Introduzione alla fisica delle particelle elementari

Evelin Meoni
(Dipartimento di Fisica - UNICAL)

Sommario

- La fisica delle particelle elementari:

  - cosa sappiamo

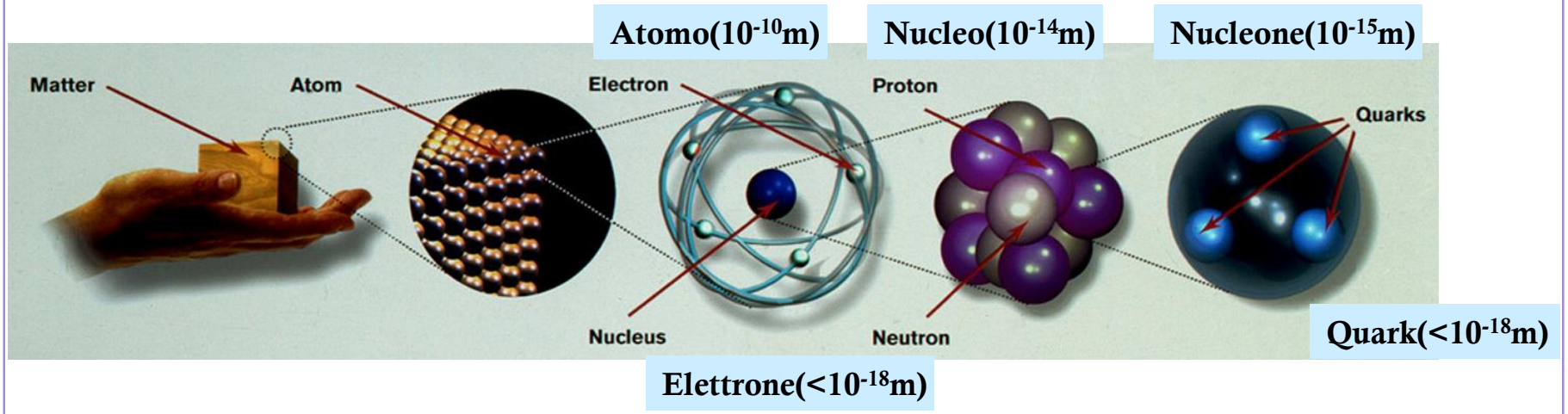
  - cosa non capiamo ancora

- Gli acceleratori di particelle ed LHC al CERN

- Alcuni elementi sull'analisi dati per l' esercitazione di oggi: analisi dati dell'esperimento ATLAS ad LHC

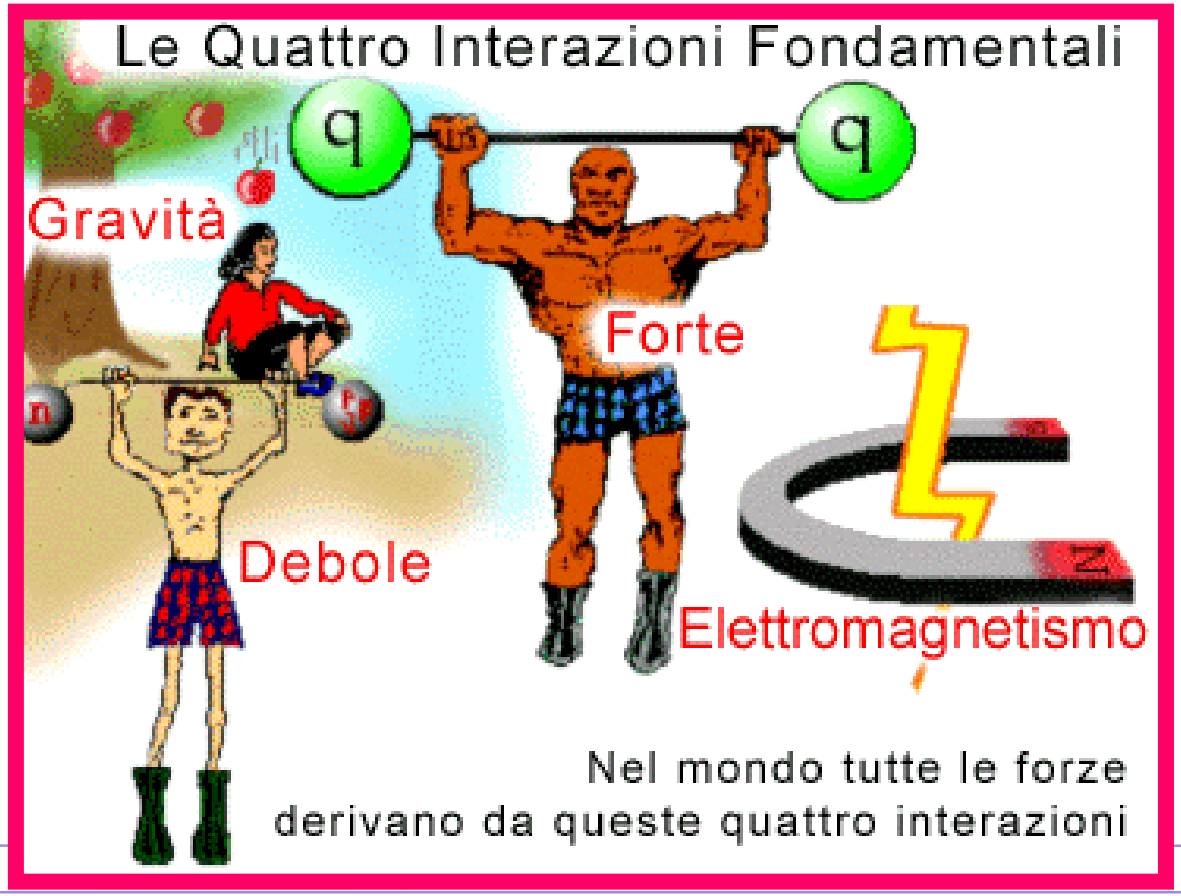
La fisica delle particelle elementari: cosa studia?

Studia i costituenti fondamentali della materia e..



La fisica delle particelle elementari: cosa studia?

..le forze che essere 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+…… →

Leptoni

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

Q= 0

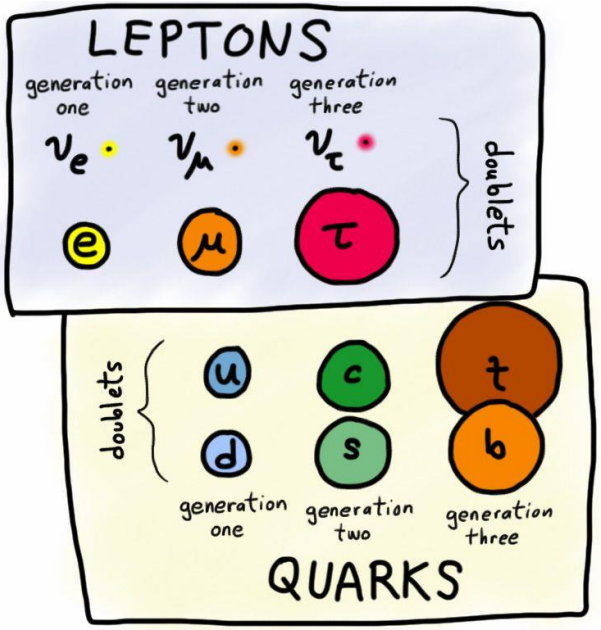
Q= -1

Quark

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

Q= +2/3

Q= -1/3



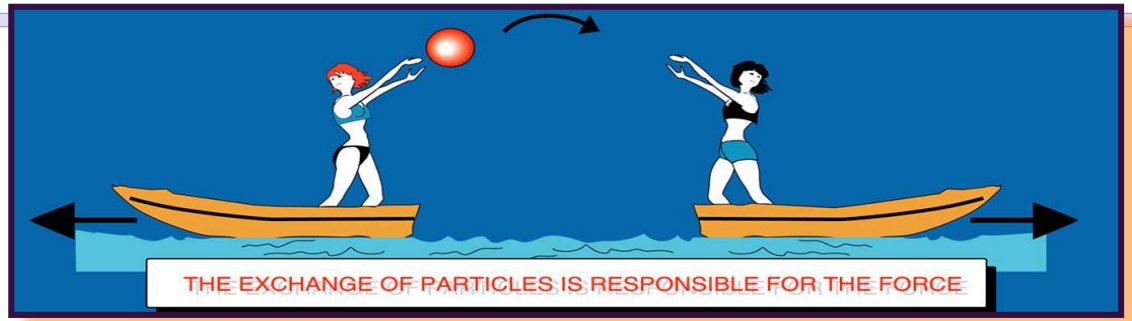
→ Occhio alla massa ed alla carica elettrica (Q)!

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



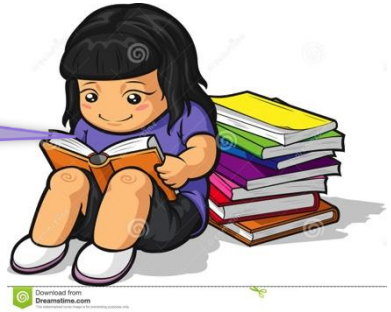
Le forze fondamentali sono 4

Forza	Intensità	Particella scambiata (BOSONI)	Dove intervengono tali forze?	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

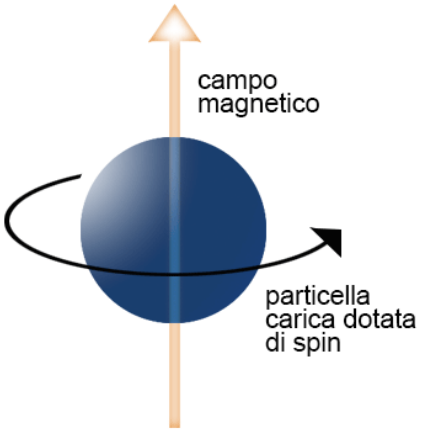
Cosa sappiamo oggi: lo spin

- Quark e leptoni sono fermioni ovvero particelle a **spin ½**
- I bosoni hanno **spin intero**

Cos'è lo spin?



Lo spin è una proprietà intrinseca delle particelle e può essere interpretato come un momento angolare, in altre parole una rotazione, anche se non è possibile dare una descrizione corretta facendo ricorso a immagini classiche.

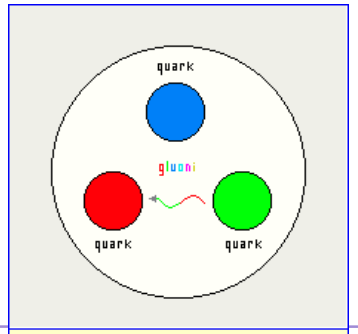


Cosa sappiamo oggi: Chi sono le particelle composte?

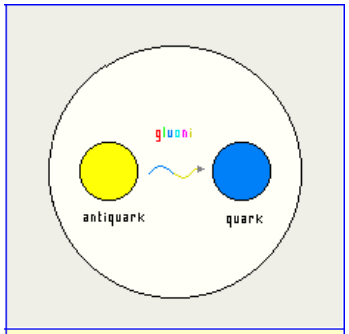
- I quarks, contrariamente ai leptoni, non possono esistere come particelle libere.
- Il Modello Standard prevede che essi debbano necessariamente formare dei sistemi legati (particelle) che prendono il nome di **Adroni.**
- La famiglia degli Adroni e' ulteriormente suddivisa in

- Barioni: formati da tre quarks (es. protone, neutrone)

- Mesoni: formati da coppie quark-antiquark



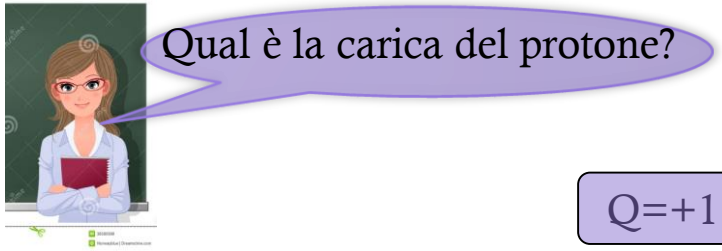
BARIONE

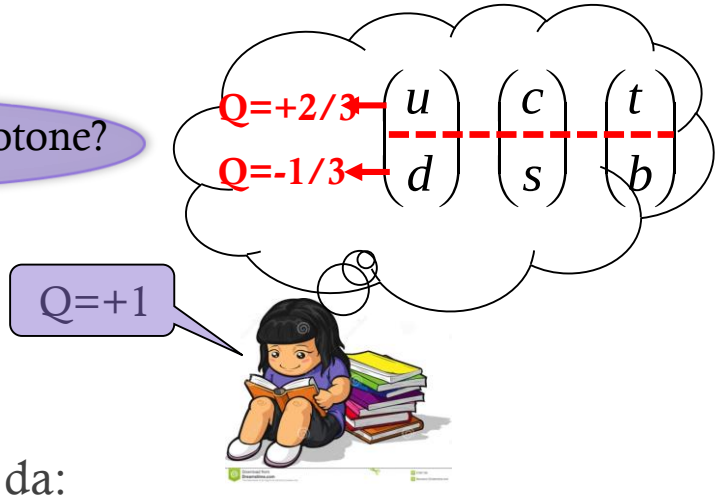


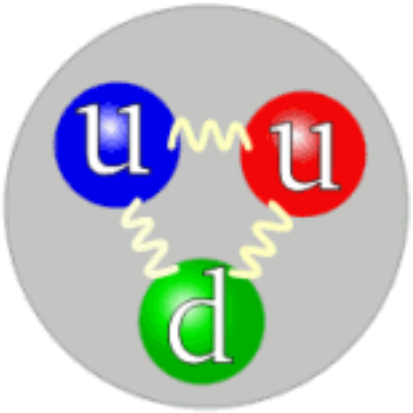
MESONE

Esempi di particelle composte

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

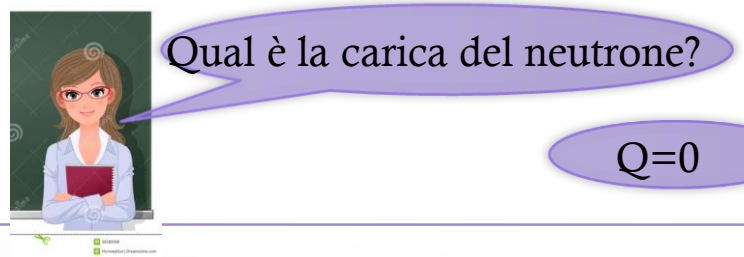


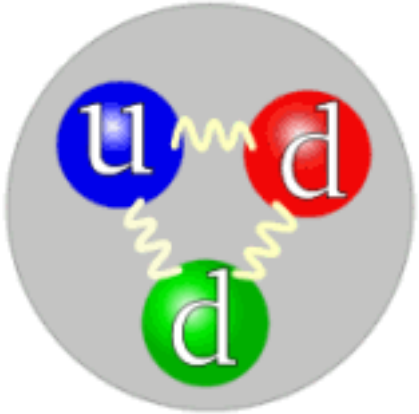




Proton

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

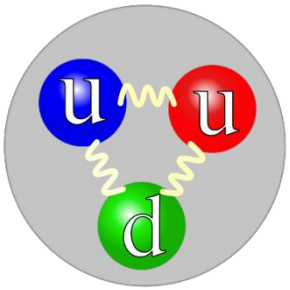




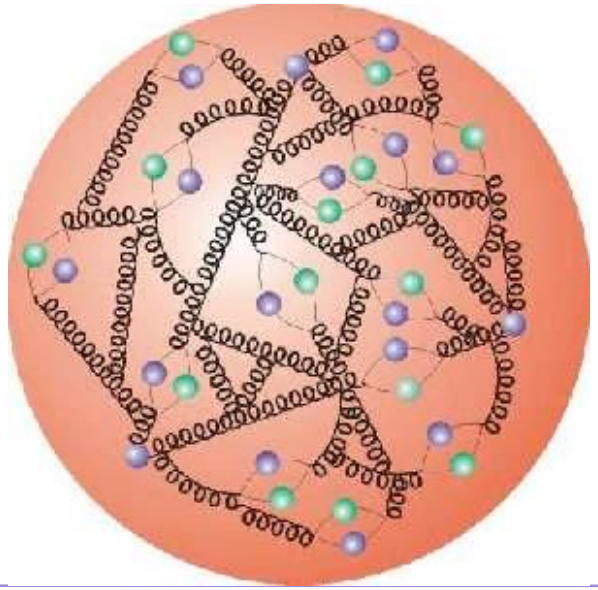
Neutron

La struttura degli adroni

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



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

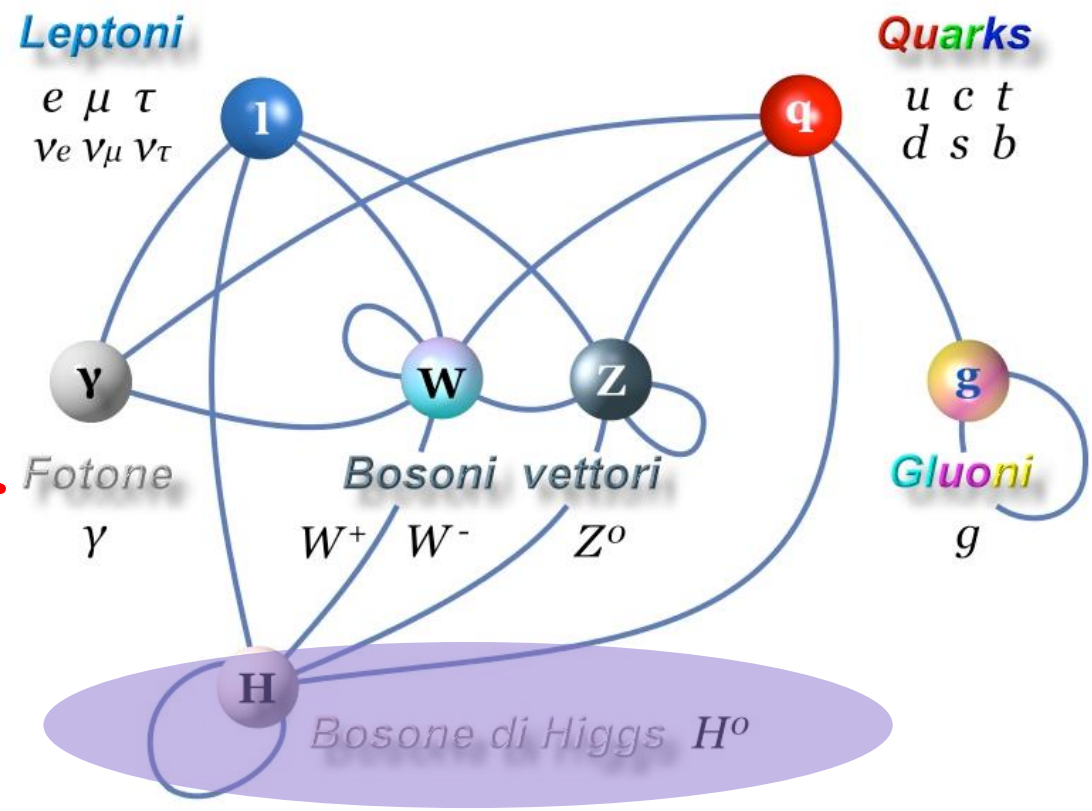


Le interazioni nel MS

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 abbia **massa**

Il **bosone di Higgs** e' la particella che da la massa a tutte le altre.

La scoperta dell'Higgs

- 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

- Ma le **interezze delle misure sono ancora troppo grandi** per stabilire se l'Higgs scoperto ad LHC e' l'Higgs previsto dal Modello Standard →E' necessario raccogliere piu' dati ed analizzarli .

Cosa non sappiamo ancora?

La particella scoperta ad LHC è veramente l'Higgs del MS? È veramente intimamente legata all'origine della massa?Oppure è il primo segnale di nuova fisica?

Higgs

→ Bisogna ancora studiare in dettaglio il meccanismo della massa

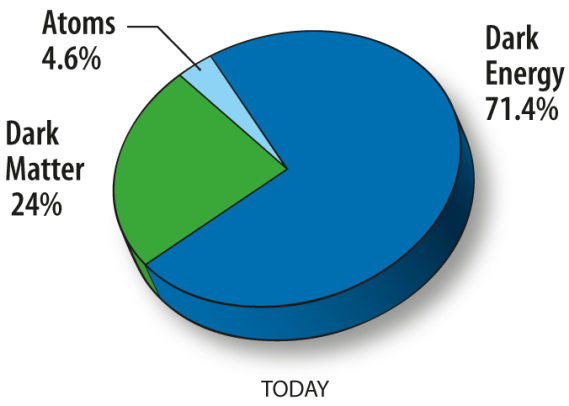
Perche' si parla di nuova fisica oltre il Modello Standard?

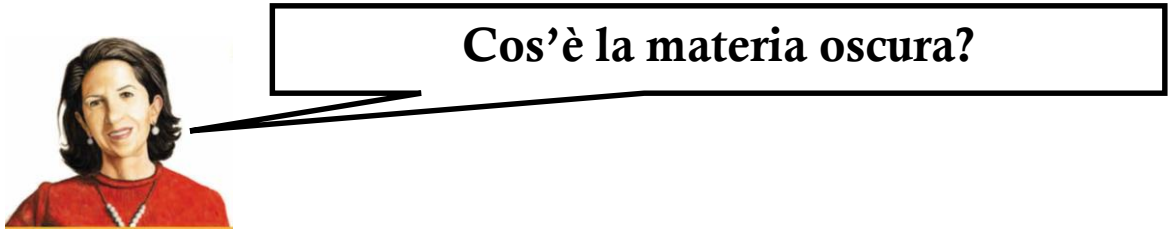
Esistono importanti osservazioni sperimentali che non sono spiegate dal Modello Standard che cifanno capire che esso non è il modello onnicomprensiso della fisica della particelle elementari

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:
→ **La quantità di materia oscura dell'universo è molto maggiore della materia ordinaria**



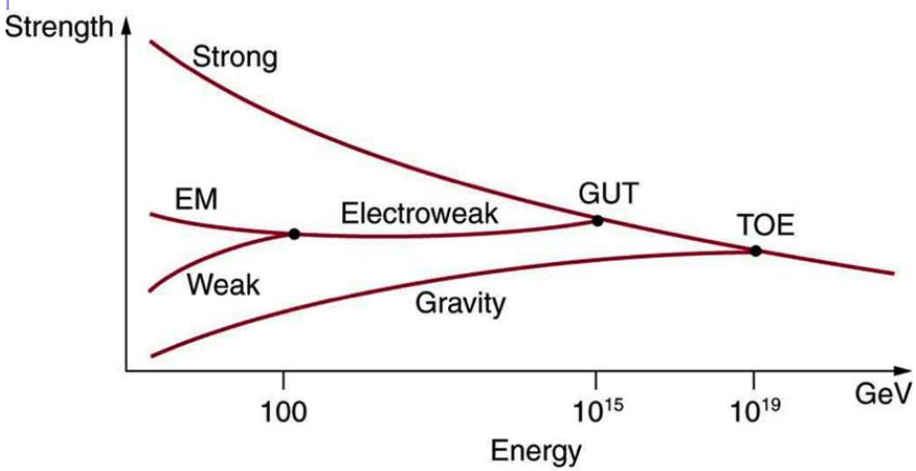


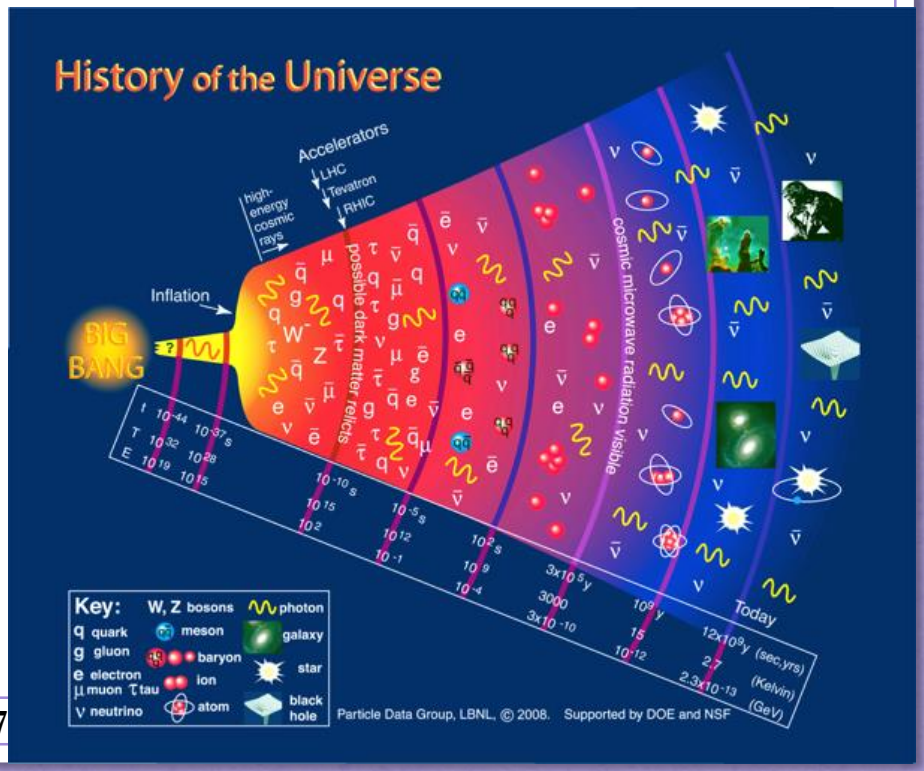
Non lo sappiamo ancora e il MS non la spiega. Esistono teorie piu' generali che inglobano il SM, che predevono una moltitidine di altre particelle, alcune delle quali potrebbero essere candidati di materia oscura.
Ad LHC nessuna evidenza di tali particelle è stata ancora trovata ad eccezione dell'Higgs

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





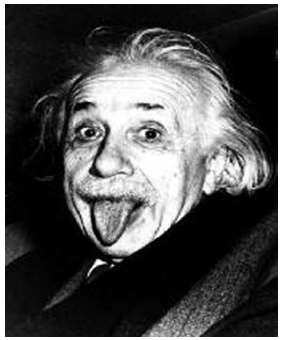
Hmm..gli esperimenti di LHC e
gli esperimenti su acceleratori
futuri forniranno alcune delle risposte a questi interrogativi negli anni a venire..

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

de Broglie

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

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



Einstein

La massa è una forma di energia

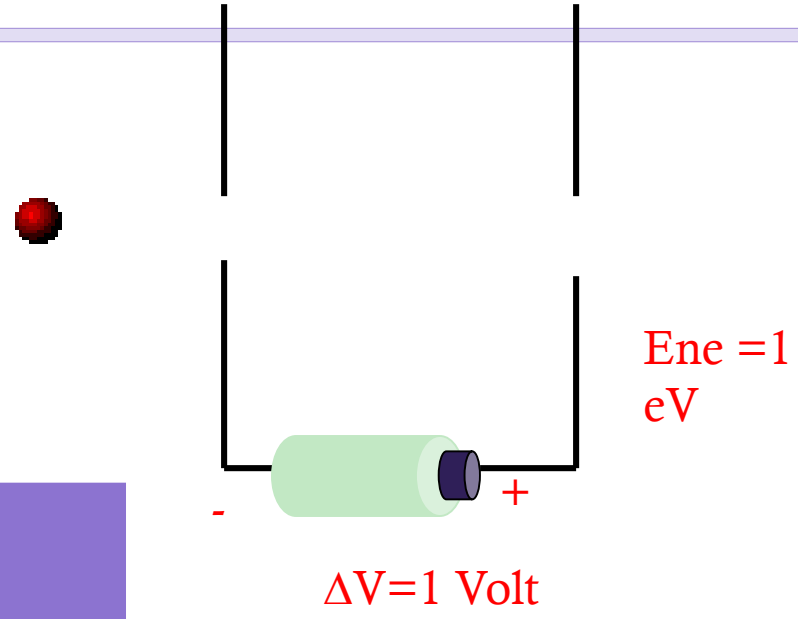
$$E = mc^2$$

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

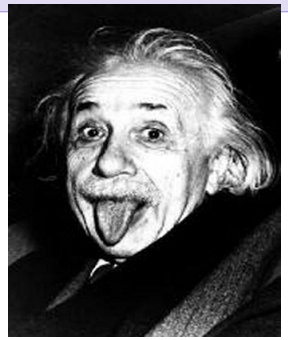
Unità di energia

Un electron-volt (eV) è la quantita 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 ($1MeV=10^6eV$)	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 (enegia del centro di massa) deve essere >= 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

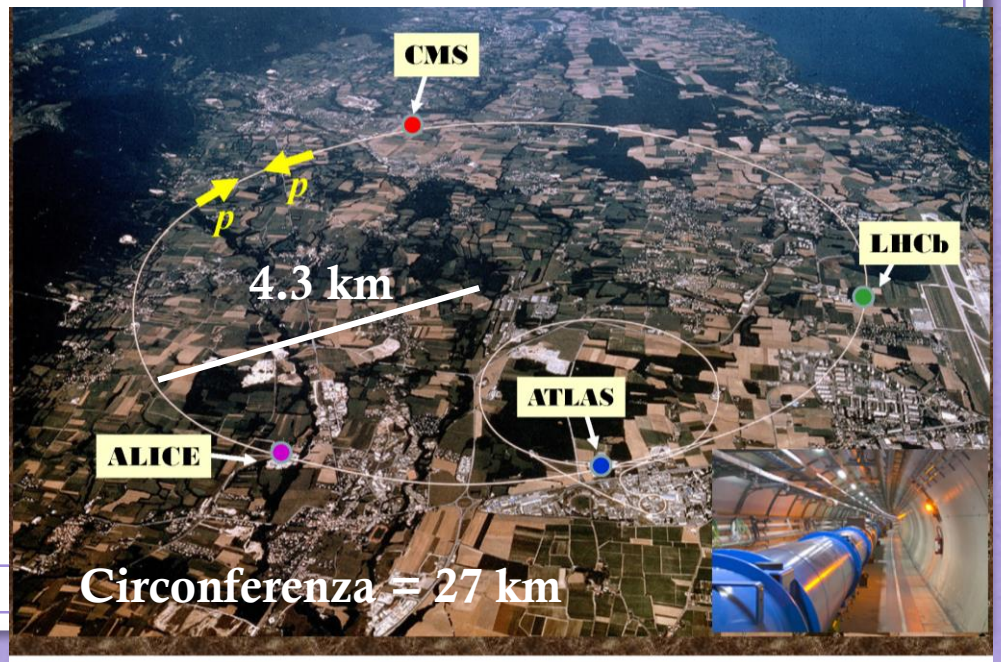
Note
0.5 MeV
1000 MeV= 1 GeV
80 GeV (Z^0=90 GeV)
125 GeV (Higgs)

CERN ed LHC

CERN
Fondato nel 1954 da 12 Paesi fra cui l' Italia. Oggi ~20 stati membri.
Più di 7000 utilizzatori da tutto il mondo.

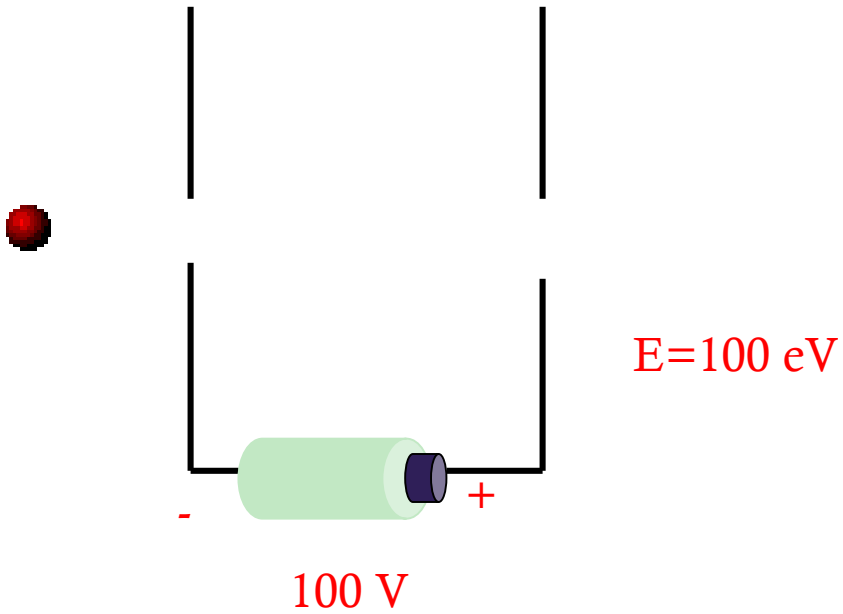
LHC
Il più grande collisionatore adronico al mondo:

- Lungo 27 km, 100 m sotto terra
- collisionatore protone-protone
- Raggiunta l'energia di collisione di 13TeV :6.5 TeV + 6.5 TeV (energia di progetto 14 TeV)

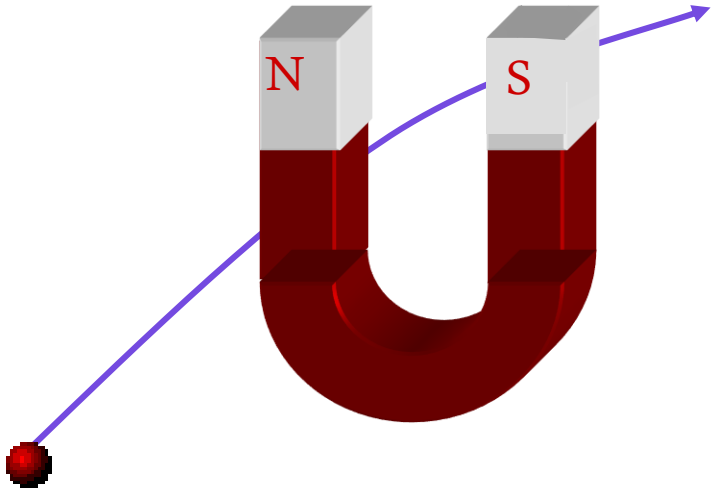


Concetti di base sugli acceleratori (1/3)

Usiamo campi elettrici per accelerare particelle cariche

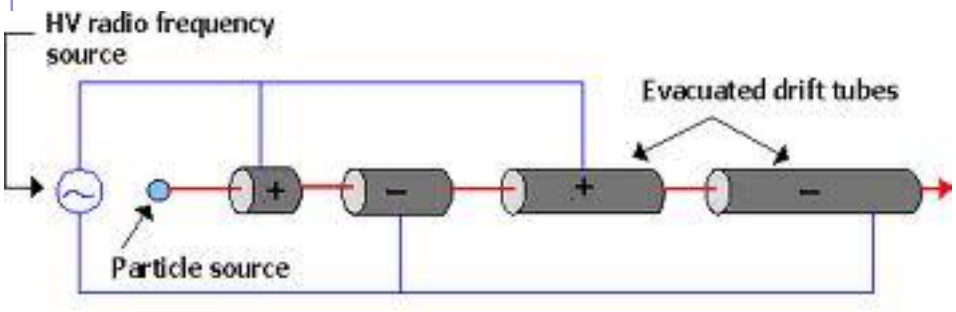


..e campi magnetici per curvare la loro traiettoria



Concetti di base sugli acceleratori (2/3)

Acceleratori lineari

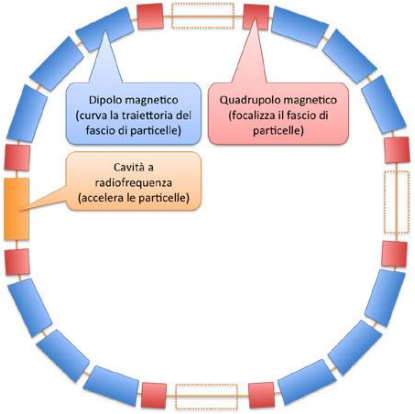


Linear Accelerator

Svantaggi:
- Sono molto lunghi:
  (LINAC4 80m per avere protoni da 160 MeV)

Vantaggi:
- Particelle cariche in moto rettilineo non perdono energia

Acceleratori circolari



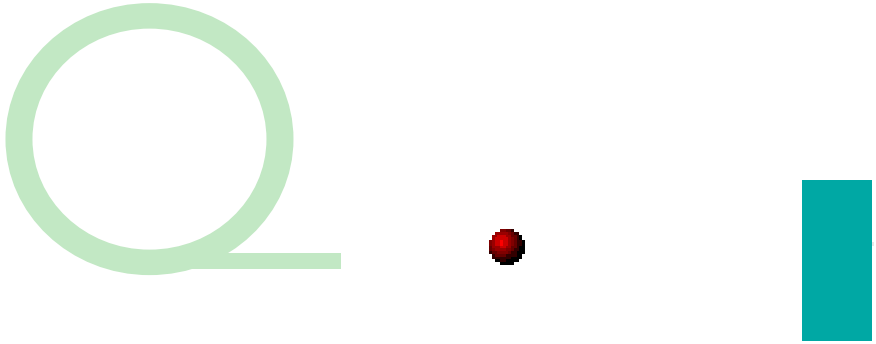
Svantaggi:
-Particelle cariche in moto curvilineo perdon Energia, effetto più importunate al diminuire della massa (catastrofico per gli elettroni)

Vantaggi:
- Più compatti

24

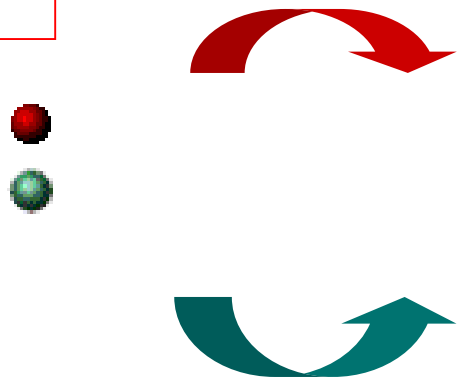
Concetti di base sugli acceleratori (3/3)

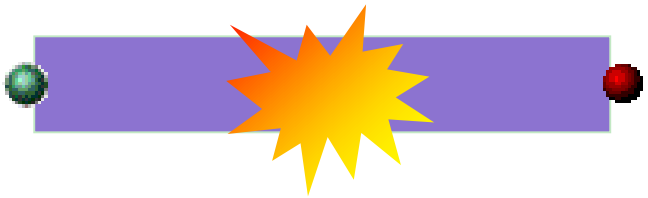
Targhetta fissa



$$E^* @ \sqrt{2mc^2 E_{inc}}$$

Collider





$$E^* @ 2E_{inc}$$

LHC al CERN (1/2)

- **Lungo 27 km, 100 m sotto terra**
- **collisionatore protone-protone**
- **Energia di collisione 13TeV**
- **Velocità dei protoni=** 99,9998 % della velocità della luce (c = 3 x 108 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°C (= 1.9 K)
- **Pressione all'interno del tubo=** 10^{-13} atm (1 decimo che sulla luna)

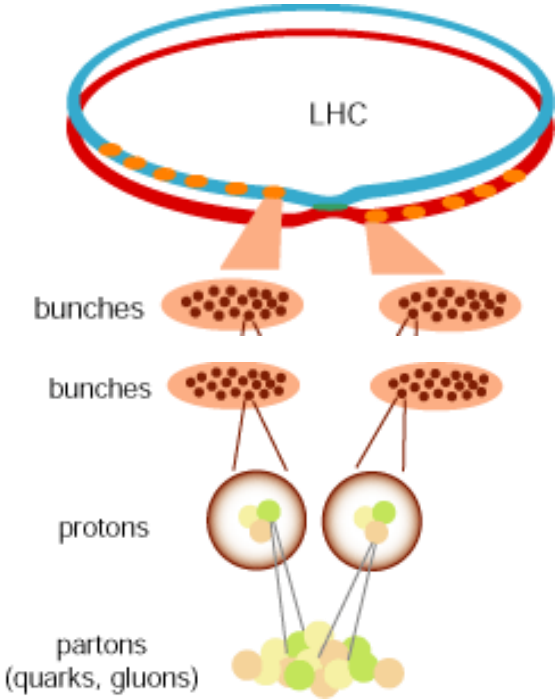
LHC al CERN (2/2)

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

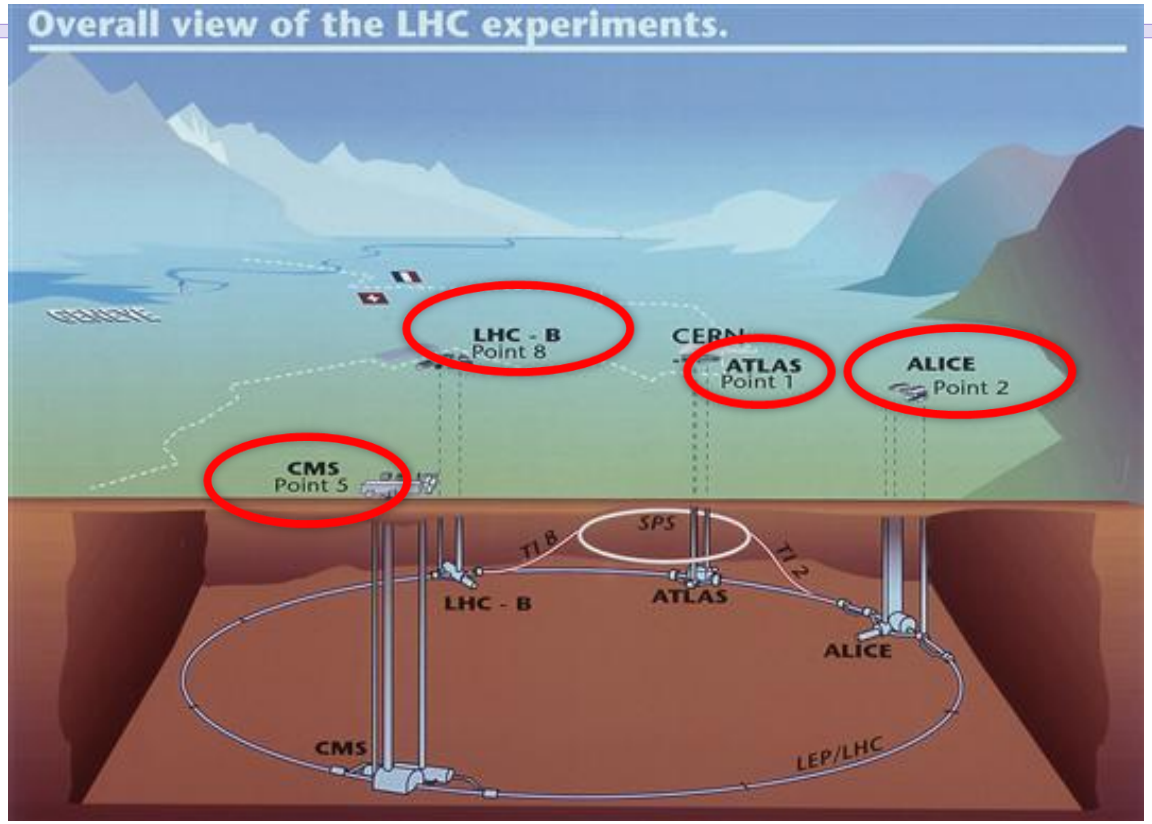
→ La densità di energia è quella dell'universo
un miliardesimo di secondo dopo il Big Bang

- **Costo** : 6 miliardi di euro (pagato in circa 10 anni dagli stati membri del CERN).

→ LHC costa:
- Meno di un centesimo della spesa mililare mondiale annua
- Quanto viene speso al mondo in una settimana di pubblicità
- Meno di un centesimo della spesa mililare mondiale annua



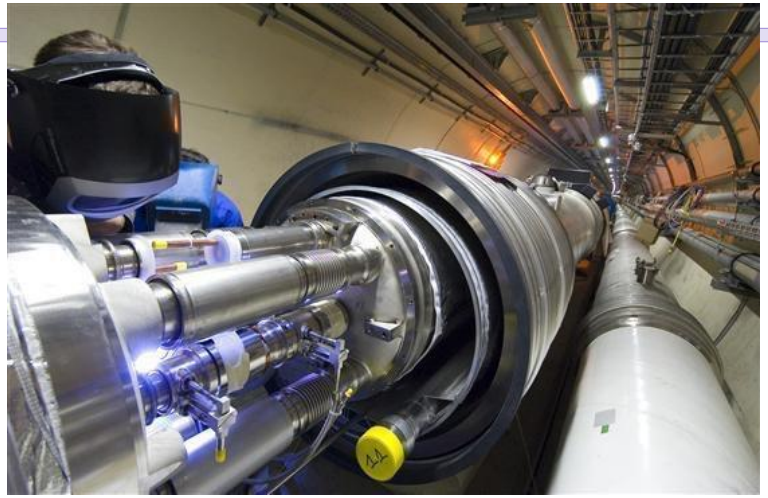
Gli esperimenti di LHC



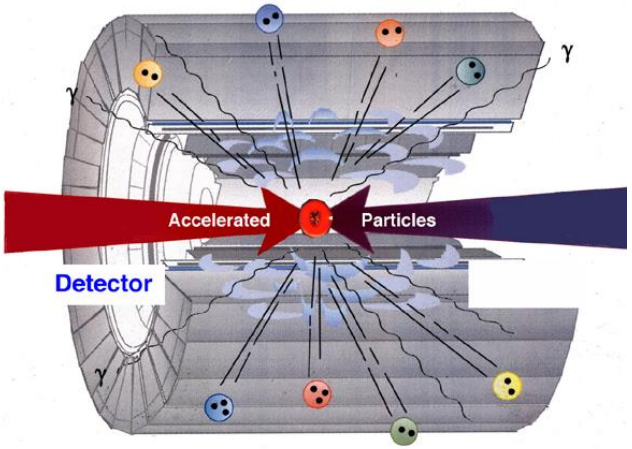
Ogni esperimento di LHC produce un volume di **dati** equivalente di **20 milioni di DVD ogni anno**

I rivelatori sugli acceleratori

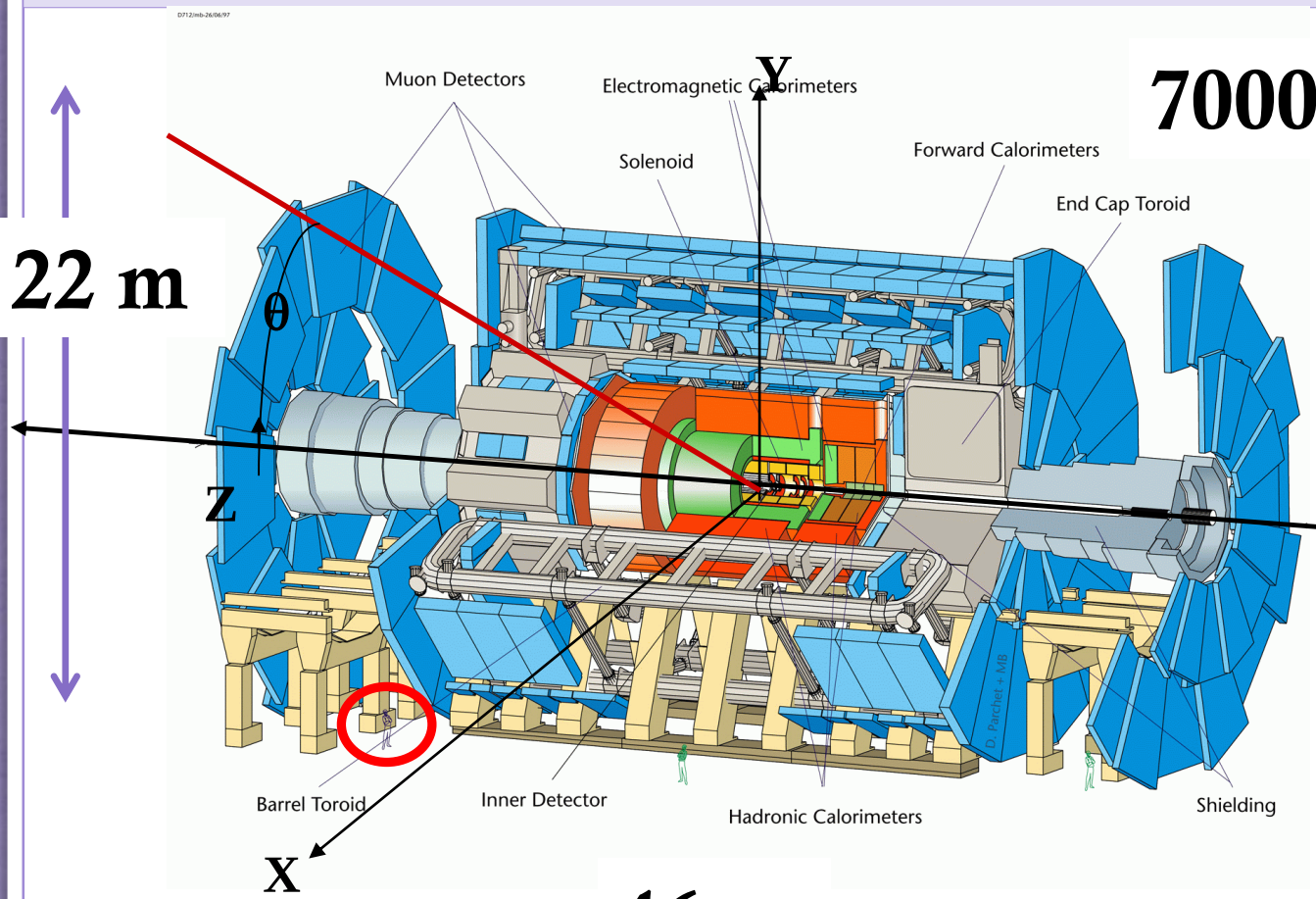
Per accelerare le particelle,
farle collidere e crearne nuove
↳ **Acceleratori**



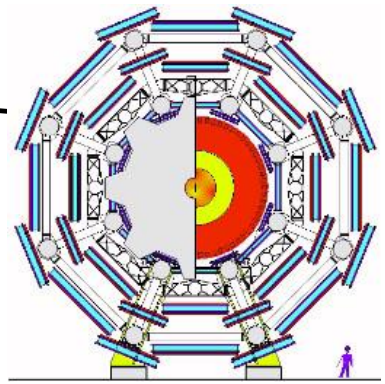
Per osservare le nuove particelle
così create
↳ **Rivelatori**



ATLAS

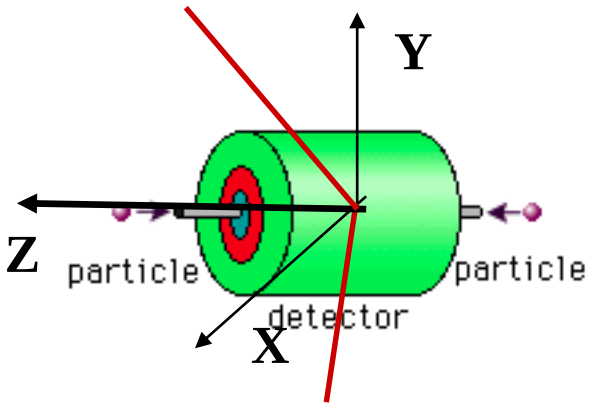


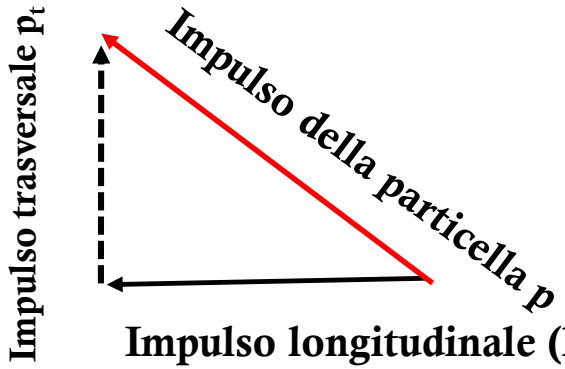
7000 Tonnellate



Piano Trasverso

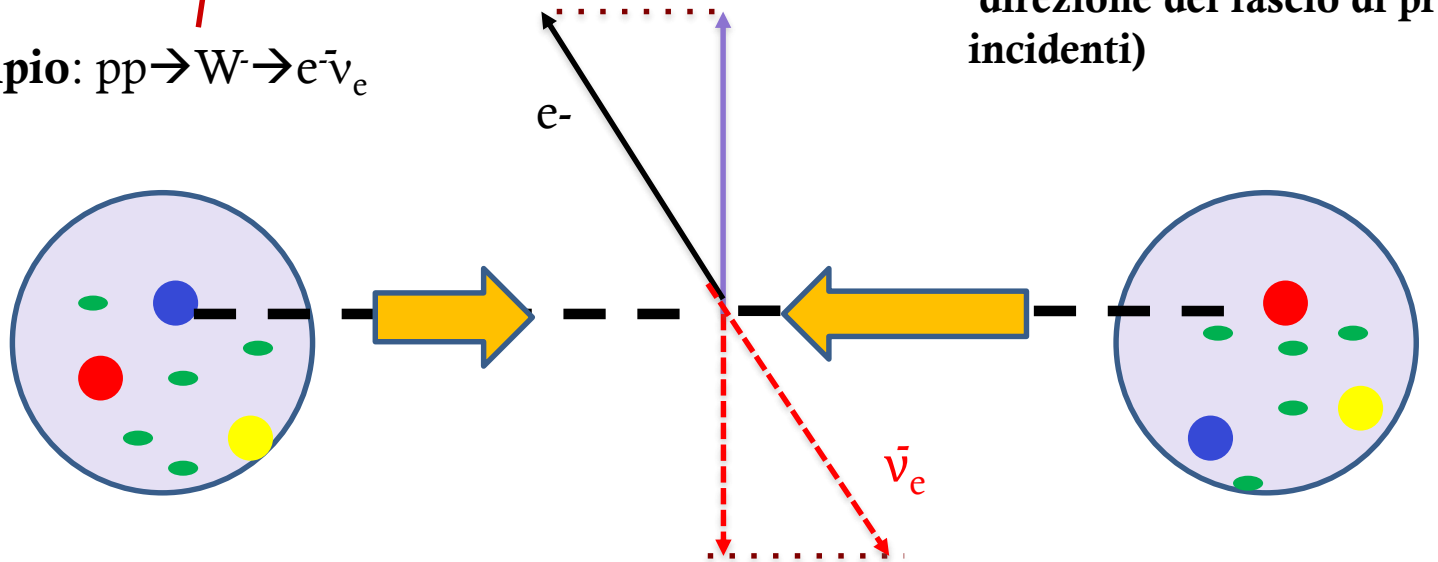
L'impulso trasverso





Impulso longitudinale (lungo la direzione del fascio di protoni incidenti)

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



Gli impulsi dei due partoni iniziali non sono uguali, ma l'impulso trasversale è nullo !!!
→anche l'impulso trasvervale totale dello stato finale è nullo !!

Cosa studiamo ad ATLAS e come?

Il risultato della collisione fra 2 pacchetti di protoni e' detta **evento** (nella realta' a volte lo stesso evento contiene piu' collisioni fra pacchetti)

Eventi differenti possono essere prodotti nella collisione fra le stesse particelle→ **Processi differenti** (alcuni più frequenti altri meno)

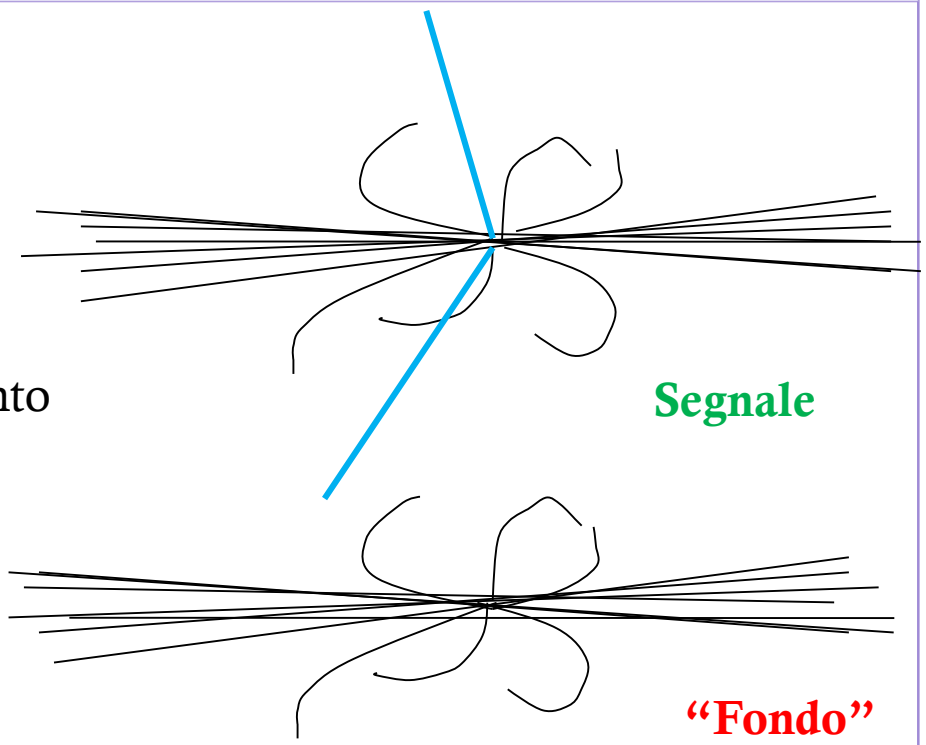
Dopo aver stabilito il tipo di processo che vogliamo studiare **(Higgs, W/Z)**
Il goal è di osservare un **gran numero di eventi (dataset),** selezionare quelli che provengono dal processo scelto e verificare se l'osservazione (o non osservazione) è in accordo con le previsioni di un dato modello teorico

Quali sono i processi più interessanti ad LHC?
Quelli in cui sono state create nuove particelle nello stato finale (Conversione energia←→ materia)
Quelle più interessanti (W/Z, Higgs) sono instabili: breve vita media →decadimenti in particelle stabil
Esempio: $pp \rightarrow W^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e$

Cosa studiamo ad ATLAS e come?

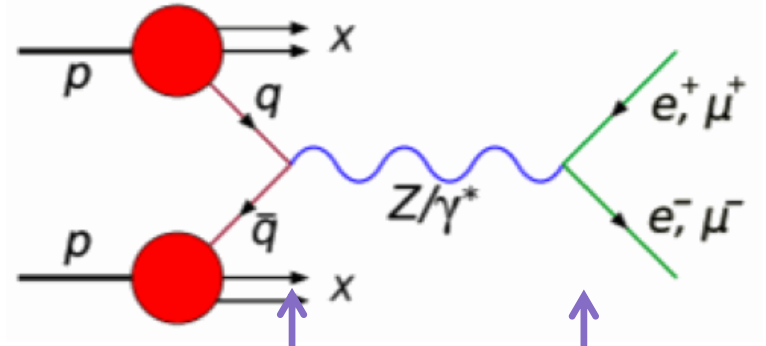
Eventi interessanti ad LHC (eventi molto rari)=
Particelle di alto p_t, accompagnate tipicamente da molte particelle di basso p_t
(esempio: $e^-\bar{\nu}_e$ che vengono dal decadimento del W^-)

Stato finale tipico di LHC=
molte particelle di basso p_t.
(molto frequenti)

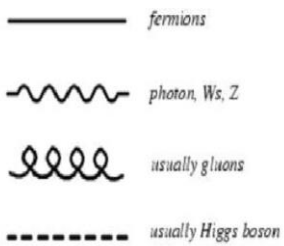


CMS e ATLAS sono pensati per studiare soprattuto questo tipo di eventi

Esempio: identificazione della Z



Questa schematizzazione dei processi fra particelle elementari è detta Diagramma di Feyman



Produzione della Z

Decadimento della Z

tempo

La Z vive un tempo molto breve e decade in 2 leptoni (2μ o 2 e), ad ATLAS misuriamo i 2 leptoni (energia, impulso, carica)

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

Selezioniamo solo eventi che hanno 2μ(o 2e) di carica opposta ed alto impulto trasverso, usiamo il principio di conservazione di energia e momento, e l'equivalenza massa energia

Esempio:identificazione della Z

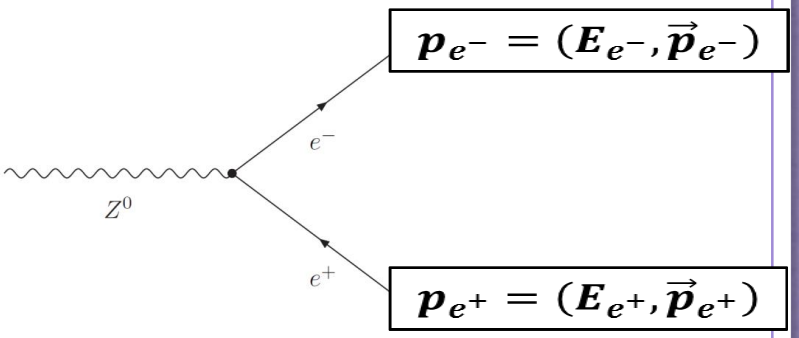
In generale: a→ a1 +a_2 (Z→ ee)

E = E_1+E_2 (conservazione dell'energia)

p = $\mathbf{p_1}$ +$\mathbf{p_2}$ (conservazione del momento, 3 equazioni scalari)

$E^2 - (|\mathbf{p}|c)^2=(mc^2)^2$ (equivalenza energia – massa)

Chi e'p? In meccanica classica **p**=m**v** → In relativita' **p**=m**v**/ srtq(1 - $|\mathbf{v}|^2/c^2$)

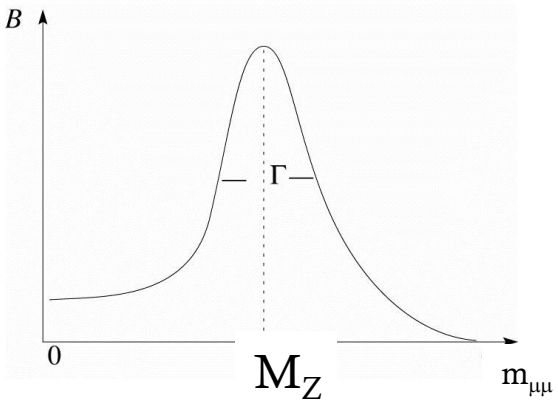


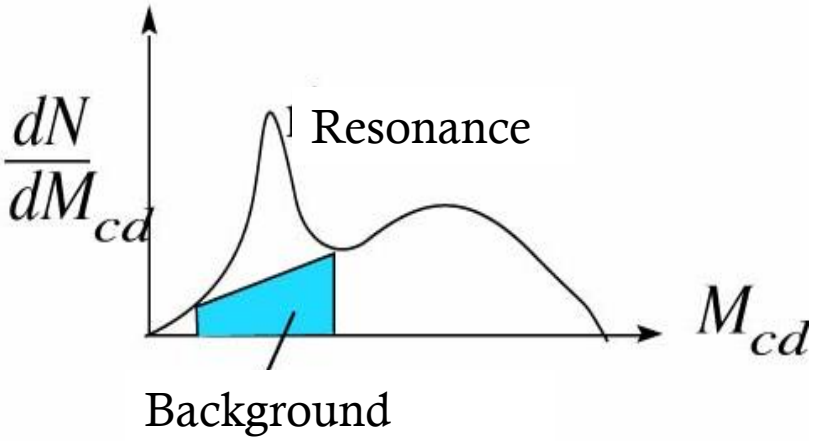
→Dobbiamo quindi misurare lo stato finale (le masse ed i momenti/energie delle particelle dello stato finale) per conoscere le caratteristiche della particella creata e decaduta (la massa in questo esempio)

Esempio:identificazione della Z

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

Idealmente dovremmo avere →

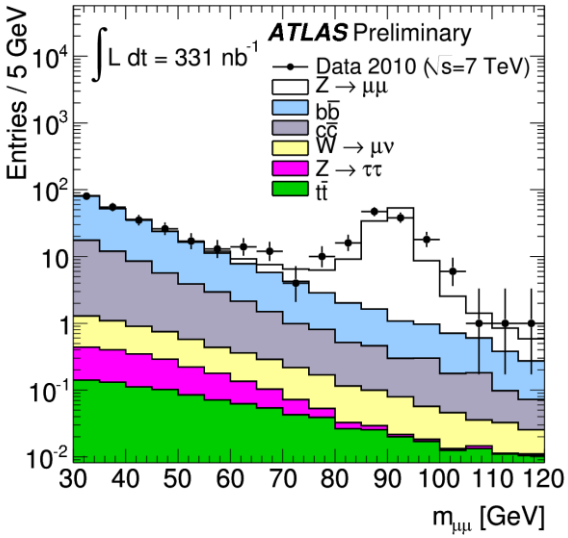


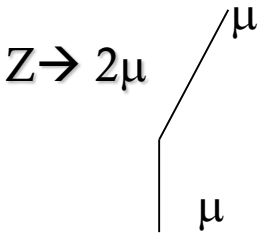


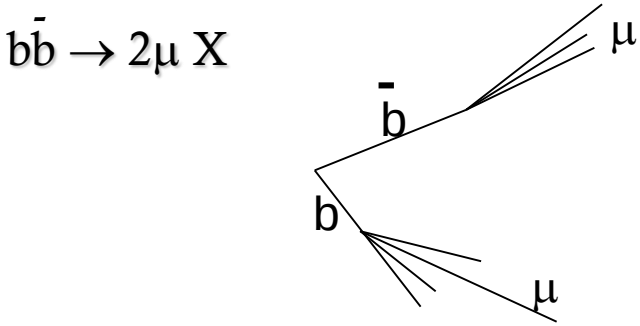
Cos'e' quella motitudine di eventi sotto il picco?

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

Esempio:identificazione della Z



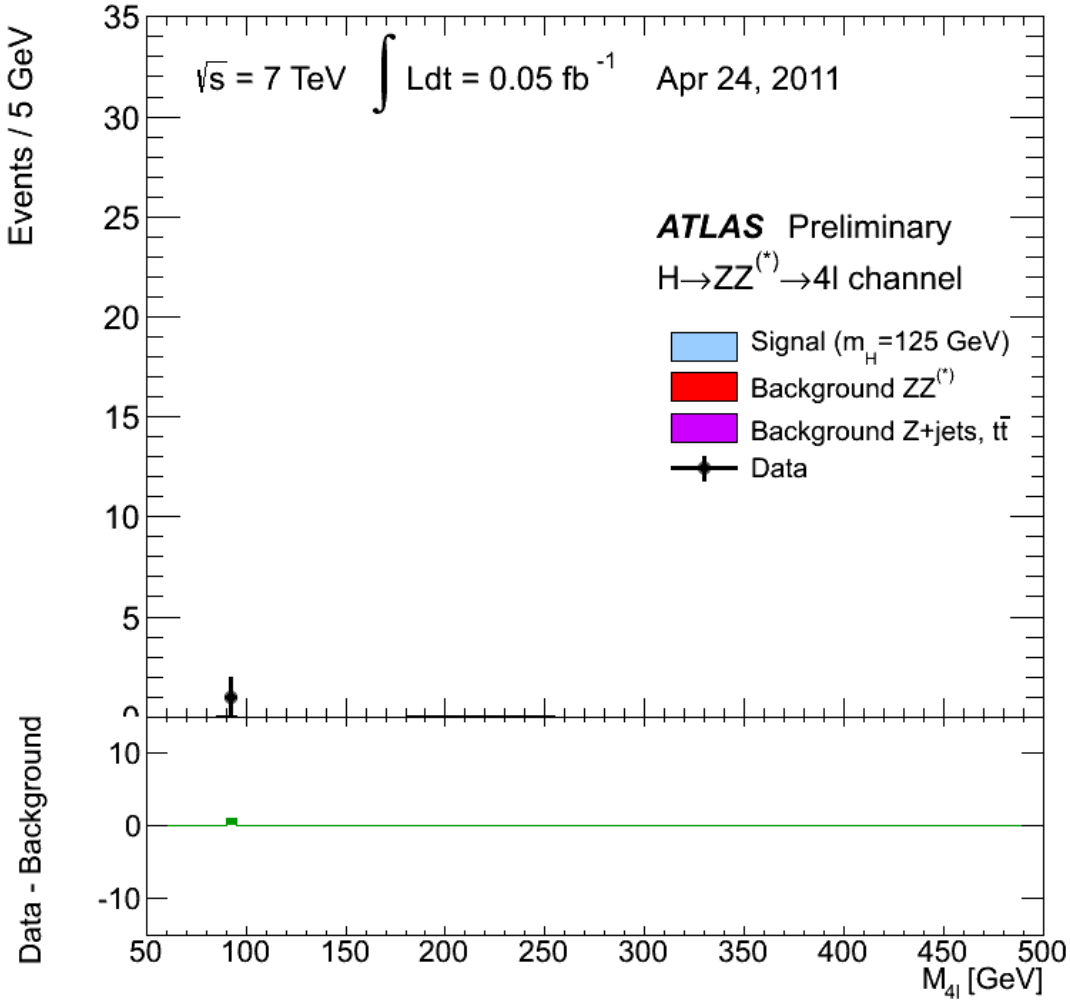




Per ridurre ulteriormente gli eventi di fondo possiamo sfruttare la **massa invariante e/o variabili di isolamento** (i μ della Z sono isolati) e/o il **parametro d'impatto**

→ **Quando studiamo W e Higgs usiamo criteri di selezione simili**

Esempio: H→4leptoni



Esercitazione di analisi dati

1. Studio della produzione singola dei bosoni $W^{\pm}$ nelle interazioni protone-protone ad LHC

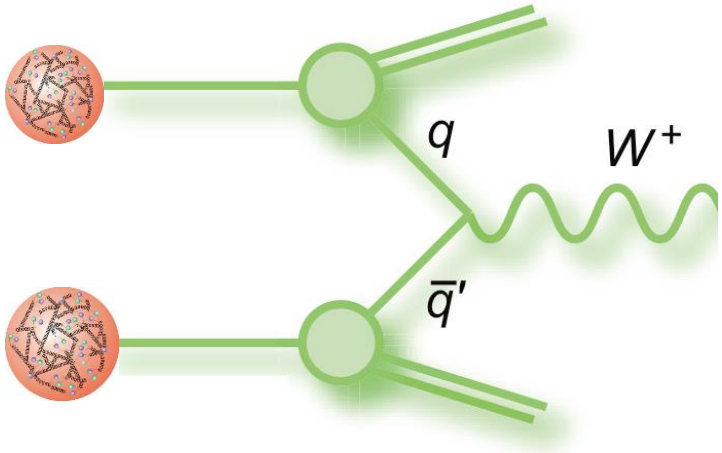
2. Identificazione e conteggio dei W^{+} rispetto ai W^{-}

3. Studio della produzione di coppie (W^{+},W^{-}) e misurazione della loro separzione angolare → Interessante in relazione alla produzione del Bosone di Higgs

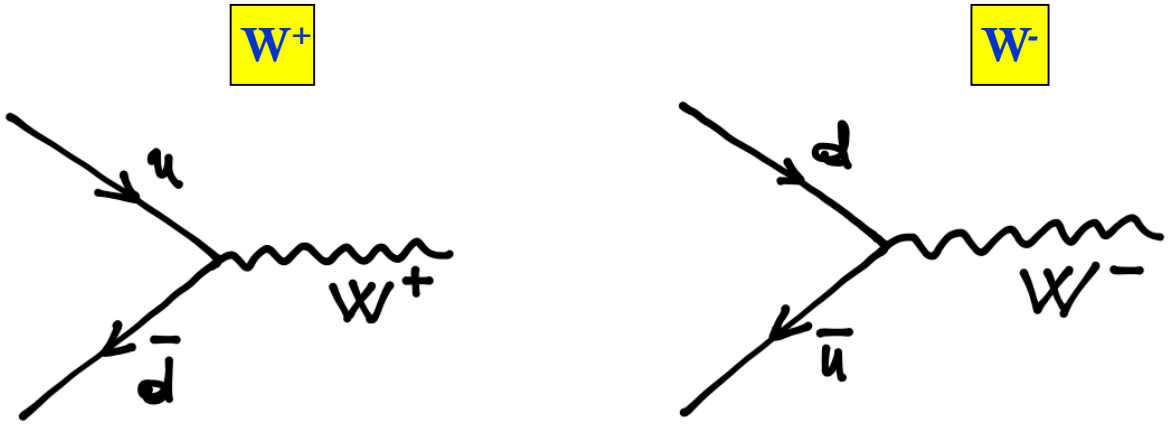
Le analisi saranno basate su di un campione dati realmente raccolto dall'esperimento ATLAS al LHC!

In ciascuna di queste analisi imparerete a distinguere gli eventi di "segnale" da quelli di "fondo".

Produzione di W ad LHC (1/2)



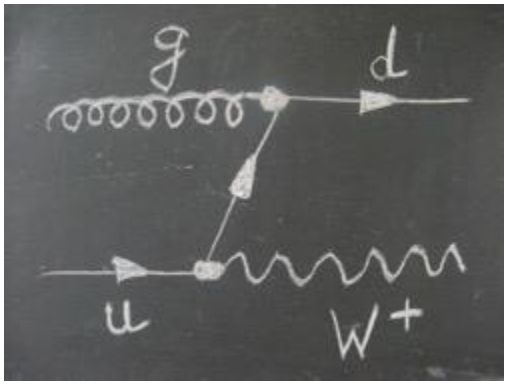
Produzione quark-quark

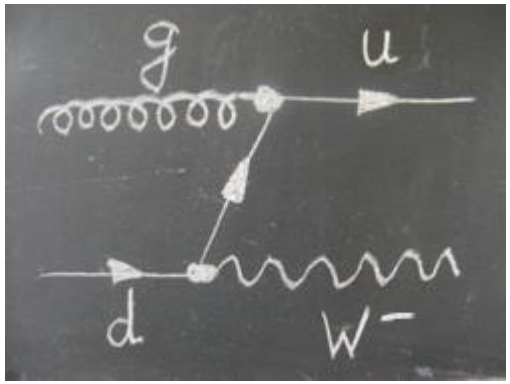


Produzione di W ad LHC (2/2)

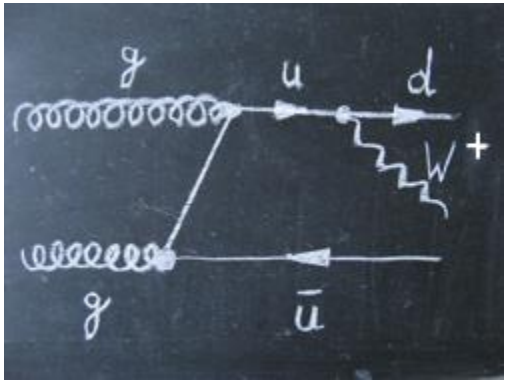
W+ **W-**

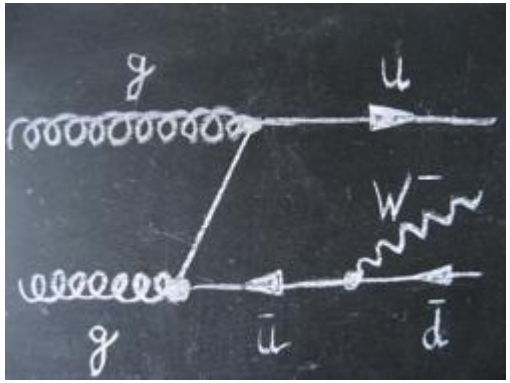
Gluone + Quark



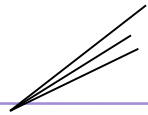


Gluone + Gluone





Nota= I quark adronizzano creando un flutto di particelle detto jet

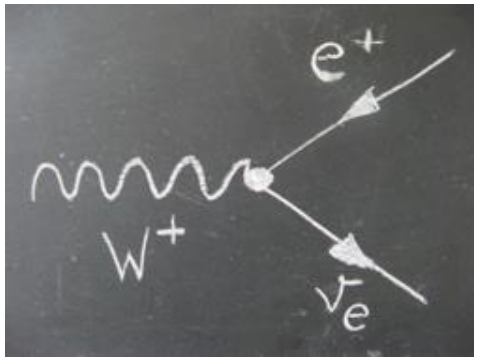


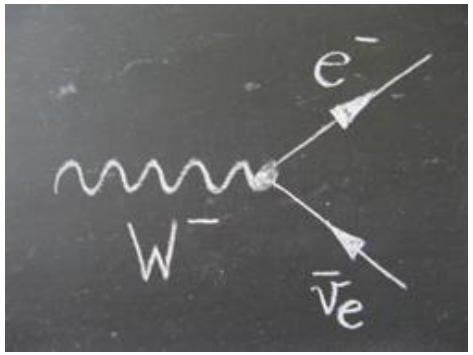
jet

Decadimenti leptonici del W

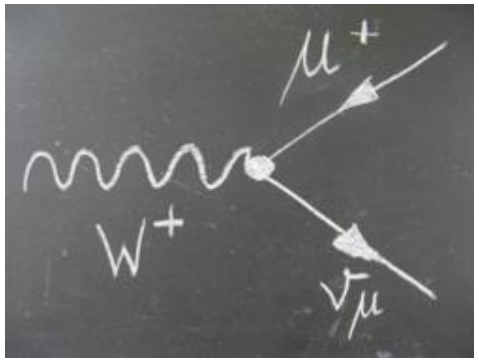
W+ **W-**

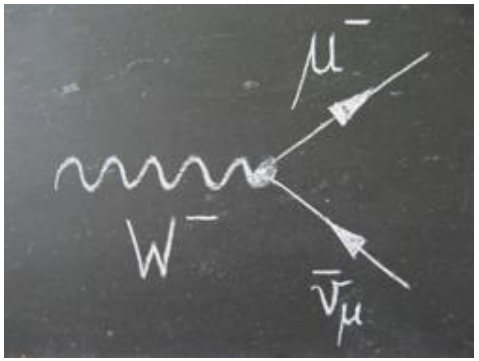
Stati finali con elettroni





Stati finali con muoni

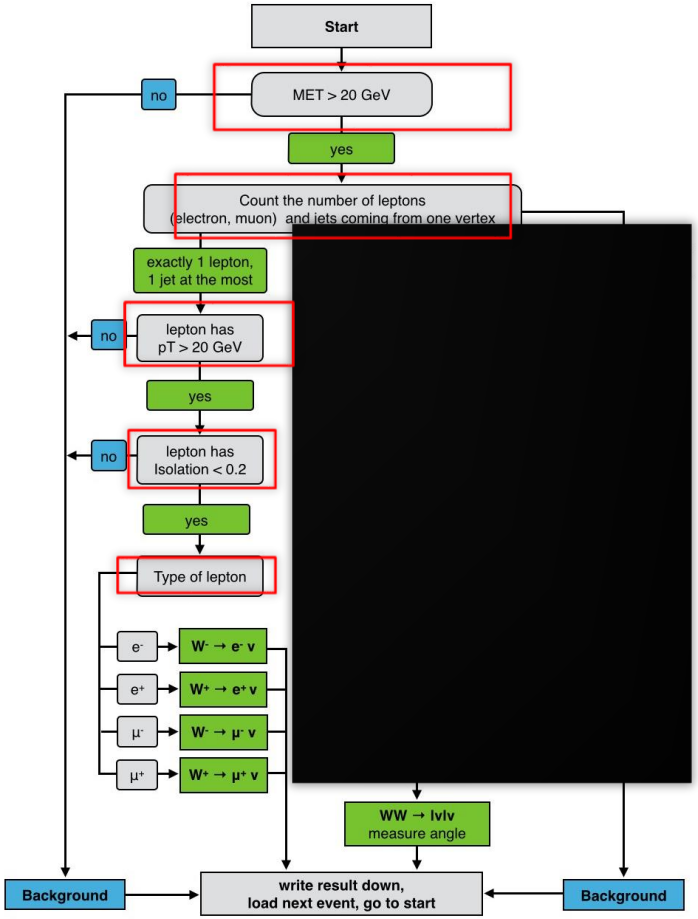




Lo stato finale del decadimento del W e' caratterizzato da un leptone di alto impulso trasverso e, a causa della presenza del neutrino, da Impulso Trasverso Mancante (MET) nell'evento

La selezione per il W

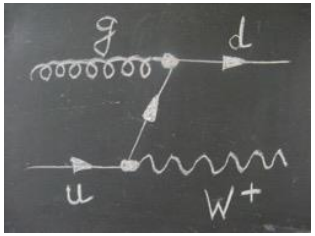
La prof.ssa La Rotonda e la dott.ssa Palazzo ve la spiegheranno in dettaglio..

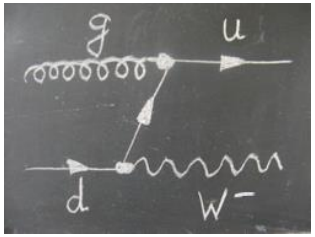


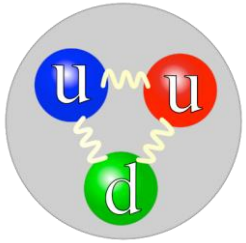
Stima del rapporto $N(W^+)/N(W^-)$

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

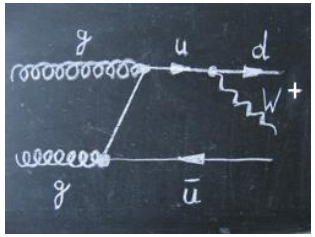
Gluone + Quark
(66 %)

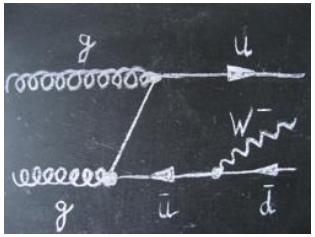






Gluone + Gluone
(34 %)





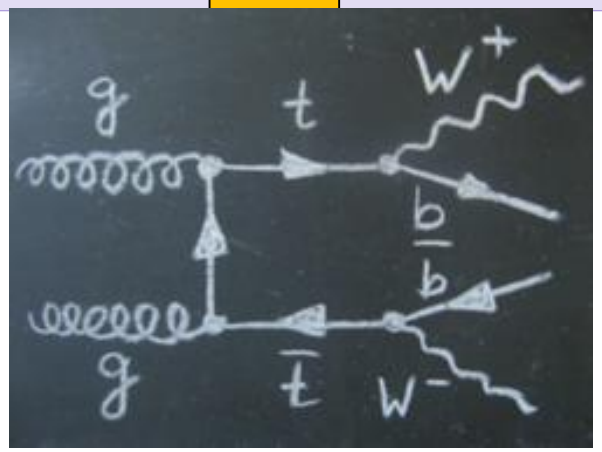
$$f+ = 0.66*(2/3) + 0.34*(1/2) \simeq 0.6$$

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

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

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

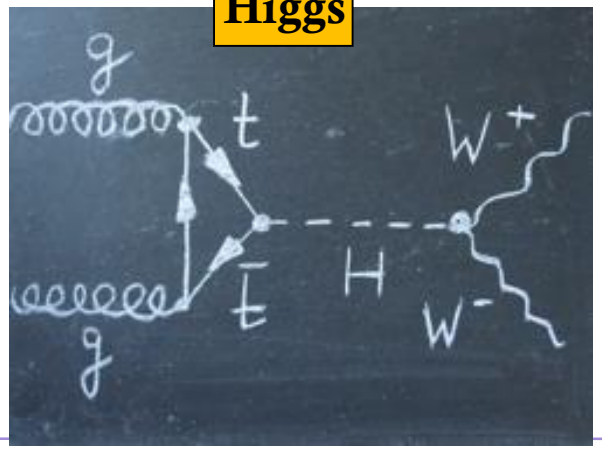
WW



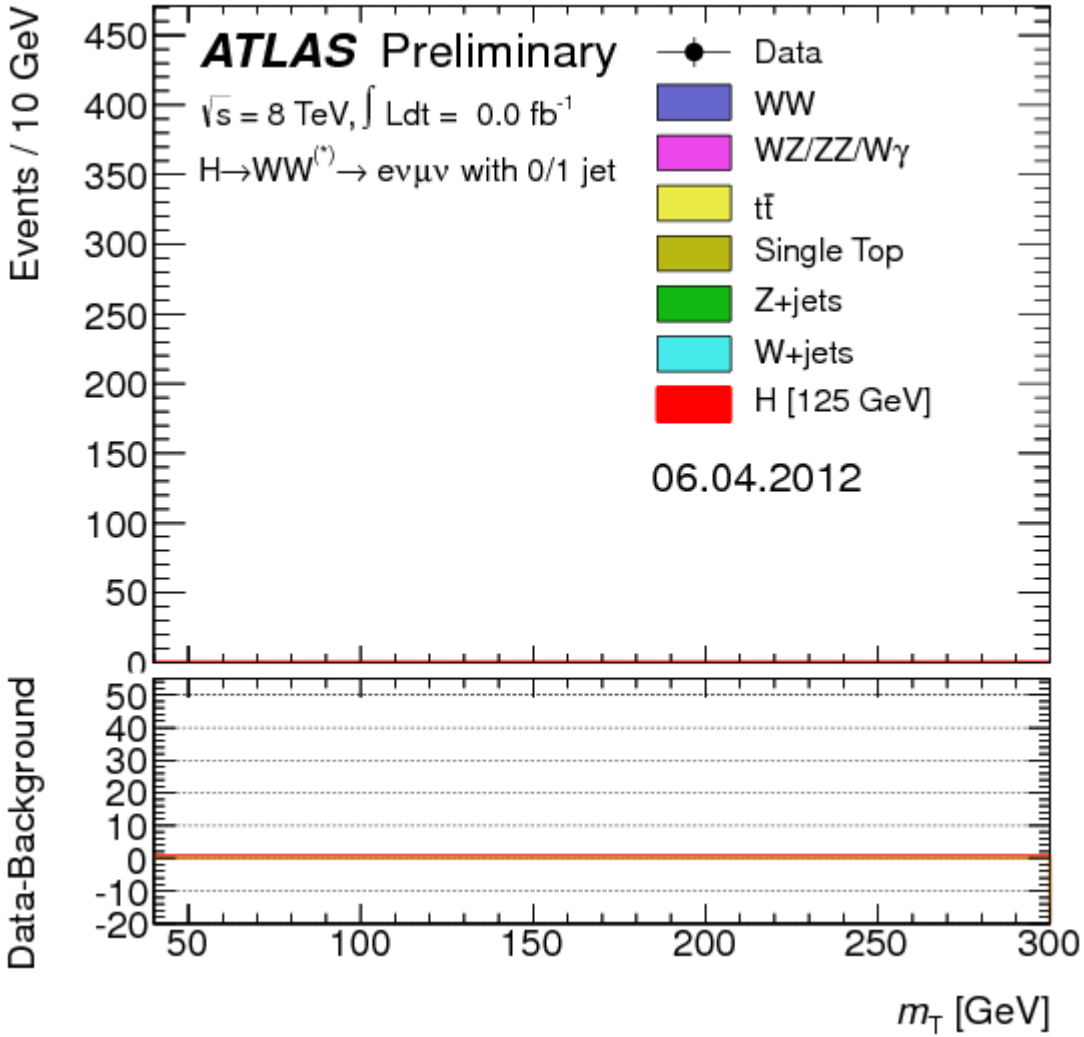
Questo stato finale e' particolarmente interessante perché rappresenta un fondo per il **bosone di Higgs del caso del decadimento H→WW**

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

Higgs



H→WW

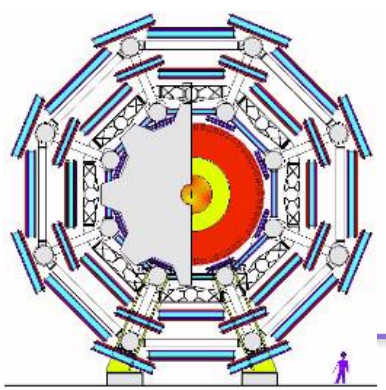

ATLAS Preliminary
√s = 8 TeV, ∫ Ldt = 0.0 fb⁻¹
H→WW(*)→ eνμν with 0/1 jet
Data
WW
WZ/ZZ/Wγ
tt̄
Single Top
Z+jets
W+jets
H [125 GeV]
06.04.2012
Events / 10 GeV
Data-Background
m_T [GeV]

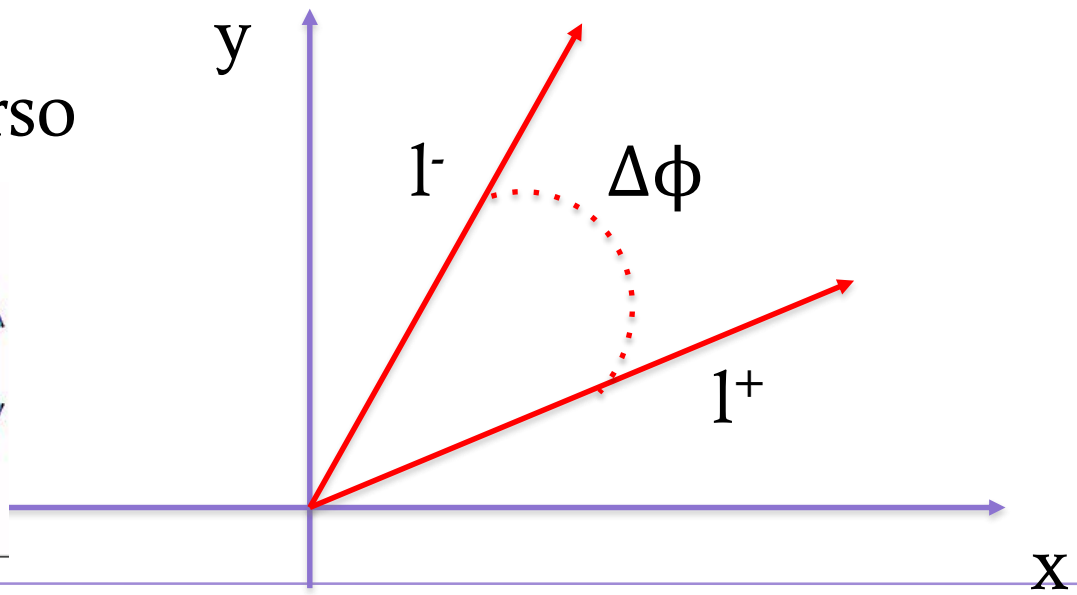
Come distinguo WW da H→WW?

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

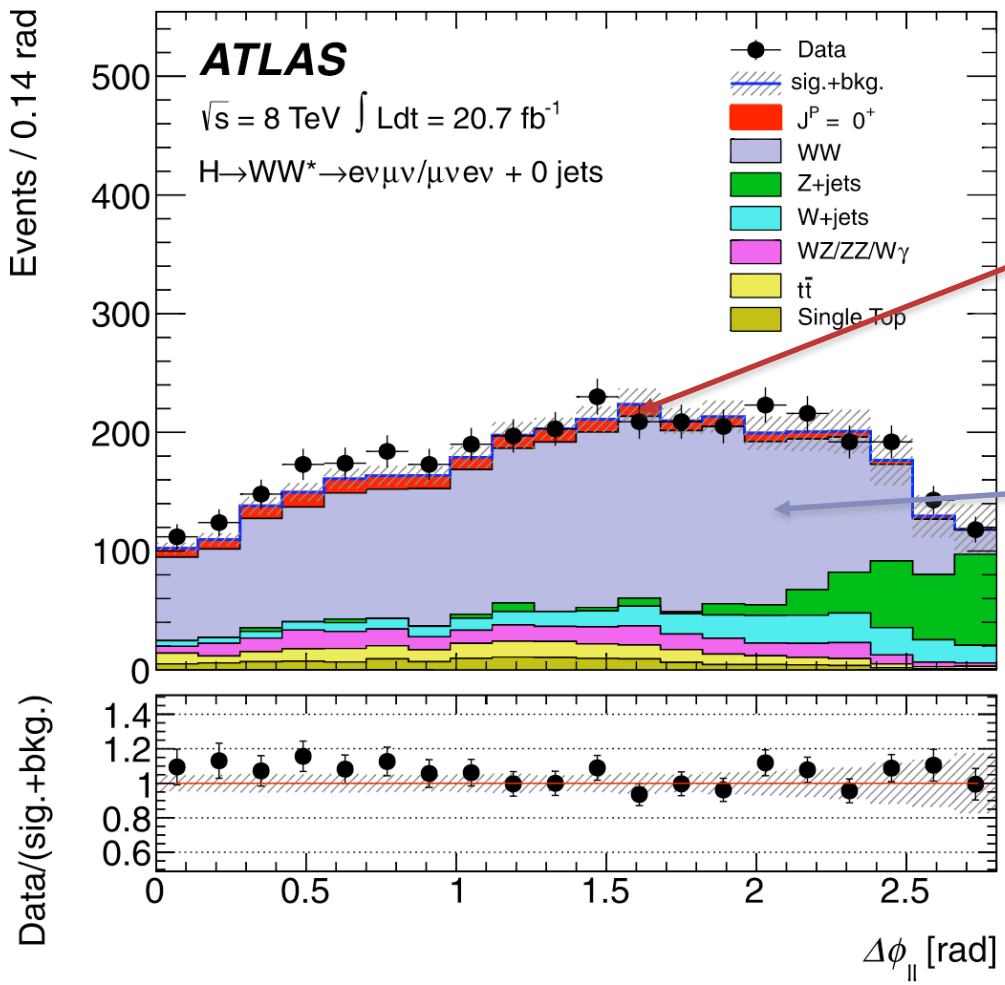
Quindi la **distribuzione angolare** dello stato finale e' diversa nel caso di decadimento dell' Higgs rispetto ad un evento WW.

Piano trasverso





Distribuzione Δϕ

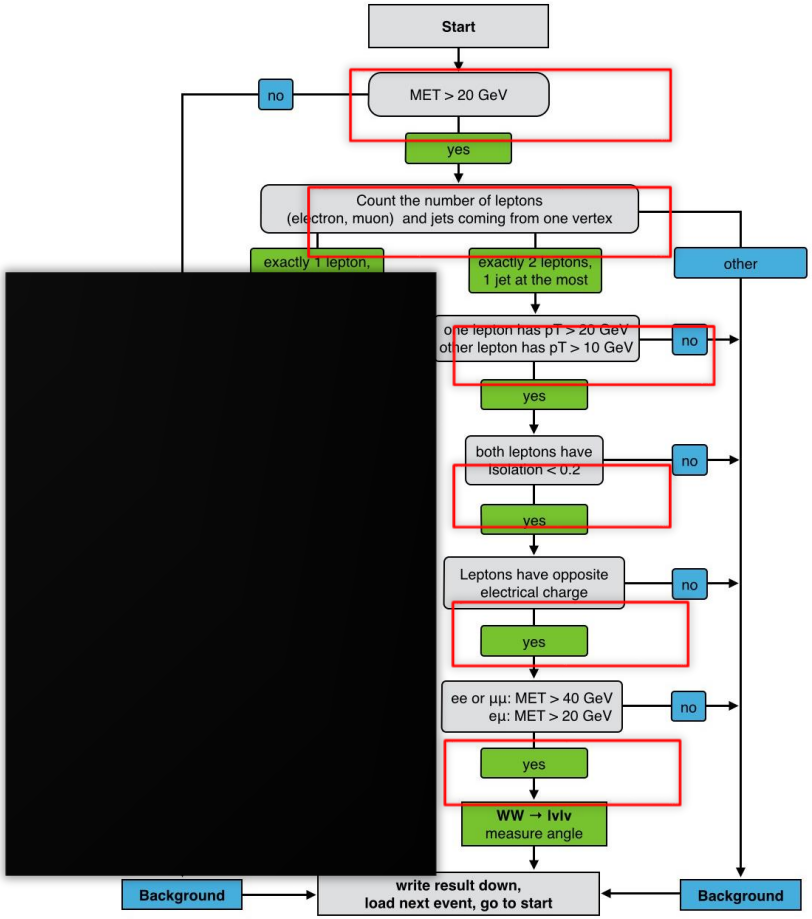


Contributo dell'Higgs

Contributo del WW

La selezione per il WW

La prof.ssa La Rotonda e la dott.ssa Palazzo ve la spiegheranno in dettaglio..



Concludendo (1/2)

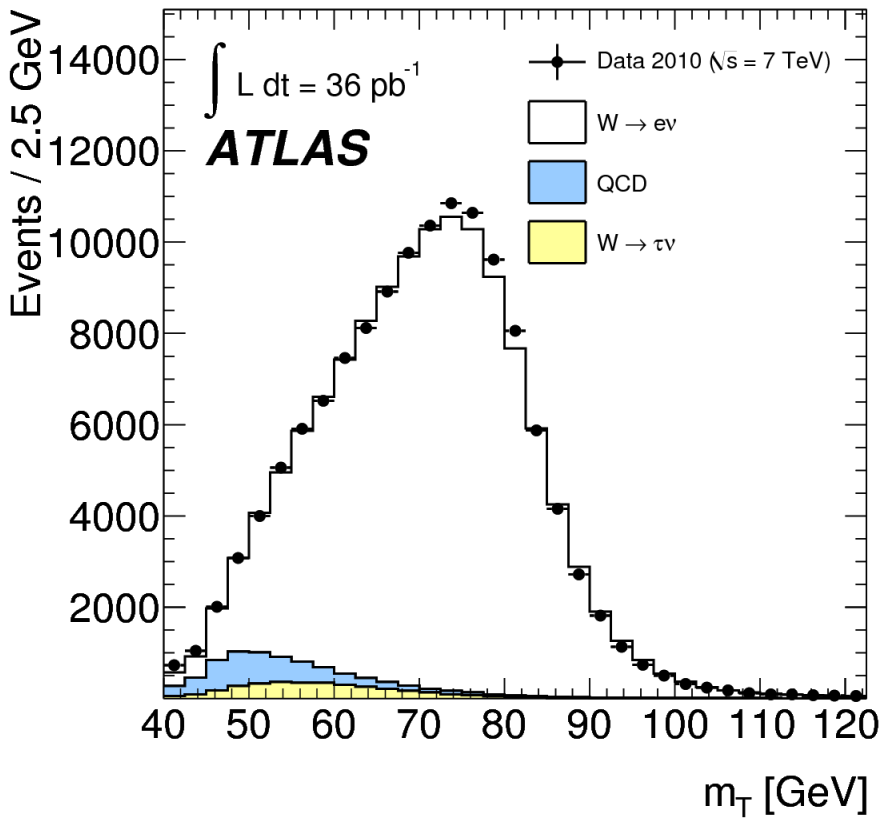
La **ricerca nel campo della Fisica delle Particelle Elementari** ed in particolare ad LHC in questi anni è **un'esperienza unica, eccitante ed emozionante..**

..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!**

Massa trasversa del W



$$m_{\mathrm{T}}^{W} = \sqrt{2 p_{\mathrm{T}}^{\ell} E_{\mathrm{T}}^{\mathrm{miss}} (1 - \cos(\phi^{\ell} - \phi^{\mathrm{miss}}))}.$$

Concludendo (2/2)

Circa la vostra esperienza in laboratorio:

- Studierete i decadimenti "leptonici" (elettroni e muoni) delle particelle W^+ e W^- prodotte negli collisioni fra protoni a LHC (esperimento ATLAS).

-Imparerete a riconoscere quando un evento contiene almeno un decadimento di una W^+ o W^- in elettrone o muone (+ neutrino) → Criteri di Selezione

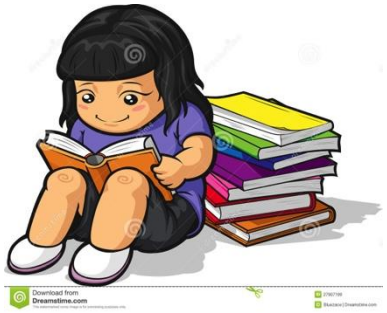
- All' interno degli eventi selezionati identificherete quelli W^+W^- e studierete la lor distribuzione angolare per cercare di identificare eventi prodotti dal decadimento della particella di Higgs.

Buon Divertimento!!

BACKUP

I personaggi delle diapositive

Voi
(con le vostre curiosita' ed i vostri dubbi)



Io
(che oggi in veste di docente cerchero' di rispondere alle vostre domande)

Lo scienziato moderno con alcuni interrogativi fondamentali

Esempi particelle composte

protone (uud)
neutrone (udd)

antiprotone ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$)
antineutrone ($\bar{u}\bar{d}\bar{d}$)

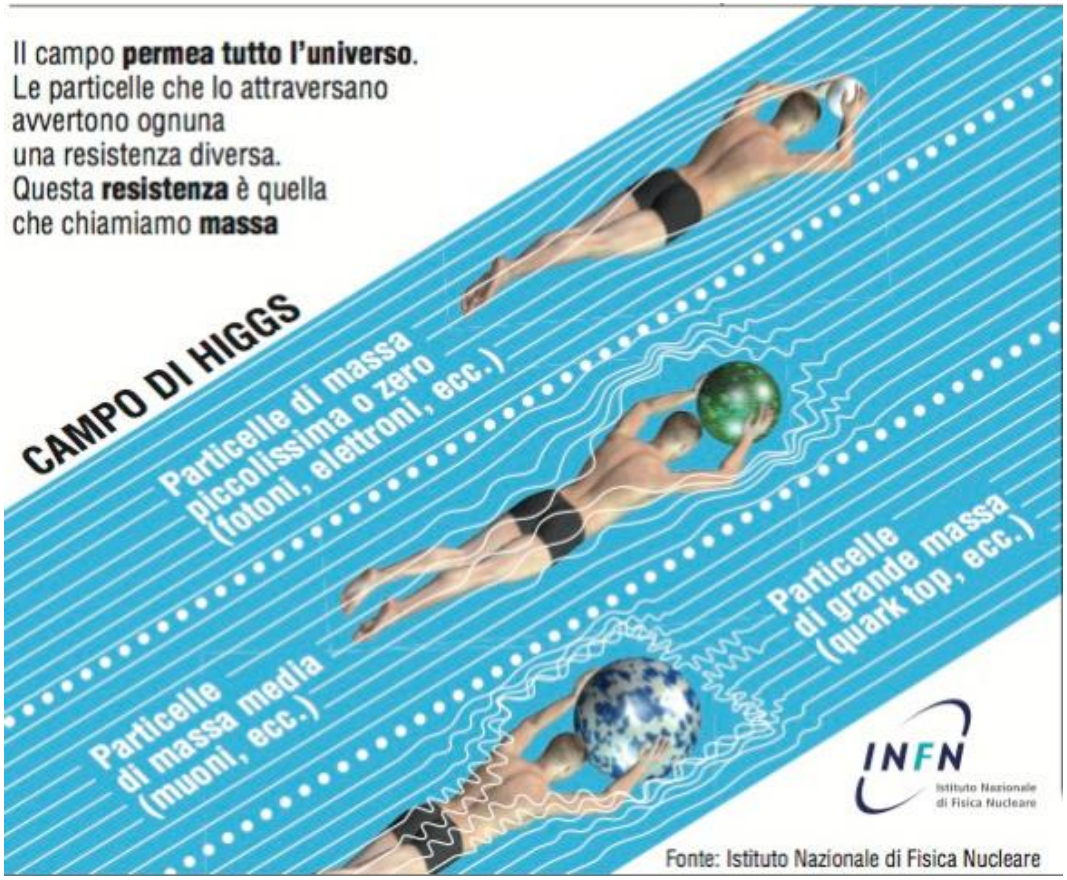
K^+ $\bar{u}s$
π^+ $\bar{u}d$

particella

K^- $\bar{u}s$
π^- $\bar{u}d$

anti-particella

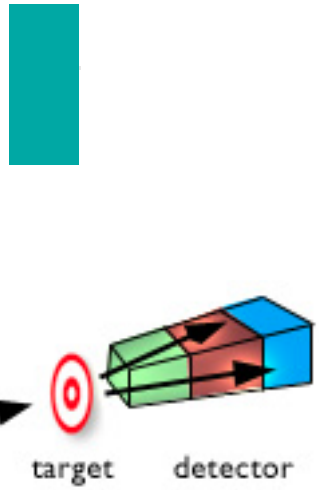
Come funziona il campo di Higgs

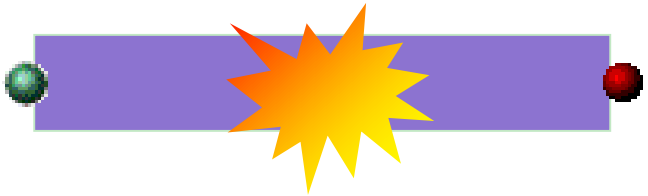


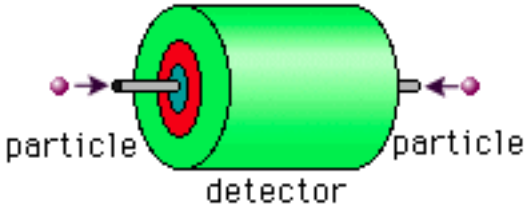
I rivelatori sugli acceleratori

I rivelatori sono enormi ma agiscono come potenti microscopi
→testano e rendono visibile l'attivita' delle particelle elementali

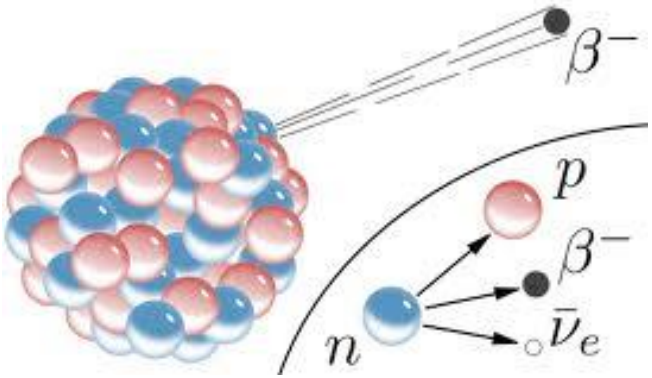
La geometria e' importante

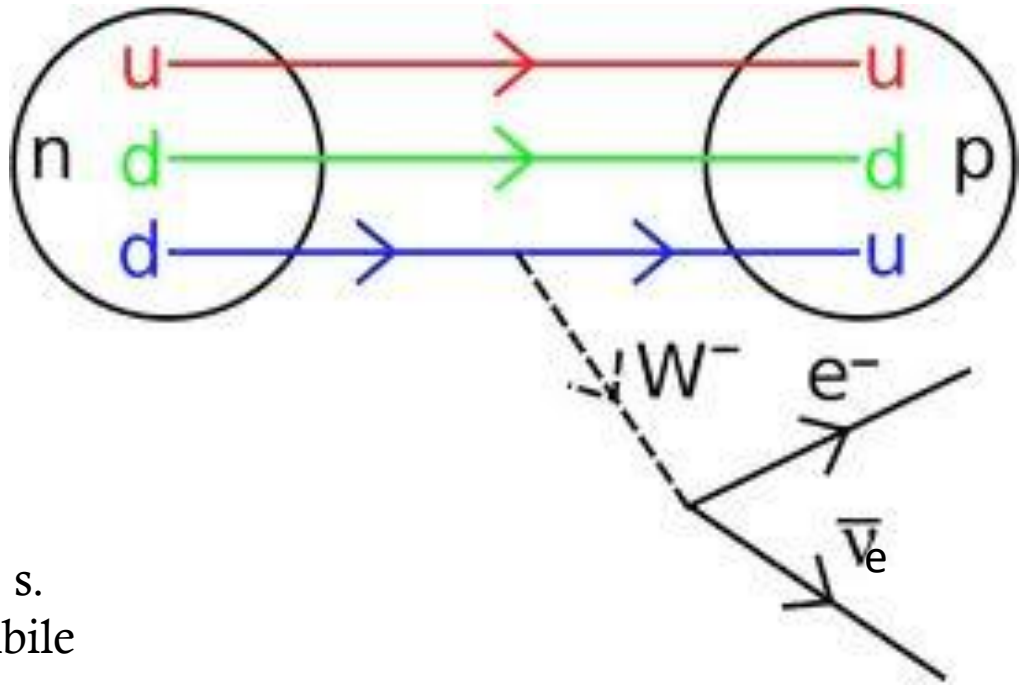






Decadimento β

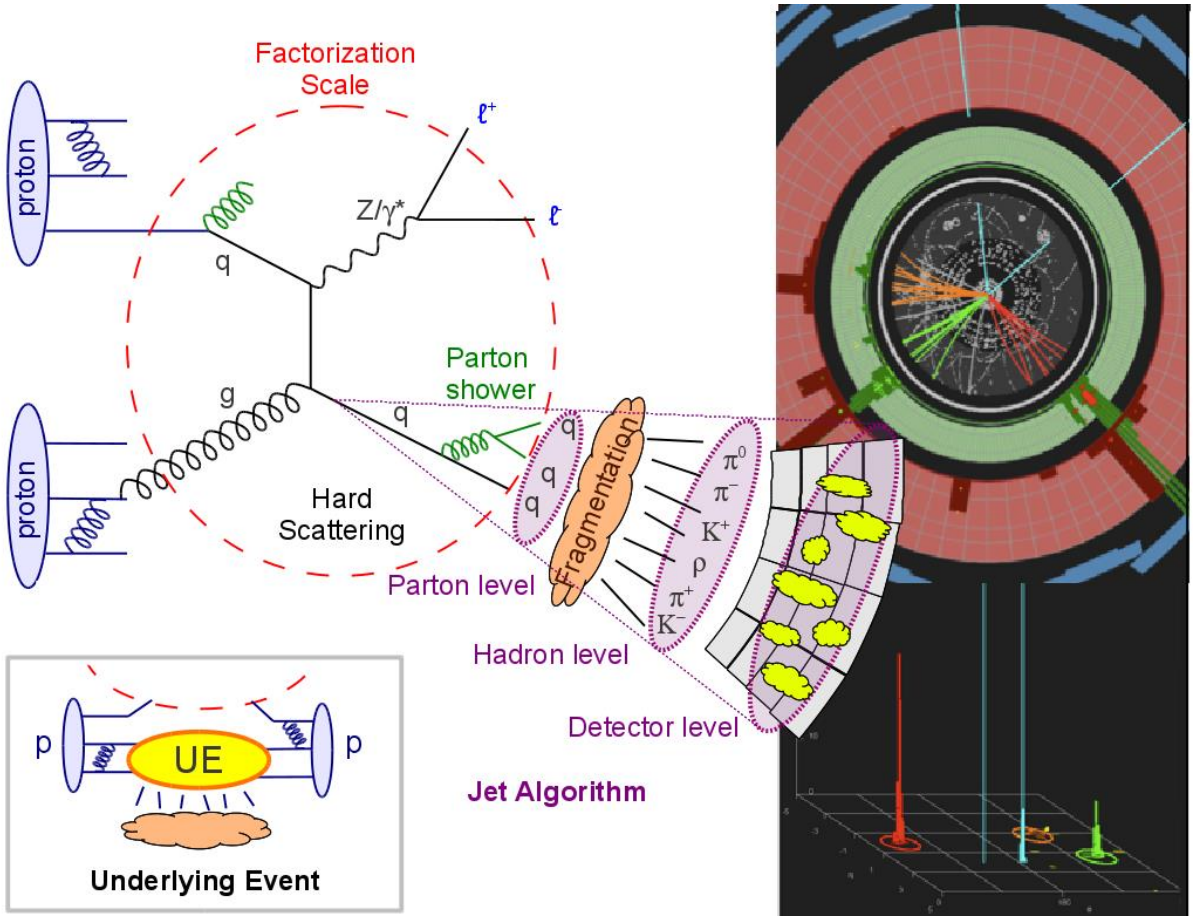




$\beta^- = e^-$

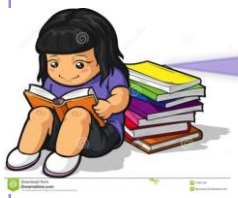
La particella W vive per un tempo brevissimo: $< 10^{-23}$ s.
E' quindi assolutamente invisibile

Jets


Factorization Scale
proton
proton
q
g
q
Z/γ*
ℓ+
ℓ-
Parton shower
Hard Scattering
Parton level
Fragmentation
Hadron level
Detector level
Jet Algorithm
p
UE
p
Underlying Event

Il neutrino e l'energia mancante

Leptoni sono ricontruti da ATLAS sfruttando gli effetti che essi provocano attraversando la materia. I neutrini interagiscono poco con la materia,quindi attraversano ATLAS senza lasciare traccia



Come facciamo a rivelarli?

Sfruttiamo la convervazione di impulso/energia nel piano trasverso

Dopo la ricostruzione/identificazione di tutte le particelle (elettroni, muoni, fotoni ed adroni):

pT(vis) +pT(inv) = 0 →pT(inv) = MET = - pT(vis)

If MET =0 → Non ci sono neutrini nell'evento

If MET ≠0 → C'è un neutrino (o più)

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