

Introduzione alla fisica delle particelle elementari

Evelin Meoni
(Dipartimento di Fisica - UNICAL)

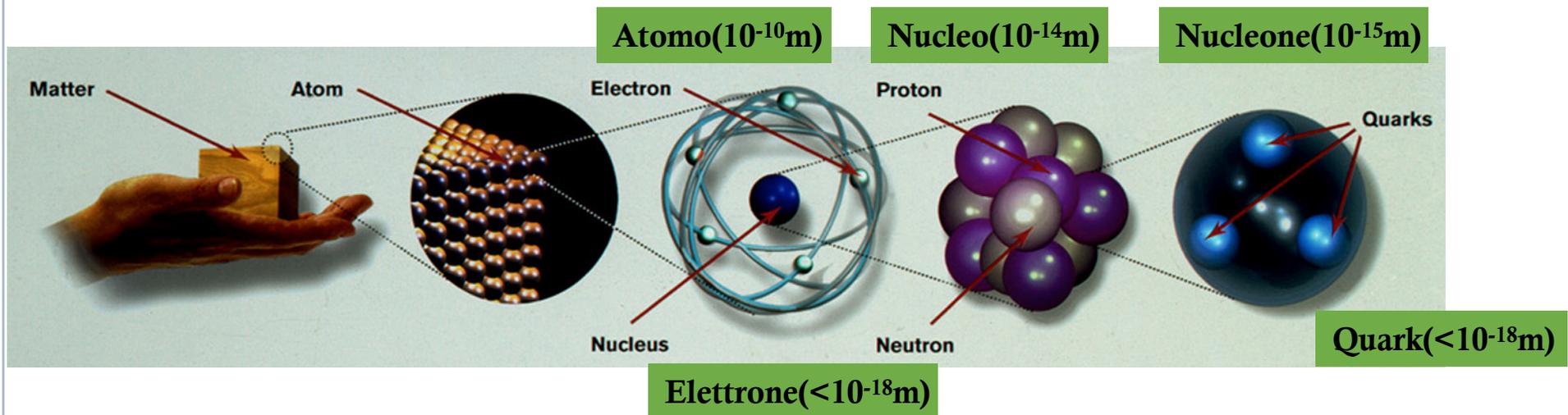


Sommario

- 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

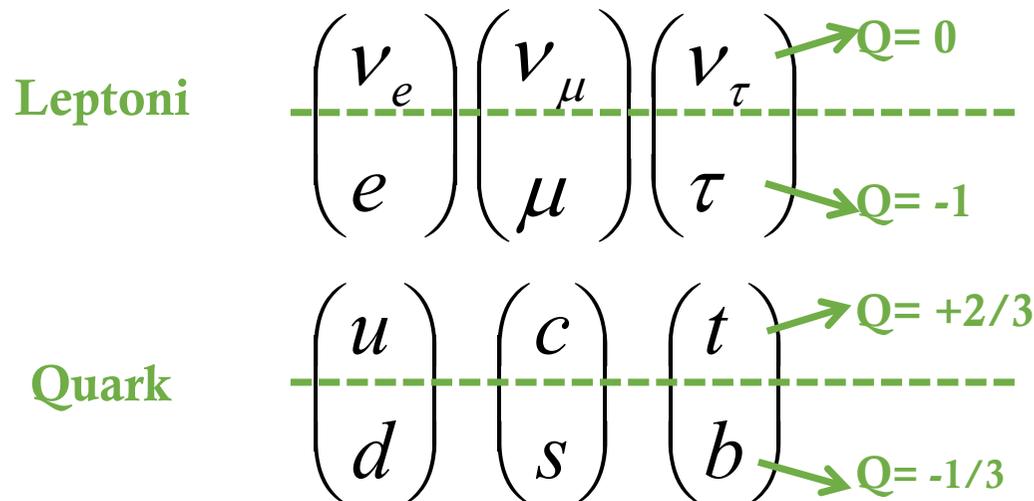
La fisica delle particelle elementari: cosa studia?

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

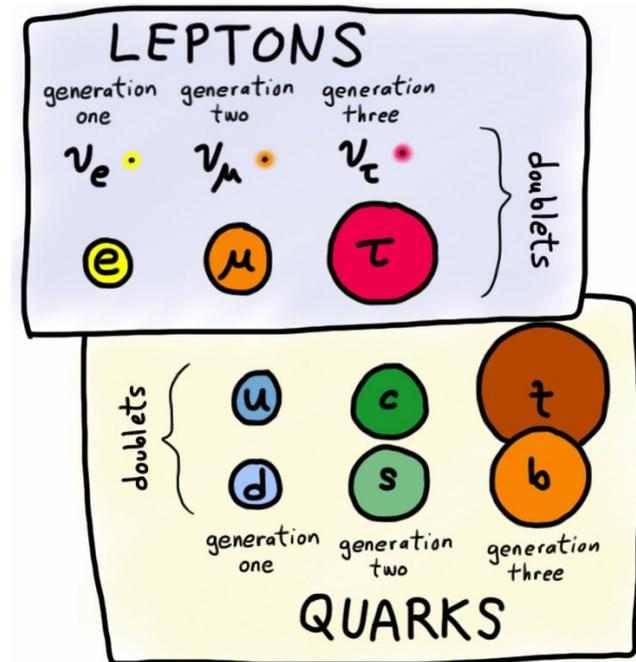


Cosa sappiamo oggi

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



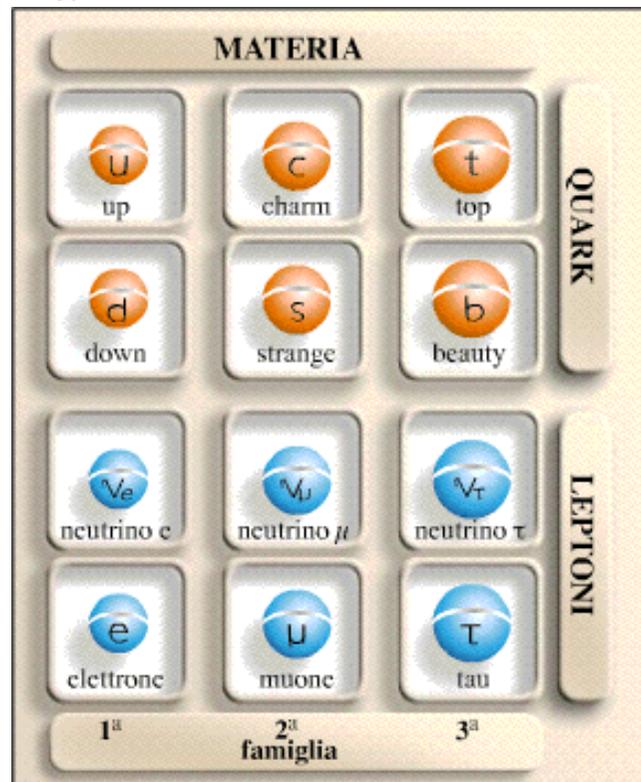
Il quark up è il principale componente elementare del nostro corpo



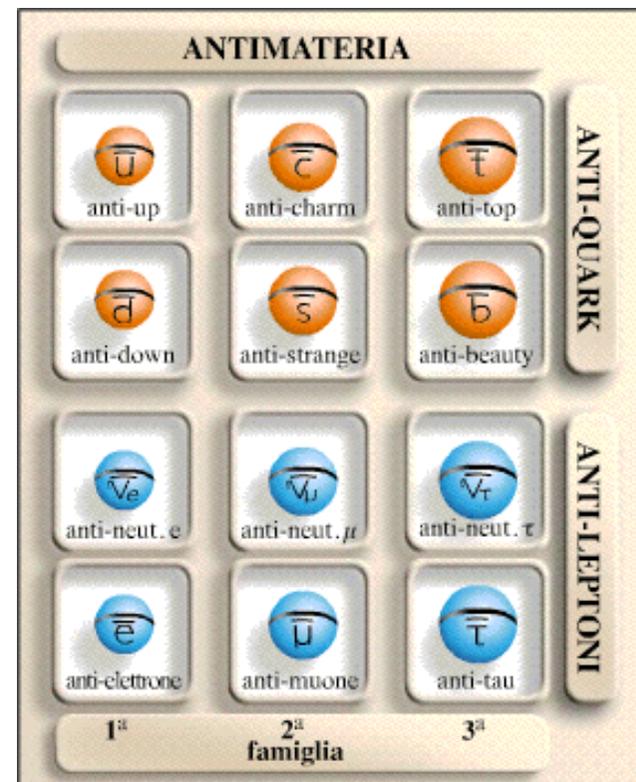
Occhio alla massa ed alla carica elettrica (Q)!

Cosa sappiamo oggi

12 particelle

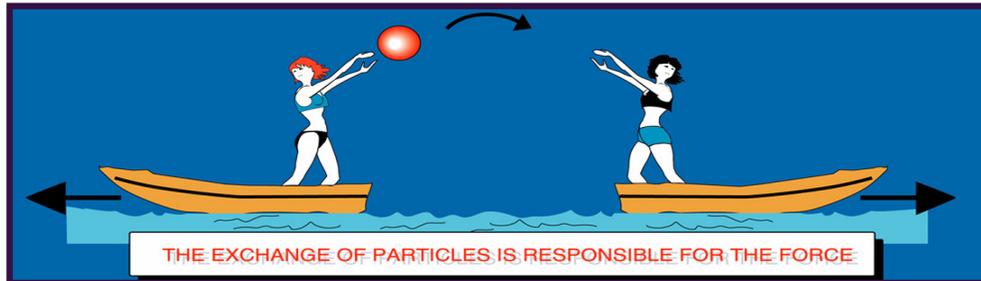


+ 12 antiparticelle

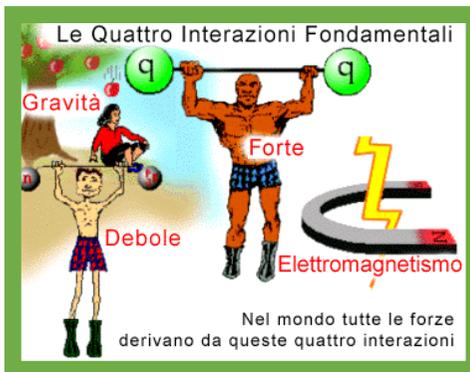


Per ogni particella esiste una corrispondente antiparticella con la stessa massa ma con carica elettrica opposta

Cosa sappiamo oggi



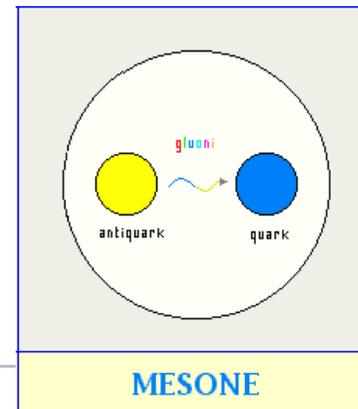
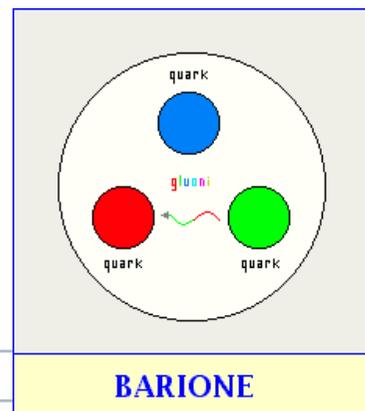
Le forze fondamentali sono 4



Forza	Intensità	Particella scambiata (BOSONI)	Come/dove vediamo questa forza?	Chi risente di questa forza?
Forte	1	Gluoni	Nuclei	Quark e Gluoni
Elettromagnetica	$\sim 10^{-3}$	Fotone	Elettricità e Magnetismo	Quark e leptoni carichi
Debole	$\sim 10^{-5}$	W^{\pm}, Z	Decadimento β	Quark e leptoni
Gravitazionale (esclusa nel MS)	$\sim 10^{-38}$	gravitino	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.
- Il Modello Standard prevede che essi debbano necessariamente formare 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

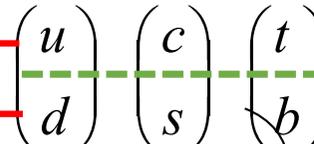


Esempi di particelle composte

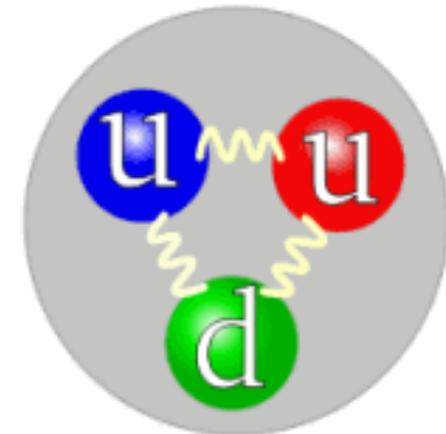
1) Il **protone** è costituito da:
due quark up ed un quark down

Qual è la carica del protone?

$Q=+2/3$
 $Q=-1/3$



$Q=+1$

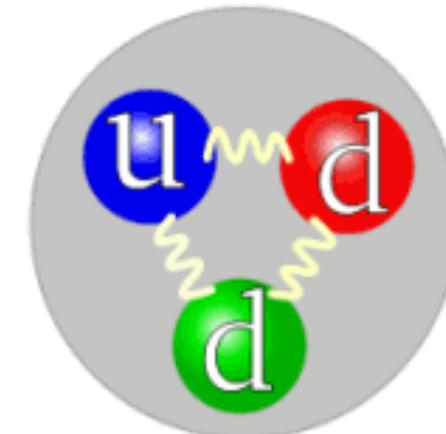


Proton

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

Qual è la carica del neutrone?

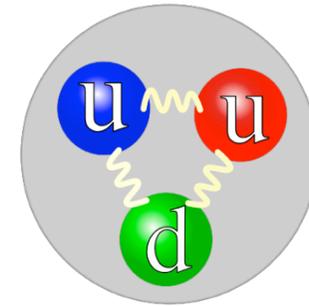
$Q=0$



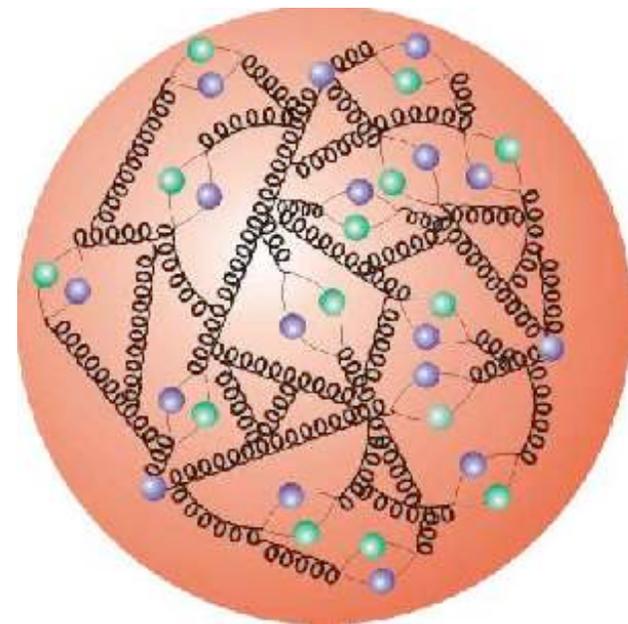
Neutron

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

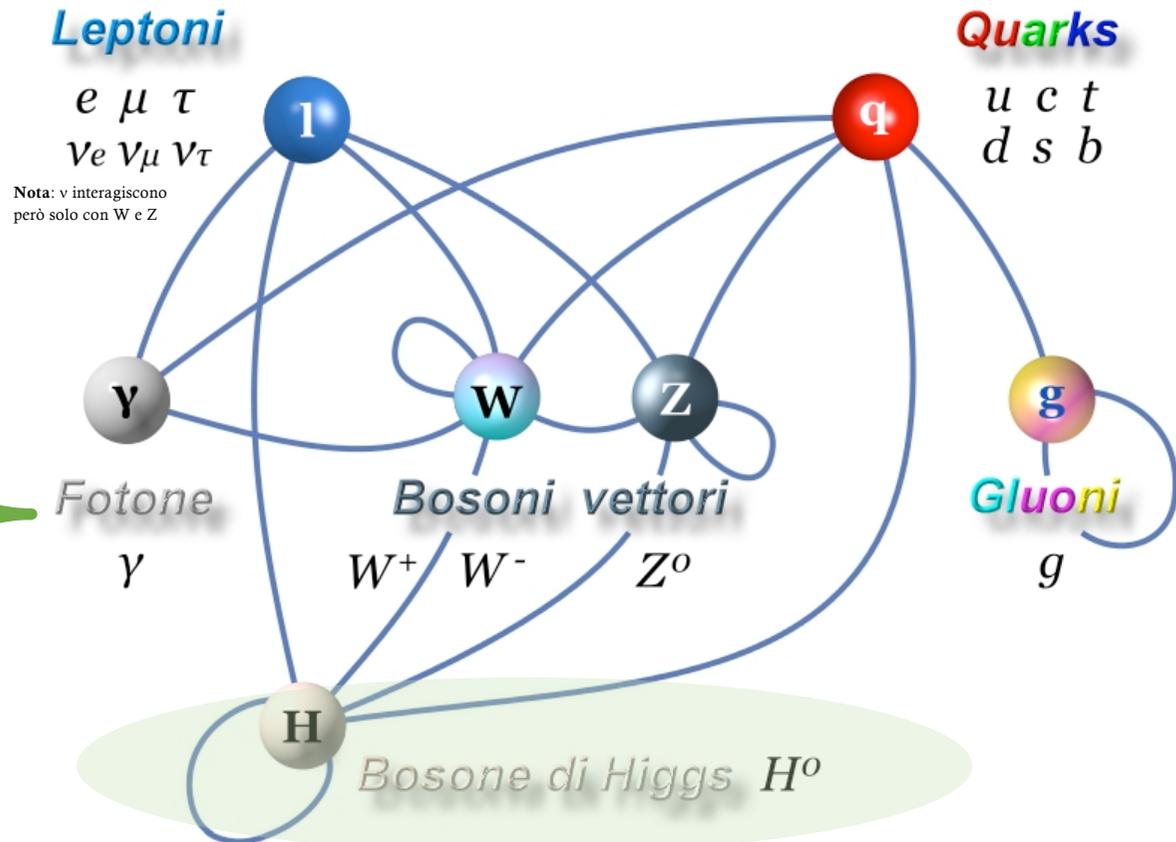


Le interazioni nel MS

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.

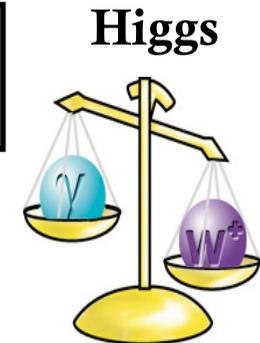
→Premio Nobel per la Fisica 2013 assegnato a Peter Higgs e Francois Englert

•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 interezze delle misure sull'Higgs (in particolare l'incertezza statistica) sono ancora grandi → E' necessario raccogliere più dati ed analizzarli in dettaglio



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 della particelle elementari

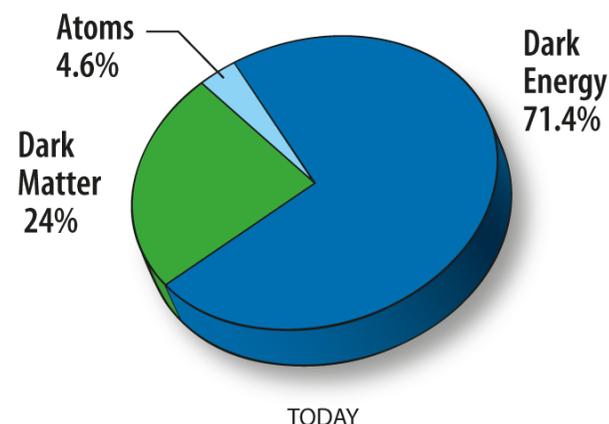


Cosa ancora non sappiamo?

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**



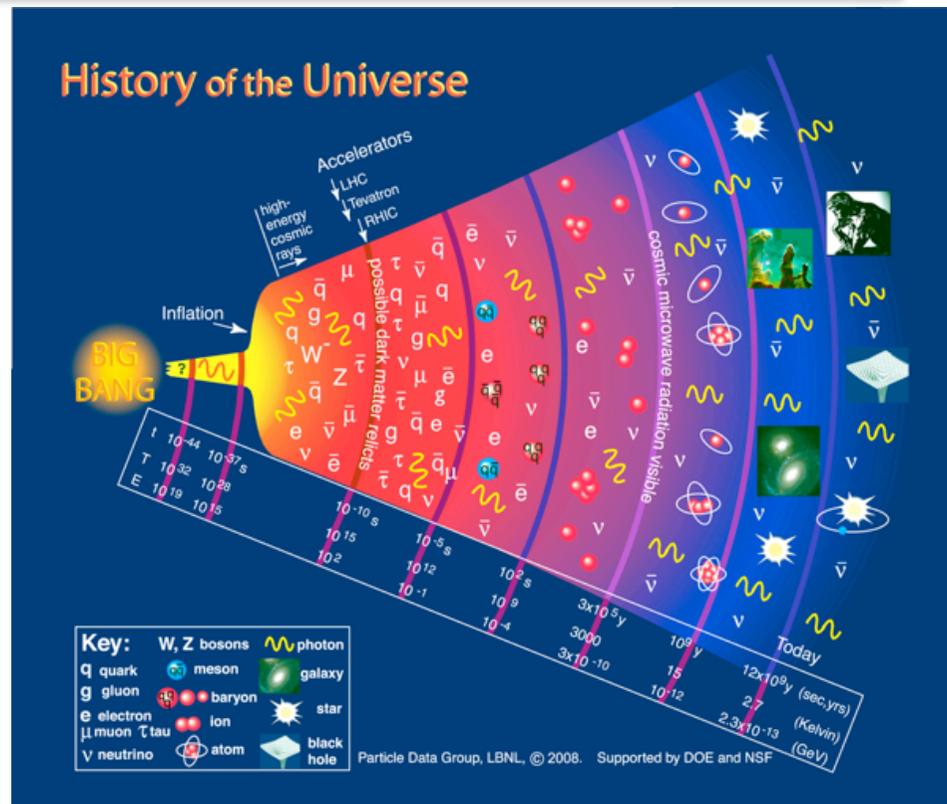
Cos'è la materia oscura?

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 ad eccezione dell'Higgs

Cosa ancora non sappiamo?



Com'era l'universo alla sua nascita?

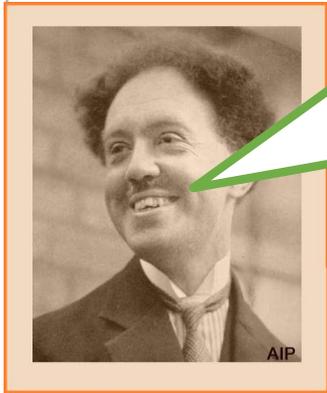


Le interazioni tra particelle negli acceleratori riproducono le stesse condizioni presenti nei primissimi istanti di vita dell'universo



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

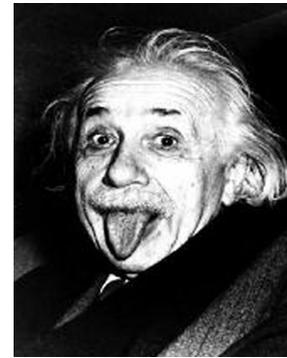
Perchè la fisica delle particelle elementari è anche detta fisica delle alte energie?



Particelle di alta energia utilizzate come sonde per studiare la struttura di altre particelle

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

de Broglie



La massa è una forma di energia

$$E = mc^2$$

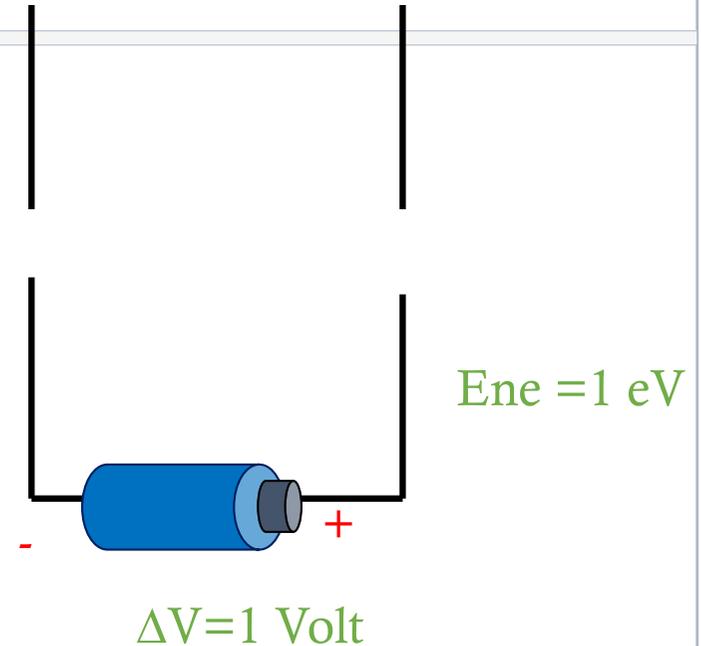
Einstein

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

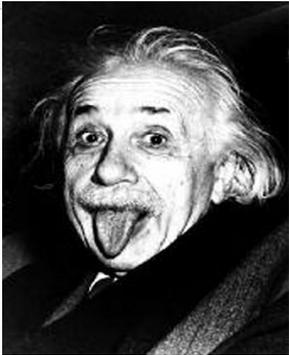
Unità di energia

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 ⁶ eV)	Energie dei processi nucleari (fissione nucleare o decadimento radioattivo)
Alcuni TeV (1TeV=10 ¹² eV)	Acceleratori: Tevatron (FermiLab), LHC (Cern)

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

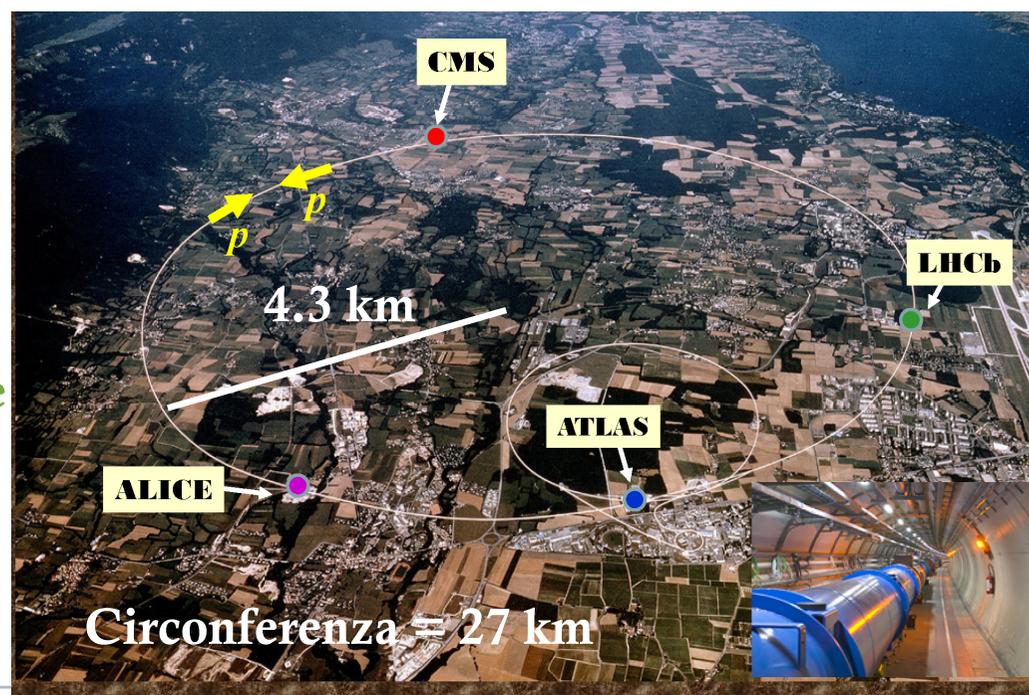
CERN

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
- Raggiunta l'energia di collisione di 13 TeV :6.5 TeV + 6.5 TeV
(energia di progetto 14 TeV)



LHC al CERN (1/2)

- **Energia di collisione 13TeV**
- **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)

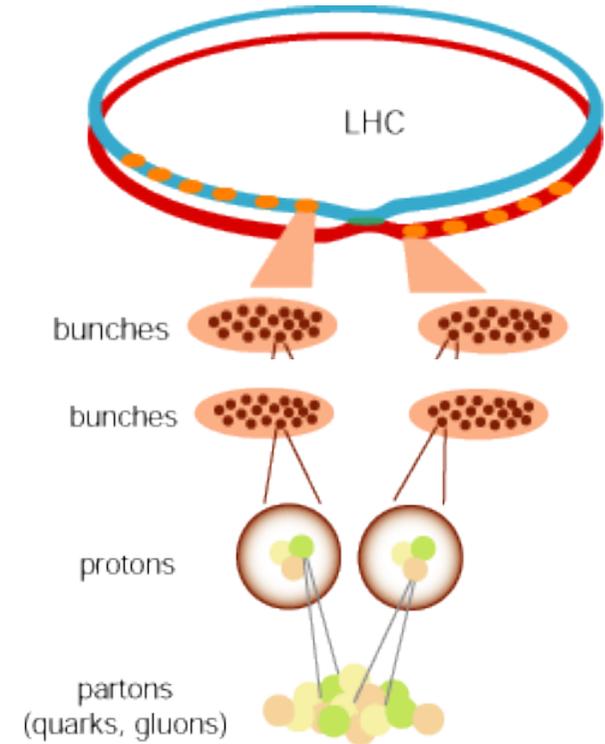


LHC al CERN (2/2)

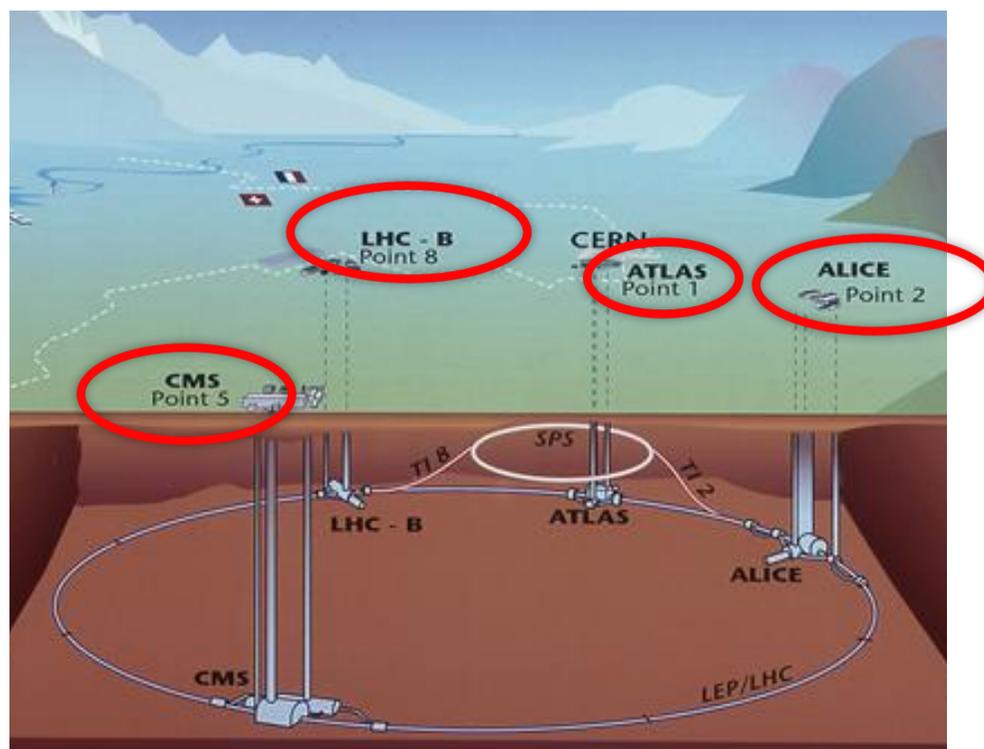
- **Densità dei pacchetti**
1 pacchetto = 10^{11} protoni
- **Frequenza di collisione** = 40 milioni al secondo

→ 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



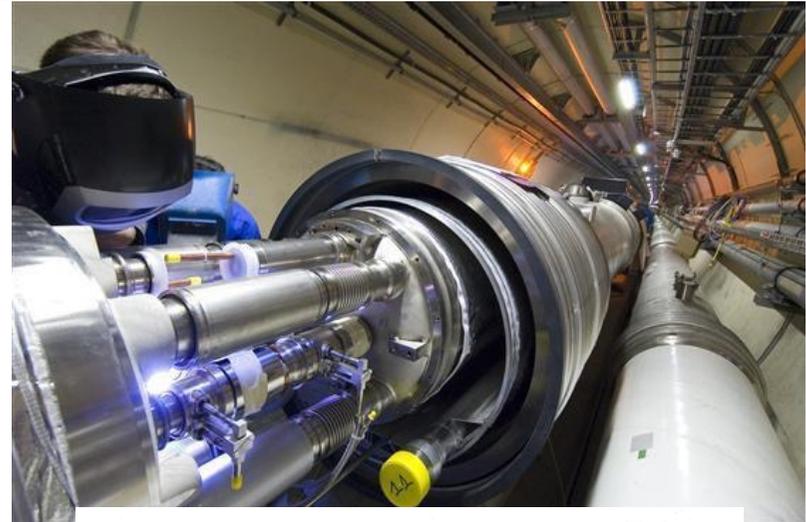
Gli esperimenti di LHC



I rivelatori sugli acceleratori

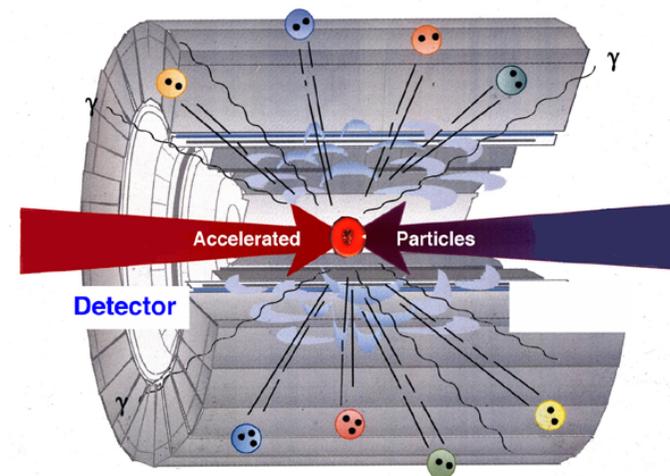
Per accelerare le particelle,
farle collidere e crearne nuove

↪ **Acceleratori**



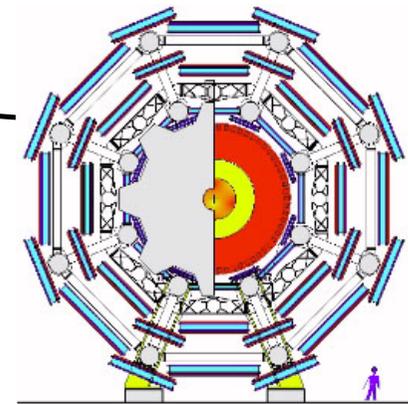
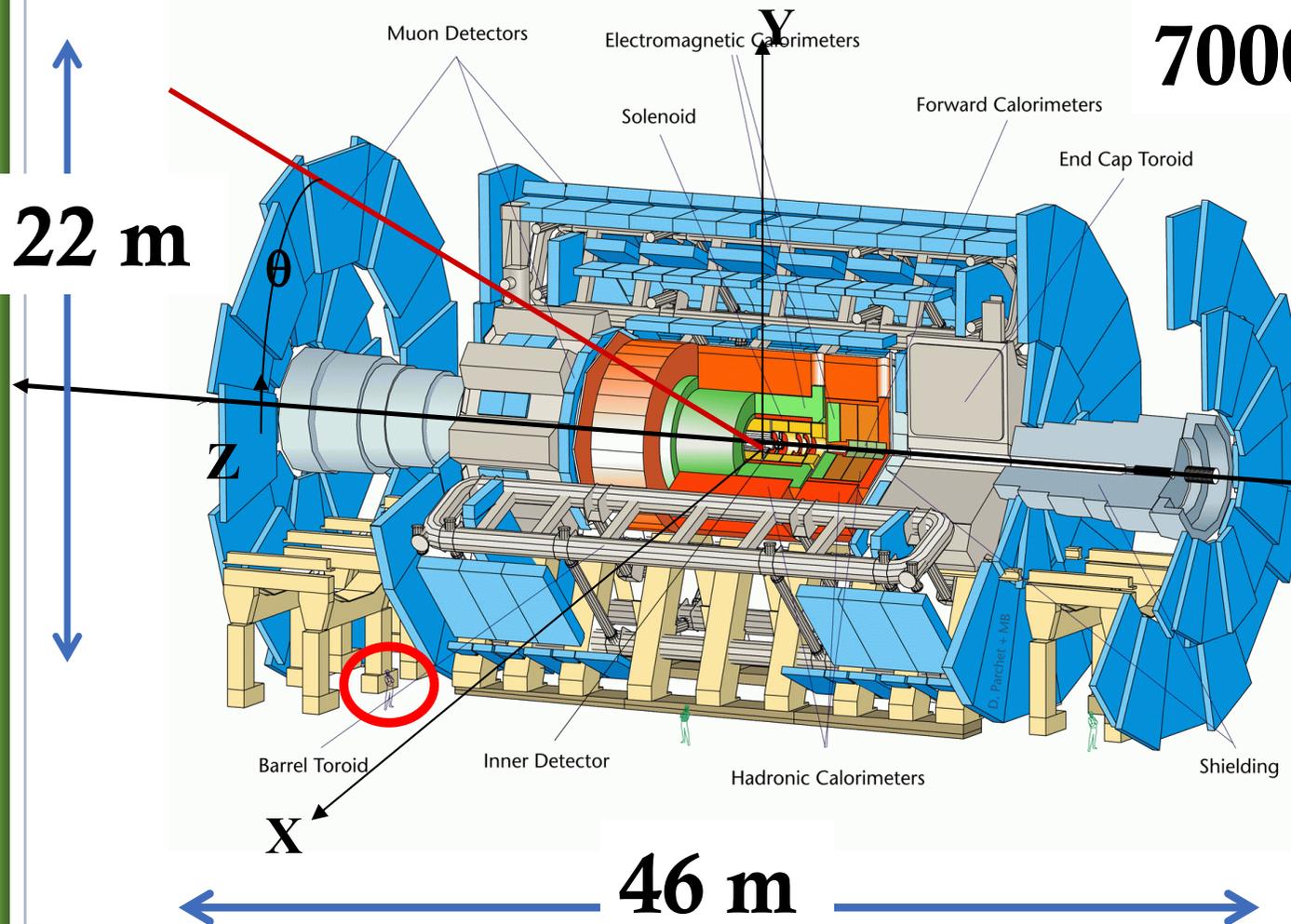
Per osservare le nuove particelle
così create

↪ **Rivelatori**



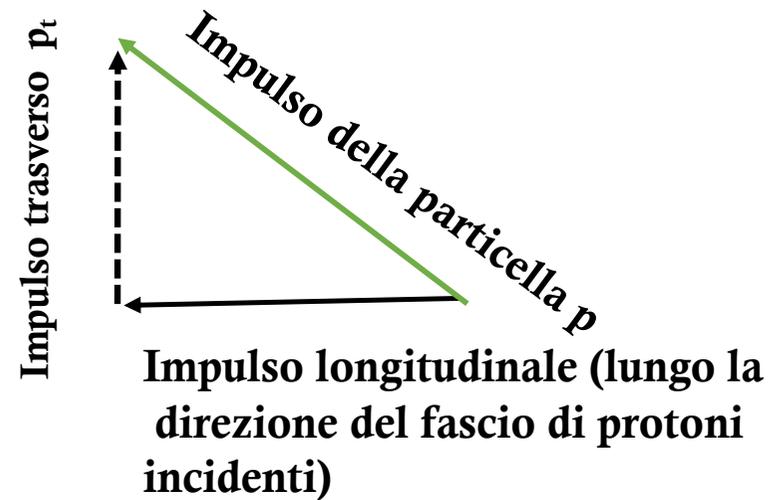
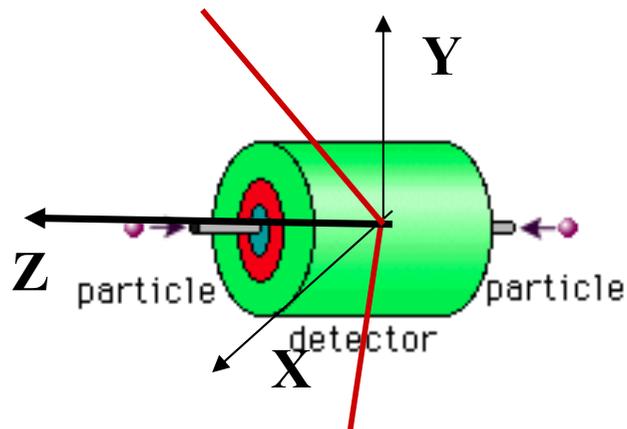
ATLAS

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**)

Il goal è di collezione 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

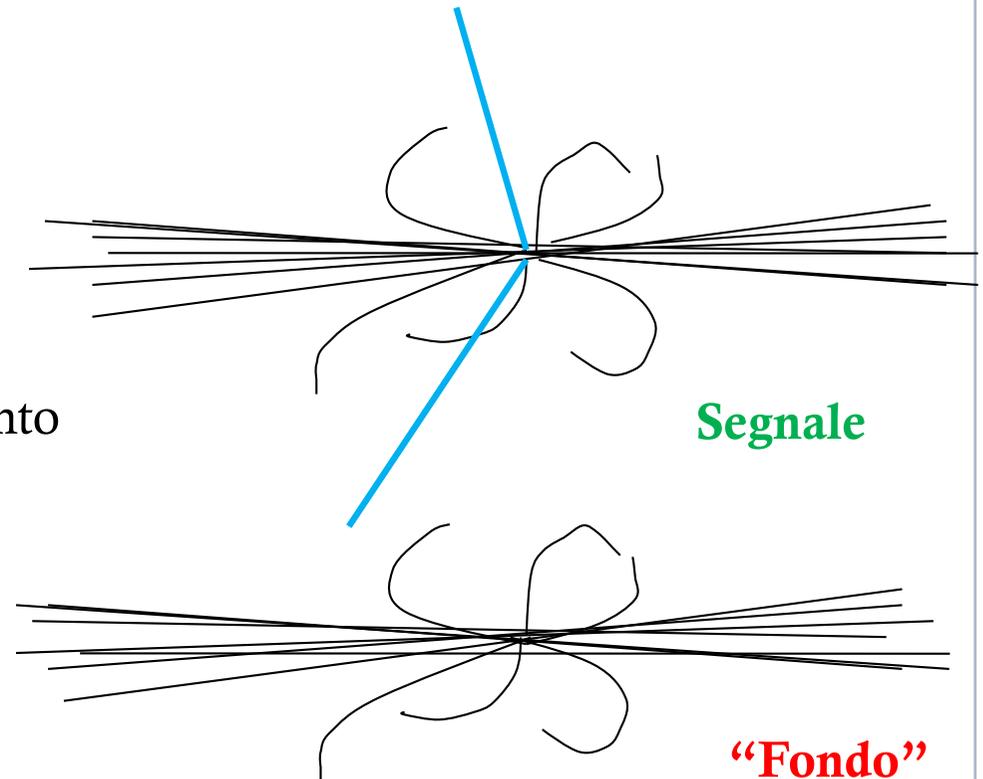
(eventi molto rari)=

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^-)

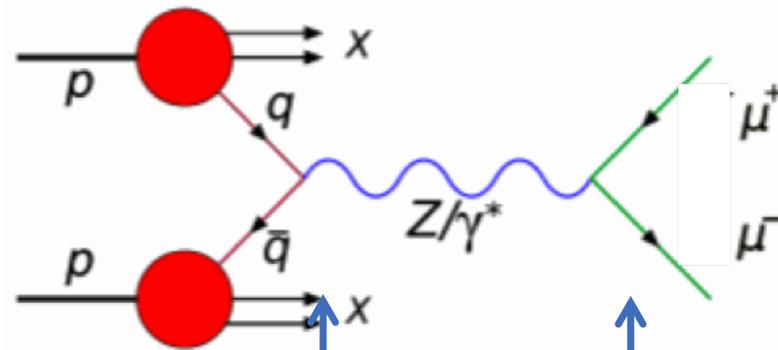
Stato finale tipico di LHC=

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

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 dopo aver raccolto un certo numero di eventi a selezionare quelli che provengono dal decadimento di $Z \rightarrow 2\mu$?

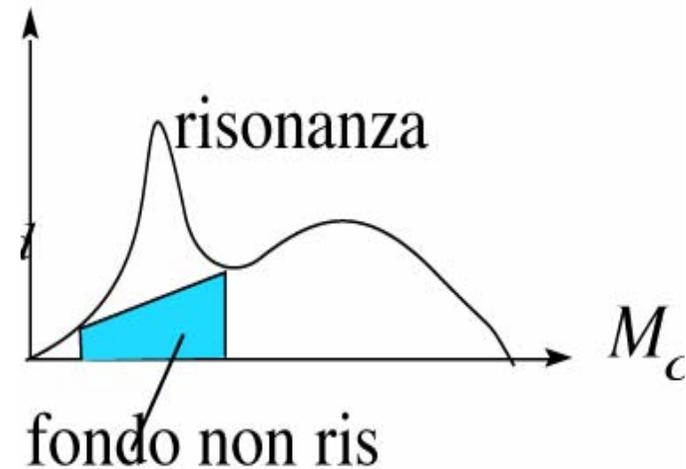
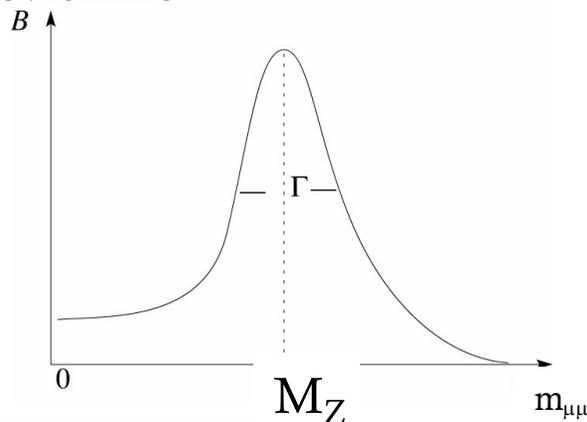
Selezioniamo solo eventi che hanno 2μ **di carica opposta ed alto impulso trasverso**. Quindi usiamo la cinematica relativistica per calcolare la **massa invariante della Z**



Esempio: identificazione della Z

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

Idealmente dovremmo avere →

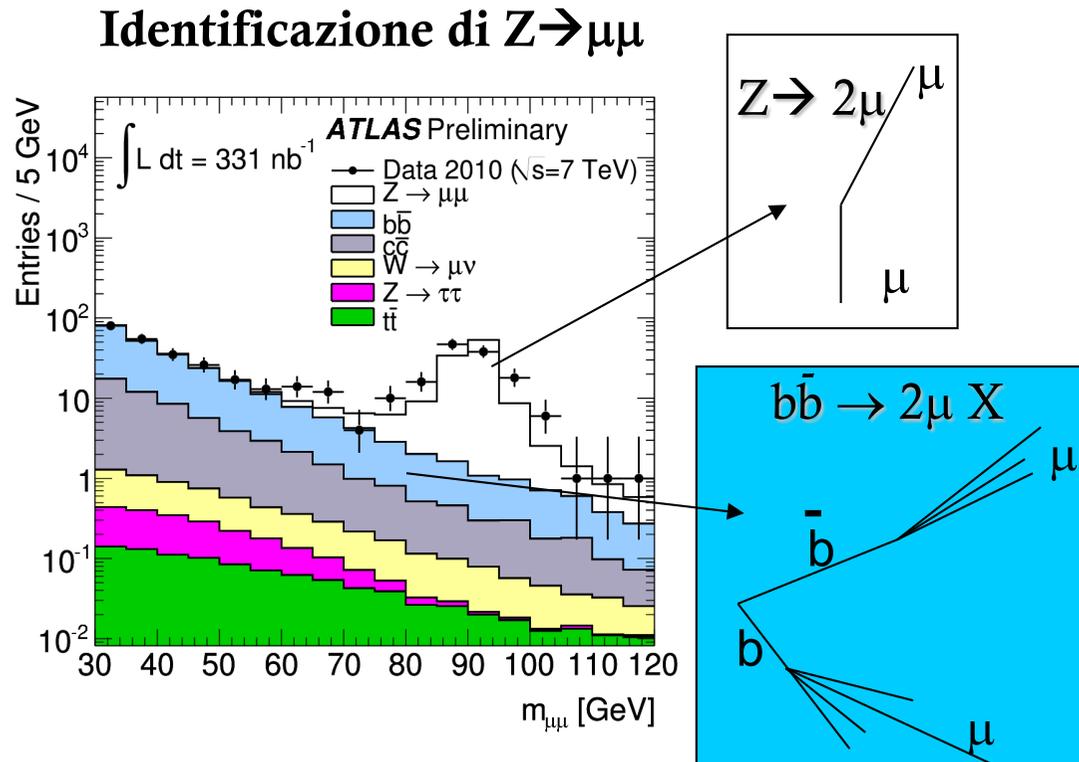


Cos'è quella motitudine di eventi che distorce la risonanza?

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



Esempio: identificazione della Z o della W

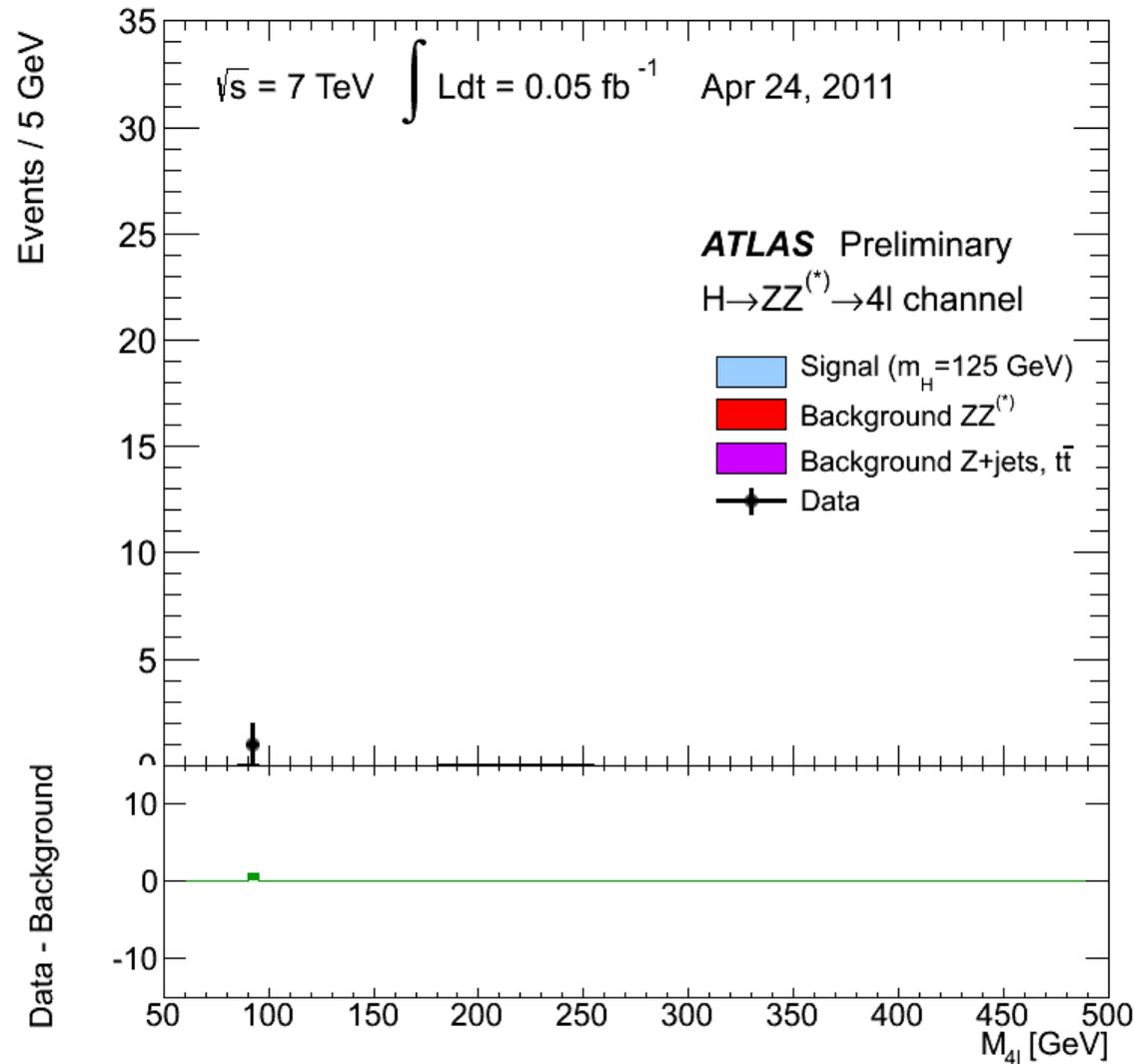


Per ridurre ulteriormente gli eventi di fondo possiamo sfruttare la **massa invariante** e/o **variabili di isolamento** (i μ della Z sono isolati)

→ Quando studiamo Higgs o W usiamo criteri di selezione simili

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

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



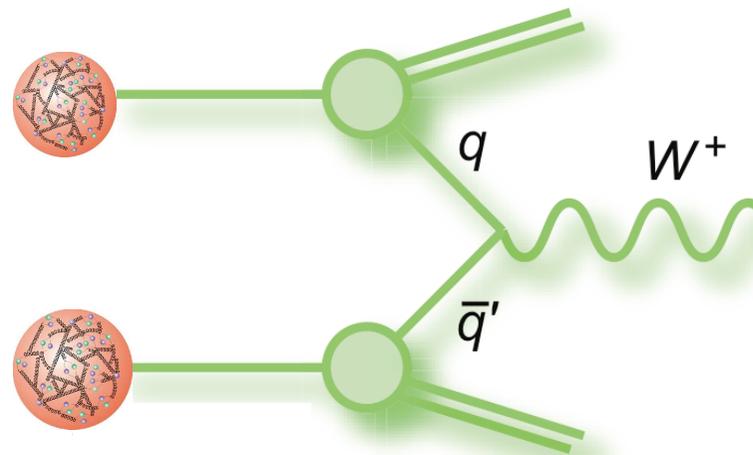
Esercitazione di analisi dati

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

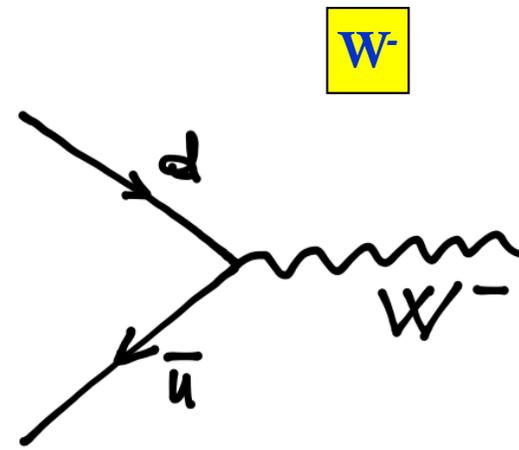
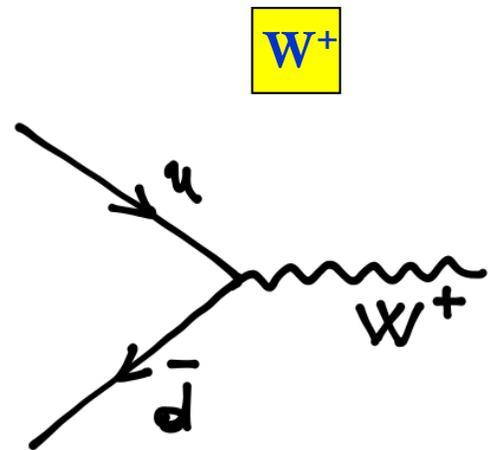
**Imparerete a distinguere gli
eventi di “segnale” da quelli di “fondo”.**

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

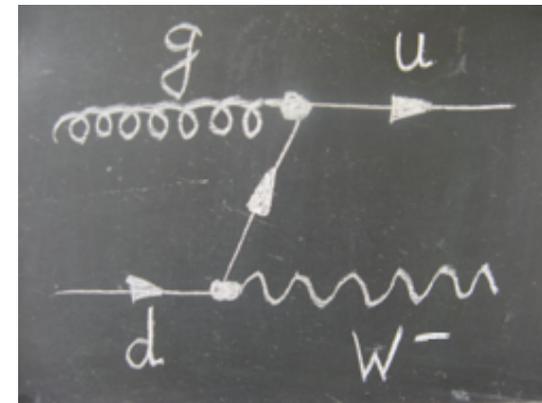
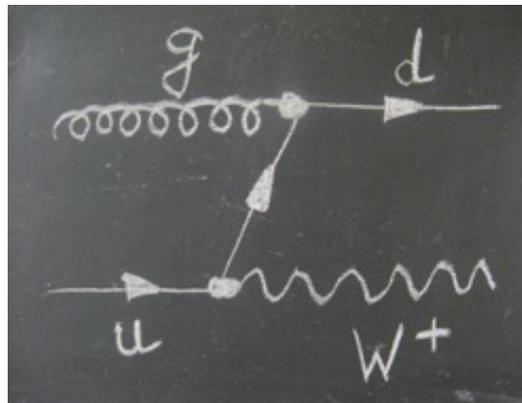


Produzione di W ad LHC

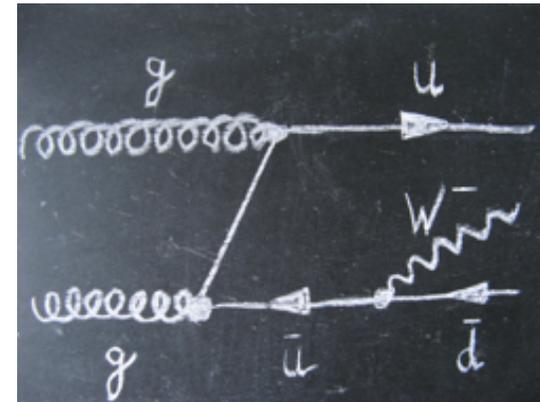
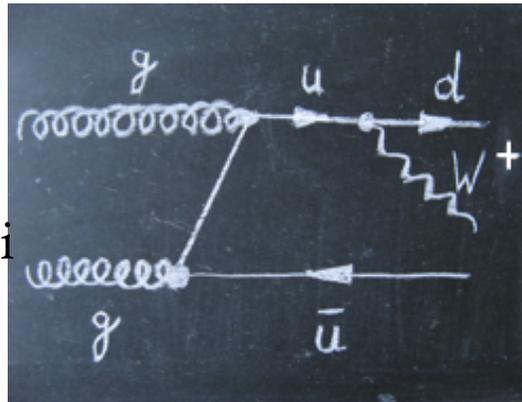
W^+

W^-

Gluone + Quark



Gluone + Gluone



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

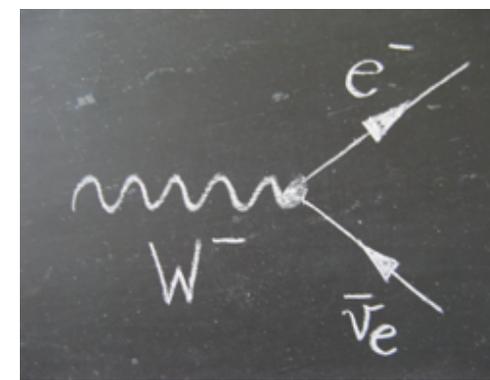
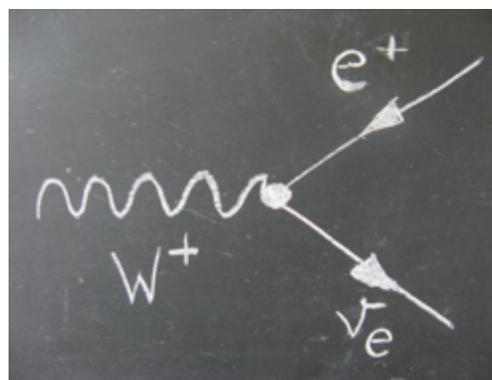


Decadimenti leptonici del W

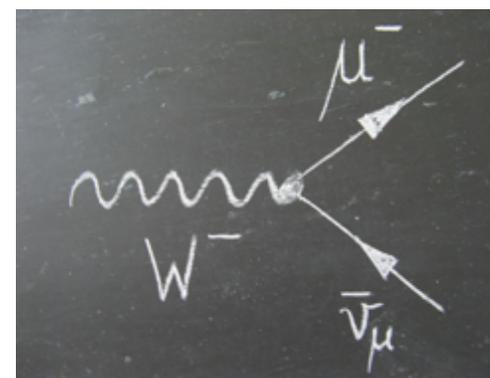
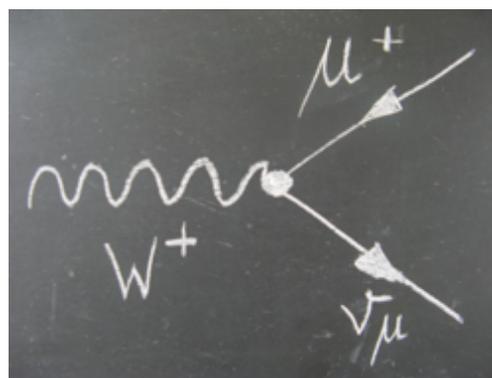
W^+

W^-

Stati finali con **elettroni**



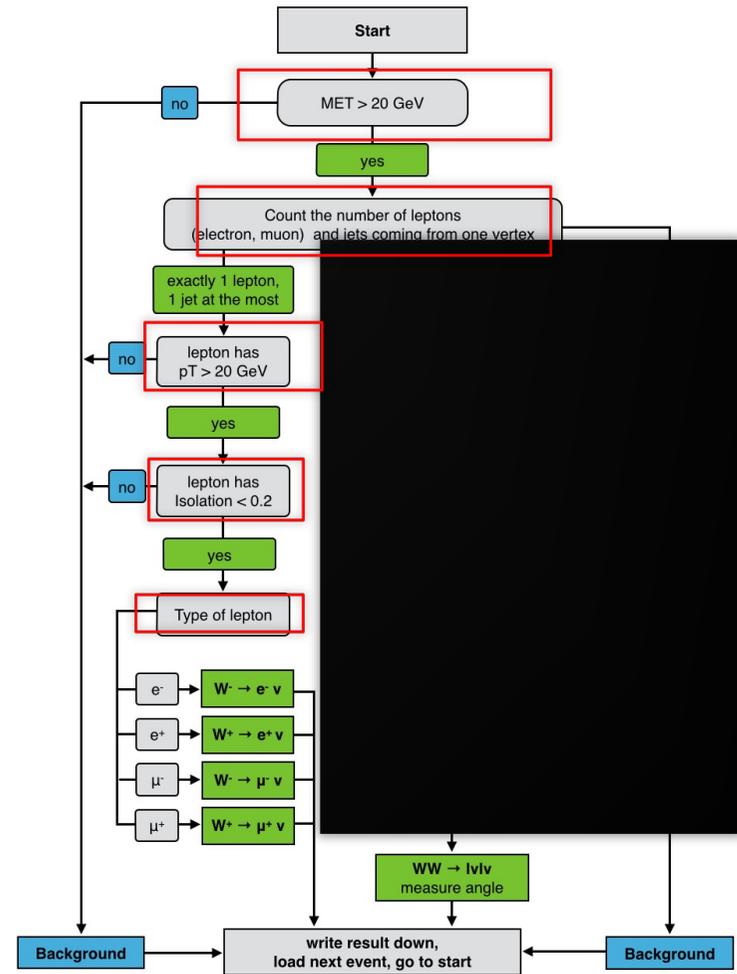
Stati finali con **muoni**



Lo stato finale del decadimento del W e' 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

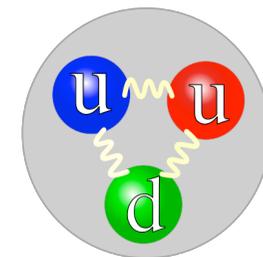
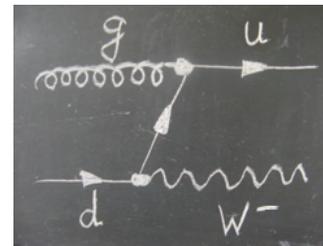
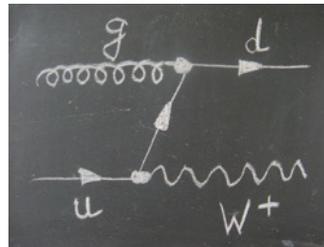
*Le mie colleghe
ve la spiegheranno
in dettaglio..*



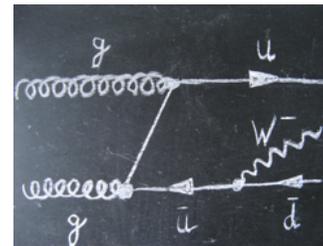
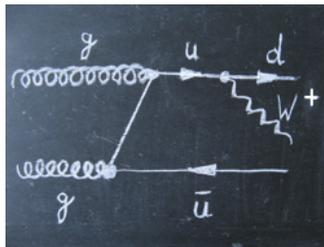
2) Stima del rapporto $N(W^+)/N(W^-)$

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

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

Combinazione dei Risultati con Quelli ottenuti dalle Altre università

Primo articolo di ATLAS in cui è stato misurato questo rapporto

Total #	W → ... + ν				Background	WW
	e ⁺	e ⁻	μ ⁺	μ ⁻		
1615						
ATP	56	56	56	56	343	133
Bonn-NTW						
BSZ Riesa	18	27	22	16	86	21
Hamburg-NTW-1	25	17	19	14	149	20
R-Hildebrand-Gym. Ma	0	0	0	0	390	91
Total	99	100	97	86	968	265
Σ W ⁺ , Σ W ⁻	W ⁺	196	W ⁻	186	W ⁺ + W ⁻	382
Ratio	 W⁺ / W⁻ 		1.0538		±	0

Comparison with results of the ATLAS collaboration (from 2011):

Measurement of the W → lν and Z/γ → ll production cross sections in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 7$ TeV with the ATLAS detector*) and Search for the Standard Model Higgs boson in the H → WW(*) → lνlν decay mode using 1.7 fb⁻¹ of data collected with the ATLAS detector at $\sqrt{s} = 7$ TeV**)

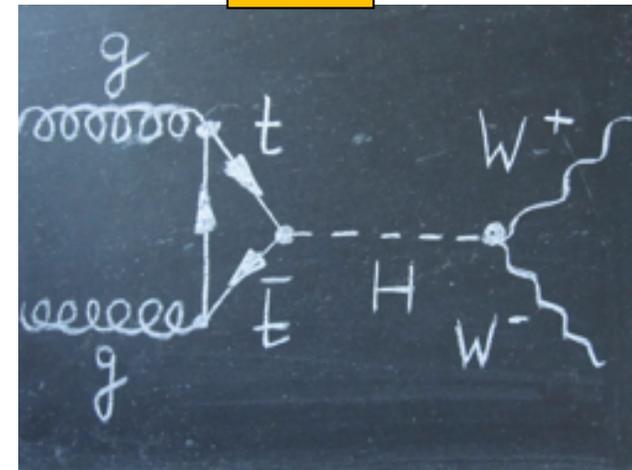
*) Authors: The ATLAS Collaboration (Submitted on 5 Dec 2011): <http://arxiv.org/abs/1109.5141.pdf>

***) Authors: The ATLAS Collaboration (24 Aug 2011): ATLAS-CONF-2011-134

	W → ... + ν				Background	WW cand.
	e ⁺	e ⁻	μ ⁺	μ ⁻		
Total	77885	52856	84514	55234	21930	469
Σ W ⁺ , Σ W ⁻	W ⁺	162399	W ⁻	108090	W ⁺ + W ⁻	270489
Ratio	 W⁺ / W⁻ 		1.50		±	0.01

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

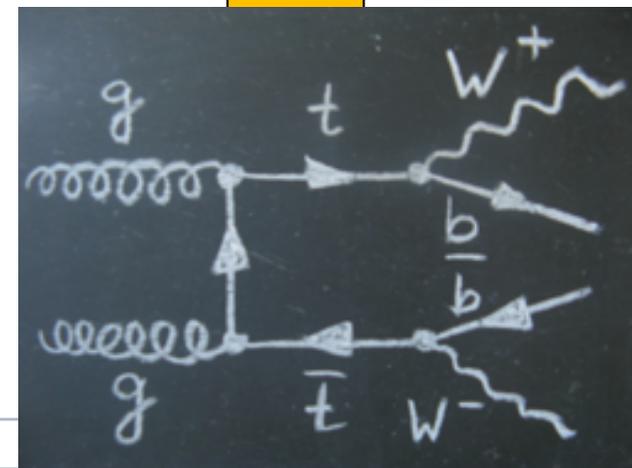
Higgs



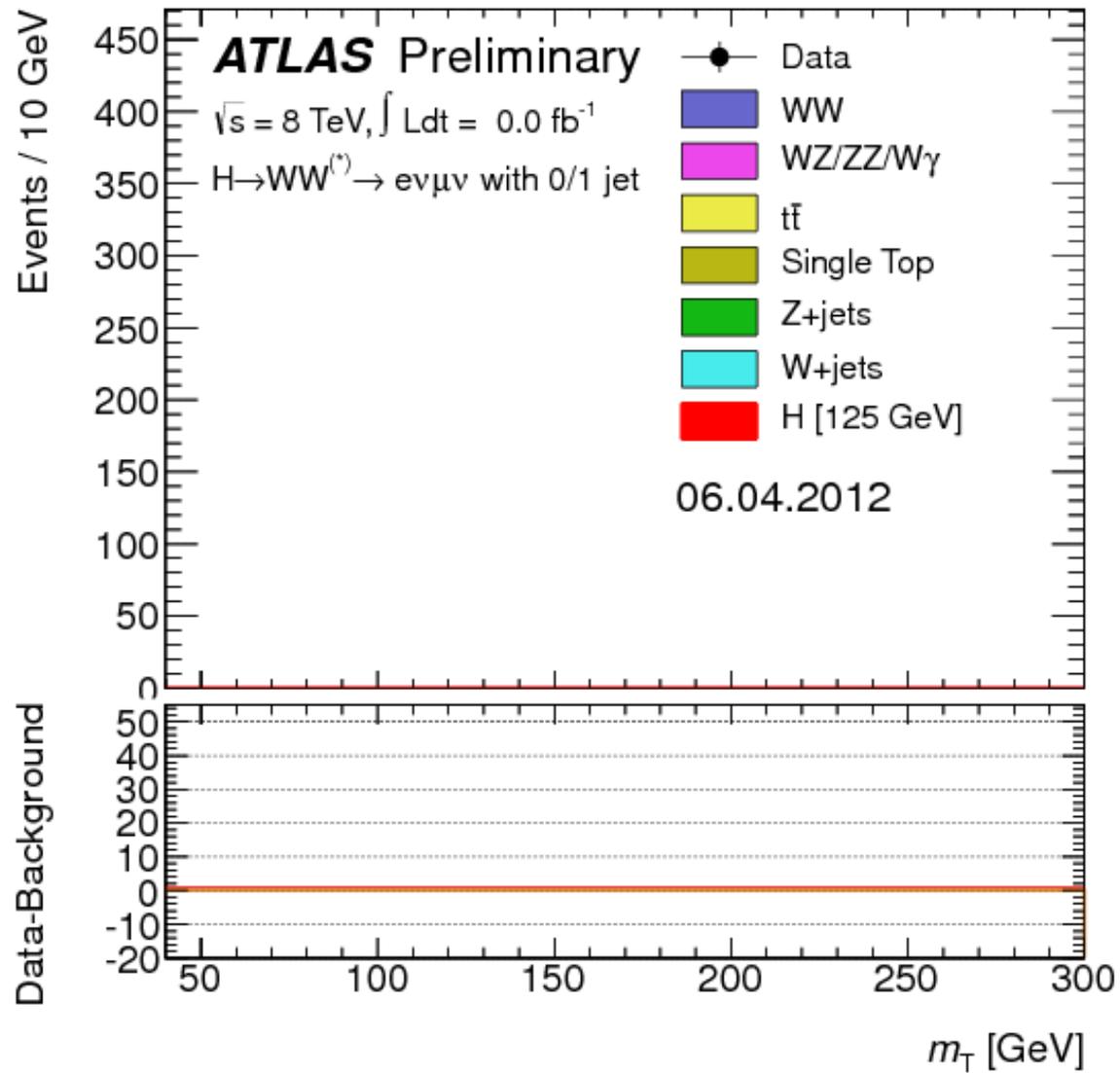
Questo stato finale e' particolarmente interessante perché rappresenta un fondo per il **bosone di Higgs del caso del decadimento $H \rightarrow WW$**

WW

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



H → WW



Come distinguo WW da $H \rightarrow WW$?

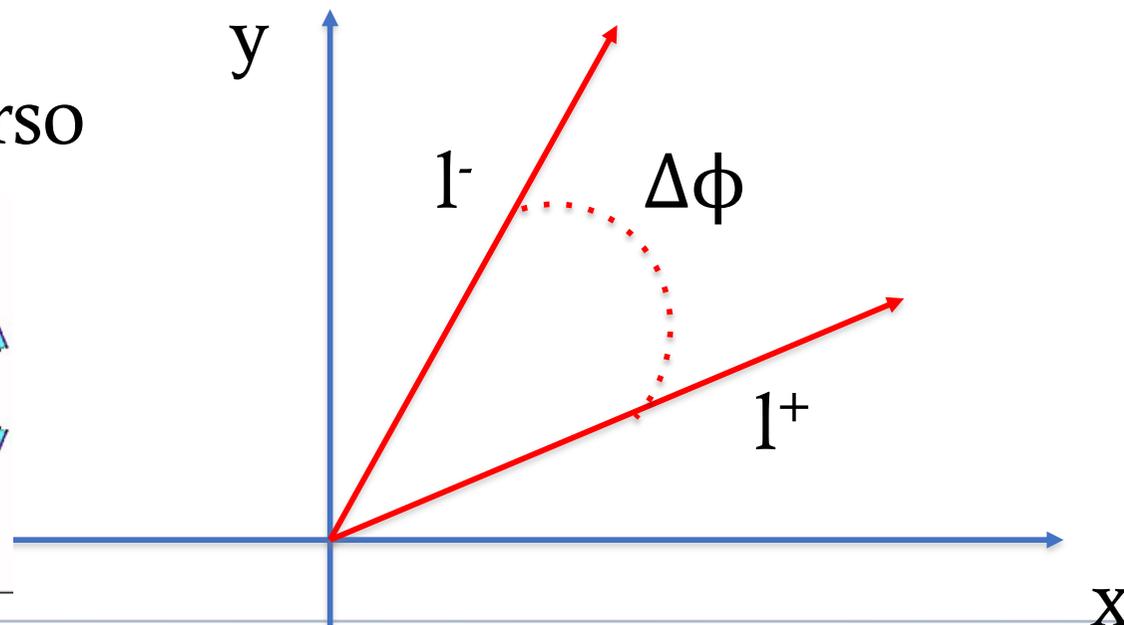
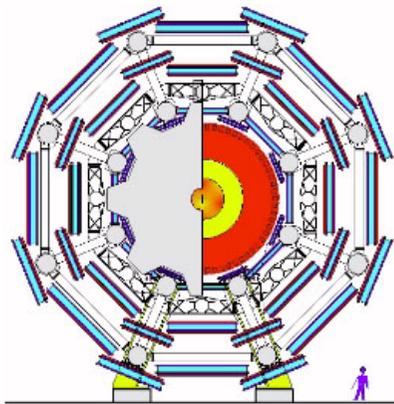
Sono eventi molto simili. Però lo **spin** di H (spin=0) influisce sulla distribuzione angolare delle W provenienti dal suo decadimento.

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

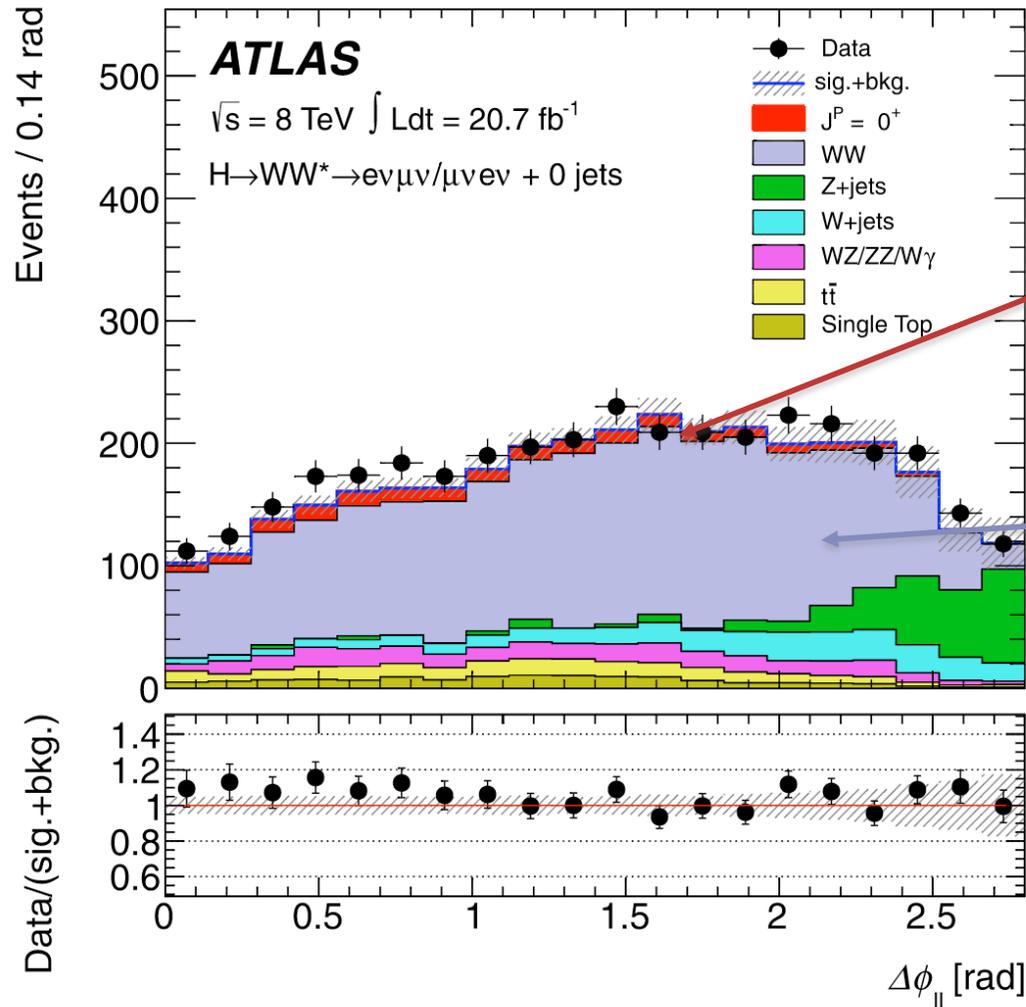
Lo spin è una proprietà intrinseca delle particelle come massa e carica



Piano trasverso



Distribuzione $\Delta\phi$



Contributo dell'Higgs

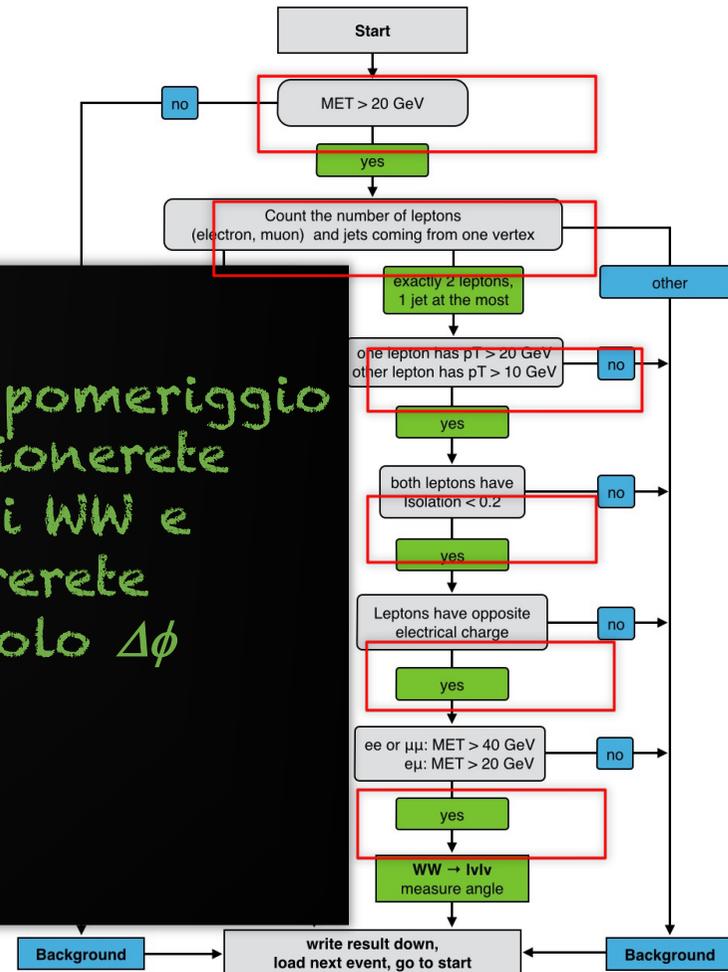
Contributo del WW

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 la vostra esperienza di laboratorio di oggi pomeriggio:

BUON DIVERTIMENTO!

