

# *Introduzione alla Fisica delle Particelle Elementari:*

*Un viaggio nell'estremamente piccolo alla scoperta  
dei segreti della materia*

- Un po' di storia
- Il Modello Standard: particelle e interazioni
- Il Bosone di Higgs: teoria e esperimenti al Large Hadron Collider del CERN
- La misura della velocità dei neutrini all'esperimento Opera del Gran Sasso

# Introduzione

La Fisica di base fa sue alcune delle domande fondamentali del Pensiero dall'antichità ad oggi:

- Da cosa è costituito l'Universo?
- Quali sono le leggi che lo governano?
- In che "direzione" evolve?
- Quali sono i componenti ultimi della materia?
- Come interagiscono tra di loro?



Non il "motivo", ma il "meccanismo"!  
Si studia l'elementare per capire il macroscopico!

# Di cosa è fatto il mondo?

- La materia è un agglomerato di pochi elementi fondamentali, che costituiscono tutto l'Universo.
- La parola "fondamentale" è una parola chiave:
  - Oggetto privo di struttura interna (non composto)

## • Domande:

- Esistono mattoni fondamentali?  
(Democrito, 460 A.C.)
- Quali sono?
- Come determinano le proprietà dell'Universo?

Excuse me...are you  
a fundamental  
particle?



La vera cosa "fondamentale" è  
il Metodo Scientifico = limitare i preconcetti  
(da Galileo alle "blind analyses")!

# L'atomo è "fondamentale"?

Alchimia → Chimica (1700-1800)

- Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche
- Evidenza di una "periodicità" (Mendeleev)
- Indicazioni di una struttura comune degli elementi (atomo: nucleoni, orbitali elettronici)

**ELEMENTS**

Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

**Periodic Table of the Elements**

IA																																				0																	
1	2																	19	20																	2																	
3	4																	5	6	7	8	9	10																														
11	12																	13	14	15	16	17	18																														
19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36																																				
37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54																																				
55	56	*La	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86																																				
87	88	+Ac	104	105	106	107	108	109	110	111	112	113																																									

\* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

# L'atomo è "fondamentale"?

NO!

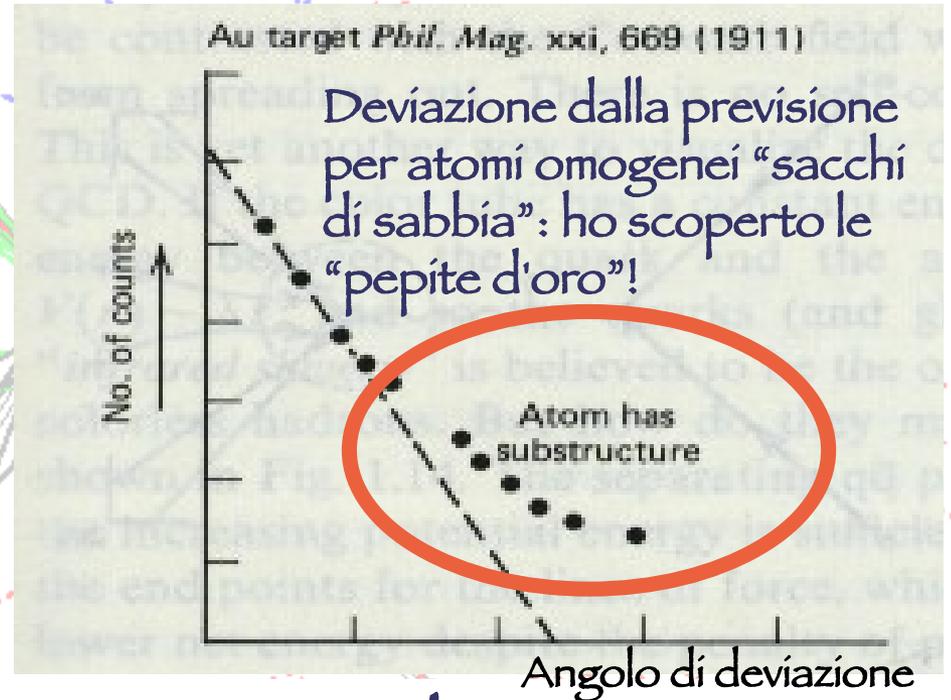
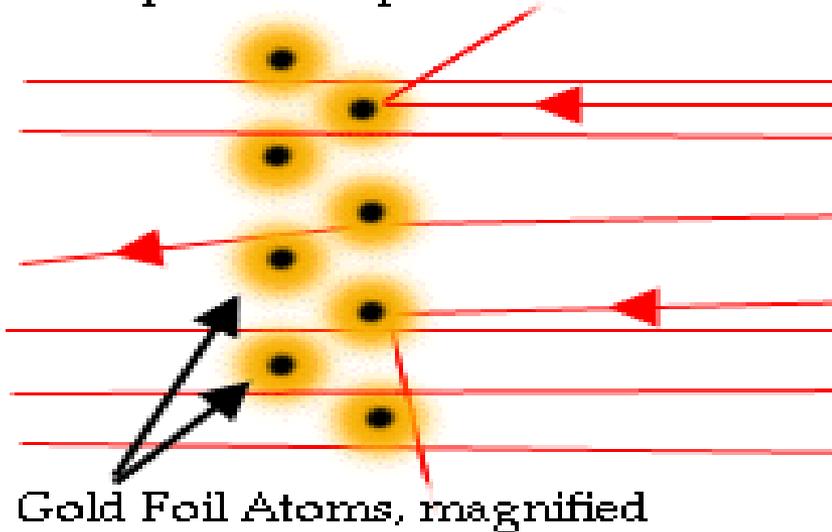
## Il Metodo "Tex Willer"



- Un sacco contiene sabbia, l'altro pepite d'oro: come faccio a scegliere senza toccarli? Osservo la deviazione dei proiettili!
- Analogamente, "sparo" all'atomo, usando particelle  $\alpha$  come proiettili e osservo la loro deviazione.
- Particelle  $\alpha$ : nuclei di Elio da decadimenti di nuclei pesanti

# Il Modello di Rutherford

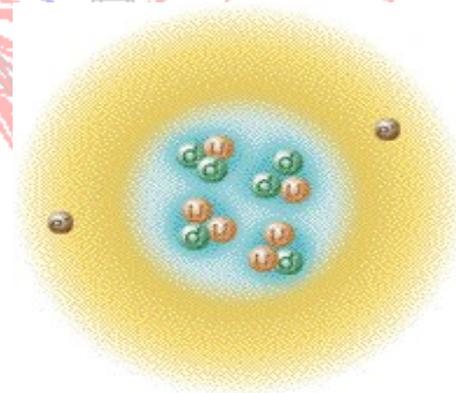
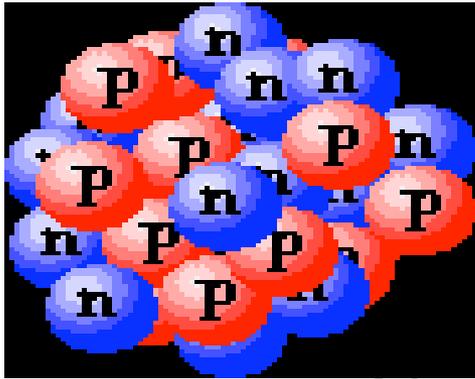
The Positive Nucleus Theory  
Explains Alpha Deflection



Risultato: L'atomo contiene un nucleo con carica positiva di raggio  $< 10 \text{ fm}$  [ $1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$ ]

# Il nucleo e' "fondamentale"? NO!

- Il **nucleo** e' composto da protoni (carica elettrica positiva) e neutroni (privi di carica elettrica, ipotizzati da Rutherford)
- Anche i **protoni** e i **neutroni** (Chadwick 1932) hanno una struttura: sono composti da particelle fondamentali: i **quarks**.



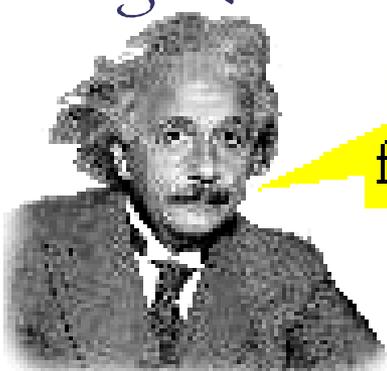
...Ma per capire cio' ci vollero proiettili di maggiore energia delle particelle  $\alpha$ ... raggi cosmici e acceleratori.

# Acceleratori

Negli acceleratori moderni le particelle cariche vengono accelerate da campi elettromagnetici variabili all'interno di cavità risonanti. Questi dispositivi devono avere:

## *Grande energia:*

- Più voglio entrare nei dettagli del bersaglio, più il proiettile deve avere "lunghezza d'onda" corta ( $\lambda = h/mv$ );
- Per produrre altre particelle sfruttando l'equivalenza di massa e energia ( $E = mc^2$ )



Mass is just a form of energy!

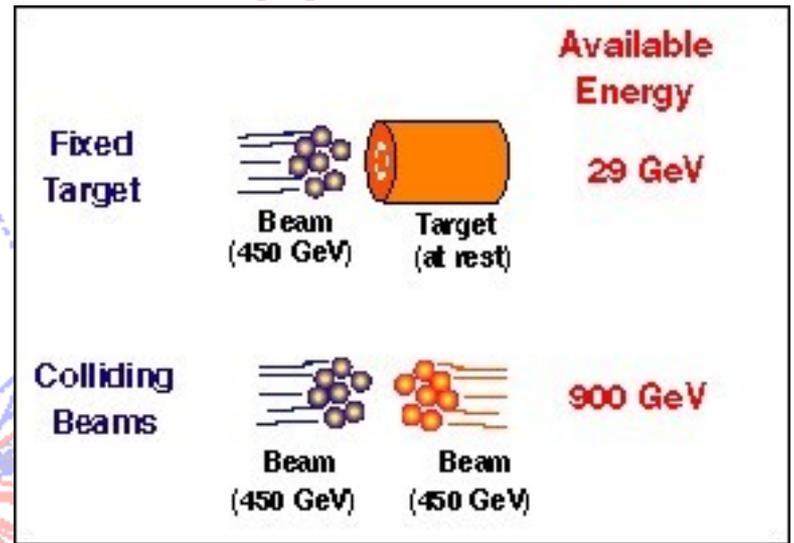
## *Grande luminosità:*

- Il numero di urti al secondo con produzione di particelle ("eventi") è pari al prodotto della "Sezione d'urto"  $\sigma$  (probabilità che il fenomeno si manifesti) per la "Luminosità"  $L$  dell'acceleratore (numero di particelle che si "incontrano" per unità di tempo e di superficie):

$$\frac{dN}{dt} = \sigma * L$$

# Energie sempre maggiori

Facendo urtare una particella accelerata contro una ferma, una parte dell'energia disponibile viene sprecata perche' la seconda particella viene "trascinata via".

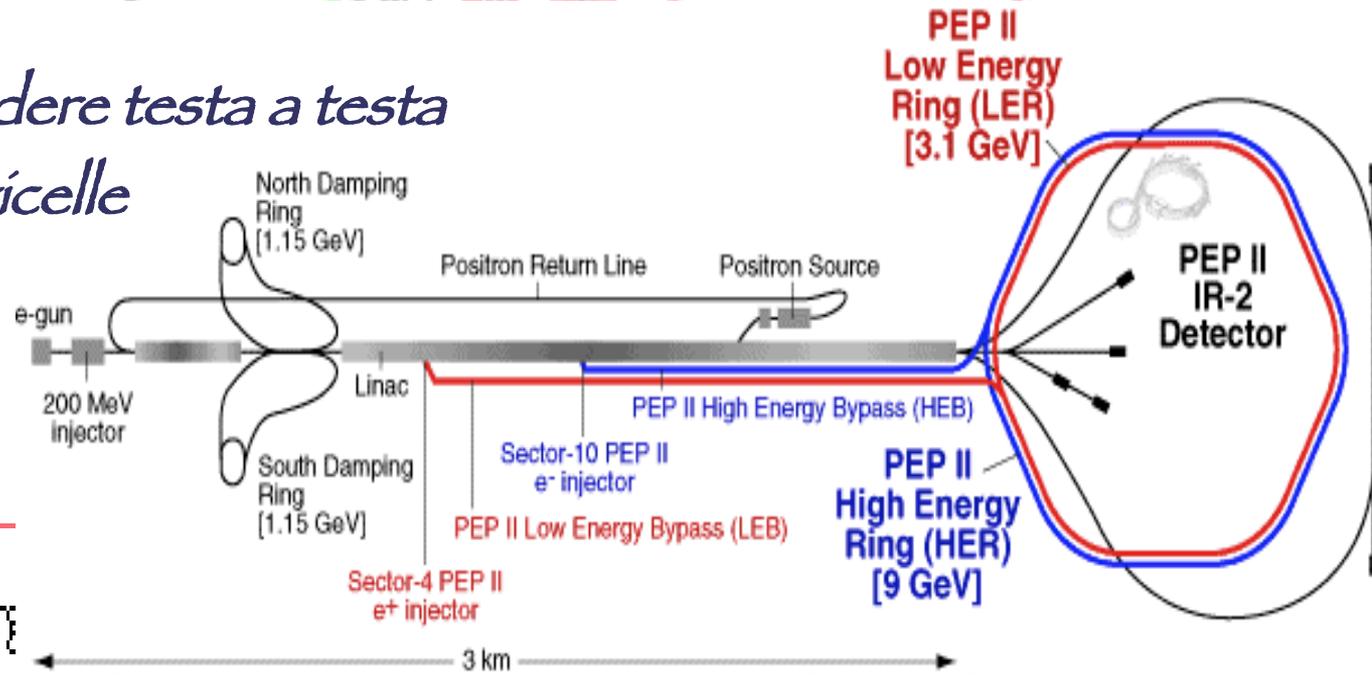


*IDEA!:* fare collidere testa a testa due fasci di particelle

Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!

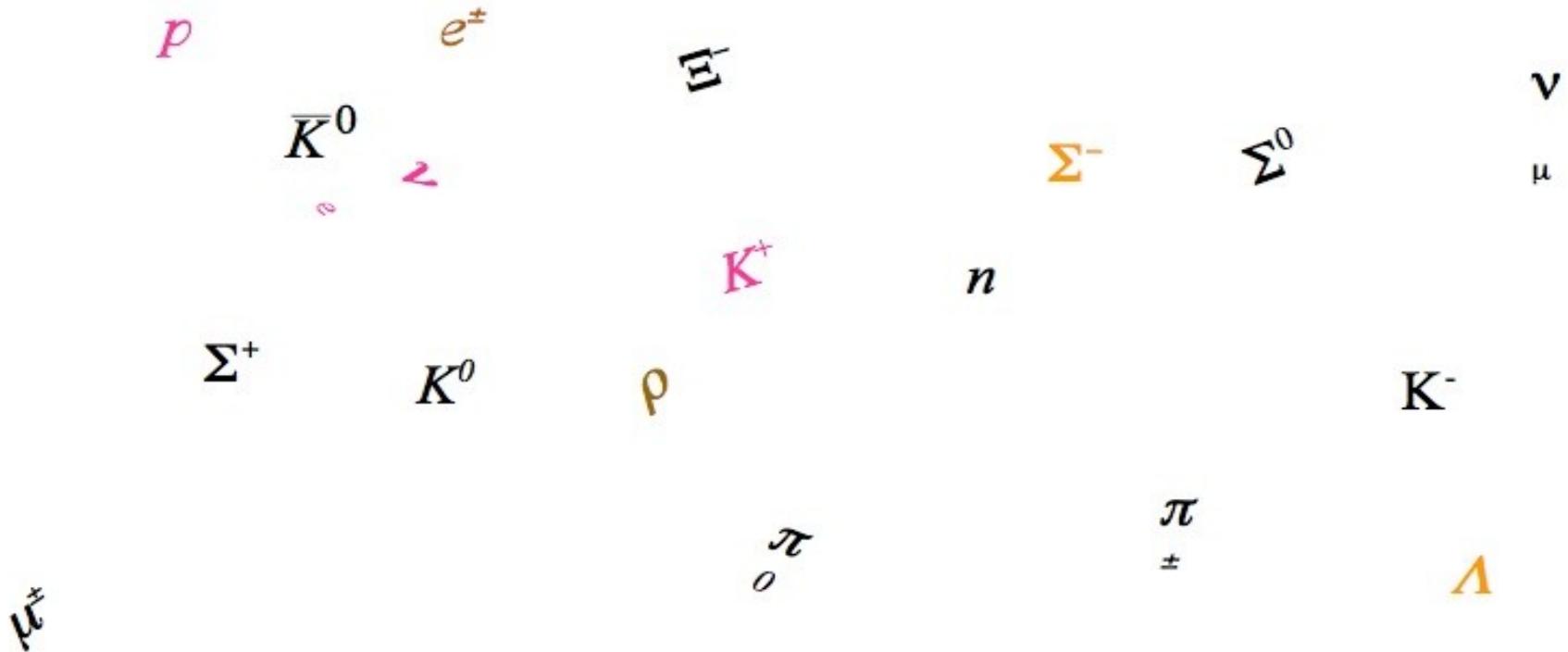


energy + energy = lots of energy



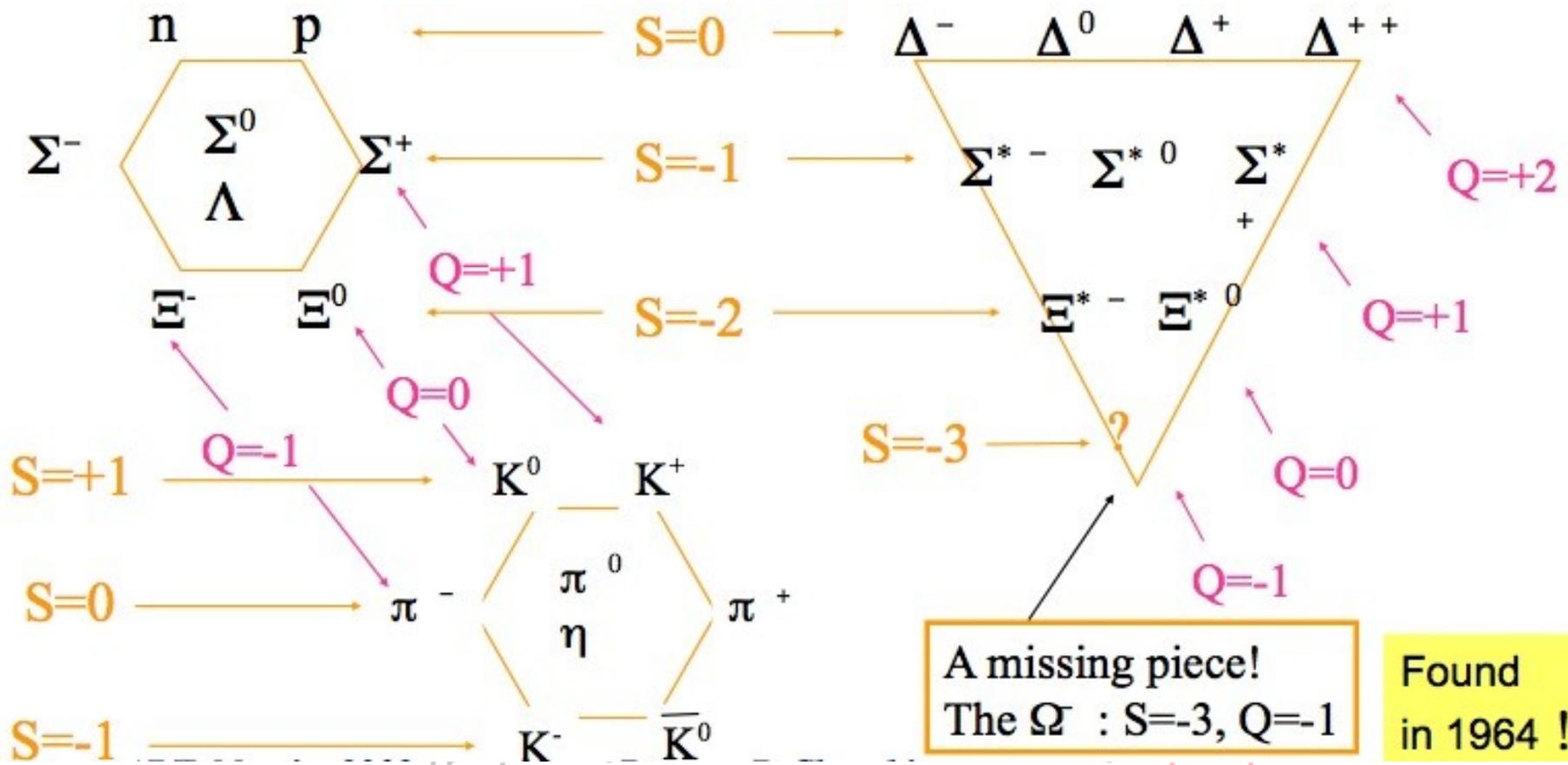
# Dov'è l'ordine?

Con i nuovi acceleratori di particelle e nuovi rivelatori (camera a bolle) a disposizione i fisici delle particelle negli anni 50 si divertirono un mondo...



# Il modello a Quark

Nel 1961 Gell-Mann & Ne'eman ebbero per la fisica delle particelle lo stesso ruolo di Mendeleev 100 anni prima con gli atomi "fondamentali"



# Ordine e

## Costituenti fondamentali

Proprio come l'ordine della tavola periodica era dovuto ai tre componenti fondamentali (e, p, n), così Gell-Mann e Zweig proposero che tutti gli "adroni" fossero costituiti da tre oggetti che vennero chiamati "quarks"

UP

DOWN

Strange

I quark hanno cariche elettriche pari a  $2/3$  (u),  $-1/3$  (d),  $-1/3$  (s) della carica del protone

p	uud	$\Delta^{++}$	uuu	$K^+$	$u\bar{s}$
n	udd	$\Delta^+$	uud	$K^0$	$d\bar{s}$
$\pi^+$	$u\bar{d}$	$\Delta^0$	udd	$K^-$	$s\bar{u}$
$\pi^0$	$u\bar{u}$	$\Delta^-$	ddd	$K^0$	$s\bar{d}$
$\pi^-$	$d\bar{u}$	$\Omega$	sss		

# Dove sono i quarks?

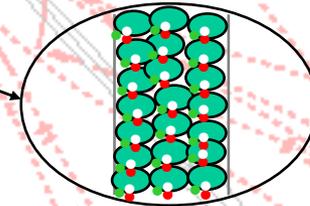
Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark erano ancora entita' matematiche...

- Fino a che l'esperimento confermo' la loro esistenza!

Ripetiamo l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte...

elettrone

Protone



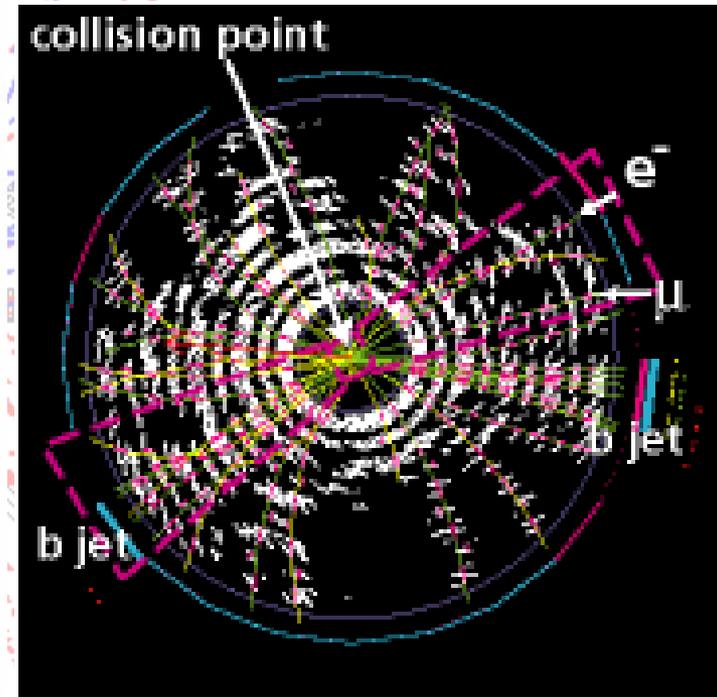
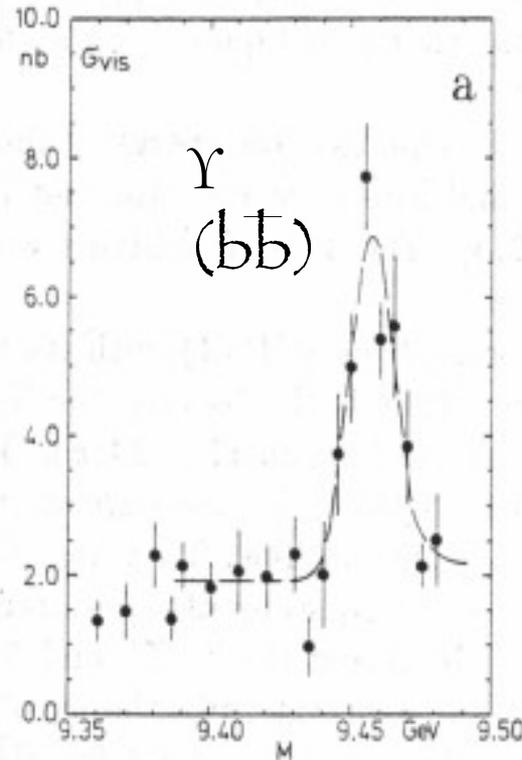
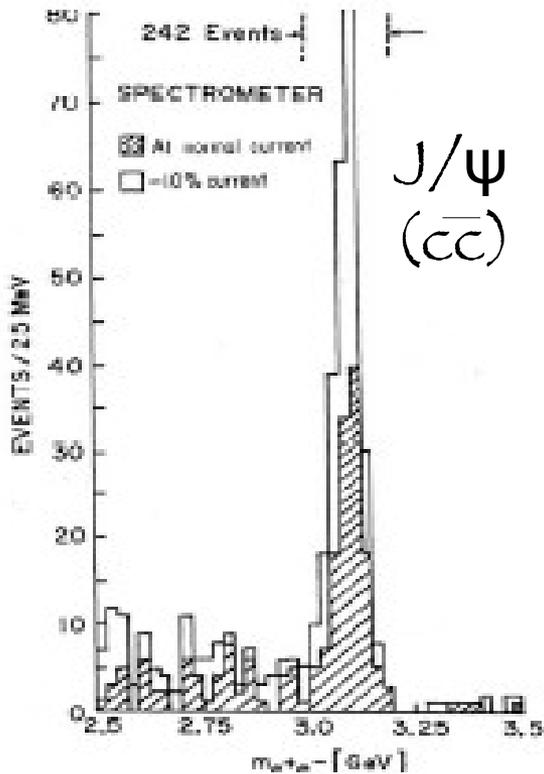
Sempre con il metodo di Tex Willer si verifico' che il protone e' costituito da altri oggetti "piu' fondamentali"! Ma i quarks "liberi" non esistono!

# I quarks charm, top e bottom

1974: scoperta del c

1977: scoperta del b

1994: scoperta del t



Mesoni: particelle formate da una coppia quark-antiquark.

Il quark top vive  $10^{-25}$  s, troppo poco per poter "adronizzare"...

# Cosa significa

## "fondamentale"?

Il concetto di "fondamentale" si è evoluto nel tempo:

Fisica atomica (~1900):

atomo ( $r \sim 10^{-10}$  m)

Fisica nucleare (~1930):

nucleo ( $r \sim 10^{-14}$  m),

nucleone ( $r \sim 10^{-15}$  m)

Fisica delle particelle (oggi):

quarks (costituenti dei nucleoni)

e leptoni (elettrone) ( $r \sim 10^{-18}$  m)

... e poi?



atoms have electrons ...



orbiting a nucleus ...

which is made of protons ...



... and neutrons

which are made of quarks, up-quarks and down-quarks ...



which are at the current limit of our knowledge.

# Il Modello Standard

- Nel Modello Standard esistono due generi di particelle:
  - Particelle materiali: il Modello Standard sostiene che la maggior parte delle particelle materiali finora conosciute è composta di particelle “più fondamentali” (quark). C'è anche un'altra classe di particelle materiali fondamentali, i leptoni (un esempio è l'elettrone) che non formano altre particelle.
  - Particelle mediatrici di forza: Ogni tipo di interazione fondamentale agisce “mediante” una o più particelle mediatrice di forza (un esempio è il fotone).

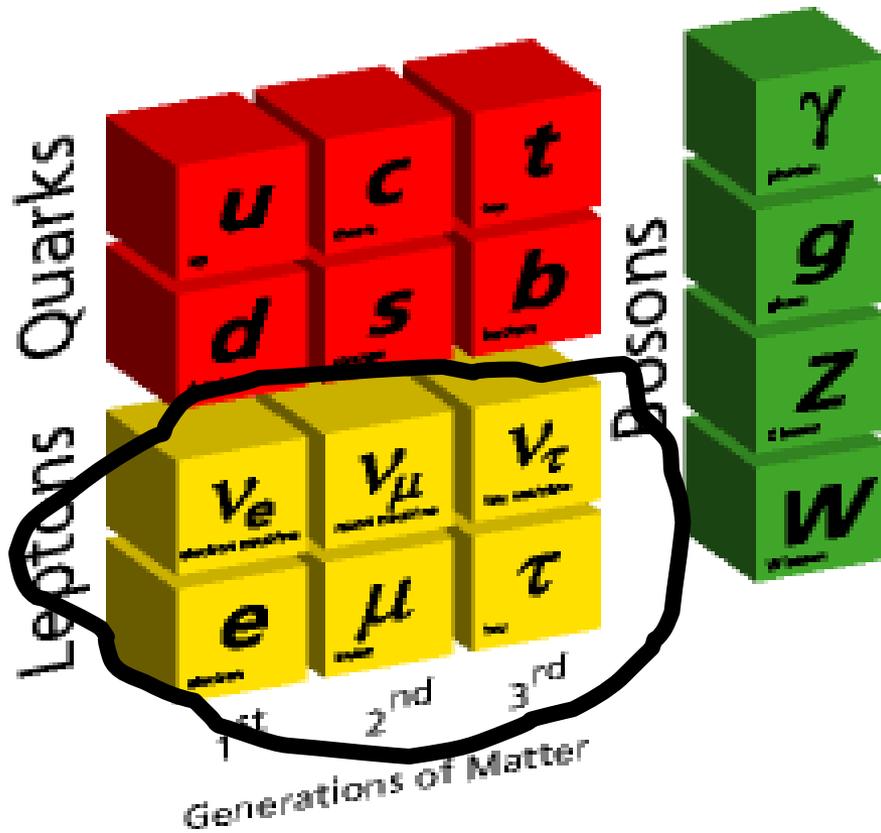
# Una nuova teoria

- Il Modello Standard descrive:
  - tutta la materia
  - tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)
- La sua bellezza sta nella capacità di spiegare centinaia di particelle e interazioni complesse con “poche” particelle e interazioni fondamentali

# Semplicità!

# I leptoni

## Elementary Particles

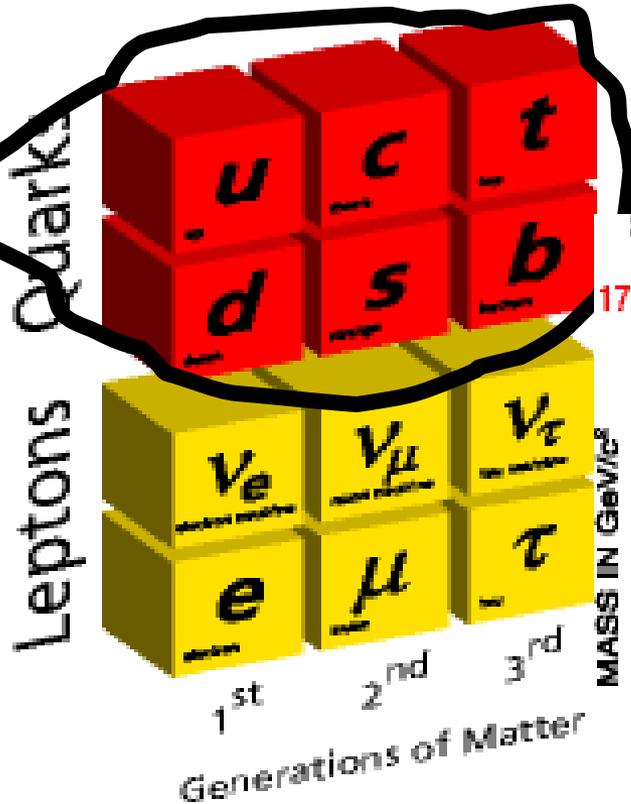


- I leptoni sono sei:
  - tre hanno carica elettrica (negativa)
  - tre non hanno carica elettrica
- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone ( $e$ ). Gli altri due leptoni carichi sono il muone ( $\mu$ ) e il tau ( $\tau$ )
  - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni neutri si chiamano neutrini:
  - c'è un neutrino corrispondente a ogni leptone carico
  - hanno massa molto piccola (ma non nulla)

# I quarks

## Elementary Particles

Ci sono 5 ordini di grandezza tra le masse del quark piu' leggero e piu' pesante



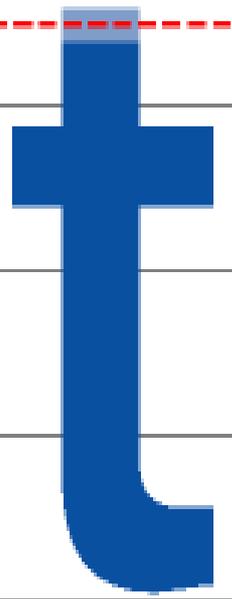
MASS IN GeV/c<sup>2</sup>

174.3

$M(\text{top}) = 172.9 \pm 1.1 \text{ GeV}/c^2$

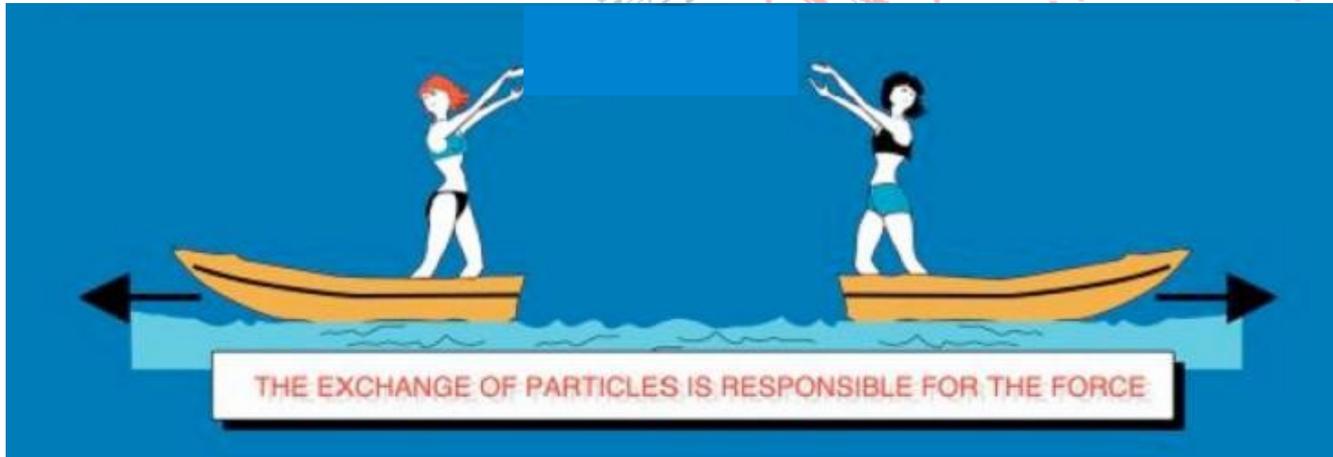
0.005 up    0.01 down    0.15 strange    1.5 c charm    5.0 b bottom

QUARKS

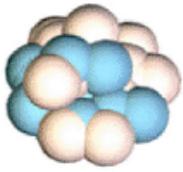
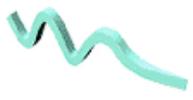
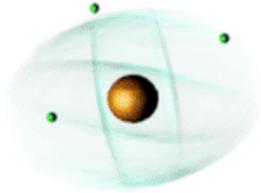
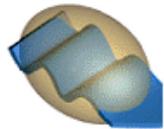
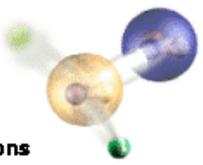


# Effetti non visibili

- Per risalire alla natura delle forze bisogna studiare le interazioni fra particelle materiali
- Consideriamo la vignetta seguente:
  - le ragazze afferrano un pallone invisibile e vengono spinte indietro dall'impatto.
  - il pallone non è visibile, ma è visibile l'effetto della sua presenza



# Interazioni e mediatori

<p style="text-align: center; color: red; font-weight: bold;">Strong</p> <p><b>Gluons (8)</b> </p> <p><b>Quarks</b> </p> <p><b>Mesons Baryons</b> </p> <p style="text-align: center;"><b>Nuclei</b> </p>	<p style="text-align: center; color: green; font-weight: bold;">Electromagnetic</p> <p><b>Photon</b> </p> <p><b>Atoms</b> </p> <p><b>Light</b> <b>Chemistry</b> <b>Electronics</b></p>
<p style="text-align: center; color: purple; font-weight: bold;">Gravitational</p> <p><b>Graviton ?</b> </p> <p><b>Solar system</b> <b>Galaxies</b> <b>Black holes</b> </p>	<p style="text-align: center; color: blue; font-weight: bold;">Weak</p> <p><b>Bosons (W,Z)</b> </p> <p><b>Neutron decay</b> <b>Beta radioactivity</b> <b>Neutrino Interactions</b> <b>Burning of the sun</b> </p>

The particle drawings are simple artistic representations

- Tutte le interazioni (o forze) che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di **mediatori di forza**.
  - Riprendendo l'immagine di prima:
    - i giocatori = particelle materiali
    - pallone = particella mediatrice di forza.

Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli effetti dei mediatori di forza sulle particelle materiali.

Ci sono quattro interazioni (forze) tra le particelle:

- Gravita'
- ElettroMagnetica
- Nucleare Forte
- Nucleare Debole

# Caratteristiche delle interazioni

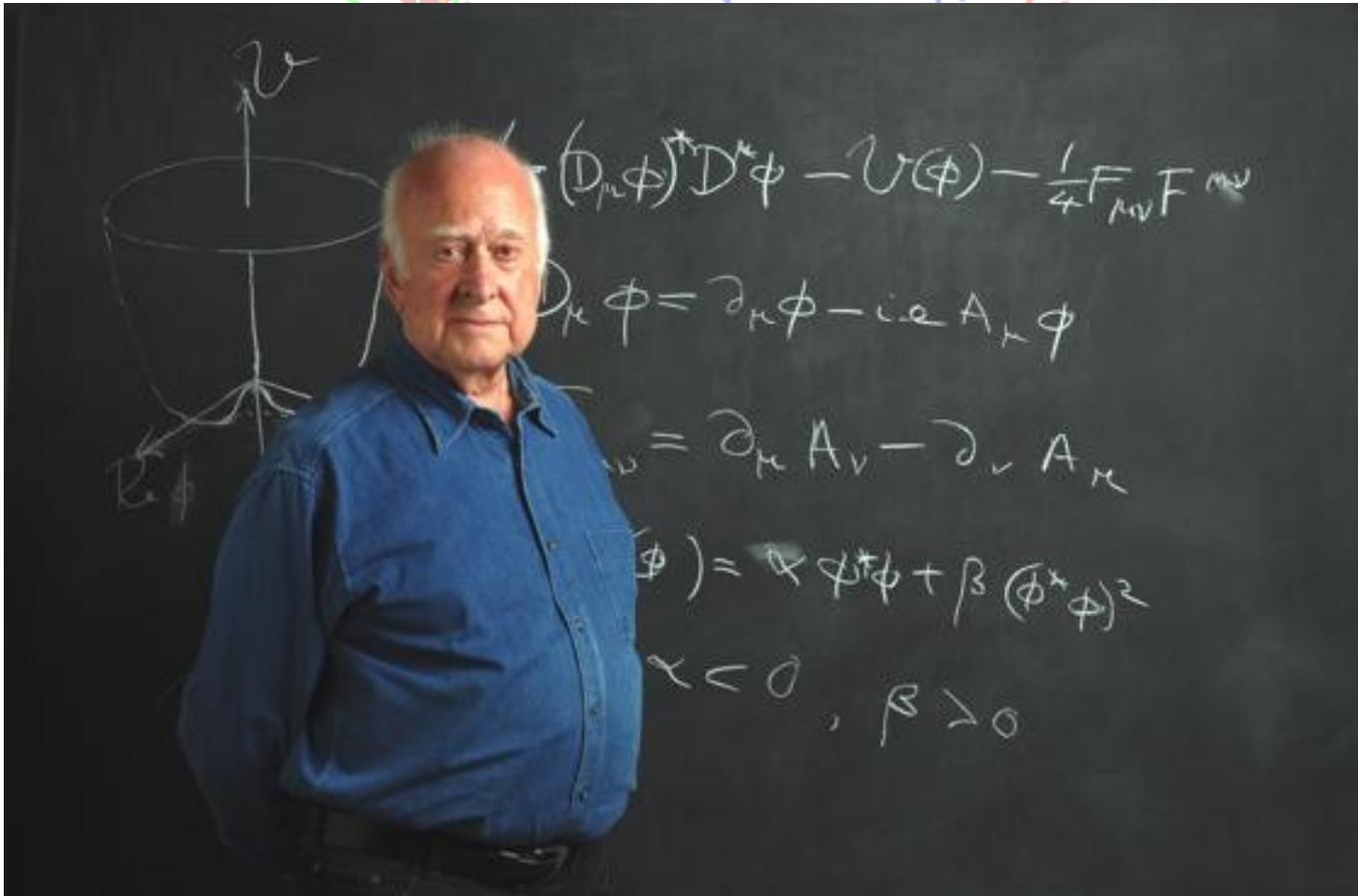
Le interazioni si differenziano per : particella che funge da mediatore, intensità, sorgente, raggio d'azione e tipo di particelle interessate:

Interazione	Sorgente	Mediatore	Intensità relativa	Raggio
Gravitazionale	m	Gravitone	$10^{-38}$	$\infty$
Nucleare Debole	q debole	W, Z <sup>0</sup>	$10^{-5}$	$10^{-15}$ m
Elettromagnetica	q elettrica	Fotone	$10^{-2}$	$\infty$
Nucleare Forte	"colore"	Gluone	1	$10^{-15}$ m

Come vedremo in seguito, W e Z sono state scoperte da Carlo Rubbia et al. al CERN nel 1980!!

Il Gravitone non è ancora stato scoperto!

# Il Bosone di Higgs... questo sconosciuto



# Interazione elettromagnetica

$$\mathcal{L} = A_\mu \left( \frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) A^\mu$$

Questo non è un geroglifico! È l'equazione che descrive la propagazione del fotone nel vuoto, alla velocità della luce  $c = 2.997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ . Attenzione: Il fotone ha massa nulla e per questo corre così tanto!

- Esempio: Interazione tra due elettroni:

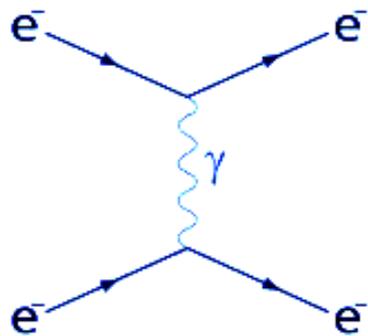


Grafico di Feynman della diffusione Moeller  $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$  mediata da scambio di fotone ( $\gamma$ )

# Interazione Debole

- Posso usare lo stesso formalismo per descrivere l'interazione debole?
- Esempio: Interazione tra un elettrone e un neutrino:

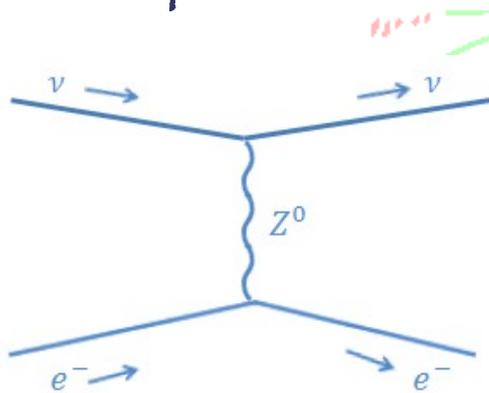
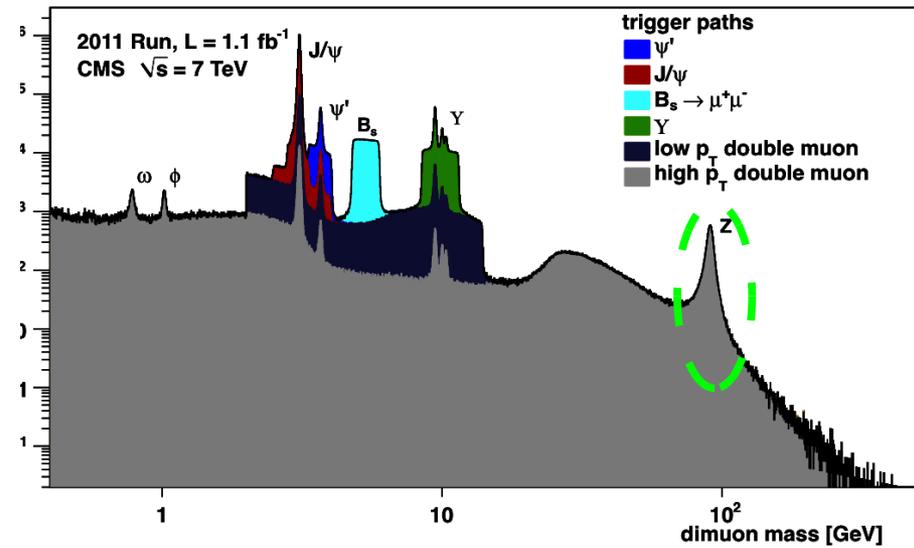
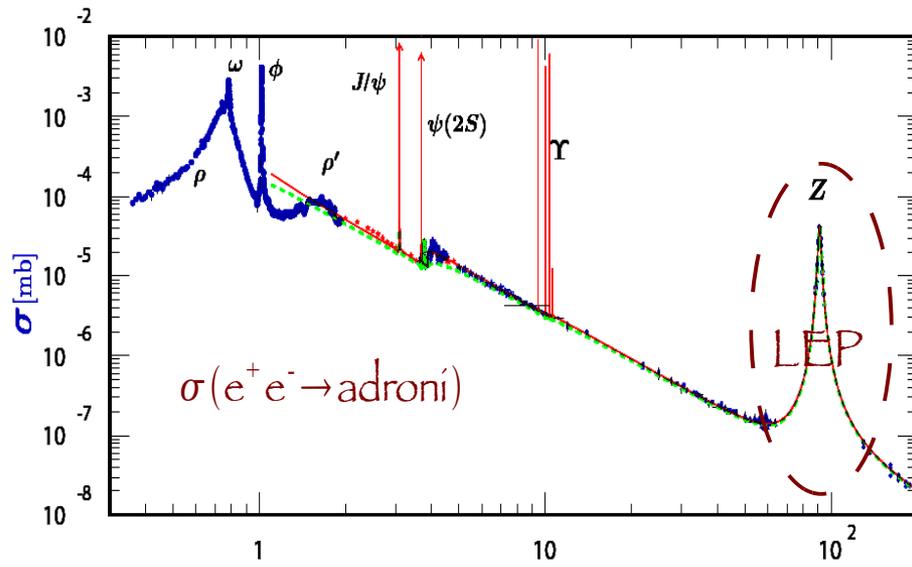


Grafico di Feynman della  
diffusione  $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$   
mediata da scambio del vettore neutro ( $Z^0$ )

- Risposta: sì... però solo se riesco a scoprire i mediatori dell'interazione debole e se riesco a modificare il “geroglifico” mostrato prima!!

# Primo: scoprire i mediatori!

- W,Z osservate nel 1980 al CERN (C.Rubbia)
- prodotte a iosa in collisioni  $e^+e^-$  (LEP)
- ... e pp (LHC)



# Secondo: Modificare le equazioni!!

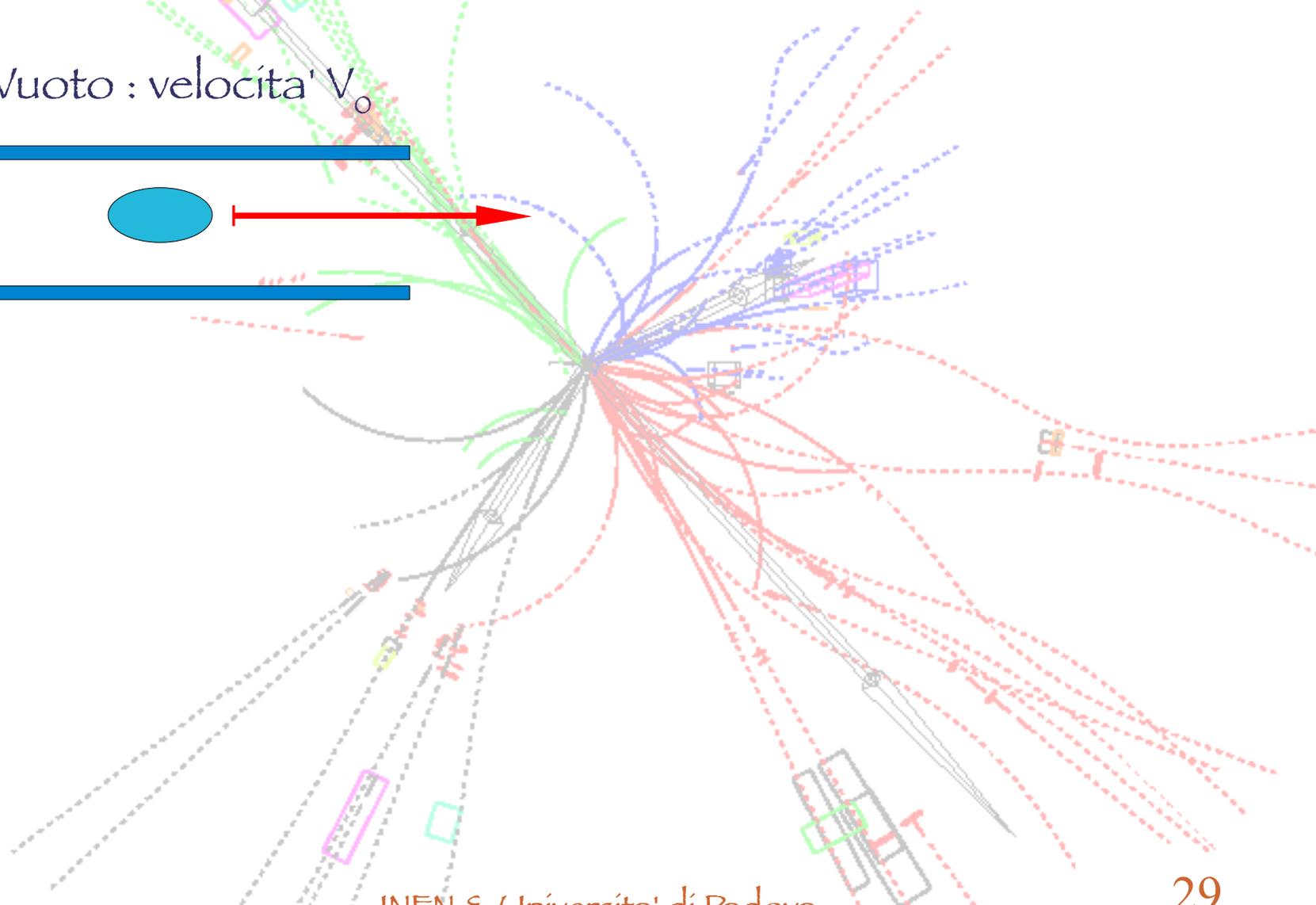
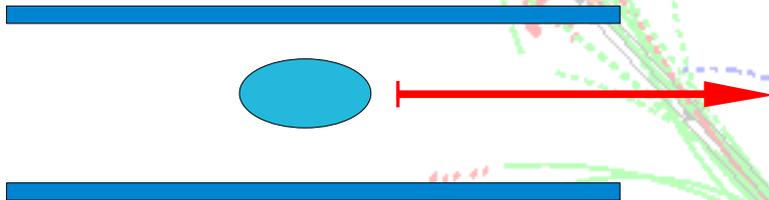
- A differenza del fotone, W e Z hanno massa... e non piccola: pesano circa come 90 protoni!
- Se prendo il “geroglifico” e ci inserisco a mano la massa di W e Z, ottengo un modello che non funziona piu` perche` molti calcoli mi danno come risultato  $\infty$ !!
- Ho due possibilità:
  - 1) Cambio lavoro... 
  - 2) Chiamo in aiuto il Prof. Higgs 

# Meccanismo di Higgs

- Il “vuoto” e` lo stato in cui l'energia e` minima.
- Introduco un nuovo “campo” (=particella) che e` una “eccitazione del vuoto” e permea tutto lo spazio.
- L'interazione delle varie particelle con questo campo le frena e genera la loro massa.
- In questo modo non ho piu` calcoli che danno  $\infty$  !
- Tra le infinite possibilita` per la scelta del vuoto, la Natura ne sceglie una (si parla di simmetria spontaneamente rotta).

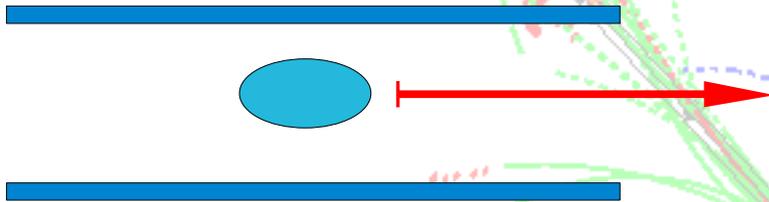
# Analogie Classiche

Vuoto : velocità  $V_0$

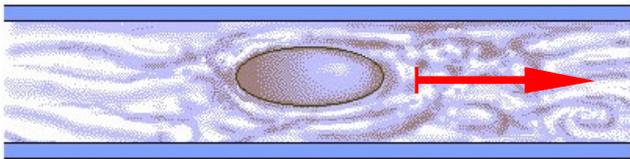


# Analogie Classiche

Vuoto : velocità  $V_0$

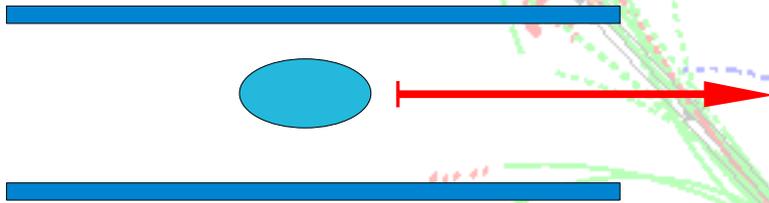


Mezzo viscoso : velocità  $v < V_0$ ,  $a = -kv$



# Analogie Classiche

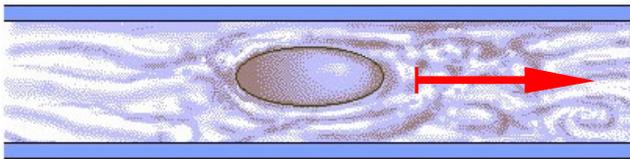
Vuoto : velocità  $V_0$



Vuoto classico :  $M=0$ ,  $v=c$

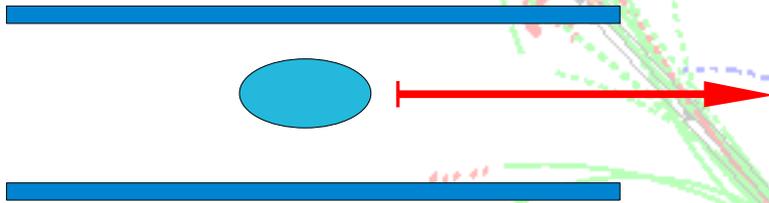


Mezzo viscoso : velocità  $v < V_0$ ,  $a = -kv$



# Analogie Classiche

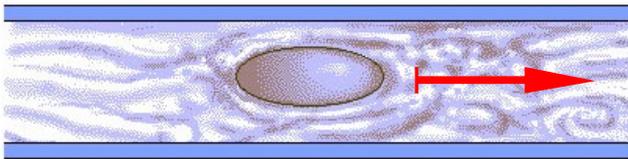
Vuoto : velocità  $V_0$



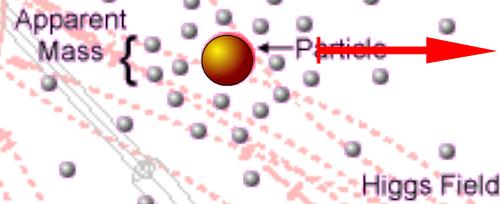
Vuoto classico :  $M=0, v=c$



Mezzo viscoso : velocità  $v < V_0$



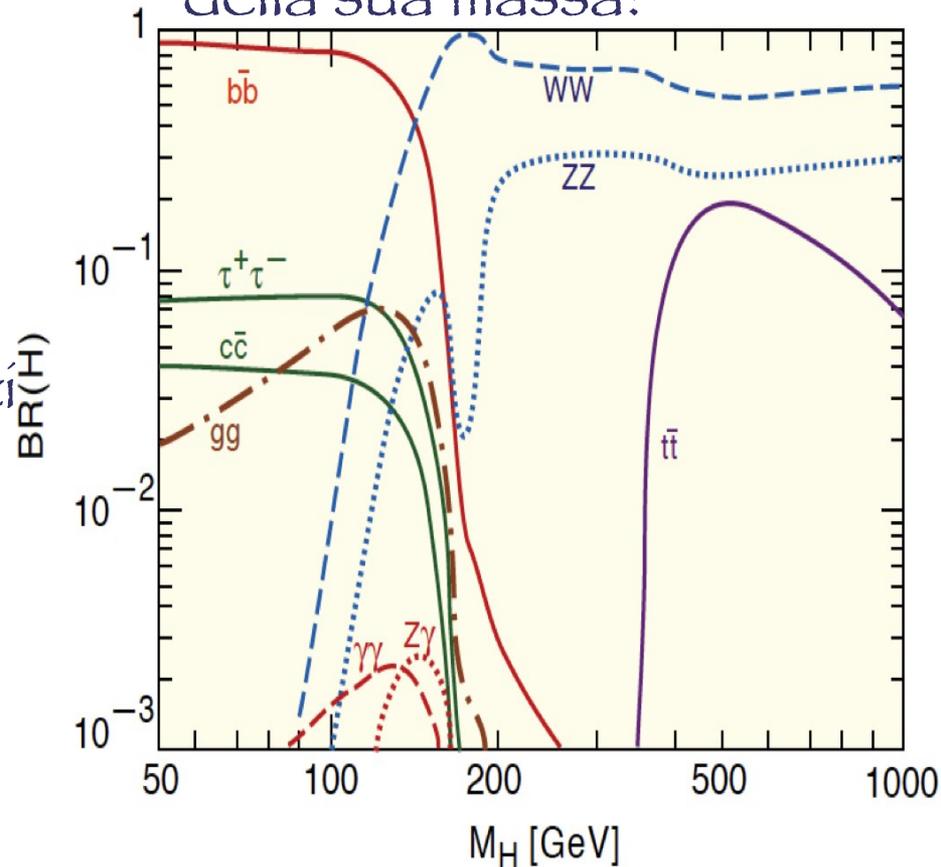
Vuoto di Higgs :  $M = \frac{1}{2} g v$   $v < c$



# Higgs: Come lo cerco?

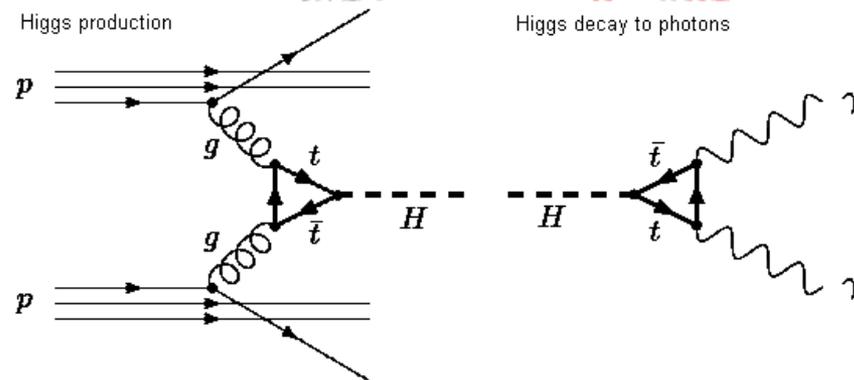
- Il Bosone di Higgs puo' essere ricercato in svariati modi legati ai diversi possibili decadimenti
- L'efficacia della ricerca dipende:
  - dall'accoppiamento dell'Higgs con i suoi prodotti di decadimento
  - dall'entita' dei processi parassiti simili al segnale ricercato

Probabilita' di decadimento dell'Higgs nelle diverse modalita' ("canali") in funzione della sua massa:



# Ricerca del Bosone di Higgs @ LHC

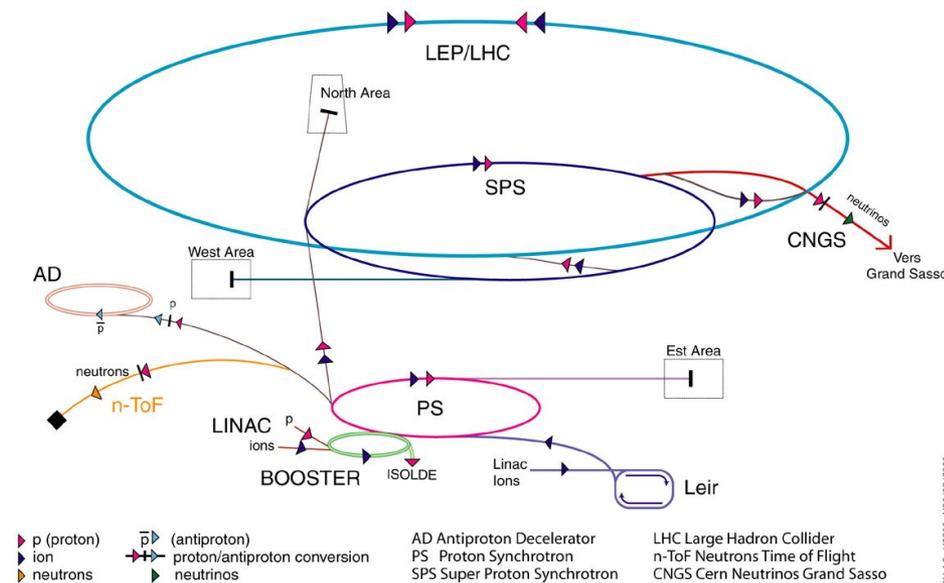
- Collisioni protone protone alla massima energia
- Scopo: convertire parte dell'energia cinetica dei protoni nell'energia di massa dell'Higgs
- Identificare l'Higgs frugando tra le particelle effettivamente osservate



# Il Large Hadron Collider

- LHC e' lo stadio finale di un sistema complesso che utilizza svariati acceleratori in cascata

**Accelerator chain of CERN (operating or approved projects)**



- Il penultimo stadio (SPS) e' l'acceleratore progettato da Carlo Rubbia per osservare W e Z nei primi anni 80

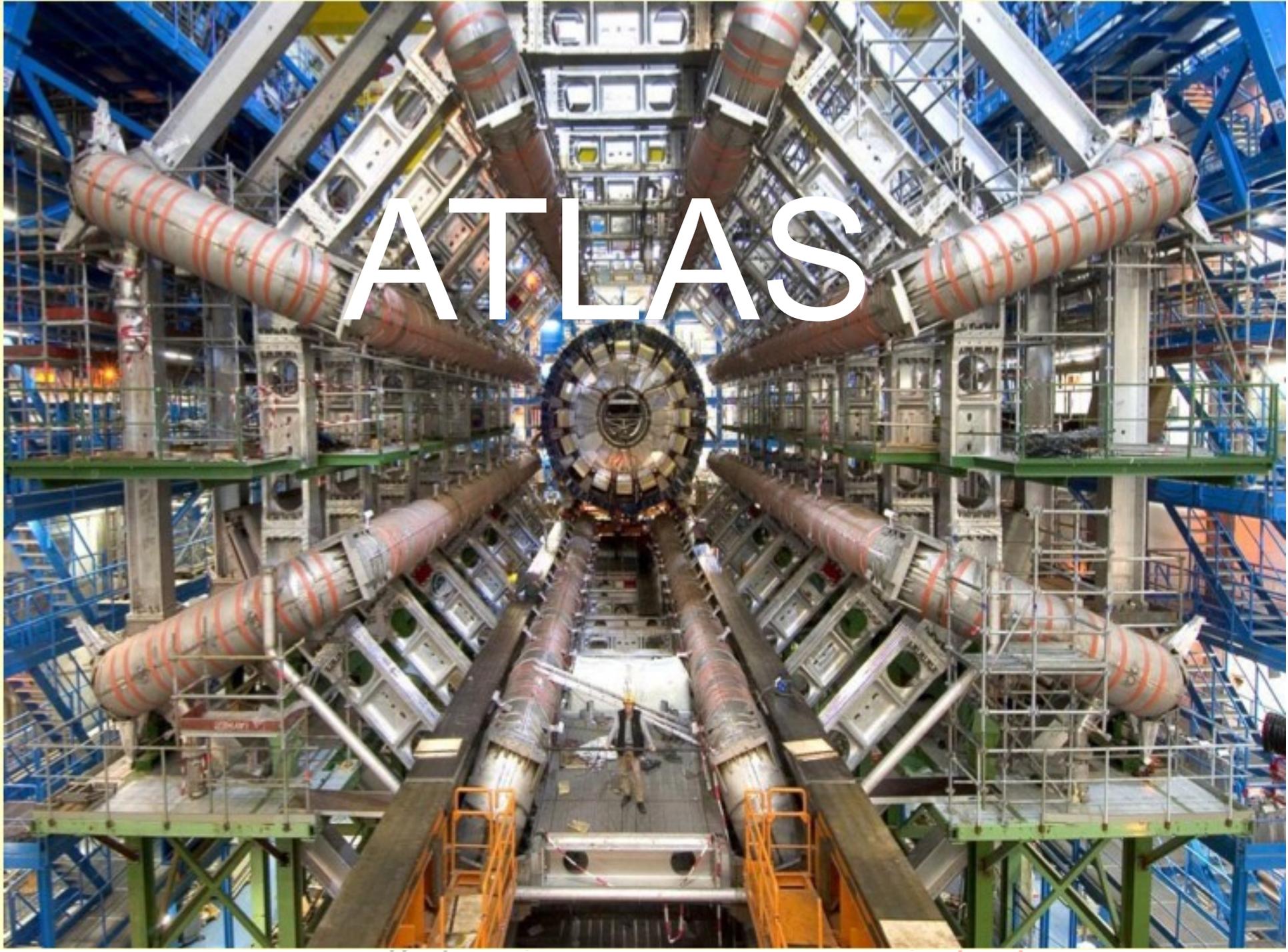
# La misura degli eventi a LHC



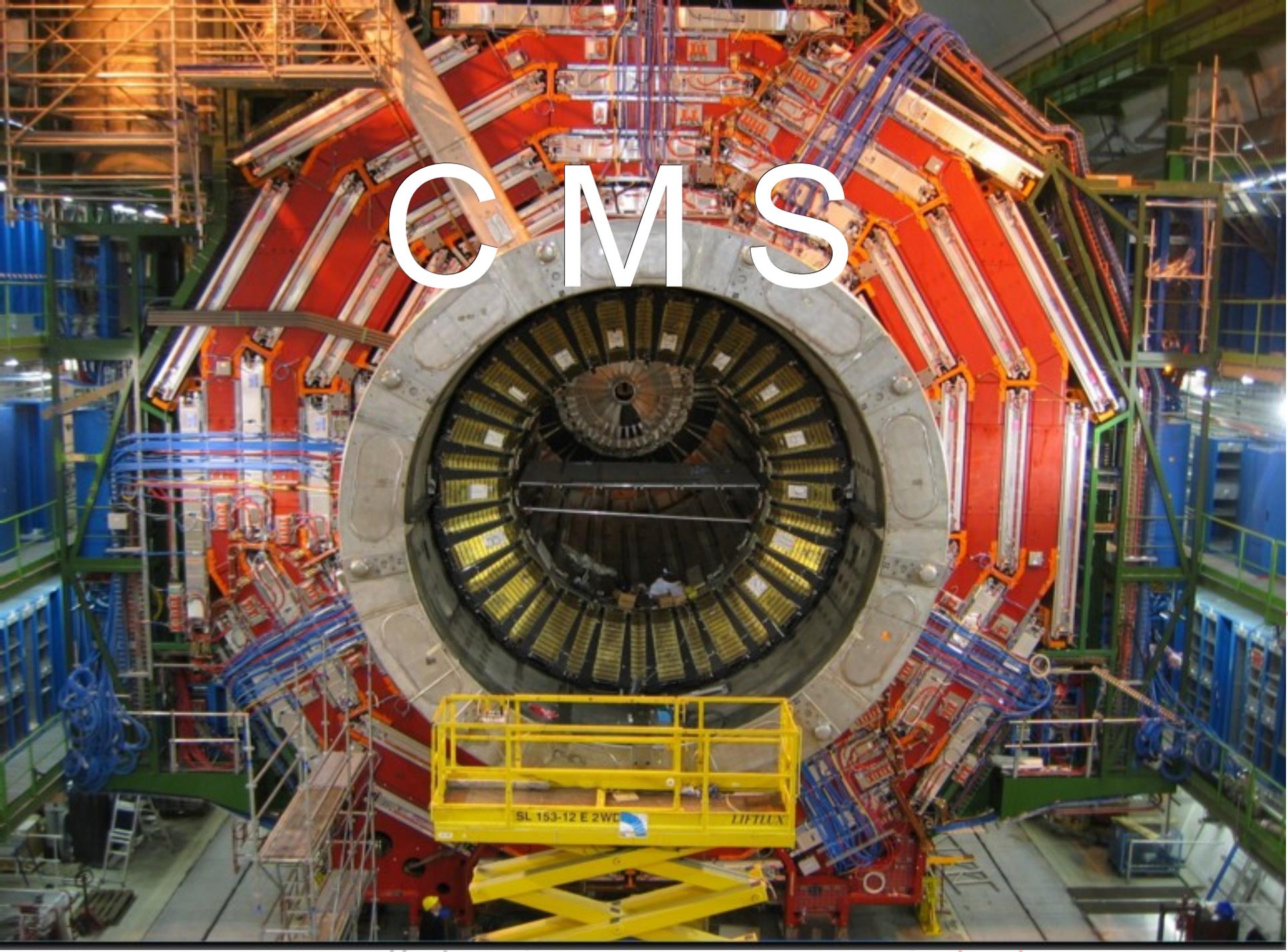
Date le energie altissime, e l'enorme molteplicità, servono rivelatori:

- estremamente grandi
- estremamente granulari
- estremamente veloci
- il più possibile ermetici (cioè, privi di buchi)

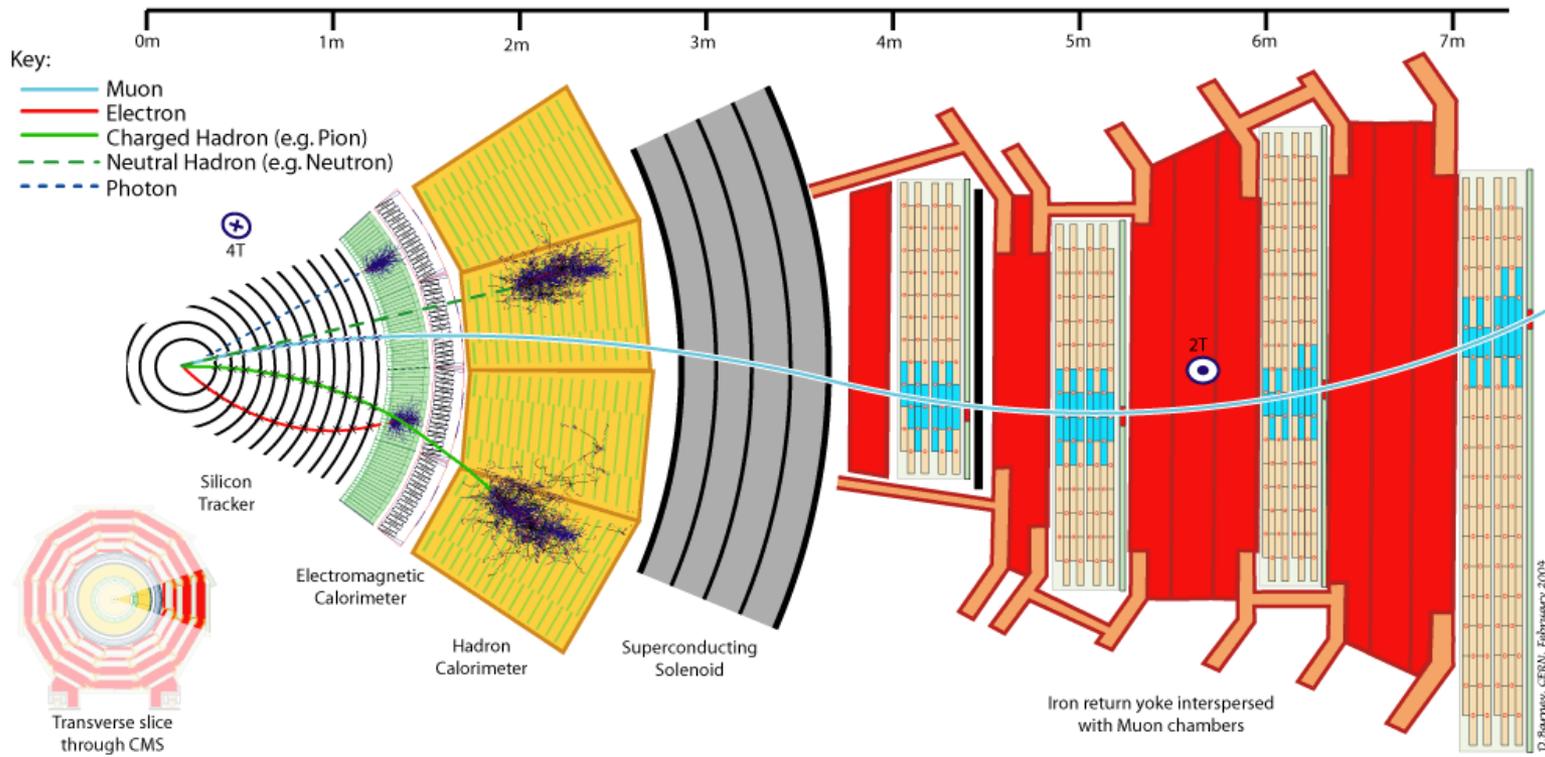
# ATLAS



# CMS



# CMS



# Un esempio : $H \rightarrow \gamma\gamma$

Questo "canale" copre un margine molto ristretto :

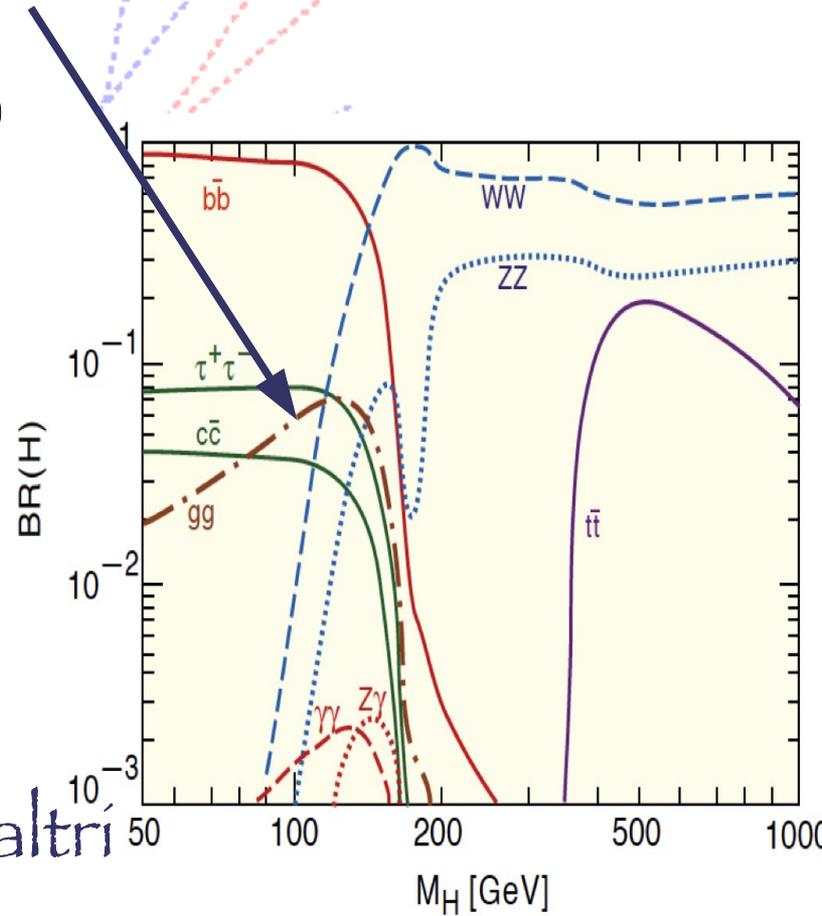
- 0.1-0.3 % se  $M_H \sim < 200$  GeV ☹️

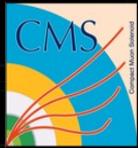
Tuttavia:

- alta efficienza per i fotoni 😊
- misura precisa della massa 😊
- fondi abbastanza bassi 😊

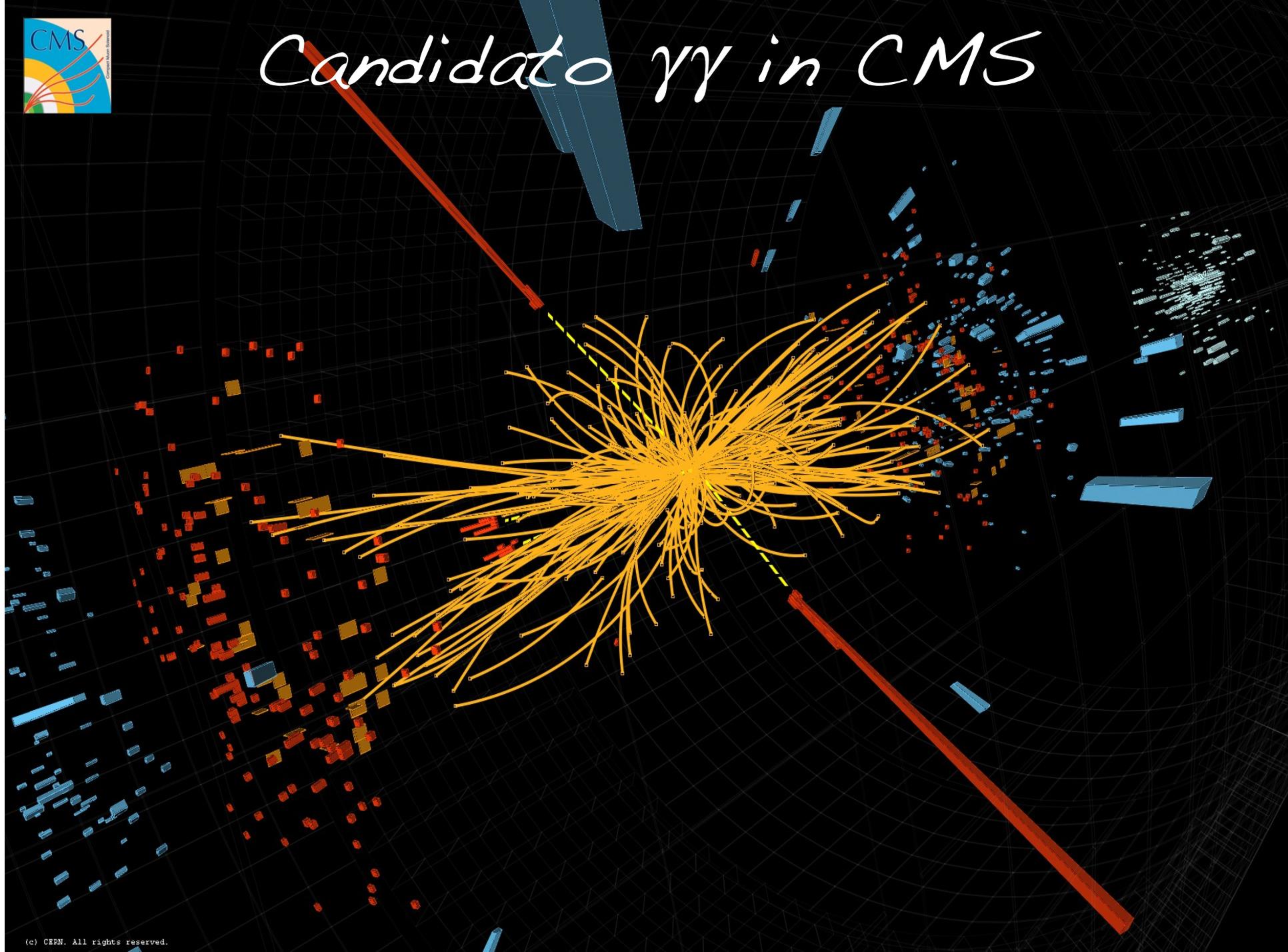
Perche` vi mostro questo e non altri canali piu` promettenti?

La risposta alle pagine seguenti!





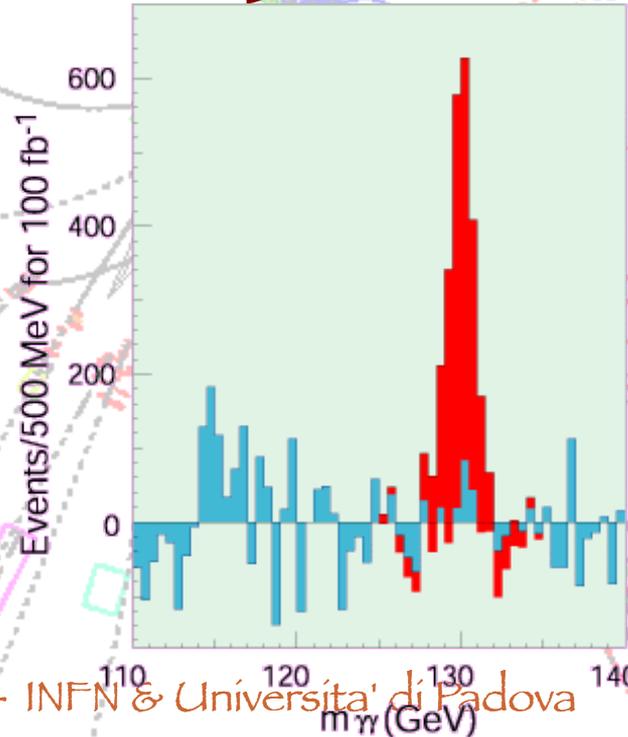
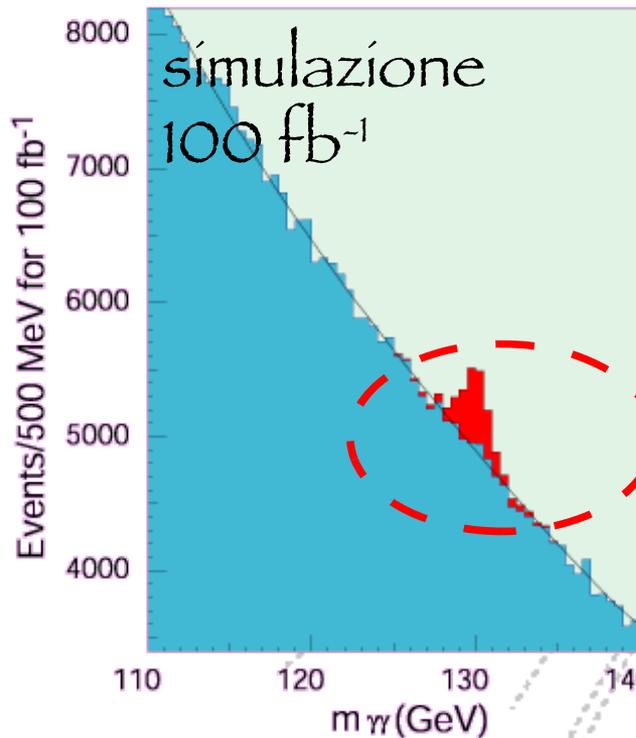
# Candidate $\gamma\gamma$ in CMS



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- misuro energia e direzione dei due fotoni
- calcolo la "massa invariante":

$$\left. \begin{aligned} E_H &= E_1 + E_2 \\ \vec{p}_H &= \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{aligned} \right\} M_H^2 = E_H^2 - \vec{p}_H \cdot \vec{p}_H$$

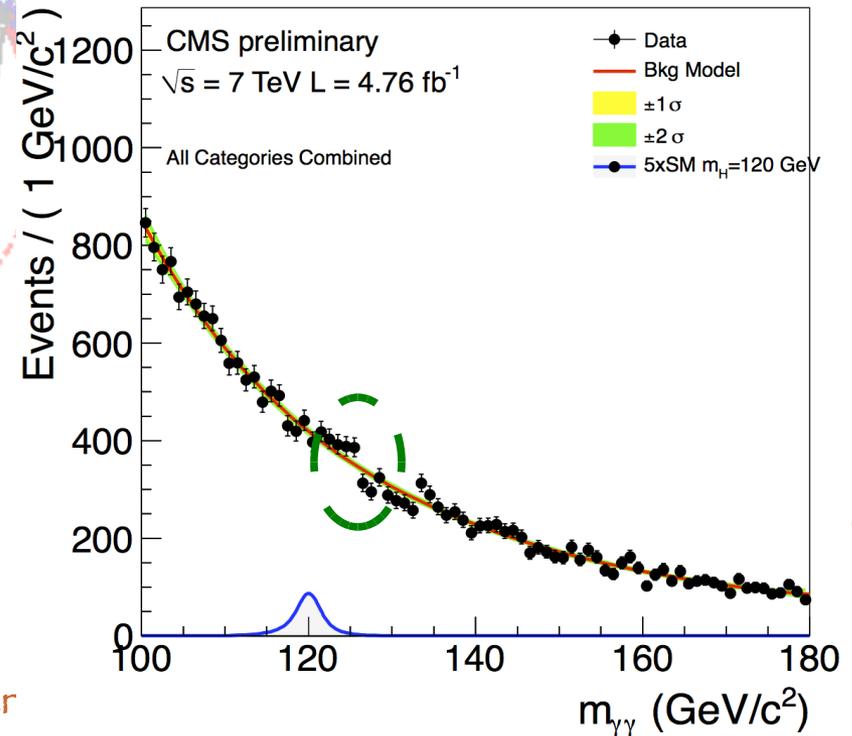
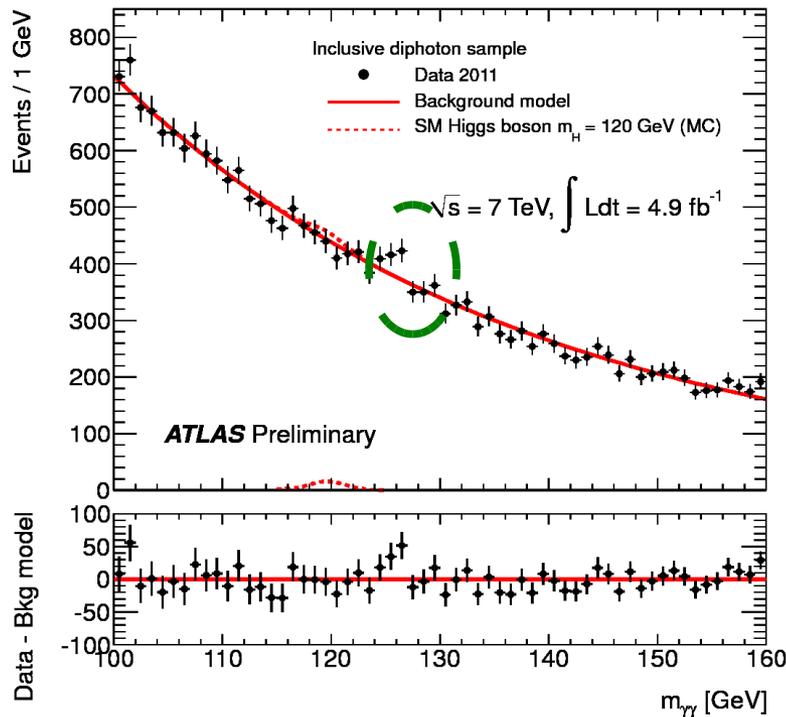


Attenzione: questa è la simulazione. Se l'avessi trovato, dovrei vedere qualcosa di simile al grafico rosso alla pagina seguente...

$H \rightarrow \gamma\gamma$

- C'e' qualcosa che sembra un eccesso nella regione che mi aspetto: L'ho trovato?
- Giornalisti: SI'
- Fisici: Non posso ancora dirlo!

dati, 5 fb<sup>-1</sup>



niver

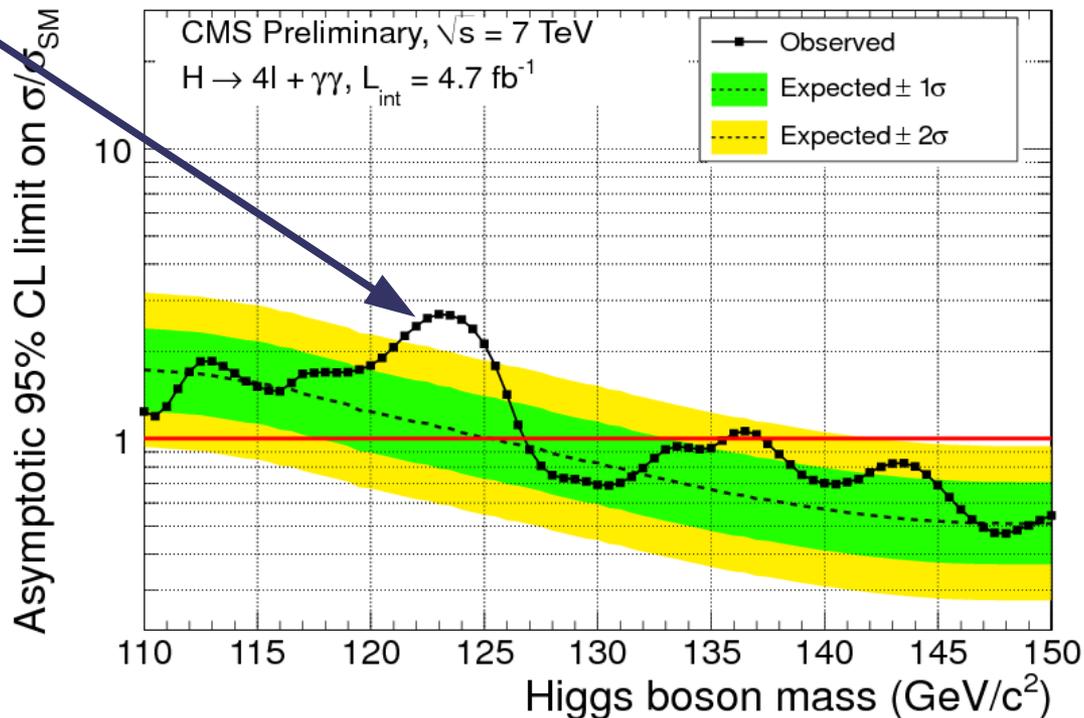
# Combinazione delle varie misure

- In pratica si esplorano tutte le strade, anche le più disperate
- Si combinano i risultati in maniera “ottimale”
- A massa alta, sono decisivi gli studi in ZZ e WW
- A massa bassa, quelli in ZZ e  $\gamma\gamma$



# Zoom

- Nella regione tra 122 – 126 GeV i dati si discostano un po' da quello che ci aspetteremmo in assenza di Higgs
- Curiosamente, anche ATLAS osserva un eccesso analogo all'incirca nella stessa regione
- L'eccesso però non è ancora statisticamente significativo



# Conclusioni sull'Higgs

- Il meccanismo di Higgs è il paradigma preferito per assegnare la massa a tutte le particelle – e quindi alla materia
- Le ricerche a LEP (1990-2000) hanno escluso l'esistenza di un Higgs leggero ( $M_H < 115 \text{ GeV}$ )
- Dopo due anni di piena attività, le ricerche a LHC escludono un Higgs con massa  $M_H > 128 \text{ GeV}$

ma ci sono indizi interessanti  $\sim 125 \text{ GeV}$

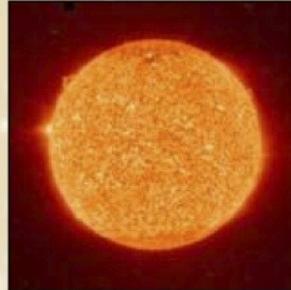
- Nel 2012 LHC produrrà il quadruplo degli eventi finora raccolti
- e arriveremo ad una conclusione definitiva

# Misura della velocità dei neutrini



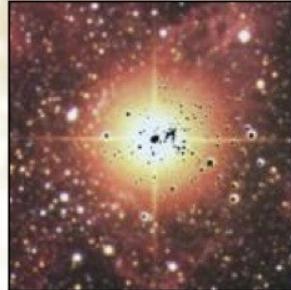
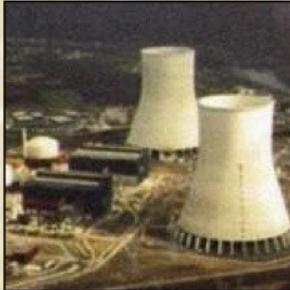
# Dove si trovano i neutrini?

**Crosta Terrestre  
(Radioattività naturale)**



**Sole**

**Reattori Nucleari**



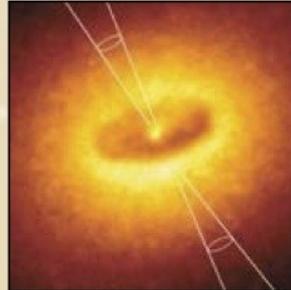
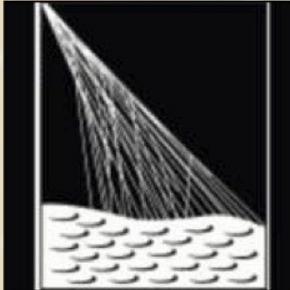
**Supernovae  
(Collasso Gravitazionale)**

**Acceleratori di particelle**



**Big Bang  
(oggi  $330 \text{ v/cm}^3$ )**

**Atmosfera Terrestre  
(Raggi Cosmici)**



**Acceleratori Cosmici**

# Sappiamo quindi già tutto?

*Nel 1998 è successo qualcosa di straordinario, per la prima volta è stata fatta una **crepa** nel muro del Modello Standard.*



## Oscillazione dei neutrini: cosa sono?

Ricorda: ci sono tre tipi diversi di neutrini.

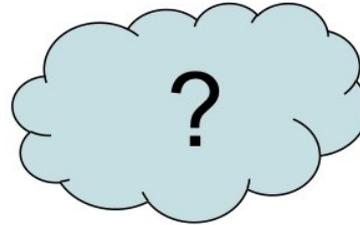
Durante il loro viaggio, tra il punto di produzione ed il punto di rivelazione, i neutrini cambiano di identità, trasformandosi da un tipo ad un altro .....

È un fenomeno possibile **solo se il neutrino ha una massa diversa da zero**, diversamente da quanto codificato nel Modello Standard.

# L'esperimento OPERA

L'esperimento OPERA è stato pensato, progettato e costruito per studiare il fenomeno delle oscillazioni

**MUON-NEUTRINO**  
Like the other 2 neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.



esperimenti di  
**SCOMPARSA**

**MUON-NEUTRINO**  
Like the other 2 neutrinos, he's got an identity crisis from oscillation.



**TAU-NEUTRINO**  
He's a tau now, but what type of neutrino will he be next?

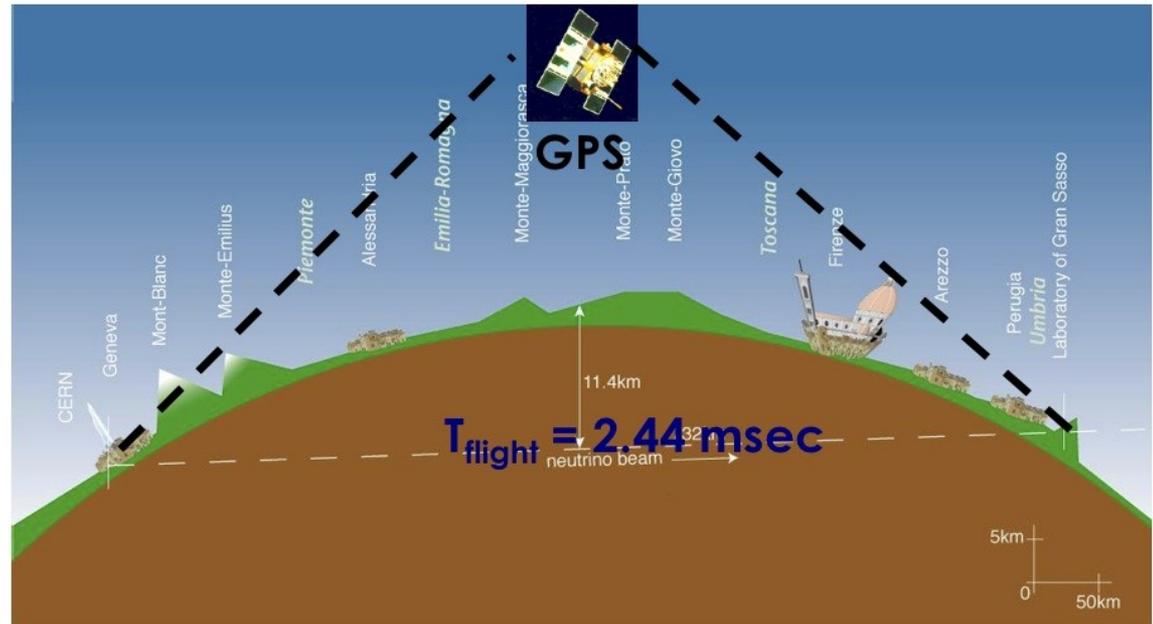


**OPERA:**  
**COMPARSA**

OPERA non è stato costruito per misurare la velocità dei neutrini!

# Neutrini dal CERN al Gran Sasso

- Il CNGS è un fascio di neutrini “artificiali” di alta energia e di grande intensità costruito con lo scopo di osservare la comparsa di neutrini tau



# Misura della velocità

$$v_v = \frac{L}{\Delta t}$$

La misura di per se' sarebbe piuttosto banale...

# Misure Precedenti

È mai stata tentata prima una misura di questo tipo?  
Sì ... più volte!

- 1) Negli anni '70: al FNAL (USA), non hanno trovato nulla e hanno dunque posto un limite:  $|v-d|/c < 4 \times 10^{-5}$
- 2) Nel 1987 è esplosa una Supernova nelle nostre "vicinanze" (168000 anni-luce). La luce è arrivata (quasi) insieme ai neutrini → altro limite  $|v-d|/c < 2 \times 10^{-9}$
- 3) Nel 2007 l'esperimento MINOS (USA) ha tentato una misura molto simile a quella di OPERA, ma con grandi errori:  
 $(v-c)/c = (5.1 \pm 2.9) \times 10^{-5} \rightarrow \text{NON CONCLUSIVA}$

# Ingredienti della misura

- Perfetta conoscenza dello spazio percorso → geodesia
- Perfetta conoscenza del tempo impiegato → GPS+orologi atomici

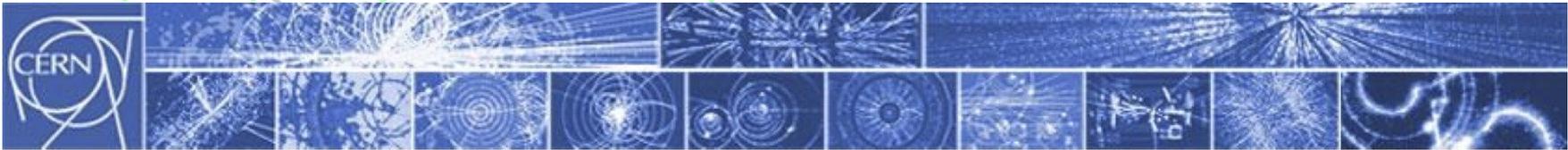


$v_{\mu}$



CERN

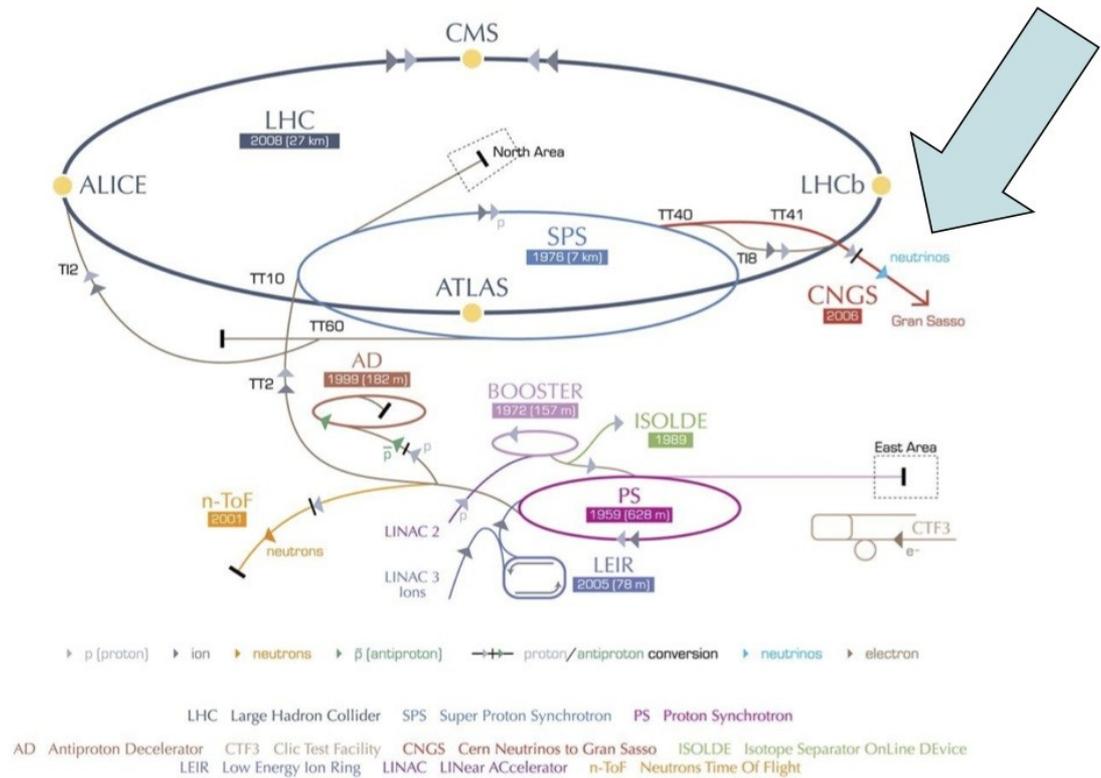
LNGS



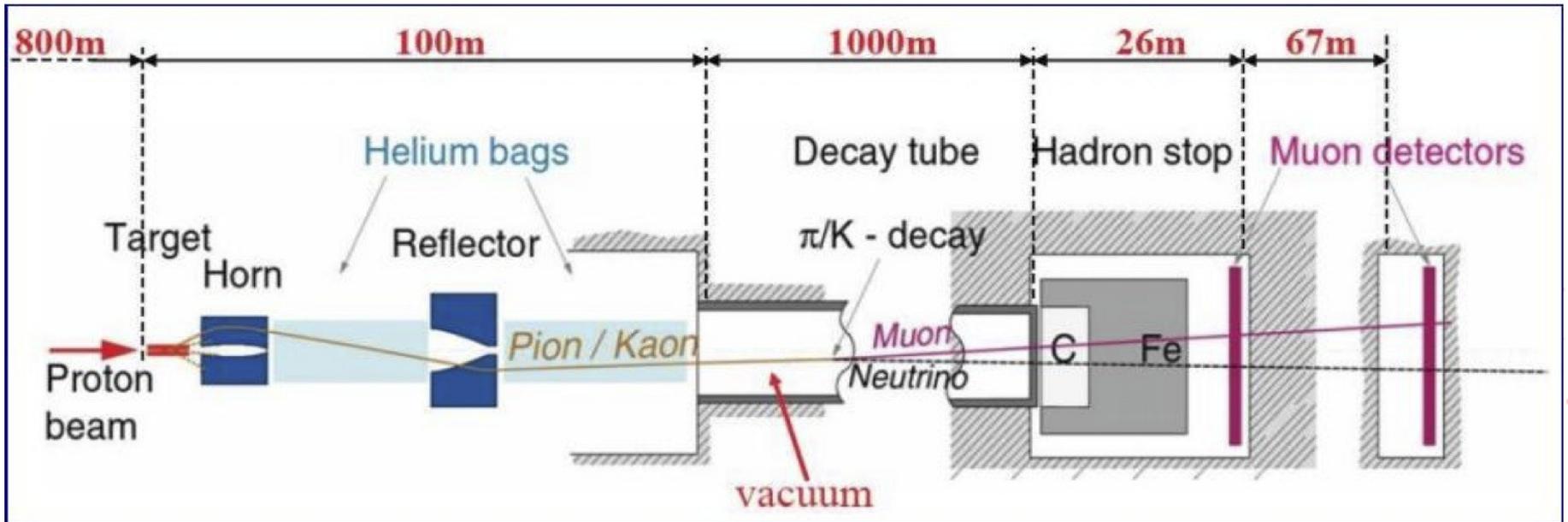
# Il fascio: come si fanno i neutrini?

I neutrini "nascono" così: un fascio di **protoni** (prodotti a partire dall'idrogeno e accelerati in un acceleratore che si chiama SPS) viene inviato contro un bersaglio. Tra le tante particelle che si creano nella collisione ci sono anche i **kaoni e i pioni**. Dopo qualche metro di "volo", i kaoni e i pioni decadono e si trasformano in **muoni e neutrini**. I muoni si fermano nella terra dopo qualche centinaio di metri mentre i neutrini continuano fino al Gran Sasso.

## CERN's accelerator complex

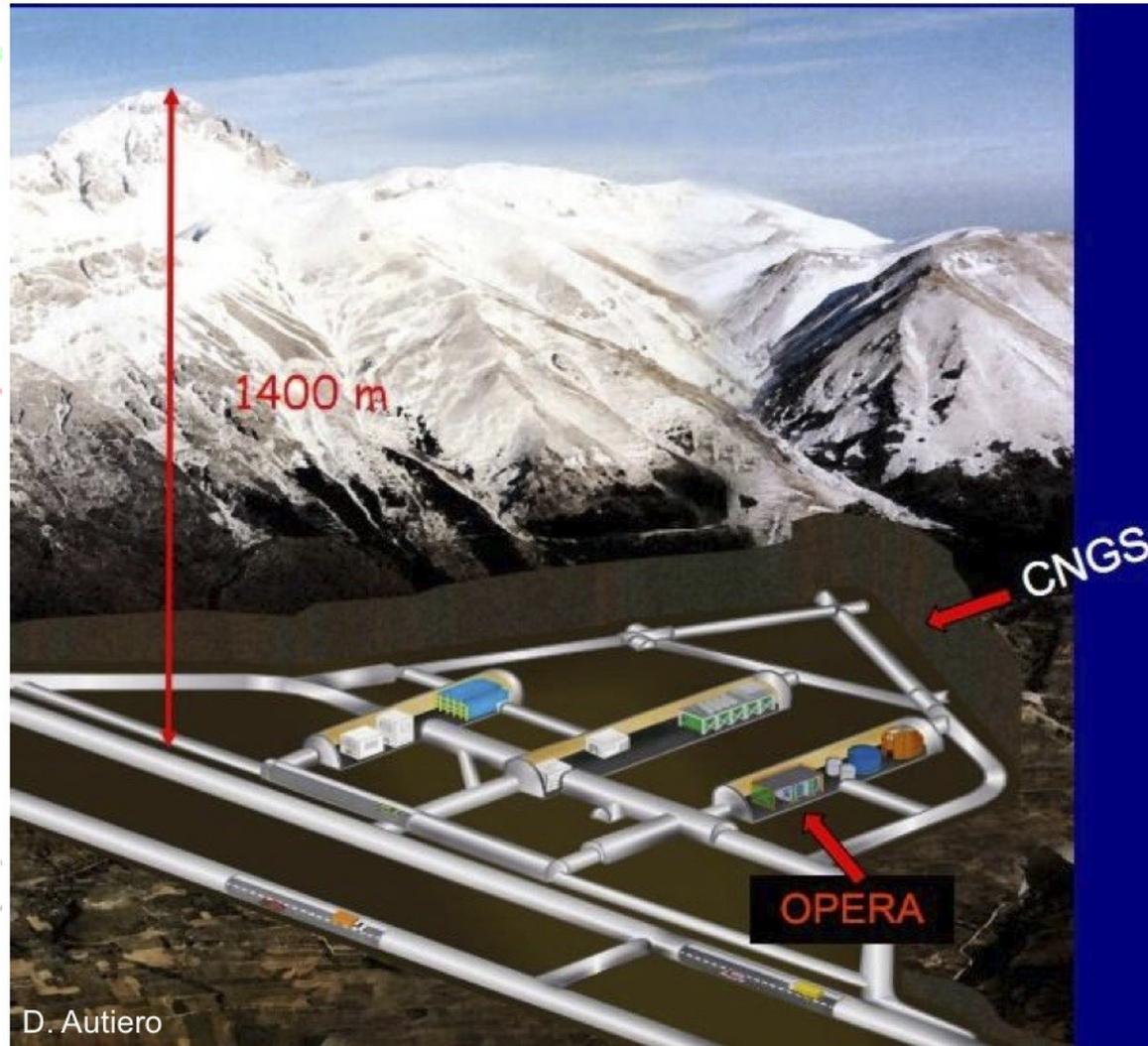


# La "partenza" vista da vicino

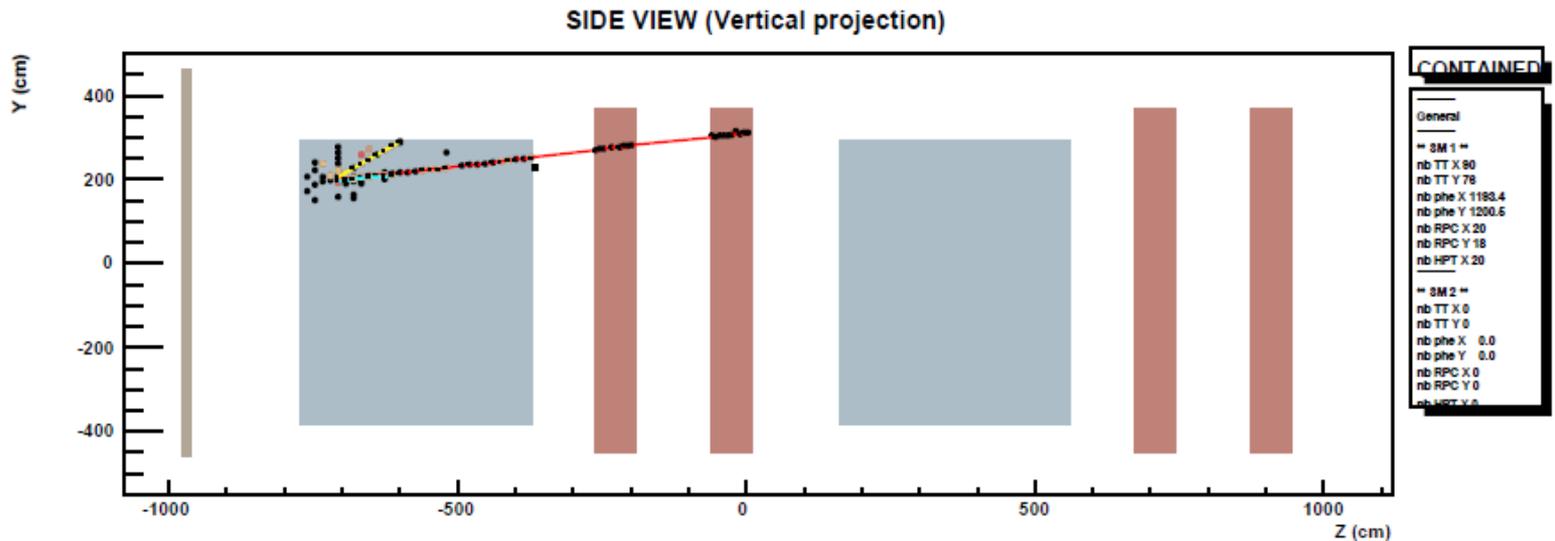
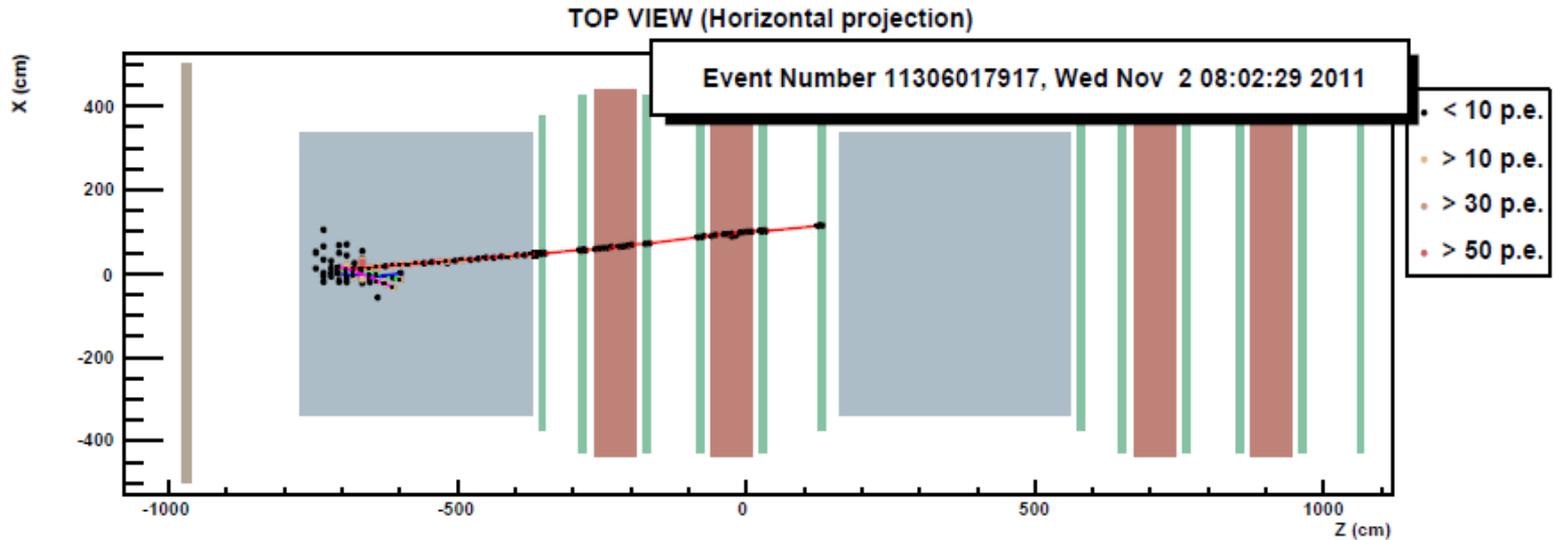


# L'arrivo al Gran Sasso

Qui il fascio è largo circa 600 m



# Un neutrino "visto" al display



# Misura della distanza

- ◆ Misura composta da diverse parti:
  - Distanza tra le due antenne GPS
  - Distanza tra l'antenna al CERN e il punto di produzione
  - Distanza tra l'antenna ai LNGS e il punto di interazione

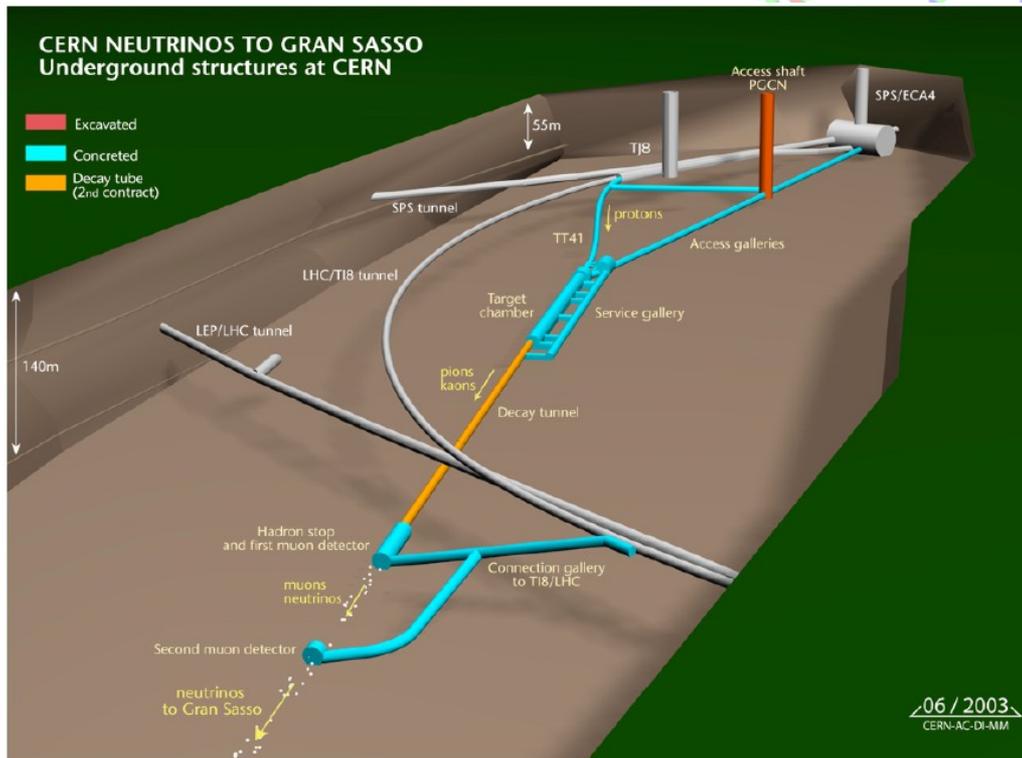
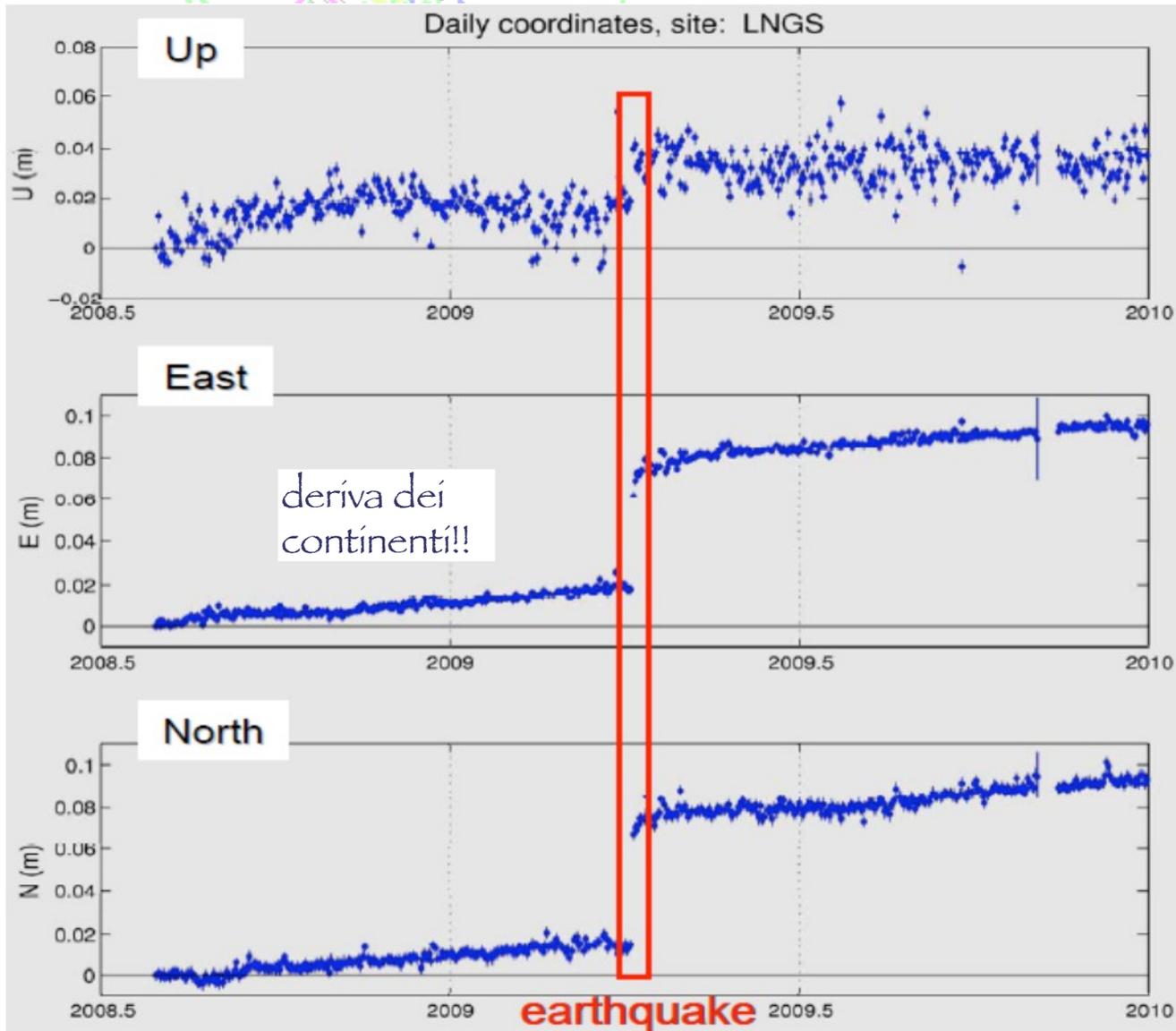


Fig. 1: Artistic view of the SPS/CNGS layout.

Distanza misurata:

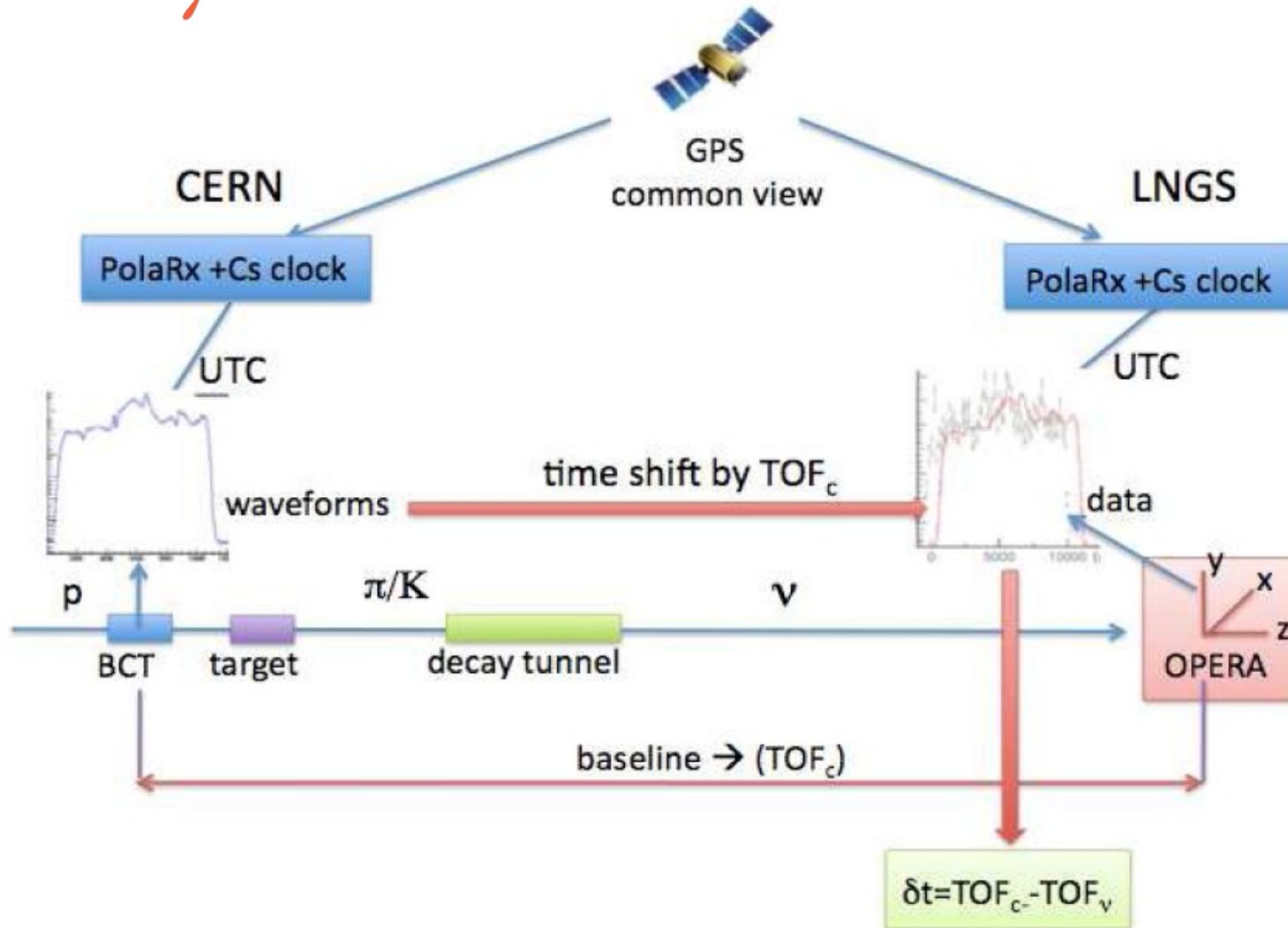
$731278.0 \pm 0.2$  m

# LNGS position monitoring



La  
precisione  
è tale da  
essere  
sensibile  
alla deriva  
dei  
continenti e  
ovviamente  
ai terremoti!

# Schema della misura di tempo di volo dei neutrini



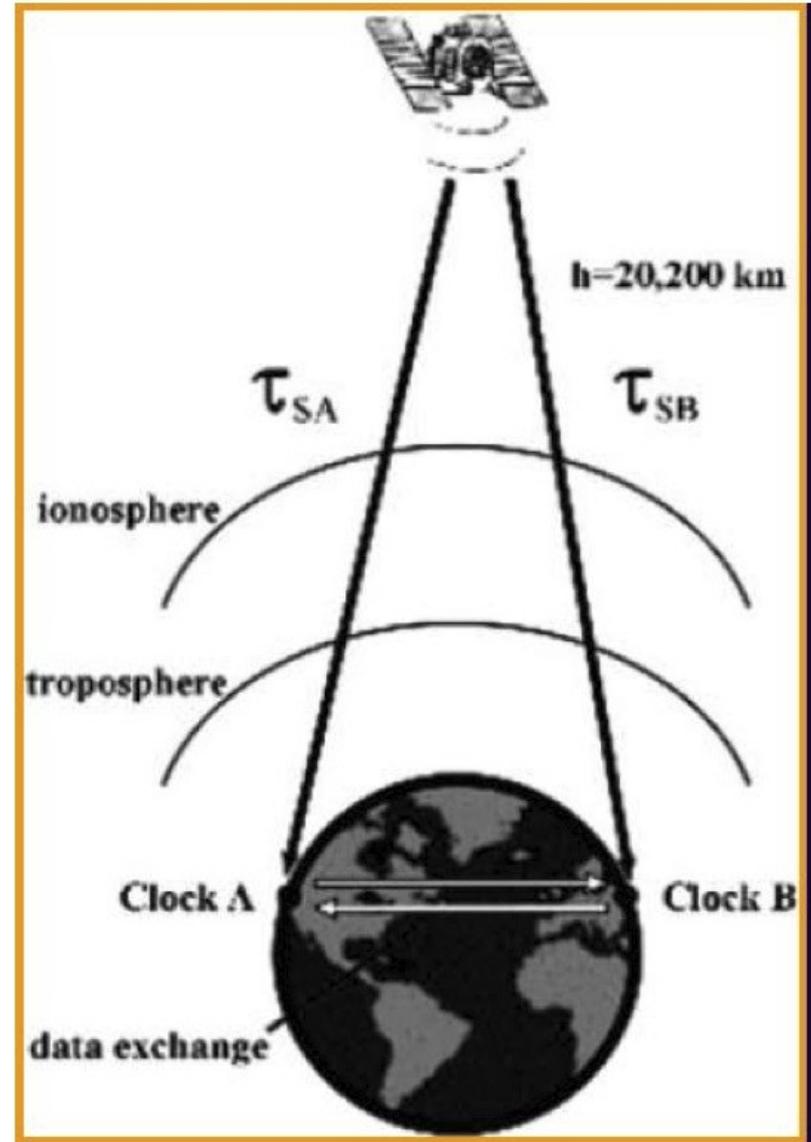
# Misura dei tempi

Uso del GPS in "common view":

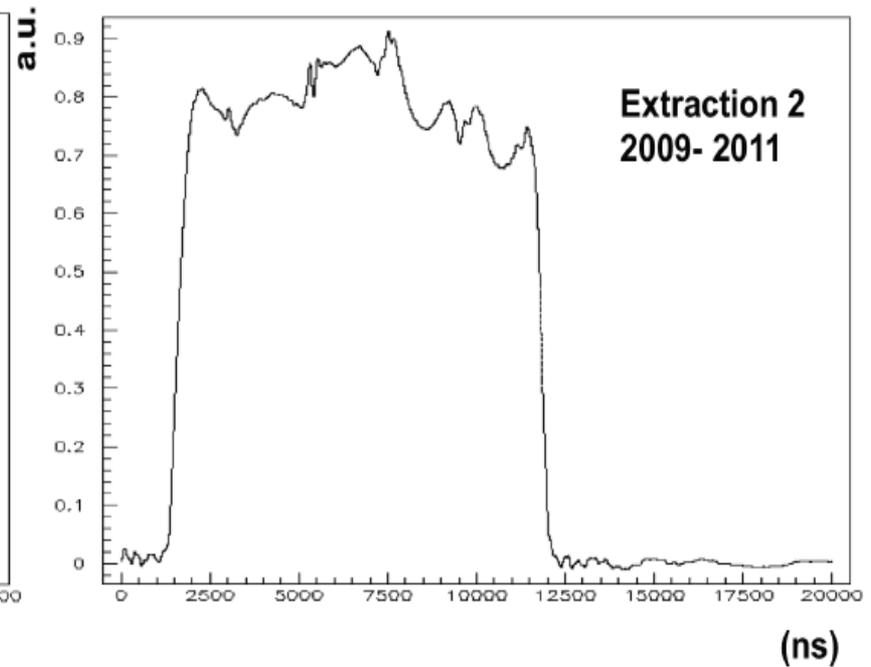
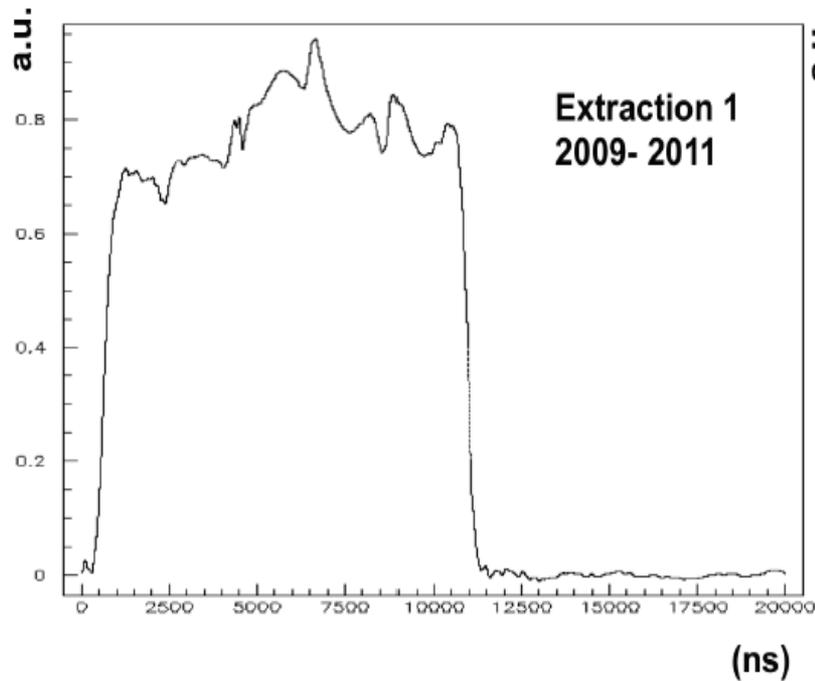
- ◆ Un tipico GPS usa 4 satelliti per determinare le 4 coordinate  $(x, y, z, t)$

- ◆ Se invece le posizioni degli orologi sono già note (da misure precedenti) basta un solo satellite

- ◆ Misura più precisa, che consente di ottenere una precisione del ns

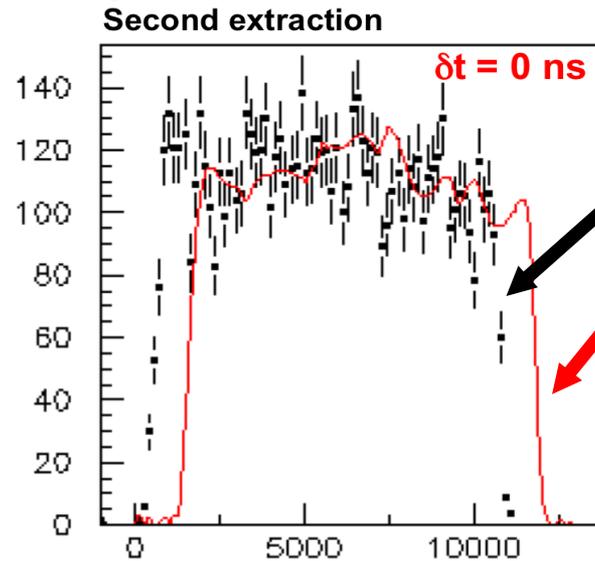
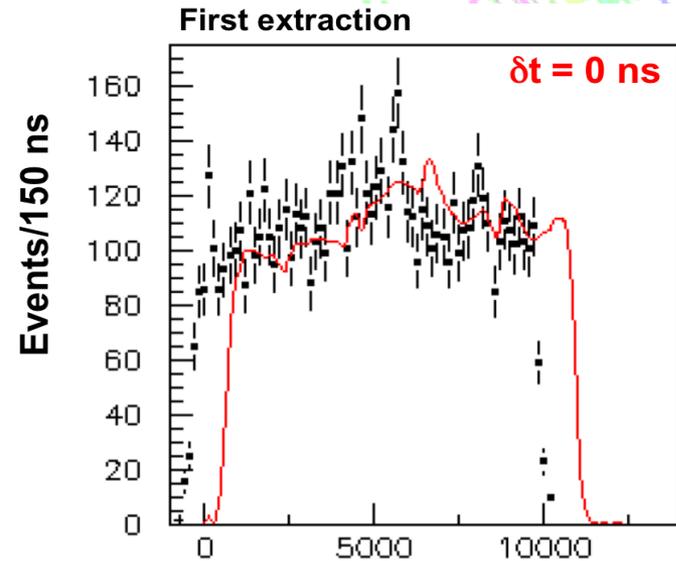


# *I genitori dei neutrini...*



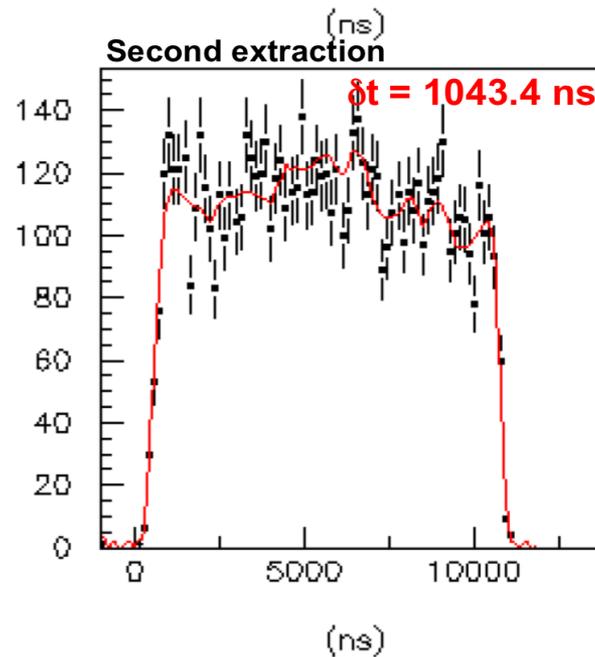
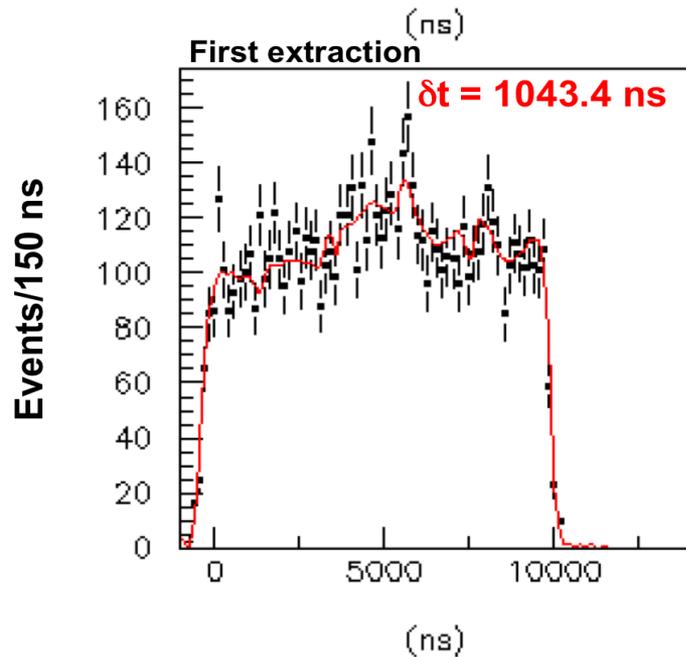
Queste sono due “foto” dei protoni prima di collidere con il bersaglio e quindi generare i neutrini.  
Sono queste foto che danno lo “start” ai cronometri ...

# Come si misura il tempo di volo?



tempi di arrivo  
dei neutrini

tempi di arrivo  
assumendo la  
distribuzione di  
partenza dei protoni  
e la velocità della  
luce nel percorso



La differenza tra il  
tempo di volo della  
luce e dei neutrini si  
ottiene dal confronto  
delle due  
distribuzioni  
temporali

# Come si misura il tempo di volo?

Ma allora i neutrini arrivano prima della luce di ben 1043.4 ns?  
NO! Nel calcolo si deve tenere conto dei ritardi dovuti alle varie fasi del processo e di varie calibrazioni dell'apparato che misura il tempo:

	Blind analysis (ns) 2006	Final analysis (ns) 2011	Correction (ns)
Baseline	2440079.6	2439280.9	
Earth rotation		2.2	
Correction baseline			-796.5
<b>CNGS delays:</b>			
UTC calibration	10092.2	10085.0	
Correction UTC			-7.2
WFD	0	30	
Correction WFD			30
BCT	0	-580	
Correction BCT			-580
<b>OPERA Delays:</b>			
TT response	0	59.6	
FPGA	0	-24.5	
DAQ clock	-4245.2	-4262.9	
Correction OPERA			17.4
<b>GPS Corrections:</b>			
Synchronisation	-353	0	
Time-link	0	-2.3	
Correction GPS			350.7
<b>Total correction</b>			<b>-985.6</b>

La somma di tutte le correzioni è di ben 985.6 ns!

E si assume di conoscerle con un errore di soli ~9 ns!

Quindi:  
 $1043.4 - 985.6 = 57.8$  ns

# Risultato finale

- Alla fine si ottiene:

$$\delta t = (57.8 \pm 7.8 \text{ (stat.)}_{-5.9}^{+8.3} \text{ (sys.)}) \text{ ns}$$

- In termini di velocità relativa rispetto alla velocità della luce:

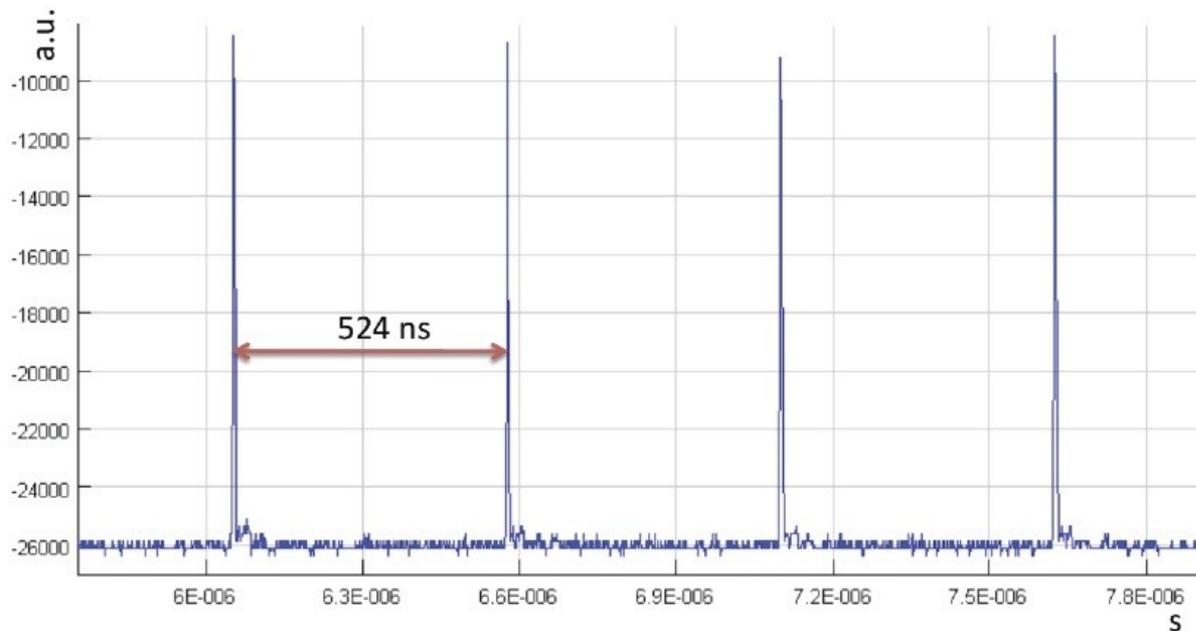
$$(v - c)/c = (2.37 \pm 0.32 \text{ (stat.)}_{-0.24}^{+0.34} \text{ (sys.)}) \times 10^{-5}$$

- È un risultato (statisticamente) MOLTO significativo:  
→  $6.2 \sigma$  come a dire: è praticamente impossibile che sia un risultato generato dal caso!

# Ulteriori checks

- E se il problema fosse nell'analisi statistica dei dati?

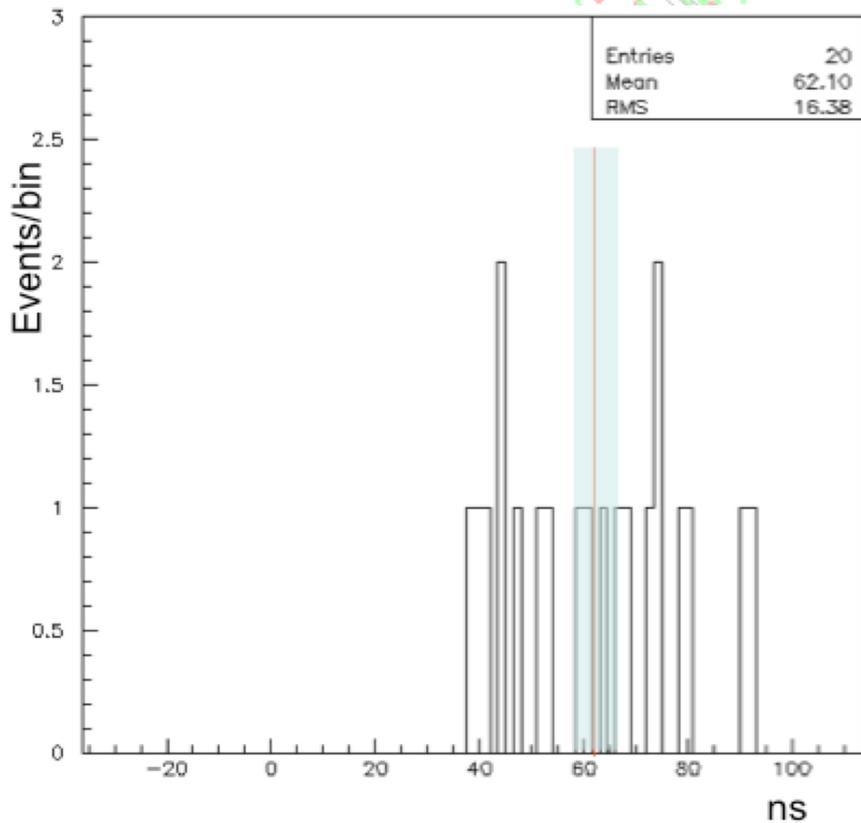
NUOVO TIPO di FASCIO



Ora sappiamo perfettamente QUANDO è partito il SINGOLO neutrino !

# Ulteriori checks: risultati

- I risultati confermano perfettamente, e con maggior precisione, quanto ottenuto con l'analisi statistica:



$$\delta t = (62.1 \pm 3.7) \text{ ns}$$

# Ultimissime Novità

Comunicato del Direttore Generale del CERN, 23/02/2012:

The OPERA collaboration has informed its funding agencies and host laboratories that it has identified two possible effects that could have an influence on its neutrino timing measurement. These both require further tests with a short pulsed beam. If confirmed, one would increase the size of the measured effect, the other would diminish it. The first possible effect concerns an oscillator used to provide the time stamps for GPS synchronizations. It could have led to an overestimate of the neutrino's time of flight. The second concerns the optical fibre connector that brings the external GPS signal to the OPERA master clock, which may not have been functioning correctly when the measurements were taken. If this is the case, it could have led to an underestimate of the time of flight of the neutrinos. The potential extent of these two effects is being studied by the OPERA collaboration. New measurements with short pulsed beams are scheduled for May.

# Cosa si impara da questa lezione?

- Non esistono risultati scientifici che non possano essere invalidati, “Provando e Riprovando...”
- ...Ma una teoria può essere rigettata o estesa solamente quando ci sono delle prove sufficienti, provenienti da esperimenti diversi, in condizioni note e riproducibili
- La capacità critica non deve mai essere inibita dalla speranza di un risultato nuovo o dalla soggezione nei confronti di una teoria consolidata

Il Metodo Galileiano ha dato prova ancora una volta di essere lo strumento adeguato per affrontare lo studio della Natura

# Prossimo futuro, già previsto prima dell'ultima "scoperta"

- *Ulteriori test* da parte della stessa Collaborazione OPERA, ad esempio usando nuovi rivelatori
- *Stesso test da parte di altri esperimenti dei LNGS* (usando dunque sempre neutrini del CNGS).
- Test simile con un altro fascio ed un altro rivelatore, ad esempio MINOS negli USA o T2K in Giappone.
- Test provenienti da altri ambiti: esempio con i "raggi cosmici".
- Se questi test dovessero confermare la misura, si aprirà una nuova fase, immaginando anche potenziali ripensamenti nella "road map" da parte della comunità scientifica.

## ...Ma se fosse vero?

- Al momento non abbiamo idea di quale possa essere l'interpretazione di un simile fenomeno ... o forse di idee ce ne sono fin troppe !
- È un fenomeno che dipende dall'energia?
  - ◆ Bisogna spiegare anche il risultato della Supernova
- È un fenomeno che dipende dal materiale attraversato?
  - ◆ Vuoto vs crosta terrestre ...
- È davvero una violazione della relatività ristretta, oppure ci sono altre spiegazioni?
  - ◆ “Extra-dimensions” sono la moda del momento
- Ci sono altre dipendenze? Ad esempio dal moto orbitale terrestre?

# Conclusioni

Il lavoro del **fisico delle particelle** è una avventura affascinante che punta alla conoscenza dei principi che regolano il mondo che ci circonda.

Anche se non è motivata direttamente dall'applicazione tecnologica, la fisica di base ha modificato la vita di tutti i giorni (medicina: dalla radiografia, alla radioterapia, alla radiazione di sincrotrone, adroterapia, PET,...). Questa ricerca ha una forte ricaduta economica sulle industrie a elevata tecnologia (superconduttori, computer).

**LHC ha aperto un nuovo capitolo di questa avventura: molte pagine saranno scritte da voi!!**