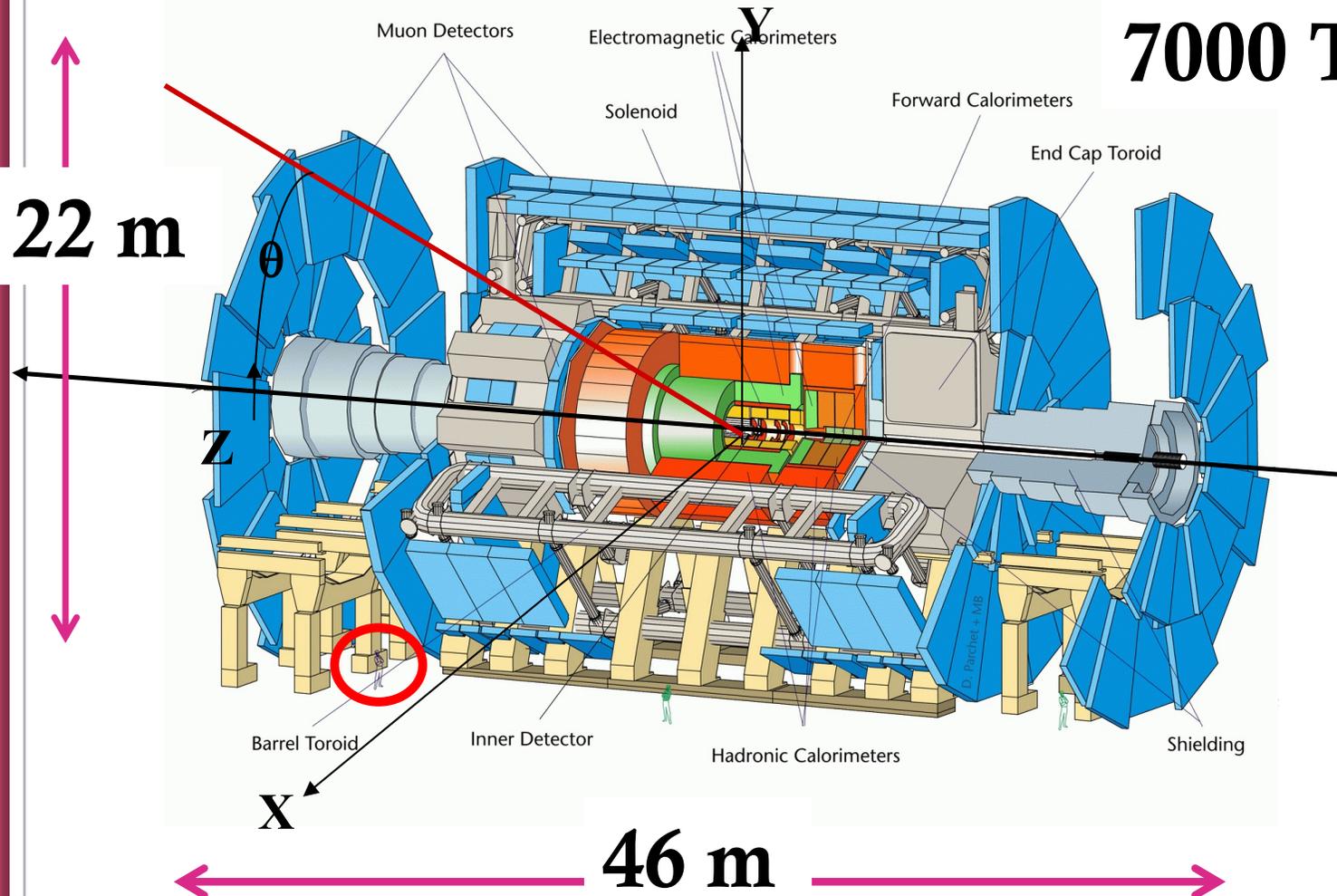
Per osservare le nuove particelle  
così create

↪ **Rivelatori**



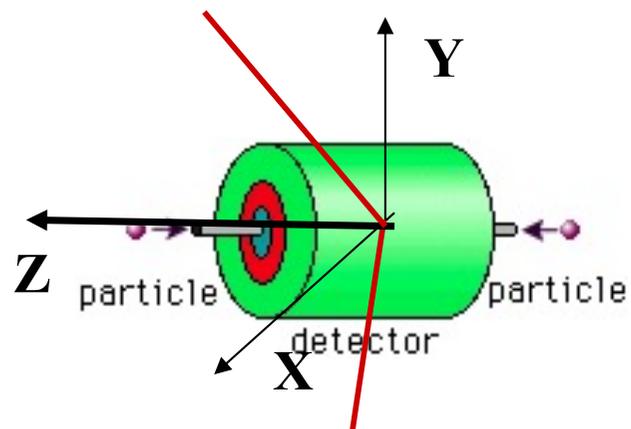
# ATLAS

**7000 Tonnellate**



**Piano Trasverso**

# L'impulso trasverso



**L'impulso trasverso gioca un ruolo importante nella fisica di LHC!**

# Cosa studiamo ad ATLAS e come?

Il risultato della collisione fra 2 (pacchetti di) protoni è detta **evento**

Eventi con caratteristiche differenti possono essere prodotti nella collisione fra protoni  
→ **Processi differenti** (alcuni più frequenti altri meno)

Dopo aver stabilito il tipo di processo che vogliamo studiare (**Higgs, W/Z, etc**)  
Il goal è di collezionare un **gran numero di eventi (dataset)**, selezionare  
quelli che provengono dal processo scelto e verificare se l'osservazione (o non osservazione) è in accordo con le previsioni di un dato modello teorico

**Quali sono i processi più interessanti ad LHC?**

Quelli in cui sono state create nuove particelle nello stato finale (Conversione energia  $\leftrightarrow$  materia)  
Quelle più interessanti (W/Z, Higgs) sono instabili: breve vita media  $\rightarrow$  decadimenti in particelle stabili

**Esempio:**  $W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$

# Cosa studiamo ad ATLAS e come?

## Eventi interessanti ad LHC

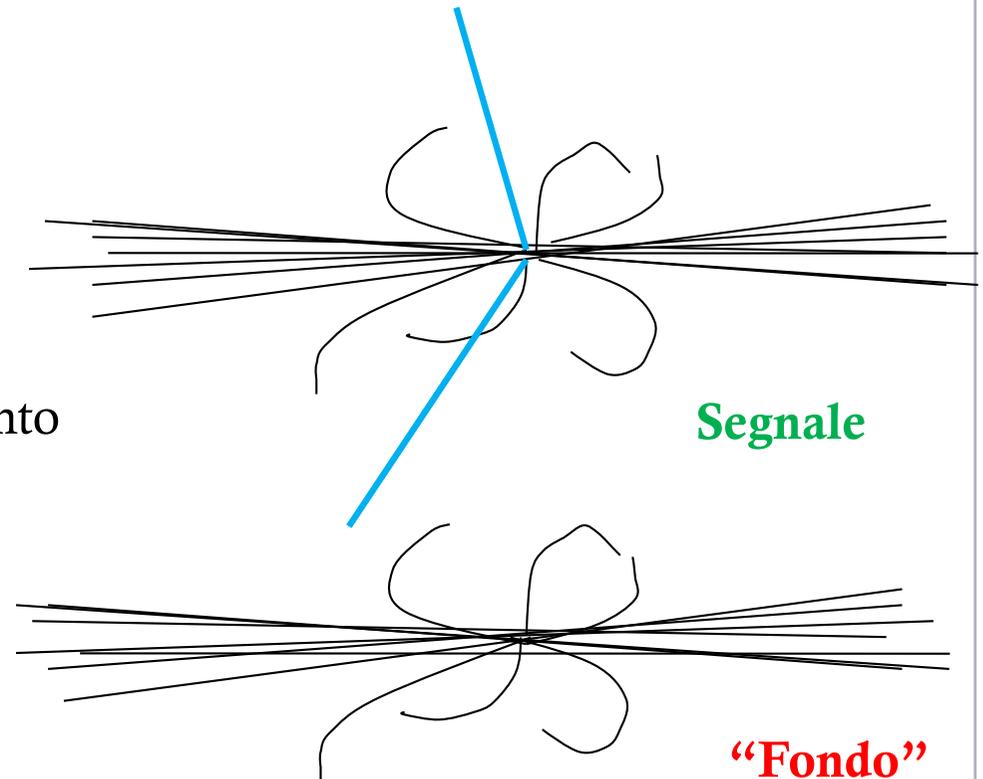
(eventi molto rari)=

Particelle di alto  $p_t$ , accompagnate  
tipicamente da molte particelle  
di basso  $p_t$

(esempio:  $e\bar{\nu}_e$  che vengono dal decadimento  
del  $W^-$ )

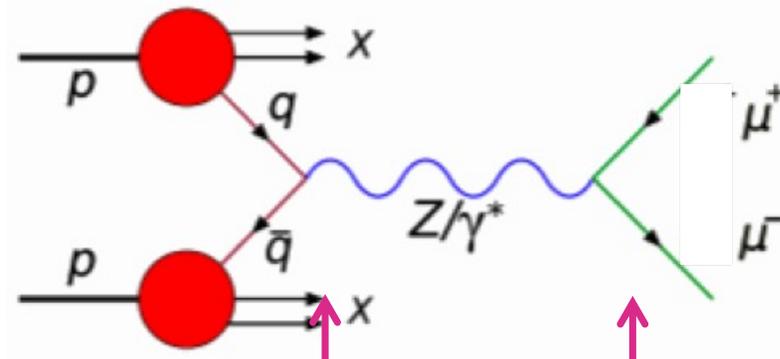
Stato finale tipico di LHC=

molte particelle di basso  $p_t$ .  
(molto frequenti)



ATLAS è pensato per studiare soprattutto eventi rari

# Esempio: identificazione della Z



Produzione della Z

Decadimento della Z tempo

La Z vive un tempo molto breve e decade, un possibile decadimento è quello in 2 muoni, ad ATLAS misuriamo i 2 muoni (energia, impulso, carica)

Come facciamo ad essere sicuri che essi provengono dal decadimento di una Z?

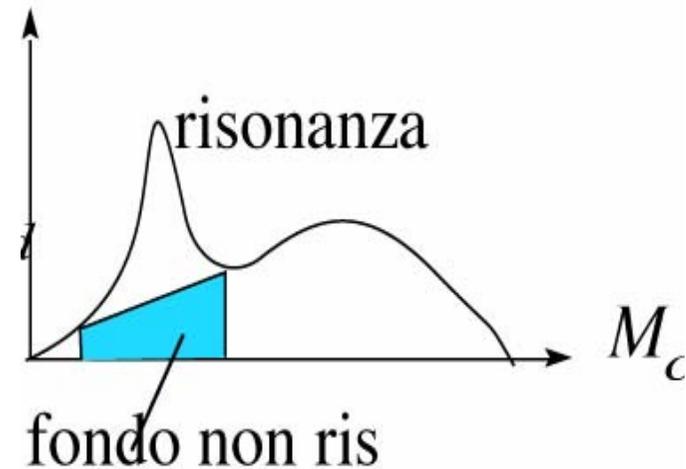
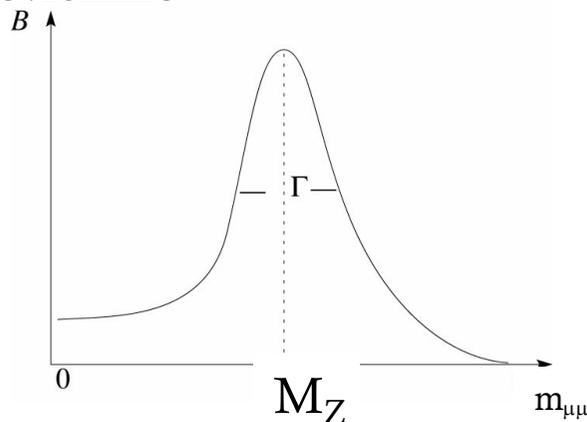
Selezioniamo solo eventi che hanno  $2\mu$  **di carica opposta ed alto impulso trasverso**. Quindi usiamo la cinematica relativistica per calcolare la **massa invariante della Z**



# Esempio: identificazione della Z

Ripetiamo il calcolo della massa per tutti gli eventi selezionati e mettiamo i risultati in un istogramma

Idealmente dovremmo avere →

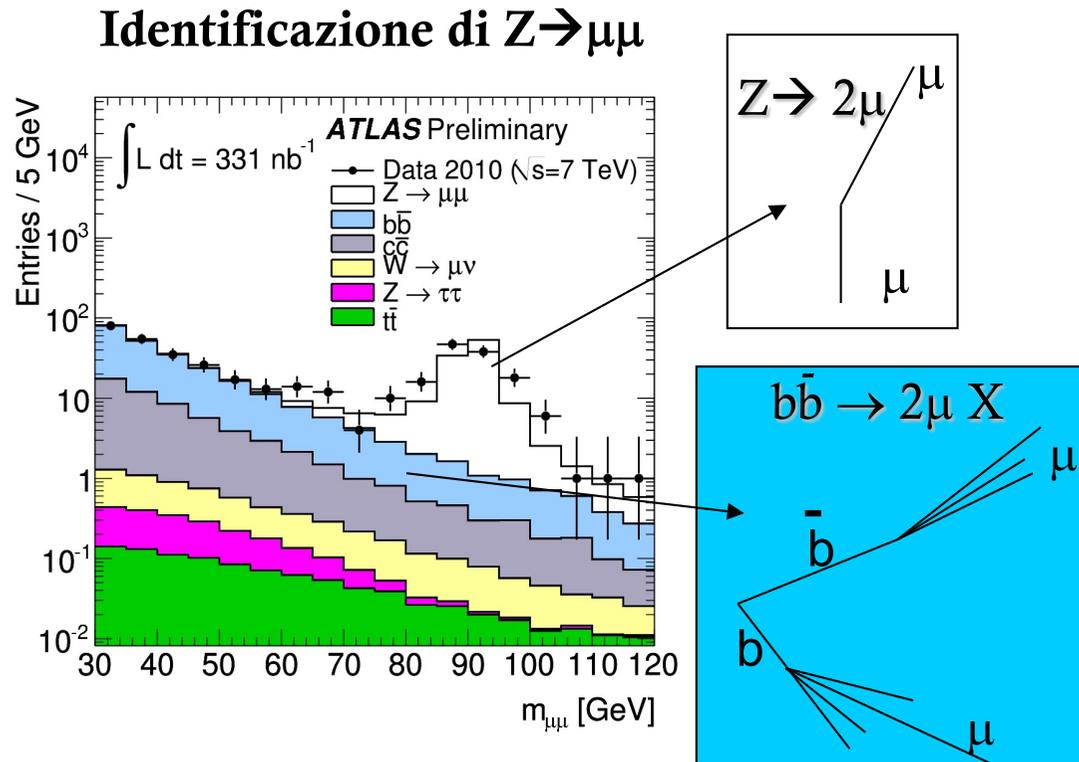


Cos'è quella motitudine di eventi sotto il picco?

È fondo (altri processi di fisica con stato finale molto simile a quello del segnale)



# Esempio: identificazione della Z o della W

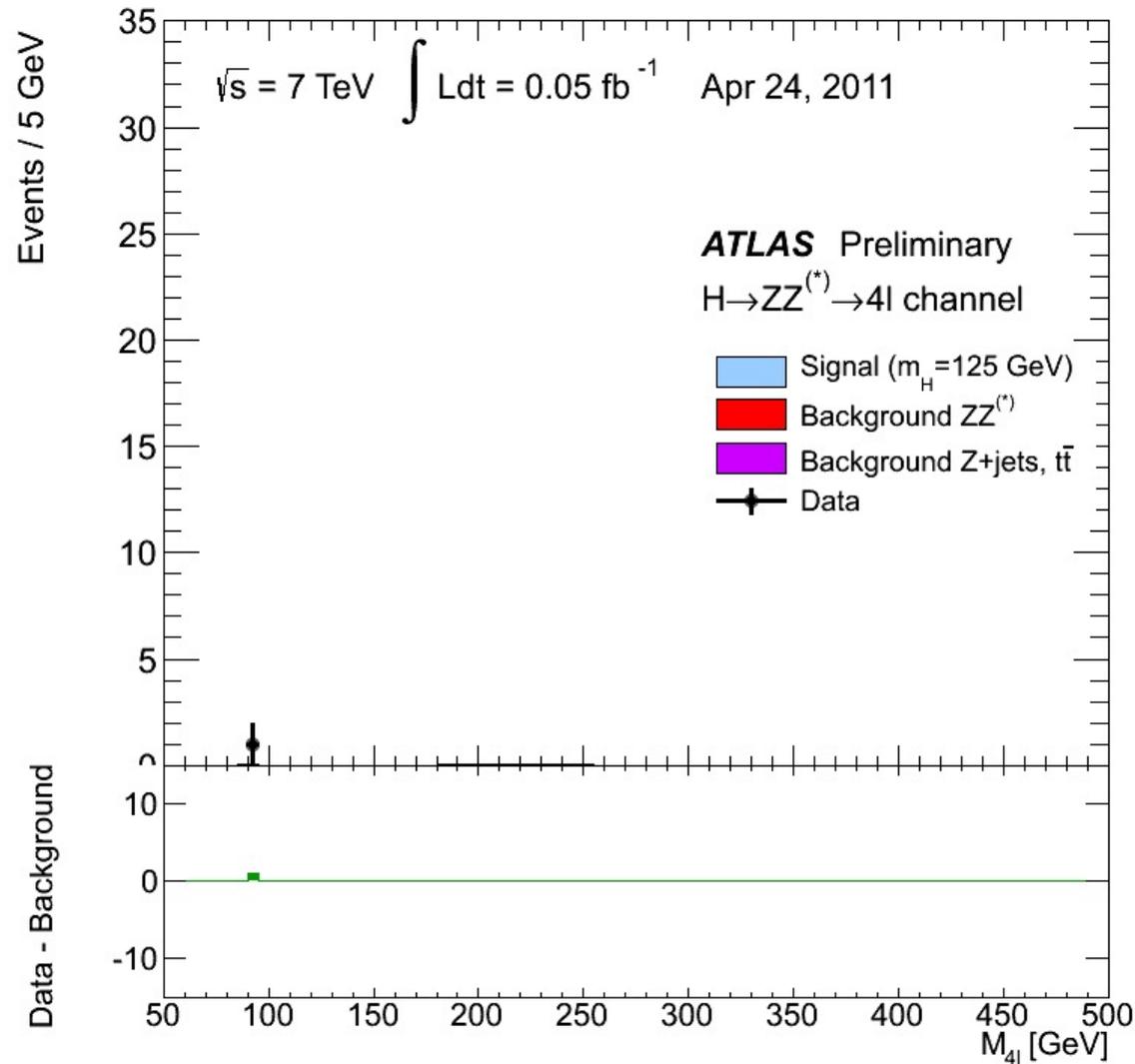


Per ridurre ulteriormente gli eventi di fondo possiamo sfruttare la **massa invariante** e/o **variabili di isolamento** (i  $\mu$  della Z sono isolati)

→ Quando studiamo Higgs o W usiamo criteri di selezione simili

Esempio:  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$

# Esempio: $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$



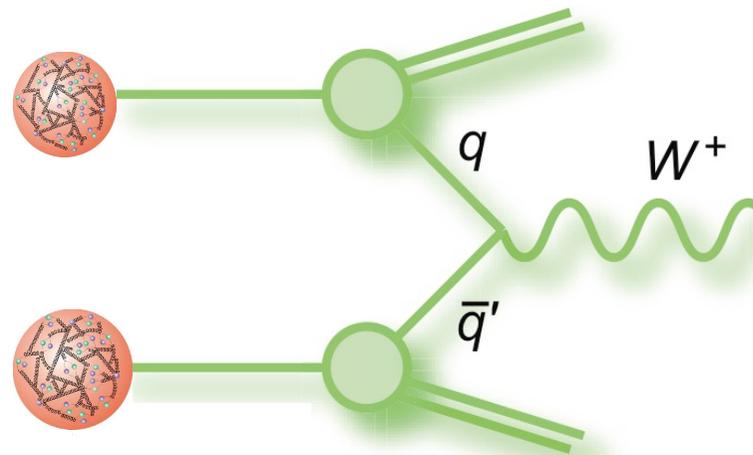
# Esercitazione di analisi dati

**Analisi di un piccolo campione dati realmente raccolto  
dall' esperimento ATLAS al LHC!**

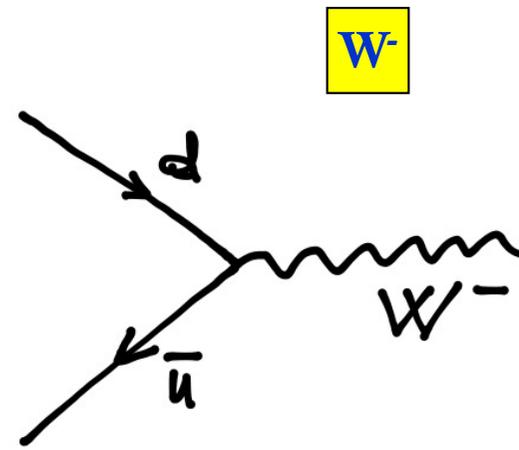
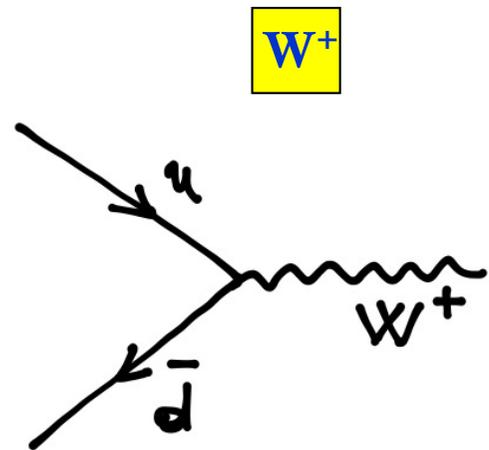
**Imparerete a distinguere gli  
eventi di “segnale” da quelli di “fondo”.**

1. Studio della produzione singola dei bosoni  $W^\pm$  nelle interazioni protone-protone ad LHC
2. Identificazione e conteggio dei  $W^+$  rispetto ai  $W^-$
3. Studio della produzione di coppie ( $W^+, W^-$ ) e misurazione della loro separazione angolare → Interessante in relazione alla produzione del Bosone di Higgs

# Produzione di W ad LHC



Produzione  
quark-antiquark

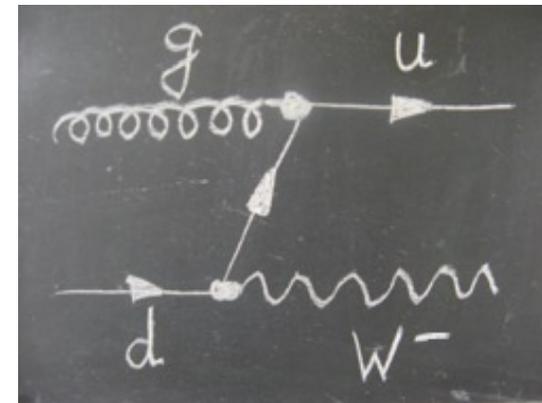
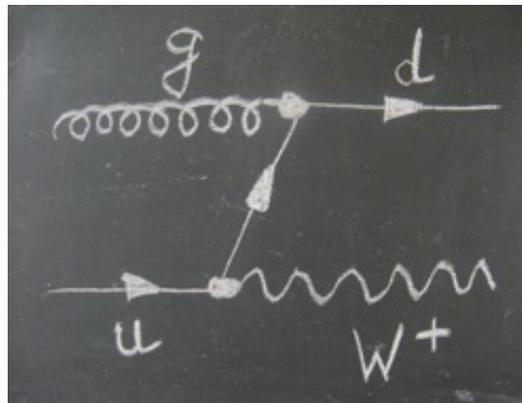


# Produzione di W ad LHC

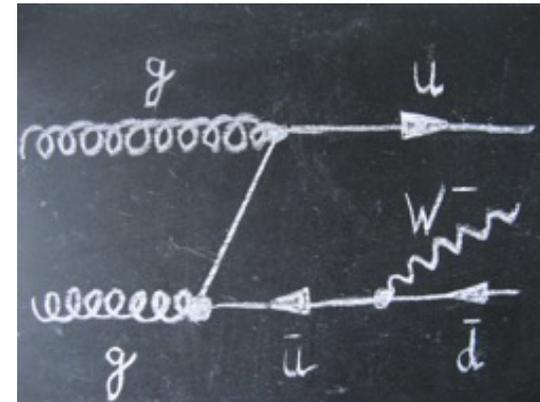
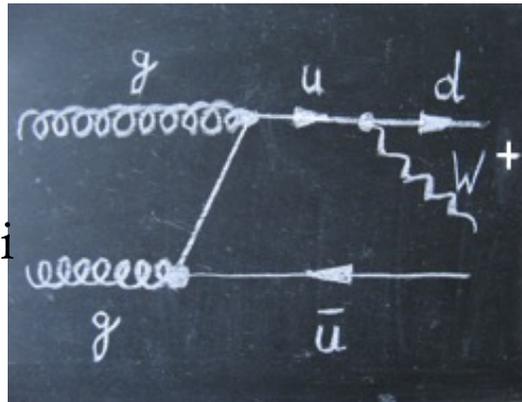
$W^+$

$W^-$

Gluone + Quark



Gluone + Gluone



**Nota=** I quark sono identificati come un flutto di particelle detto jet

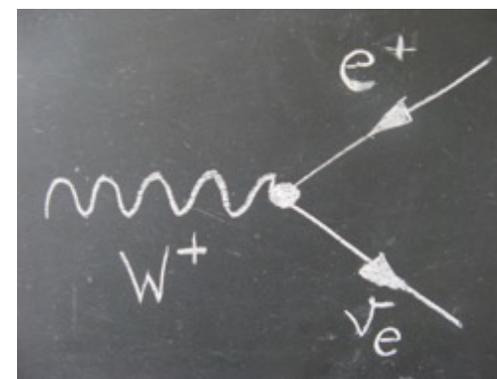
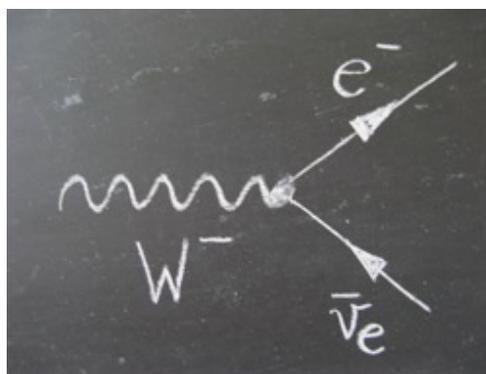


# Decadimenti leptonici del W

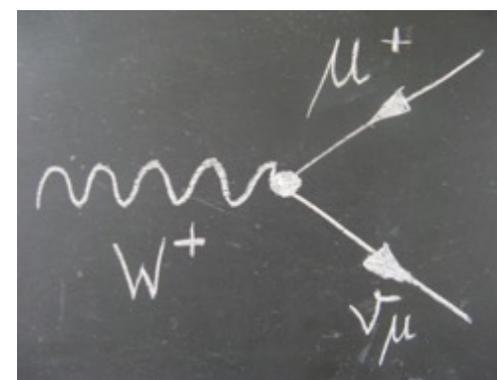
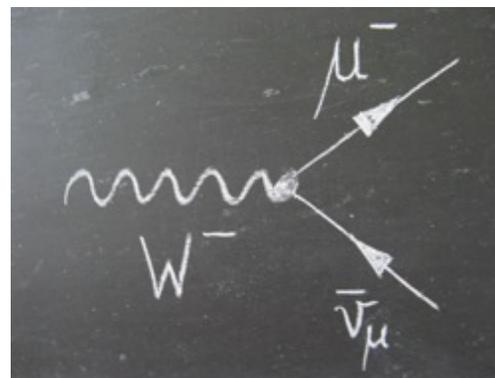
$W^-$

$W^+$

Stati finali con **elettroni**



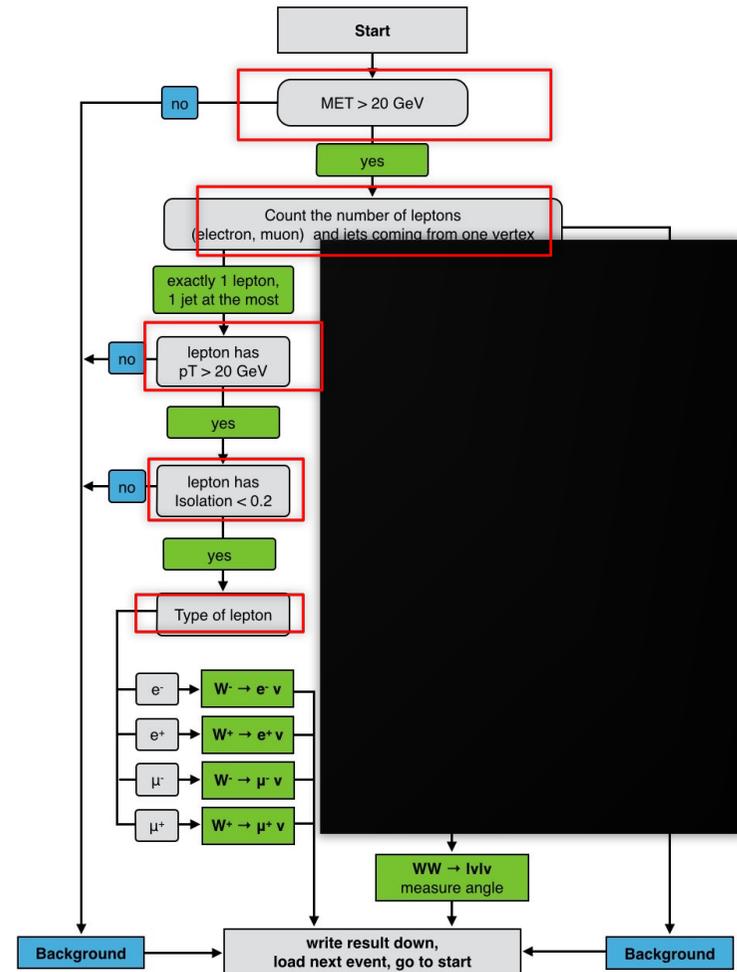
Stati finali con **muoni**



Lo stato finale del decadimento del W è caratterizzato da un **leptone di alto impulso trasverso** e, a causa della presenza del neutrino, da **Impulso Trasverso Mancante (MET)** nell'evento

# 1) La selezione per il W

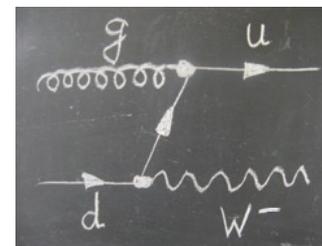
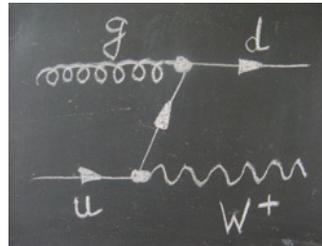
*Le mie colleghe  
ve la spiegheranno  
in dettaglio..*



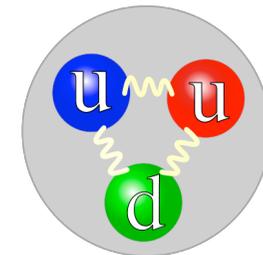
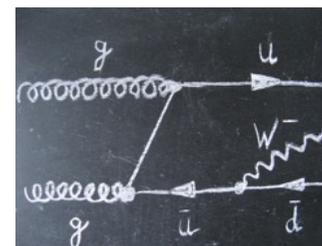
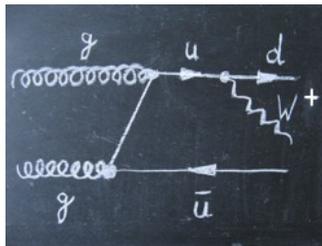
## 2) Stima del rapporto $N(W^+)/N(W^-)$

Per il processo “gluone + quark” il rapporto  $W^+/W^-$  dipende dal contenuto di quarks **u** e **d** nel protone

Gluone + Quark  
( 66 % )



Gluone + Gluone  
( 34 % )



$$f^+ = 0.66 * (2/3) + 0.34 * (1/2) \simeq 0.6$$

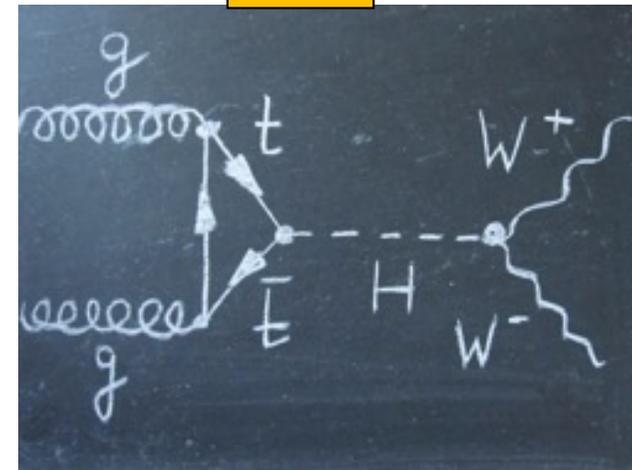
$$f^- = 0.66 * (1/3) + 0.34 * (1/2) \simeq 0.4$$

$$N(W^+)/N(W^-) = f^+/f^- \simeq 1.5$$

Il rapporto  $W^+/W^-$  dà informazioni sulla composizione dei protoni

### 3) Studio della produzione di coppie $W^+ W^-$

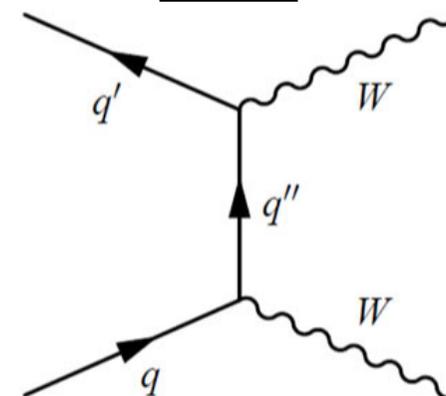
Higgs



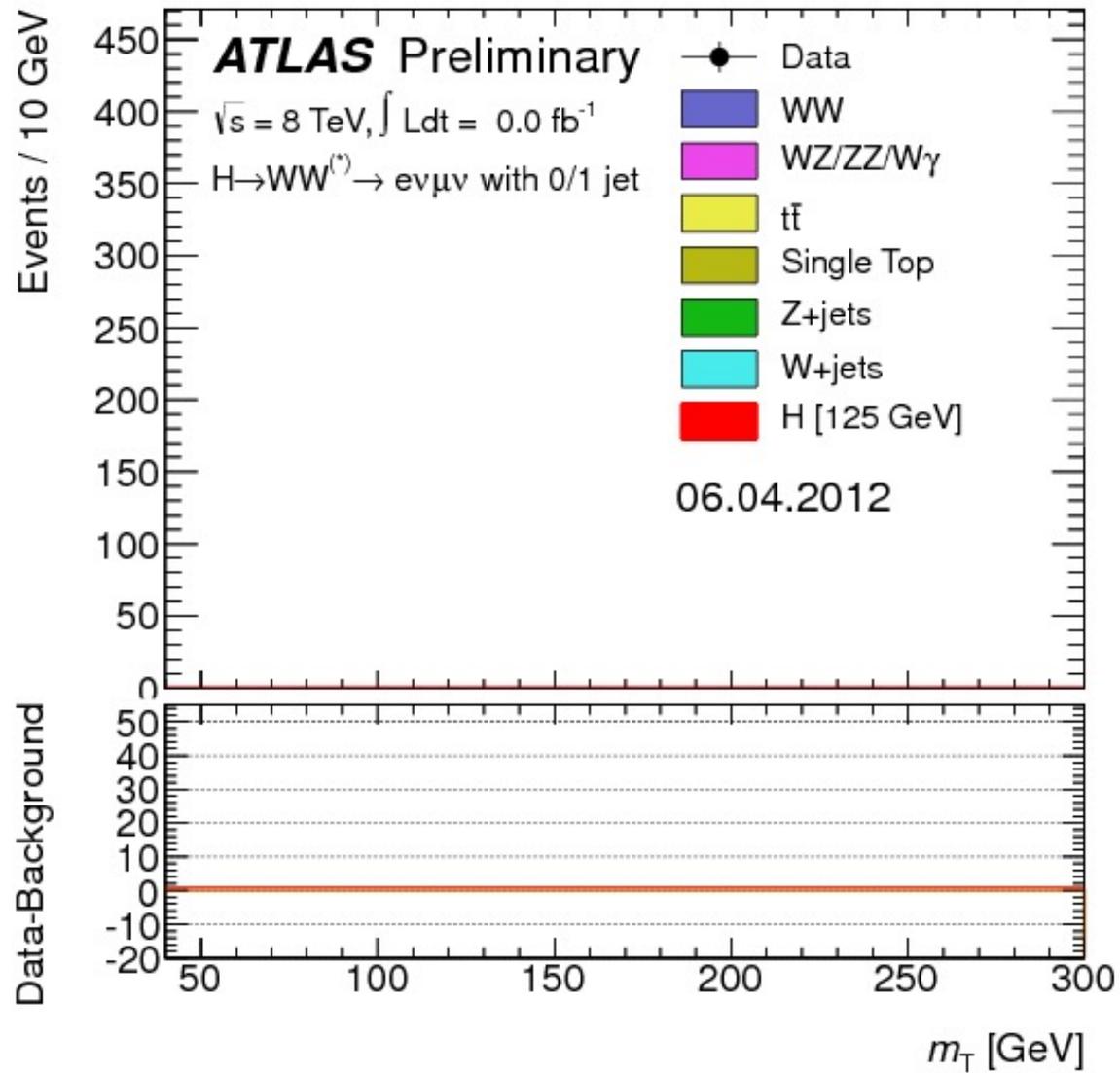
Questo stato finale è particolarmente interessante perché rappresenta un fondo per il **bosone di Higgs del caso del decadimento  $H \rightarrow WW$**

Il bosone di Higgs può infatti essere prodotto e decadere attraverso il seguente processo:

WW



# H → WW



# Come distinguo WW da $H \rightarrow WW$ ?

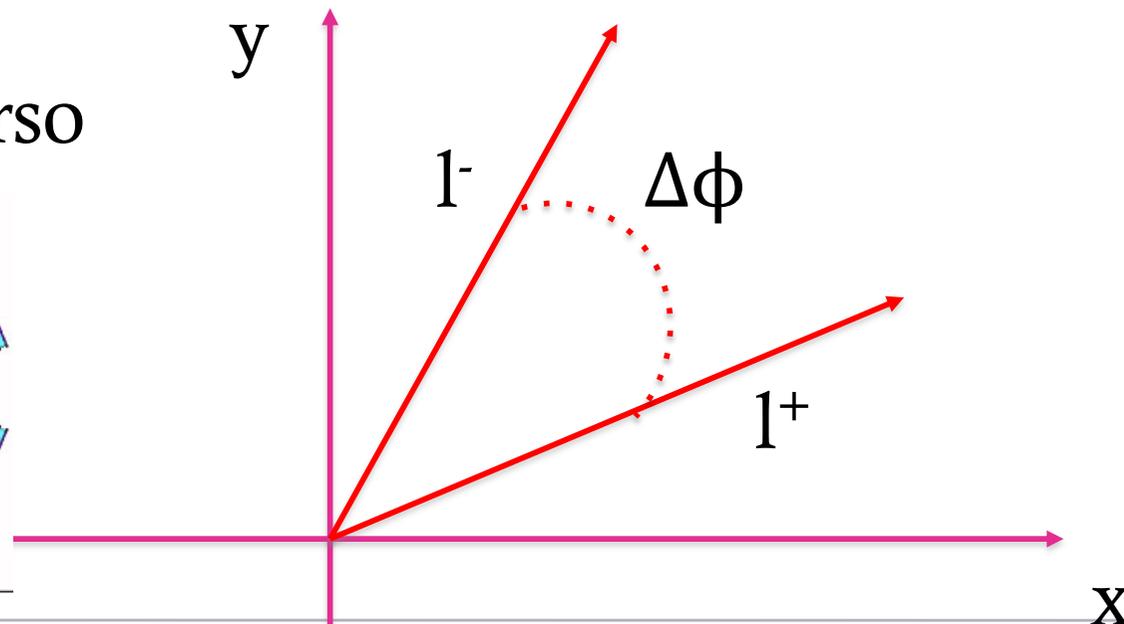
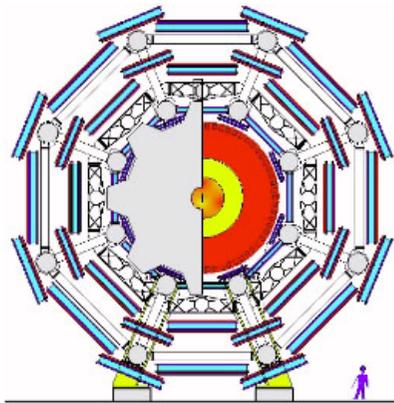
Sono eventi molto simili. Però lo **spin** di H (spin=0) influisce sulla distribuzione angolare delle W provenienti dal suo decadimento.

Lo spin è una proprietà intrinseca delle particelle come massa e carica

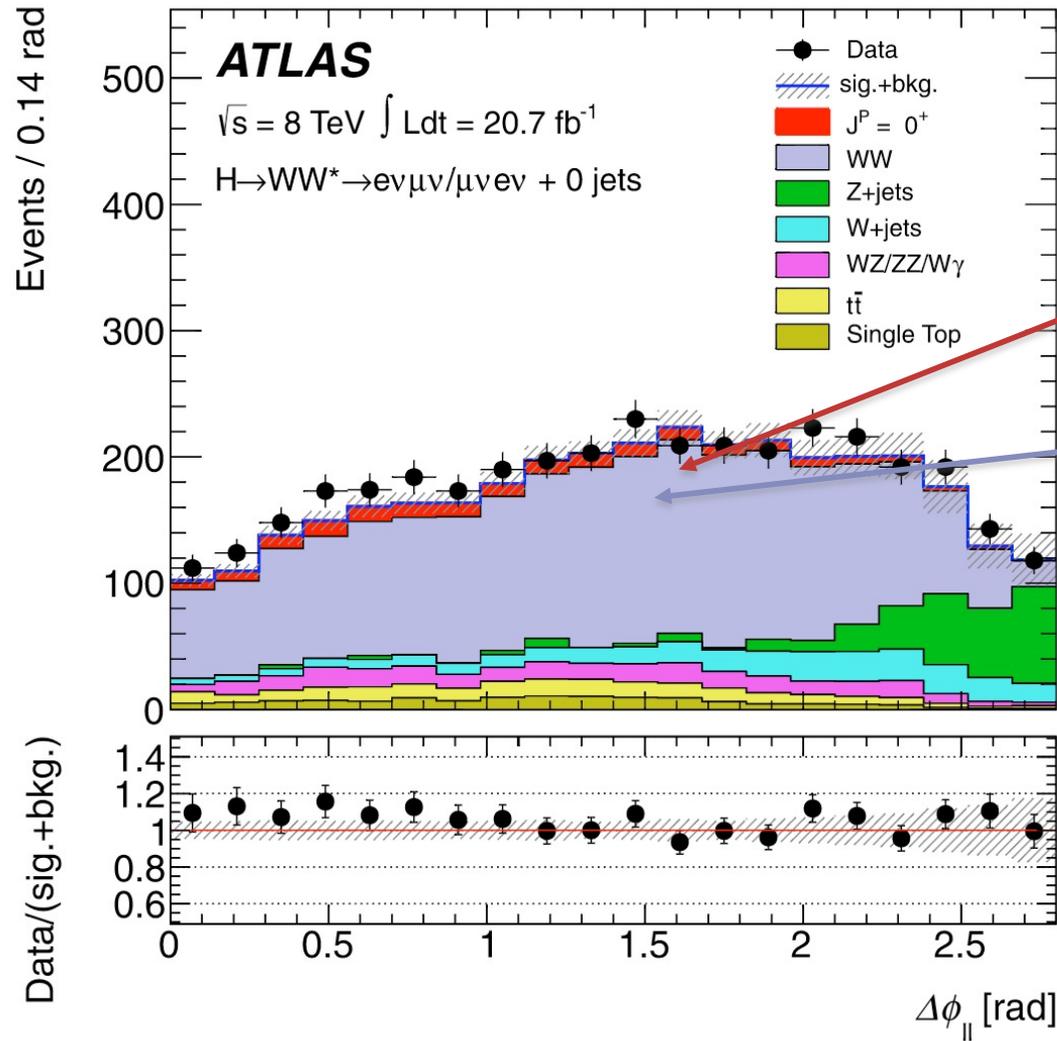
Quindi la **distribuzione angolare** dello stato finale è diversa nel caso di decadimento dell' Higgs rispetto ad un evento WW.



Piano trasverso



# Distribuzione $\Delta\phi$



Contributo dell'Higgs

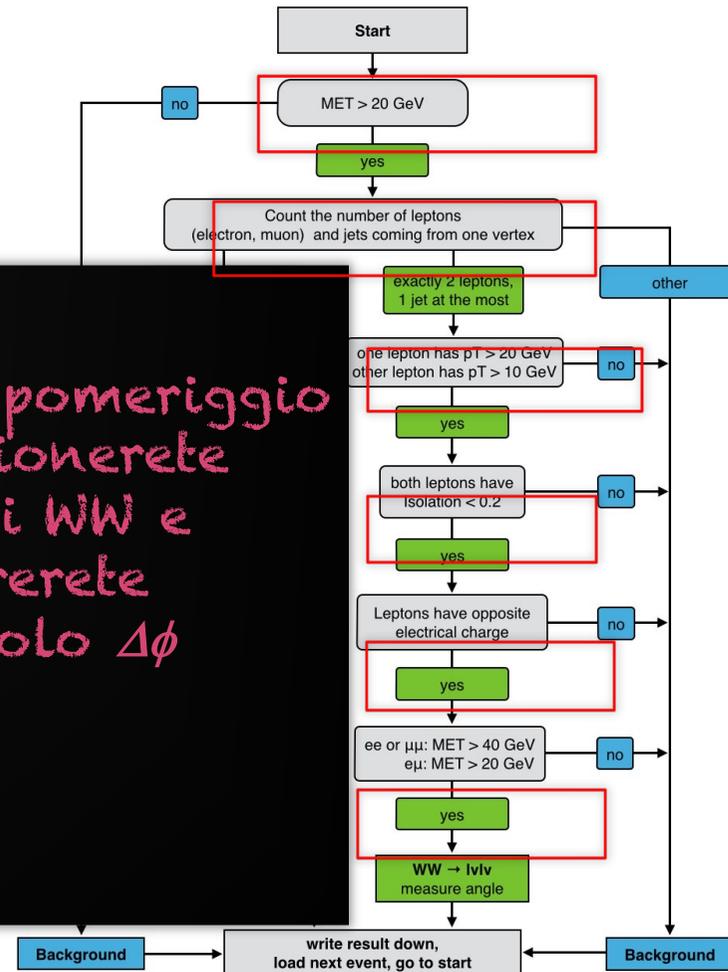
Contributo del WW

# La selezione per il WW

*Le mie colleghe ve la  
spiegheranno  
in dettaglio..*



Oggi pomeriggio  
selezionerete  
eventi WW e  
misurerete  
l'angolo  $\Delta\phi$



# Concludendo

La ricerca nel campo della **Fisica delle Particelle Elementari** ed in particolare ad LHC in questi anni è **un'esperienza unica, eccitante ed emozionante..**

..caratterizzata da tanto lavoro, tanta fatica, ed a volte stress, ma anche enormi soddisfazioni!

Abbiamo scoperto il bosone di Higgs, verificato la validità del MS ad energie finora inesplorate ed escluso tanti scenari teorici per la fisica oltre il MS

→**nuovi ed interessanti risultati sono alla porta!**

Per l' esperienza di laboratorio di oggi pomeriggio:

**BUON DIVERTIMENTO!**

