



Università degli Studi di Perugia/INFN Perugia

Master Class - 09/03/2012

# L'esperimento CMS e le tecniche di analisi

Francesco Romeo

## 1 Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari

# Di cosa parliamo oggi?

- 1 Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- 2 L'acceleratore di particelle LHC

# Di cosa parliamo oggi?

- 1 Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- 2 L'acceleratore di particelle LHC
- 3 Il rivelatore di particelle CMS

# Di cosa parliamo oggi?

- 1 Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- 2 L'acceleratore di particelle LHC
- 3 Il rivelatore di particelle CMS
- 4 Come fare una misura sperimentale

## Domandiamoci insieme alcune cose

- **Quante sono le interazioni che descrivono i fenomeni che possono essere spiegati?**

## Domandiamoci insieme alcune cose

- **Quante sono le interazioni che descrivono i fenomeni che possono essere spiegati?**
- **Quali sono le particelle "fondamentali" che caratterizzano la materia conosciuta?**

## Domandiamoci insieme alcune cose

- **Quante sono le interazioni che descrivono i fenomeni che possono essere spiegati?**
- **Quali sono le particelle "fondamentali" che caratterizzano la materia conosciuta?**
- **Quale modello descrive i fenomeni compresi della fisica delle particelle?**



## Domandiamoci insieme alcune cose

- **Quante sono le interazioni che descrivono i fenomeni che possono essere spiegati?**
- **Quali sono le particelle "fondamentali" che caratterizzano la materia conosciuta?**
- **Quale modello descrive i fenomeni compresi della fisica delle particelle?**
- **E' un modello completo o manca qualcosa?**

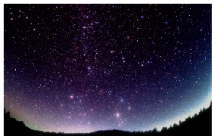
# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



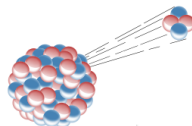
# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



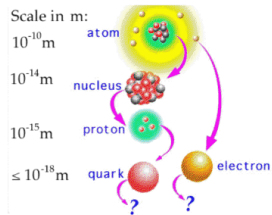
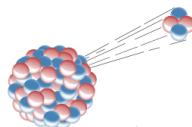
# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



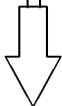
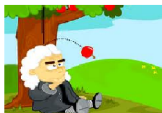
# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



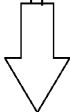
# La curiosità dell'uomo di conoscere e spiegare la natura



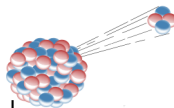
Tutto questo, oggi, si può spiegare con solo **4 interazioni fondamentali!!!**



**Gravitazionale**



**Elettromagnetica**



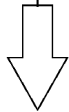
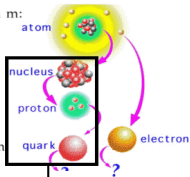
Scale in m:

$10^{-10}$  m

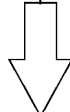
$10^{-14}$  m

$10^{-15}$  m

$\leq 10^{-18}$  m



**Debole**



**Forte**



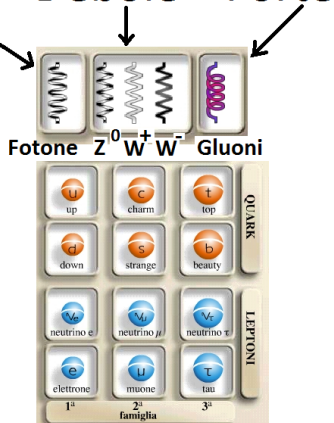
La teoria è descritta da un modello, noto come il **Modello Standard** della fisica delle particelle

**INTERAZIONI**  
Elettromagnetica      Debole      Forte

**MEDIATORI**



**MATERIA**



## Limiti del Modello Standard

**Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:**

## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?
- Come rientra la gravità nel modello standard?



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE



- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?
- Come rientra la gravità nel modello standard?
- E' una teoria "poco elegante" → contiene 19 parametri liberi



## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?
- Come rientra la gravità nel modello standard?
- E' una teoria "poco elegante" → contiene 19 parametri liberi



### OSSERVAZIONI SPERIMENTALI

- Simmetria materia-antimateria → universo osservato composto principalmente di materia

## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?
- Come rientra la gravità nel modello standard?
- E' una teoria "poco elegante" → contiene 19 parametri liberi



### OSSERVAZIONI SPERIMENTALI

- Simmetria materia-antimateria → universo osservato composto principalmente di materia
- La massa dei neutrini

## Limiti del Modello Standard

Il Modello Standard riesce a spiegare molte osservazioni con una precisione molto accurata, ma non riesce a giustificare alcuni dati sperimentali e non sa rispondere a diverse domande:

### SPECULAZIONI TEORICHE

- I quark e i leptoni sono veramente particelle fondamentali o sono a loro volta composti di particelle più elementari?
- Perché ci sono 3 generazioni di quark e 3 di leptoni?
- In condizioni ordinarie possiamo osservare solo particelle della prima generazione → perché anche le altre 2 generazioni?
- E' possibile predire la massa delle particelle?
- Come rientra la gravità nel modello standard?
- E' una teoria "poco elegante" → contiene 19 parametri liberi



### OSSERVAZIONI SPERIMENTALI

- Simmetria materia-antimateria → universo osservato composto principalmente di materia
- La massa dei neutrini
- Quantità di materia nota dell'universo  $\sim 5\%$  → materia/energia oscura



# Cosa fare???



# Proviamo ad andare **oltre** il Modello Standard

## Proviamo ad andare **oltre** il **Modello Standard**

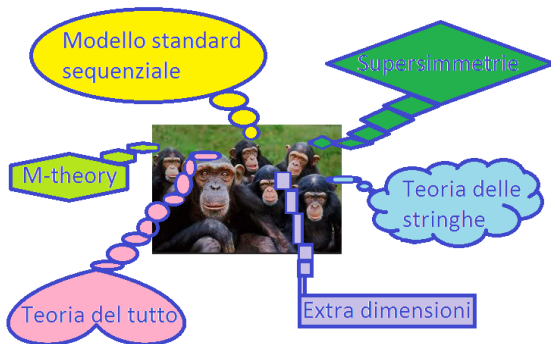


Si possono proporre nuovi modelli che spiegano le **osservazioni sperimentali** e che rispondono alle domande irrisolte

## Proviamo ad andare **oltre** il **Modello Standard**



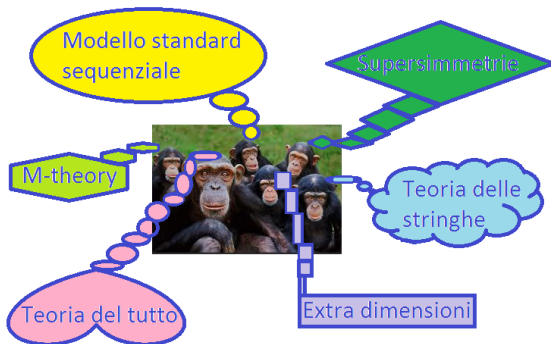
Si possono proporre nuovi modelli che spiegano le **osservazioni sperimentali** e che rispondono alle domande irrisolte



## Proviamo ad andare **oltre** il **Modello Standard**



Si possono proporre nuovi modelli che spiegano le **osservazioni sperimentali** e che rispondono alle domande irrisolte

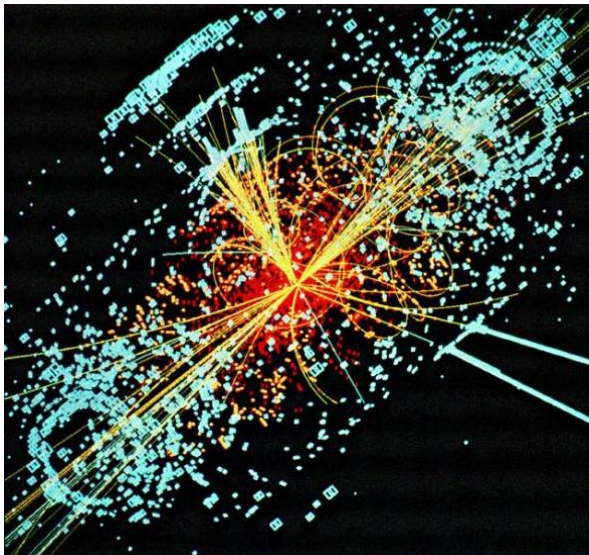


Ma chi avrà ragione?





# Sole le osservazioni sperimentali possono dircelo!!!



# Vediamo insieme quello che c'è da sapere

- **Cos'e' LHC?**

# Vediamo insieme quello che c'è da sapere

- **Cos'e' LHC?**
- **Che energia può raggiungere?**

## Vediamo insieme quello che c'è da sapere

- **Cos'è LHC?**
- **Che energia può raggiungere?**
- **Come si generano i fasci di particelle?**

## Vediamo insieme quello che c'è da sapere

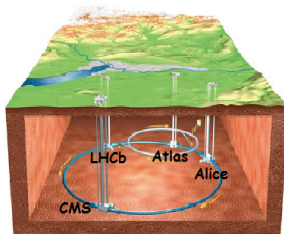
- **Cos'è LHC?**
- **Che energia può raggiungere?**
- **Come si generano i fasci di particelle?**
- **Come si accelerano fino a velocità prossime a quelle della luce?**

# Cos'è LHC???

- **LHC è il più grande acceleratore di particelle che sia mai stato costruito dall'uomo per far urtare protoni contro protoni o ioni pesanti tra loro**

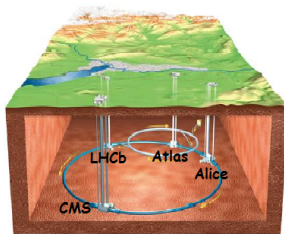
## Cos'è LHC???

- LHC è il più grande acceleratore di particelle che sia mai stato costruito dall'uomo per far urtare protoni contro protoni o ioni pesanti tra loro
- Ha una circonferenza di 27 Km e si trova ad una profondità media di 100 m sottoterra al confine franco-svizzero di Ginevra



## Cos'è LHC???

- LHC è il più grande acceleratore di particelle che sia mai stato costruito dall'uomo per far urtare protoni contro protoni o ioni pesanti tra loro
- Ha una circonferenza di 27 Km e si trova ad una profondità media di 100 m sottoterra al confine franco-svizzero di Ginevra



- Ospita 4 grandi esperimenti: CMS, ATLAS, ALICE e LHCb



Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di  
collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

# Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di  
collisione

Ma cosa vuol dire???



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di  
collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

Ma cosa vuol dire???

1eV(elettronVolt) corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone  
posto in una d.d.p.(differenza di potenziale)  $\Delta V = 1V(Volt)$

# Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

Ma cosa vuol dire???

1eV(elettronVolt) corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone posto in una d.d.p.(differenza di potenziale)  $\Delta V = 1V(Volt)$

Ancora poco chiaro!?

# Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

**Ma cosa vuol dire???**

1eV(elettronVolt) corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone posto in una d.d.p.(differenza di potenziale)  $\Delta V = 1V$ (Volt)

**Ancora poco chiaro?!?**

1 eV è una piccola porzione di energia che corrisponde a  $1.6 \cdot 10^{-19}$  J(Joule)



Un'ape ( $M_{ape} = 1g$ ) che si muove alla velocità  $V_{ape} = 1$  m/s ha un'energia di  $E_{ape} = 10^{-3}J = 6.25 \cdot 10^{15}eV$

# Che **energia** può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV** =  $14 \cdot 10^{12}$  eV

**Ma cosa vuol dire???**

1eV(elettronVolt) corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone posto in una d.d.p.(differenza di potenziale)  $\Delta V = 1V(Volt)$

**Ancora poco chiaro!?**

1 eV è una piccola porzione di energia che corrisponde a  $1.6 * 10^{-19}$  J(Joule)



Un'ape ( $M_{ape} = 1g$ ) che si muove alla velocità  $V_{ape} = 1$  m/s ha un'energia di  $E_{ape} = 10^{-3}J = 6.25 \cdot 10^{15}eV$

**Si direbbe un'energia molto maggiore di quella di LHC!?**

# Che energia può raggiungere questo acceleratore???

L'energia nel punto di collisione



può arrivare fino a  
**14 TeV = 14 · 10<sup>12</sup> eV**

**Ma cosa vuol dire???**

1eV(elettronVolt) corrisponde all'energia guadagnata da un elettrone posto in una d.d.p.(differenza di potenziale)  $\Delta V = 1V(Volt)$

**Ancora poco chiaro?!?**

1 eV è una piccola porzione di energia che corrisponde a  $1.6 * 10^{-19} J(Joule)$



Un'ape ( $M_{ape} = 1g$ ) che si muove alla velocità  $V_{ape} = 1 m/s$  ha un'energia di  $E_{ape} = 10^{-3} J = 6.25 \cdot 10^{15} eV$

**Si direbbe un'energia molto maggiore di quella di LHC?!?**

Infatti...ma LHC, ogni 25 nano-sec(40 milioni di volte al secondo!), fa scontrare  $10^{14}$  protoni  $\rightarrow E_{LHC} \simeq 10^8 J$  che come energia corrisponde a quella nel punto di impatto di 2 camion di  $M_{camion} = 100tonnellate$  che si scontrano viaggiando ad una velocità  $V_{camion} = 120Km/h$







# Dopo che abbiamo prodotto le particelle

- **Come possiamo rivelarle?**

## Dopo che abbiamo prodotto le particelle

- **Come possiamo rivelarle?**
- **Quali proprietà possiamo misurare?**

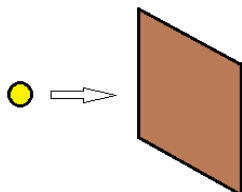
## Dopo che abbiamo prodotto le particelle

- **Come possiamo rivelarle?**
- **Quali proprietà possiamo misurare?**
- **Come è fatto un rivelatore di particelle, per esempio CMS?**

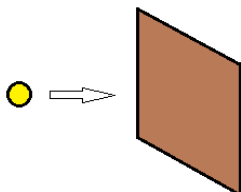
## Dopo che abbiamo prodotto le particelle

- **Come possiamo rivelarle?**
- **Quali proprietà possiamo misurare?**
- **Come è fatto un rivelatore di particelle, per esempio CMS?**
- **Come faccio a distinguere una particella da un'altra?**

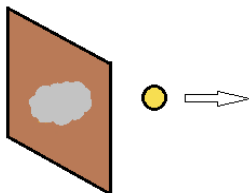
Cosideriamo una particella  
che attraversa un  
certo materiale



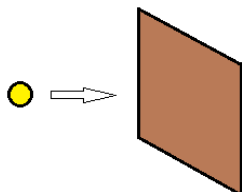
Cosideriamo una particella  
che attraversa un  
certo materiale



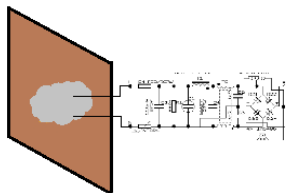
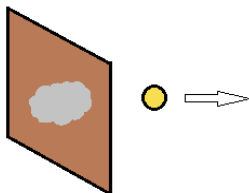
Nell'attraversarlo la particella  
rilascia energia



Cosideriamo una particella  
che attraversa un  
certo materiale

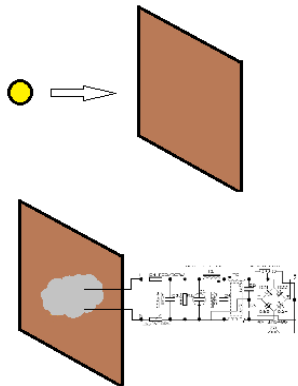


Nell'attraversarlo la particella  
rilascia energia



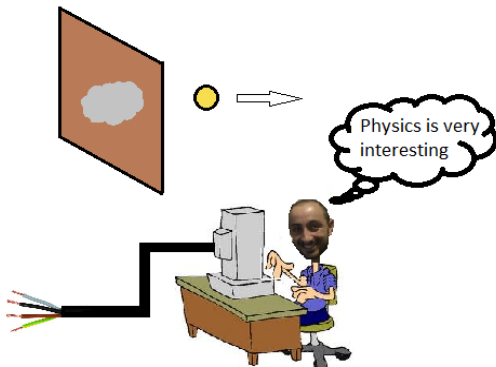
L'energia viene convertita in  
segnale elettrico

Cosideriamo una particella  
che attraversa un  
certo materiale



L'energia viene convertita in  
segnale elettrico

Nell'attraversarlo la particella  
rilascia energia



Il segnale digitalizzato contiene  
l'informazione sui dati che  
verranno analizzati dai fisici



**E' importante capire quale materiale scegliere.**

**E' importante capire quale materiale scegliere.  
In linea di principio ogni possibile mezzo può essere usato per rivelare le particelle,  
ma il modo in cui l'energia viene rilasciata e convertita in segnale elettrico può variare da materiale a materiale, quindi:**

**E' importante capire quale materiale scegliere.**

**In linea di principio ogni possibile mezzo può essere usato per rivelare le particelle,**

**ma il modo in cui l'energia viene rilasciata e convertita in segnale elettrico può variare da materiale a materiale, quindi:**

- 1 Occorre scegliere un materiale adatto alla misura che si vuole fare**

**E' importante capire quale materiale scegliere.**

**In linea di principio ogni possibile mezzo può essere usato per rivelare le particelle,**

**ma il modo in cui l'energia viene rilasciata e convertita in segnale elettrico può variare da materiale a materiale, quindi:**

- 1 Occorre scegliere un materiale adatto alla misura che si vuole fare**
- 2 Bisogna capire come le particelle interagiscono con esso**

**E' importante capire quale materiale scegliere.**

**In linea di principio ogni possibile mezzo può essere usato per rivelare le particelle,**

**ma il modo in cui l'energia viene rilasciata e convertita in segnale elettrico può variare da materiale a materiale, quindi:**

- 1 Occorre scegliere un materiale adatto alla misura che si vuole fare**
- 2 Bisogna capire come le particelle interagiscono con esso**
- 3 Occorre capire come questa interazione può essere usata per effettuare la nostra misura**

**E' importante capire quale materiale scegliere.**

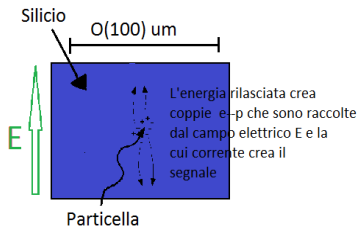
**In linea di principio ogni possibile mezzo può essere usato per rivelare le particelle,**

**ma il modo in cui l'energia viene rilasciata e convertita in segnale elettrico può variare da materiale a materiale, quindi:**

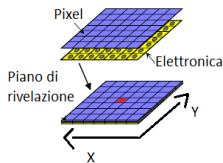
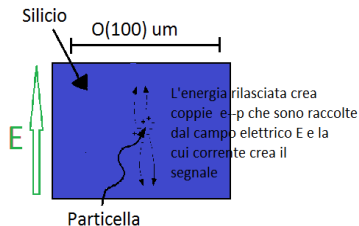
- 1 Occorre scegliere un materiale adatto alla misura che si vuole fare**
- 2 Bisogna capire come le particelle interagiscono con esso**
- 3 Occorre capire come questa interazione può essere usata per effettuare la nostra misura**

**Vediamo qualche esempio...**

# Misuriamo la **posizione** e poi la **traiettoria** di una particella carica usando un rivelatore al silicio



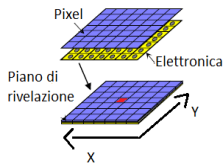
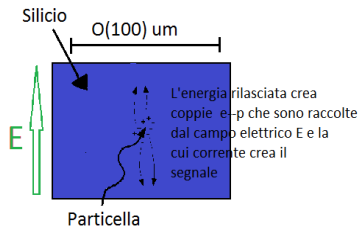
# Misuriamo la **posizione** e poi la **traiettoria** di una particella carica usando un rivelatore al silicio



Mettendo insieme tanti piccoli rivelatori al silicio, posso costruire un piano in cui ogni quadratino in cui passa la particella mi indica le coordinate della sua **posizione** sul piano

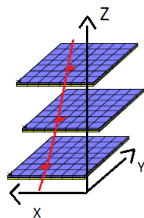


# Misuriamo la **posizione** e poi la **traiettoria** di una particella carica usando un rivelatore al silicio

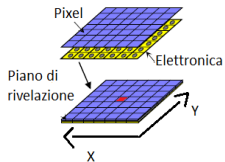
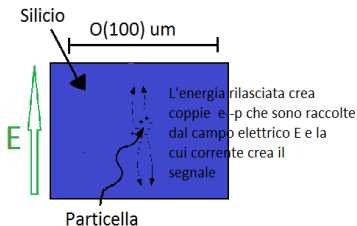


Mettendo insieme tanti piccoli rivelatori al silicio, posso costruire un piano in cui ogni quadratino in cui passa la particella mi indica le coordinate della sua **posizione** sul piano

A questo punto, posso estendere il ragionamento sovrapponendo più piani per identificare la terza coordinata della particella nello spazio e provare a tracciare la sua **traiettoria**

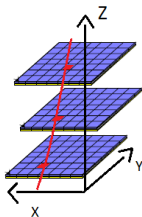


# Misuriamo la **posizione** e poi la **traiettoria** di una particella carica usando un rivelatore al silicio

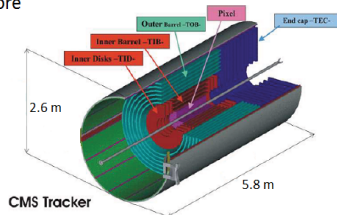


Mettendo insieme tanti piccoli rivelatori al silicio, posso costruire un piano in cui ogni quadratino in cui passa la particella mi indica le coordinate della sua **posizione** sul piano

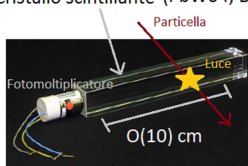
A questo punto, posso estendere il ragionamento sovrapponendo più piani per identificare la terza coordinata della particella nello spazio e provare a tracciare la sua **traiettoria**



Coprendo tutto l'angolo solido con strati cilindrici si ottiene quello che si chiama **tracciatore**



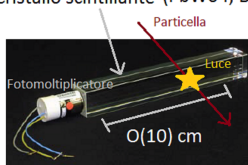
## Se invece vogliamo misurare l'energia

Cristallo scintillante (PbWO<sub>4</sub>, BGO...)

Quando una particella attraversa uno scintillatore, rilasciando energia, eccita i suoi atomi e le sue molecole e si emette luce. La luce viene trasmessa al fotomoltiplicatore dove viene convertita in corrente elettrica

# Se invece vogliamo misurare l'energia

Cristallo scintillante (PbWO<sub>4</sub>, BGO...)

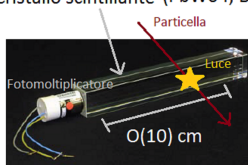


Quando una particella attraversa uno scintillatore, rilasciando energia, eccita i suoi atomi e le sue molecole e si emette luce. La luce viene trasmessa al fotomoltiplicatore dove viene convertita in corrente elettrica

E' possibile stabilire una relazione tra la corrente elettrica misurata e l'energia che viene depositata dalla particella e quindi effettuare misure di **energia**

# Se invece vogliamo misurare l'energia

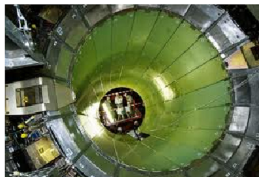
Cristallo scintillante (PbWO<sub>4</sub>, BGO...)



E' possibile stabilire una relazione tra la corrente elettrica misurata e l'energia che viene depositata dalla particella e quindi effettuare misure di **energia**

Quando una particella attraversa uno scintillatore, rilasciando energia, eccita i suoi atomi e le sue molecole e si emette luce. La luce viene trasmessa al fotomoltiplicatore dove viene convertita in corrente elettrica

Coprendo ancora tutto l'angolo solido, si costruisce quello che si chiama calorimetro



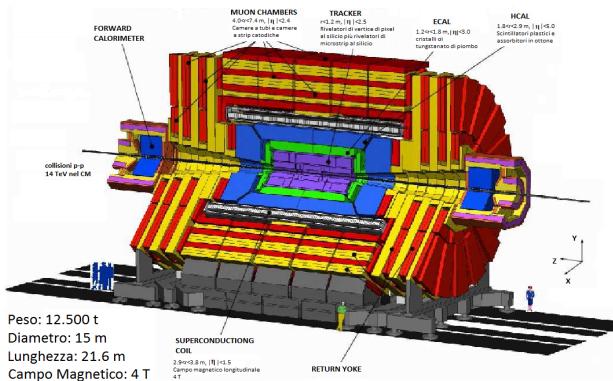
Ormai dovrete aver capito come funziona il gioco.

**Ormai dovrete aver capito come funziona il gioco.  
Un rivelatore è fatto da più sottorivelatori ognuno con una  
funzione specifica.**

Ormai dovrete aver capito come funziona il gioco.

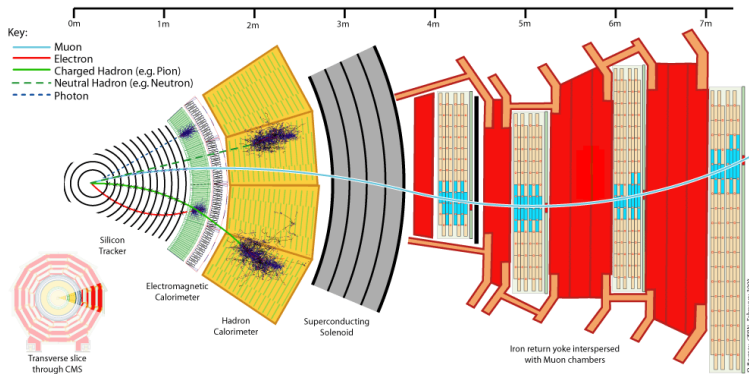
Un rivelatore è fatto da più sottorivelatori ognuno con una funzione specifica.

Mettendo insieme tutti i sottorivelatori, ecco che otteniamo il rivelatore CMS, "COMPACT MUON SOLENOID" (WEB LINK)





# Ci resta solo da capire come distinguere le varie particelle (WEB LINK)



Direi che siamo pronti per iniziare la nostra misura, ma

- **Quali particelle consideriamo?**

Direi che siamo pronti per iniziare la nostra misura, ma

- **Quali particelle consideriamo?**
- **Come possiamo capire se una particella ci interessa o meno?**

Direi che siamo pronti per iniziare la nostra misura, ma

- **Quali particelle consideriamo?**
- **Come possiamo capire se una particella ci interessa o meno?**
- **A quali proprietà siamo interessati?**

Direi che siamo pronti per iniziare la nostra misura, ma

- **Quali particelle consideriamo?**
- **Come possiamo capire se una particella ci interessa o meno?**
- **A quali proprietà siamo interessati?**
- **Come possiamo effettuare la nostra misura?**

Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei **mediatori dell'interazione debole**

Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei **mediatori dell'interazione debole**

- Il  $W^+$  con carica elettrica unitaria positiva

## Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei mediatori dell'interazione debole

- II  $W^+$  con carica elettrica unitaria positiva
- II  $W^-$  con carica elettrica unitaria negativa



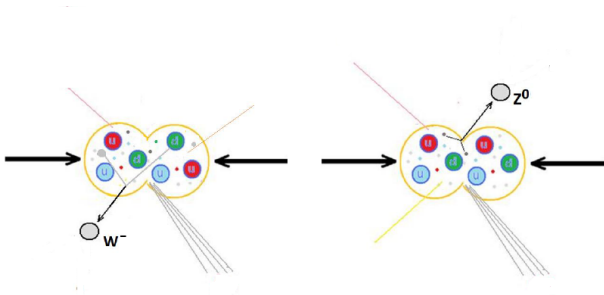
## Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei mediatori dell'interazione debole

- Il  $W^+$  con carica elettrica unitaria positiva
- Il  $W^-$  con carica elettrica unitaria negativa
- Lo  $Z^0$  che è elettricamente neutro

## Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei mediatori dell'interazione debole

- Il  $W^+$  con carica elettrica unitaria positiva
- Il  $W^-$  con carica elettrica unitaria negativa
- Lo  $Z^0$  che è elettricamente neutro

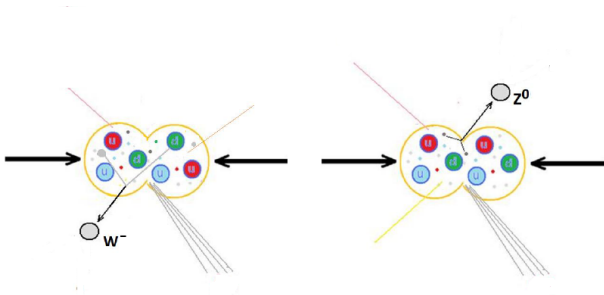
Queste particelle possono essere prodotte ad LHC durante l'urto tra i protoni del fascio



## Oggi ci concentriamo sulla rivelazione dei mediatori dell'interazione debole

- Il  $W^+$  con carica elettrica unitaria positiva
- Il  $W^-$  con carica elettrica unitaria negativa
- Lo  $Z^0$  che è elettricamente neutro

Queste particelle possono essere prodotte ad LHC durante l'urto tra i protoni del fascio

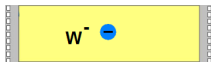


Quando una particella viene prodotta, alcune condizioni sono le stesse prima e dopo la produzione. Sapreste dire quali?

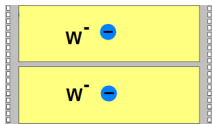
Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec),

Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

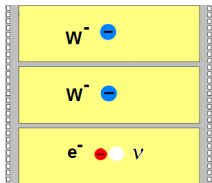
Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono



Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

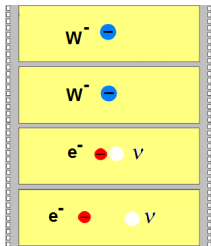


Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

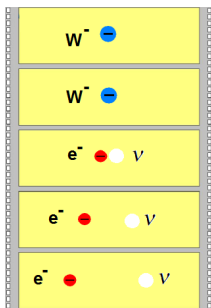












Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

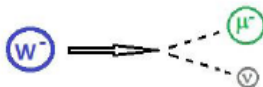
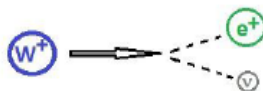


Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono











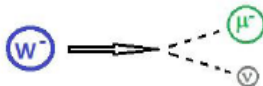
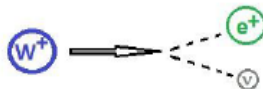
Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

$W^-$ 
$W^-$ 
$e^-$   $\nu$
$e^-$   $\nu$
$e^-$   $\nu$



Queste particelle "vivono" per un tempo molto breve ( $\sim 10^{-25}$  sec), quindi il rivelatore non fa in tempo a "vederle" direttamente, ma misura le proprietà delle particelle in cui esse decadono

$W^-$ 
$W^-$ 
$e^-$   $\nu$
$e^-$   $\nu$
$e^-$   $\nu$

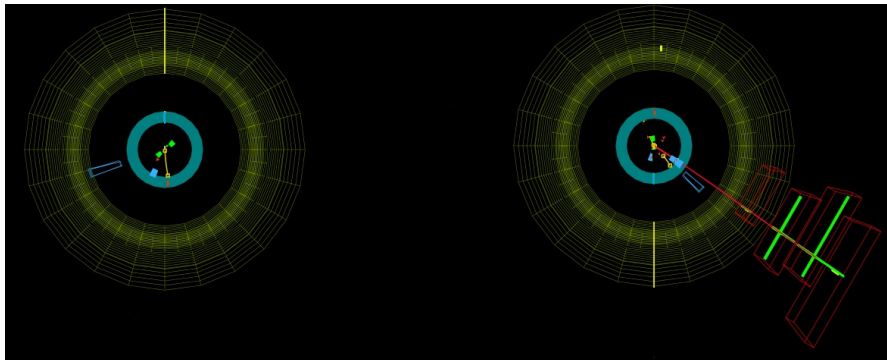


Ed ora, riuscite a vedere se sono rispettate le leggi di conservazione?

# Quindi alla fine cosa vede il nostro rivelatore CMS?

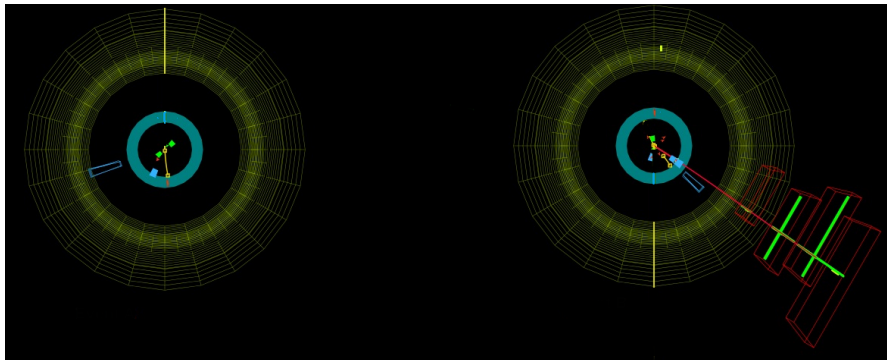
# Quindi alla fine cosa vede il nostro rivelatore CMS?

Qualche cosa del genere:



# Quindi alla fine cosa vede il nostro rivelatore CMS?

Qualche cosa del genere:



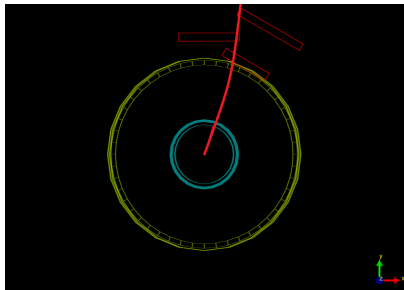
In base a quello che abbiamo visto prima, sapreste riconoscere che tipo di particelle sono?

# E' per la carica elettrica?



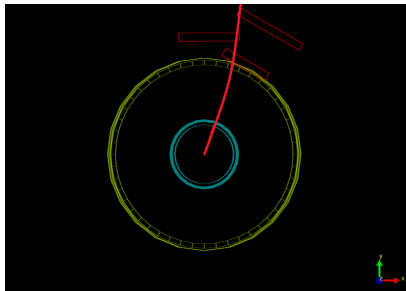
## E' per la carica elettrica?

Occorre prestare attenzione alla curvatura della particella nel piano XY.



E' per la **carica elettrica**?

Occorre prestare attenzione alla curvatura della particella nel piano XY.



E' possibile far vedere, usando una legge nota come Forza di Lorentz, che le particelle che hanno una **curvatura oraria** hanno **carica elettrica positiva** e, viceversa, quelle che hanno una **curvatura antioraria** hanno una **carica negativa**

# Ed invece cosa non vede?

# Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



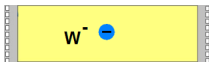
**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**

## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**

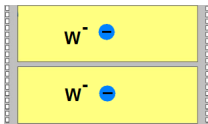


## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**

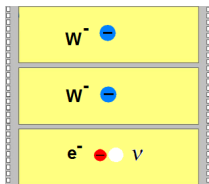


## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**



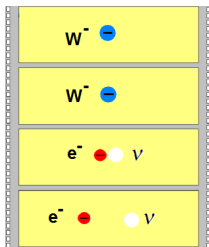


## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**

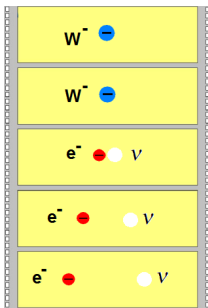


## Ed invece cosa non vede?

**I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente**



**Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano**

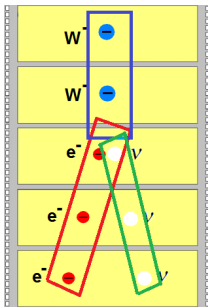


## Ed invece cosa non vede?

I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente



Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano



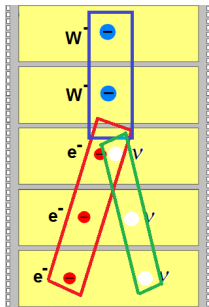
energia iniziale =  
 energia di tutti tranne  
 il neutrino + energia  
 del neutrino  
 →  
 energia del neutrino =  
 energia iniziale -  
 energia di tutti tranne  
 il neutrino

## Ed invece cosa non vede?

I neutrini hanno carica elettrica nulla e quindi non possono essere rivelati direttamente



Noi però sappiamo che prima e dopo la produzione di particelle alcune proprietà, come l'energia, si conservano



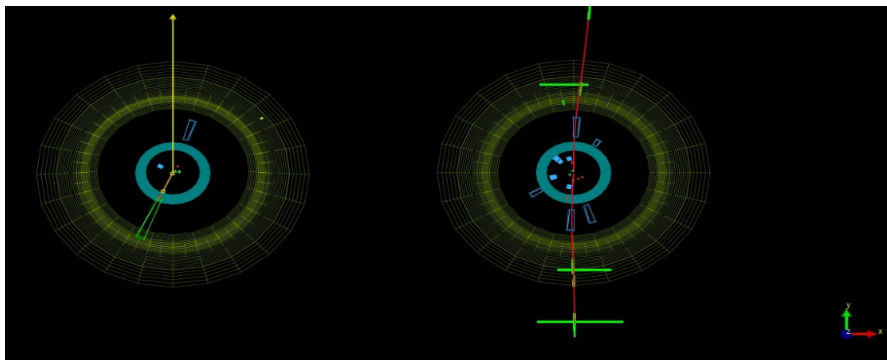
**energia iniziale** =  
**energia di tutti tranne  
il neutrino** + **energia  
del neutrino**



**energia del neutrino** =  
**energia iniziale** -  
**energia di tutti tranne  
il neutrino**

L'energia del neutrino si misura come **energia mancante (missing energy)**!

Quindi ora sapete distinguere tra W e Z?



Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**
- **L'acceleratore di particelle LHC**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**
- **L'acceleratore di particelle LHC**
- **Il rivelatore di particelle CMS**



Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**
- **L'acceleratore di particelle LHC**
- **Il rivelatore di particelle CMS**
- **Come fare una misura sperimentale**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**
- **L'acceleratore di particelle LHC**
- **Il rivelatore di particelle CMS**
- **Come fare una misura sperimentale**

**In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- L'acceleratore di particelle LHC
- Il rivelatore di particelle CMS
- Come fare una misura sperimentale

In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:

- **Di cosa è fatto l'universo?**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- **Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari**
- **L'acceleratore di particelle LHC**
- **Il rivelatore di particelle CMS**
- **Come fare una misura sperimentale**

**In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:**

- **Di cosa è fatto l'universo?**
- **Perché abbiamo la massa che abbiamo?**

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- L'acceleratore di particelle LHC
- Il rivelatore di particelle CMS
- Come fare una misura sperimentale

In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:

- Di cosa è fatto l'universo?
- Perché abbiamo la massa che abbiamo?
- Esistono le extra-dimensioni?

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- L'acceleratore di particelle LHC
- Il rivelatore di particelle CMS
- Come fare una misura sperimentale

In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:

- Di cosa è fatto l'universo?
- Perché abbiamo la massa che abbiamo?
- Esistono le extra-dimensioni?
- Cosa hanno da dire particelle ancora poco conosciute come i neutrini?

Ricapitolando, gli argomenti che abbiamo visto insieme oggi sono:

- Il Modello Standard della fisica delle particelle elementari
- L'acceleratore di particelle LHC
- Il rivelatore di particelle CMS
- Come fare una misura sperimentale

In un futuro molto vicino, misure come quella che farete voi oggi potranno svelare i misteri che l'uomo ancora non conosce:

- Di cosa è fatto l'universo?
- Perché abbiamo la massa che abbiamo?
- Esistono le extra-dimensioni?
- Cosa hanno da dire particelle ancora poco conosciute come i neutrini?
- E tanto altro ancora.....

Perciò ricordate:

- **Le osservazioni dirette ed indirette, il pensiero critico, logico, creativo può portare a inferenze sottili e valide**



## Perciò ricordate:

- **Le osservazioni dirette ed indirette, il pensiero critico, logico, creativo può portare a inferenze sottili e valide**
- **Lavorate insieme, pensate (qualche volta anche fuori dagli schemi) e siate critici di quello che fate**

## Perciò ricordate:

- **Le osservazioni dirette ed indirette, il pensiero critico, logico, creativo può portare a inferenze sottili e valide**
- **Lavorate insieme, pensate (qualche volta anche fuori dagli schemi) e siate critici di quello che fate**

**”...non...trasmettere fatti e concetti della fisica, ma...stimolare ed aiutare a sbocciare quelle capacità di analisi e di critica, senza le quali i fatti e i concetti non portano molto lontano.”**

**Aniello Nappi**

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

- **Il rapporto  $e/\mu$**

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

- **Il rapporto  $e/\mu$**
- **Il rapporto  $W^+/W^-$**

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

- **Il rapporto  $e/\mu$**
- **Il rapporto  $W^+/W^-$**
- **Fare un istogramma di massa per i candidati dello  $Z^0$**

Bravi :-) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

- **Il rapporto  $e/\mu$**
- **Il rapporto  $W^+/W^-$**
- **Fare un istogramma di massa per i candidati dello  $Z^0$**

**Ecco alcuni strumenti utili:**



Bravi :-)) Siete pronti per iniziare la misura vera e propria

**Osservando gli eventi raccolti da CMS, dovrete essere in grado di misurare:**

- **Il rapporto  $e/\mu$**
- **Il rapporto  $W^+/W^-$**
- **Fare un istogramma di massa per i candidati dello  $Z^0$**

**Ecco alcuni strumenti utili:**

**Il rivelatore CMS e gli eventi da analizzare**

**(<http://www18.i2u2.org/elab/cms/event-display/>)**

**Il foglio di calcolo per la raccolta dei dati**

**([http://quarknet.us/library/index.php/Spreadsheets\\_2012](http://quarknet.us/library/index.php/Spreadsheets_2012))**