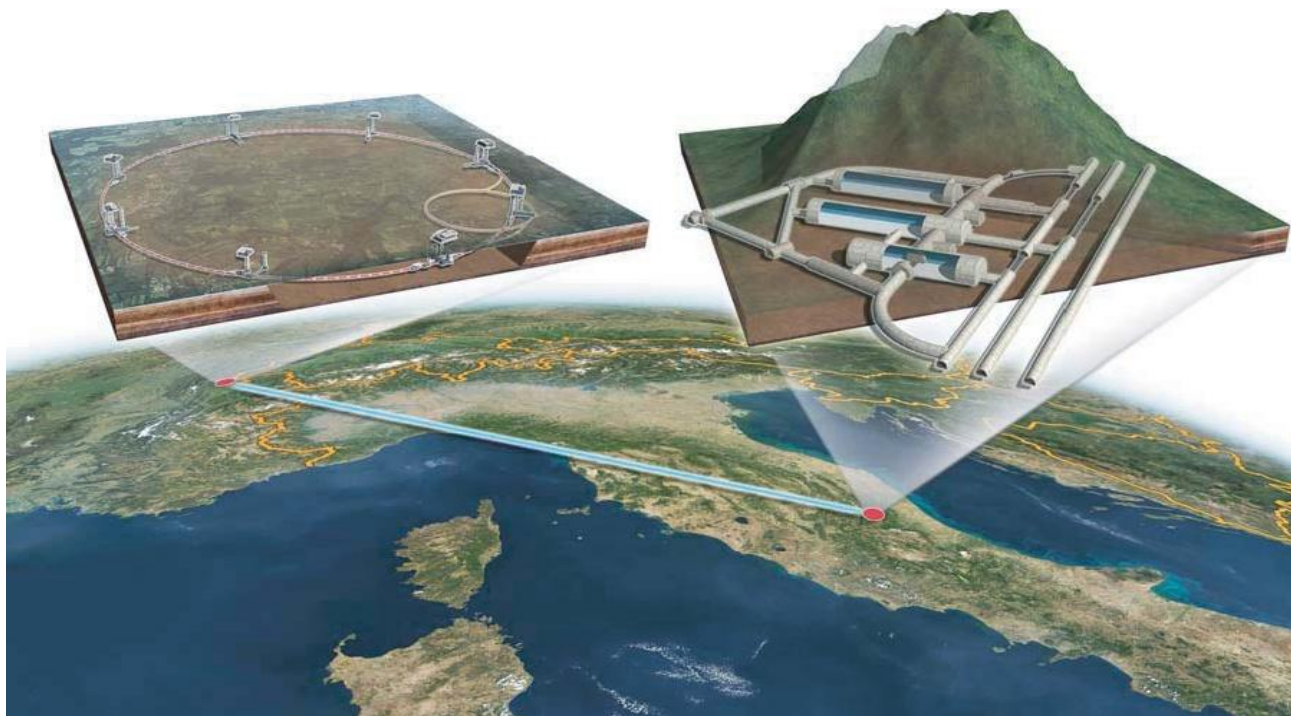


*all'origine dell'Universo:*

*dall'infinitamente piccolo all'infinitamente grande*



Alberto Guglielmi

Vicenza, 8 Febbraio 2017

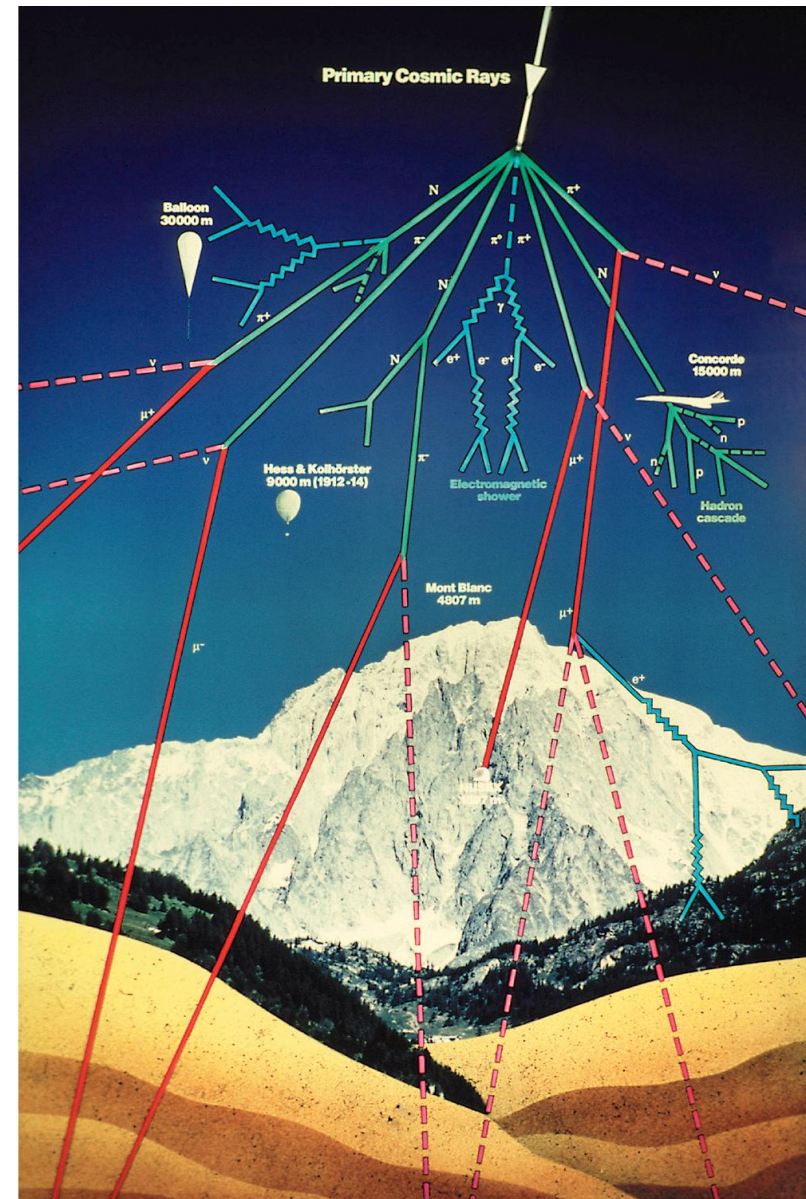
# *L'Uomo studia l'Universo*

- *da sempre l'uomo ha rivolto lo sguardo affascinato alle stelle quali " markers" dell'Universo: quanto e' grande l'Universo, come e' fatto e da dove veniamo?*
- *dall'osservazione tradizionale come percezione delle stelle ad occhio nudo alla rivelazione dei segnali luminosi di natura elettromagnetica nel visibile con strumenti ottici (cannocchiale, telescopio,...)*
- *atmosfera: barriera di protezione da*
  - *radiazioni elettromagnetiche*
  - *nuclei atomici, particelle subnucleari*
- *Oltre l'atmosfera: satelliti artificiali danno accesso ad altre sorgenti di informazioni che rivelano dettagli profondi dell'Universo, che parlano della sua origine e "funzionamento"*
  - *astronomia raggi X*
  - *ad energie sempre piu' elevate*
  - astronomia gamma*

*la temperatura media dell'Universo e' -270 C*  
*la sua eta' e' 13.8 miliardi di anni*  
*il suo diametro e'  $10^{27}$  metri (93 miliardi di anni luce)*

# *i raggi cosmici*

- *V. Hess (1912) dimostra, con un volo in pallone, che la radioattività ambientale aumenta con l'altezza*
- *il pianeta e' investito, continuamente, da una varieta' di particelle, i raggi cosmici primari, che hanno origine in processi solari, esplosioni di SuperNovae ed eventi galattici:*
  - *protoni (90 %), atomi di He ma anche Fe.. U*
  - *radiazioni elettromagnetiche*
- *l'interazione dei raggi primari (assorbimento) con l'atmosfera comporta la produzione di una cascata di altre particelle che*
  - *in parte si arresta e in parte*
  - *continua il proprio cammino fino al suolo, penetrandolo e attraversando il pianeta*



*alla superficie: 100 particelle/m<sup>2</sup>/s: nucleoni, nuclei,  $\gamma$ , mesoni  $\pi^\pm$   $\pi^0$   $K^\pm$  ..., leptoni carichi  $e^\pm$   $\mu^\pm$   $\tau^\pm$  e i neutrini  $\nu_e$   $\nu_\mu$   $\nu_\tau$*



## *ma di che cosa e' fatto il mondo ??*

- *Democrito nel IV sec AC ipotizza che la materia sia fatta da "atomi indivisibili" dotati di dimensioni, forma e peso diversi e da vuoto tra essi... tutte le proprietà che sperimentiamo sarebbero dovute alle interazioni fra essi.*
- *in pratica Democrito ha stabilito il concetto di "particella elementare", l'ingrediente alla base del tutto...*
- *Ma per rispondere alla domanda **ma di che cosa e' fatto il mondo ??** dobbiamo trovare i costituenti ultimi della materia e capire come interagiscono per creare l'incredibile varietà che osserviamo*
- *Scopriremo che le possibili interazioni fra le particelle sono dovute alla propagazione di forze dovute allo "scambio" di altre particelle, mediatori dell'interazione...*
- *un salto logico piuttosto forte rispetto al modo di percepire le forze a noi note con l'esperienza quotidiana...*
- *lo scambio di questi mediatori e' governato da leggi fondamentali che dobbiamo comprendere per capire di che cosa e' fatto il mondo... e quindi da dove ha origine!*

***Ci servono alcuni strumenti fondamentali che sono stati sviluppati nel corso del '900***

## All' inizio del '900 per descrivere il micro/macro Cosmo:

- *la meccanica classica di Galileo e Newton* :  $F = ma$ ,  $d^2x/dt^2 - F/m = 0$   
spazio e tempo assoluti rispetto all'osservatore, princ. di relativita' galileiana;
- *la forza di gravita' permette di descrivere il moto dei pianeti;*
- *l' interazione elettrica e magnetica unificate nel 1865 nelle 4 eq. di Maxwell  
tramite il concetto di campo e interazione mediata da onde elettromagnetiche;*
- *1905 A. Einstein formula la Relativita' Speciale: estende la meccanica  
classica per descrivere la dinamica delle particelle a velocita' ~ quella della luce:  
 $c \sim 300000$  km/s, limite invalicabile in natura (neutrini superluminali ? No !):*
  - *nasce cosi' lo spazio-tempo a 4 dimensioni; spazio e tempo non sono piu'  
assoluti: dilatazione del tempo e contrazione delle lunghezze;*
  - *massa particella "relativistica" in moto:  $m = m_0/\sqrt{1 - (v/c)^2} > m_0$  a riposo;*
  - *$E = mc^2$ : equivalenza massa - energia  $\gamma \rightarrow e^+ e^-$   
la materia nasce dall'energia, la materia e' un serbatoio di energia!*

# La rivoluzione quantistica: la concezione probabilistica

- *Nuovi fatti sperimentali scardinano il quadro classico... Progressi teorici e sperimentali dell'inizio del XX sec avviano una profonda rivoluzione:*
  - *J.J. Thompson scopre l'elettrone (1897), E. Rutherford (1911) svela la struttura dell'atomo: nucleo atomico piccolissimo positivo, circondato da  $e^-$*
  - *M. Planck introduce il concetto di "quanto" elementare di energia:  $E = n h \nu$  (1900)  $\hbar = 1,0551 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s.}$ , N. Bohr L. De Broglie descrivono l'atomo;*
  - *A. Einstein spiega l'effetto fotoelettrico con quanti di luce (fotoni);*
  - *Formulazione della Meccanica Quantistica: nascita di un nuovo ente, ne' onda ne' corpuscolo, descritto da una funzione d'onda  $\Psi(x, t)$ :*
    - ✓ *Concetto probabilistico della nuova meccanica non piu' deterministica  $P = |\Psi|^2$  e principio di indeterminazione di Heisenberg  $\Delta p \Delta x > h/2\pi$ ;*
    - ✓ *Equazione di Shroedinger : descrive l'evoluzione della funzione d'onda  $\hbar^2/2m \partial^2 \Psi / \partial x^2 + V \Psi - i \hbar \partial \Psi / \partial t = 0$   $V(x, t)$ : potenziale esterno*

# Un nuovo mondo subnucleare si affaccia

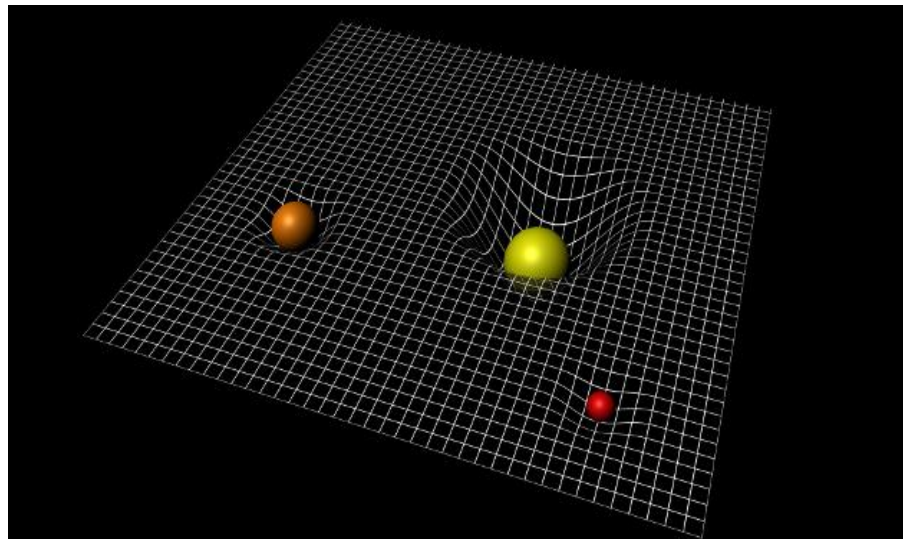
- *L'analisi delle tracce dei raggi cosmici registrate con speciali lastre di emulsioni fotografiche rivela uno zoo di nuove particelle,  $\mu$ ,  $\pi$ ,  $k$ ,...*
- *Si scoprono l'antimateria e particelle instabili che vivono frazione di miliardesimi di secondo;*
- *Equazione di Dirac  $(\gamma_\mu \partial_\mu + M) \Psi(x)=0$ : coniuga meccanica quantistica & relatività ristretta => elettrodinamica quantistica, moderna teoria di campo;*
- *Pauli nel 1930 ipotizza l'esistenza del neutrino a massa piccolissima (scoperto nel '56 da Reines e Cowan) per salvare la legge di conservazione dell'energia e del momento nei processi di decadimento  $\beta$  radioattivi;*
- *Enrico Fermi scopre come rompere il nucleo atomico liberando l'energia che tiene uniti protoni e neutroni e formula la teoria dell'interazione Debole responsabile dei decadimenti radioattivi e dell'emissione dei neutrini;*
- *Madame Wu scopre nel '56 che l'interazione debole (neutrini) non è invariante per inversione delle coordinate spaziali: distingue la destra dalla sinistra (e la particella dall'antiparticella) !*

# *un tumultuoso sviluppo intellettuale...*

- ... proprietà delle leggi di simmetria...
- *S. Glashow A. Salam S. Weimberg* unificano interaz. Elettromagnetica e Debole introducendo i "bosoni vettori"  $W^\pm Z^0$  che mediano le interazioni, scoperti poi da *C. Rubbia, S. Van der Meer* in collisioni tra p e antip all'SPS - CERN;
- *P. Higgs* propone nel 1964, lavoro inizialmente rifiutato dalla prestigiosa *Physics Letters*, un meccanismo per spiegare la massa delle particelle a partire dalla rottura di una simmetria: *come nota finale teorizza una nuova particella ...*

*Ma anche... Relatività Generale, A. Einstein: osservatore solidale con massa in moto non può distinguere l'accelerazione dovuta ad una forza esterna da quella prodotta da un campo gravitazionale*

- *Le traiettorie dei corpi celesti seguono le linee più brevi (geodetiche)*
- *Vicino a una massa lo spazio è curvo e la linea più breve non è la linea retta!*





# Ma e' lo sviluppo tecnologico che alimenta quello scientifico...

- dal microscopio ottico a quello elettronico: aumenta il potere risolutivo determinato dalla lunghezza d'onda della radiazione incidente  $\lambda = 1/\nu = h/E$ , un'alta energia corrisponde ad una piccola  $\lambda$  con cui sondare la materia
- l'indagine di strutture sempre piu' piccole, 1 fermi =  $10^{-13}$  cm, richiede quindi sonde di energia sempre maggiore e lung. d'onda sempre piu' piccola con cui penetrare la materia per capire "cosa c'e' dentro";
- Nascono/si sviluppano i moderni acceleratori di particelle... e i grandi rivelatori.

La scienza non può progredire senza il supporto di una adeguata tecnologia  
La tecnologia non può perfezionarsi senza passi avanti della scienza



la storia mostra uno sviluppo logico di questi concetti:

le due discipline procedettero a braccetto dall'invenzione della ruota ai giorni nostri.

- **Osservazione in laboratorio:** proprietà particelle elementari e leggi fondamentali che governano la natura facendo collidere fasci intensi di particelle, protoni, elettroni, ad altissima energia cercando di avvicinarci alle condizioni del Big-Bang...

**CERN di Ginevra, il laboratorio per eccellenza con il FermiLab a Chicago (USA); oltre a KEK e Jpark in Giappone, Dubna, Novosibirsk e Protvino in Russia oltre a esperimenti ai reattori nucleari che producono fasci di anti-neutrini**

- **Osservazione dei messaggeri del Big-Bang:** esperimenti in grandi laboratori sotterranei per misurare raggi cosmici di altissima energia, neutrini, ricerca di fenomeni rari quali il decadimento del protone (instabilità della materia) e la materia oscura...

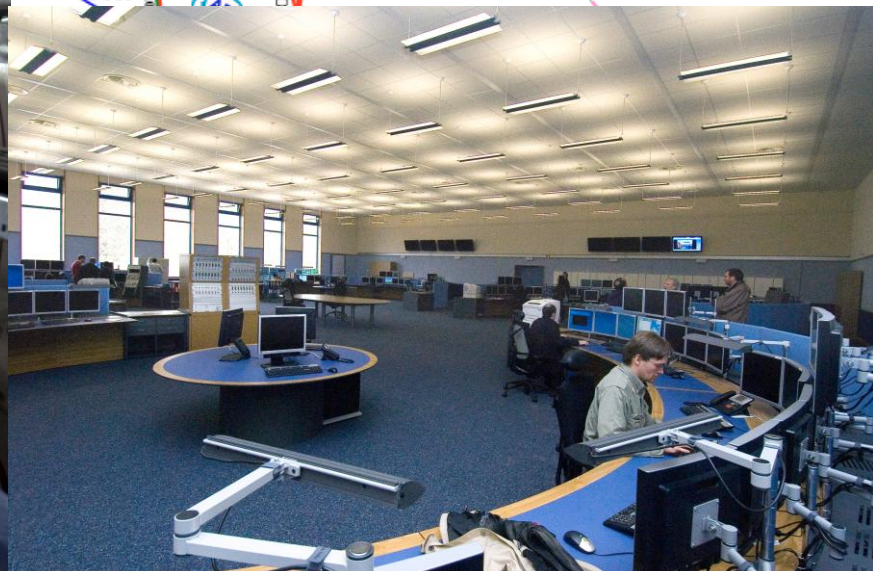
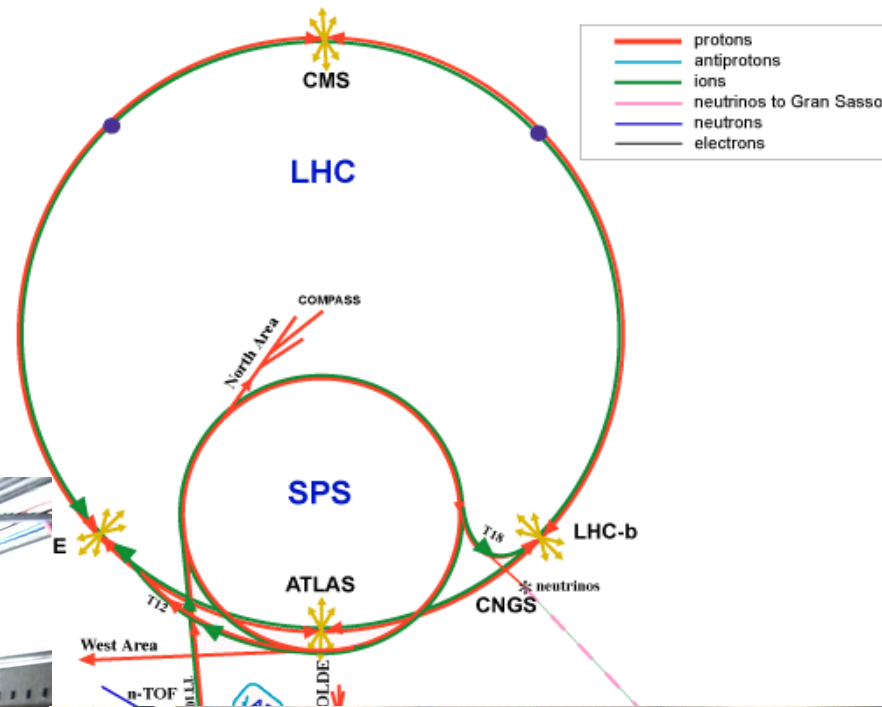
**Laboratori INFN del Gran Sasso, Kamioka in Giappone,...**

***l'evoluzione dell'infinitamente grande e' determinata dalle proprietà dell'infinitamente piccolo!***



*il CERN*

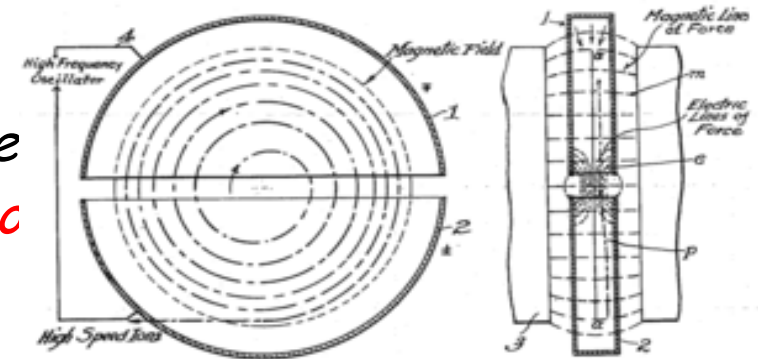
CERN Accelerators  
(not to scale)



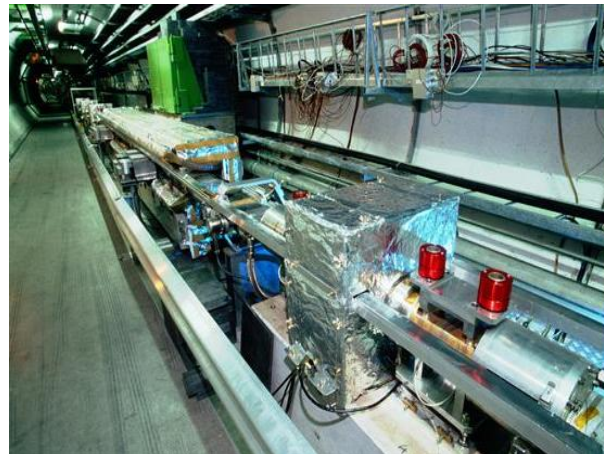


# Dal ciclotrone (1929) al sincrociclotrone, verso LHC

- Se esistono altre particelle oltre a quelle note deve essere possibile crearle con un acceleratore sufficientemente potente *in collisioni che liberino energia sufficiente ( $E=mc^2$ )*.



- 1) una particella carica viene accelerata attraversando un campo elettrico (ddp):
  - migliaia di cavità acceleranti → acceleratori lineari
  - *particelle ripassano nelle stesse cavità molte volte* → *acceleratori circolari*
- 2) servono potenti magneti per curvare le traiettorie delle particelle ,  
attenzione: cariche elettriche fatte curvare "irradiano" energia e decelerano..  
-> servono quindi macchine di grandi dimensioni (raggi di curvatura)

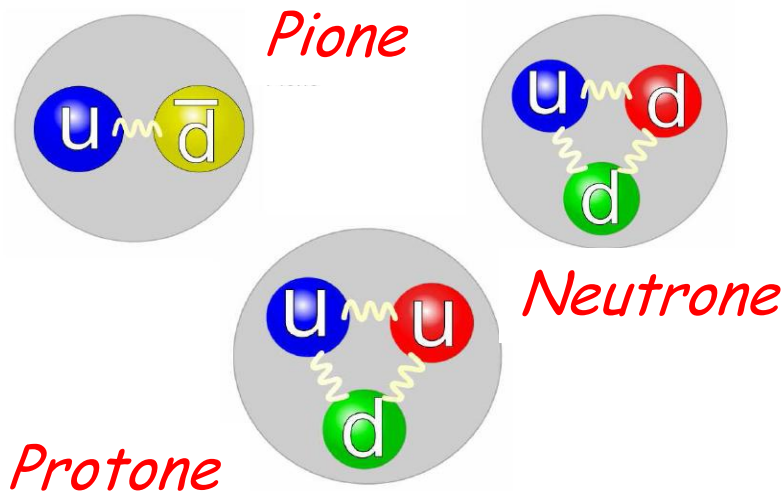


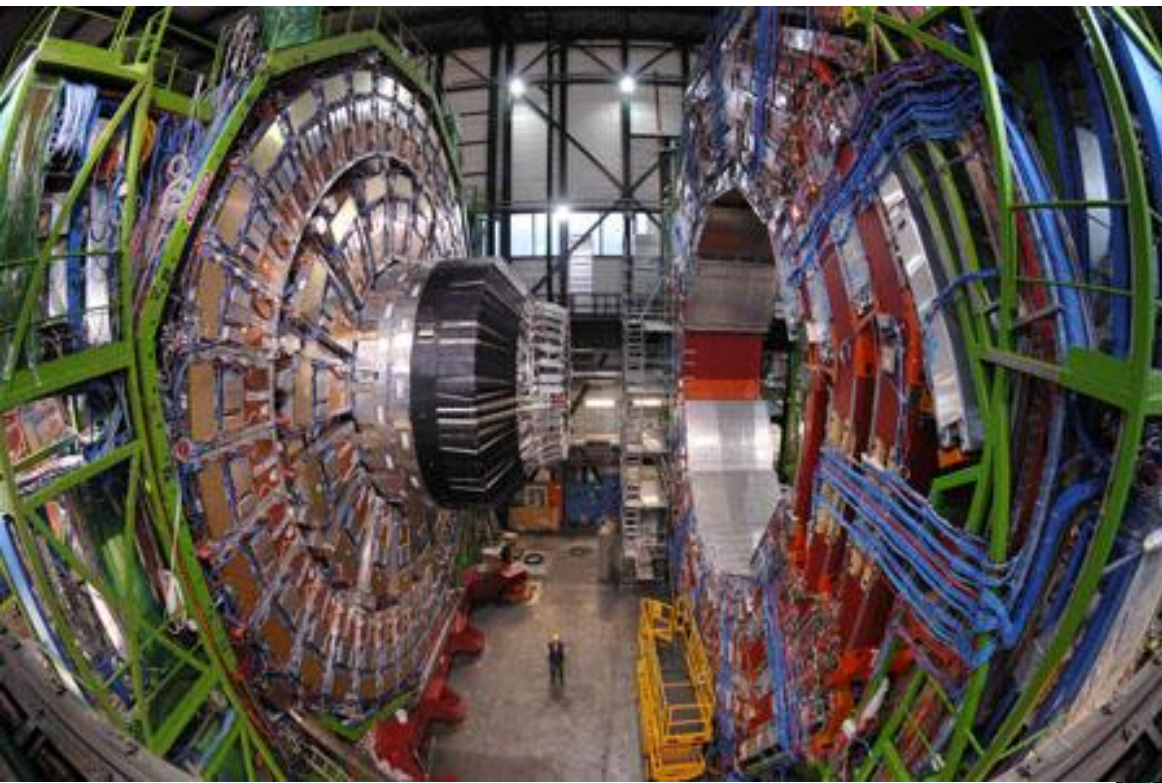
*sviluppo di superconduttori ed elettronica di controllo va di pari passo con la costruzione di macchine sempre più potenti*



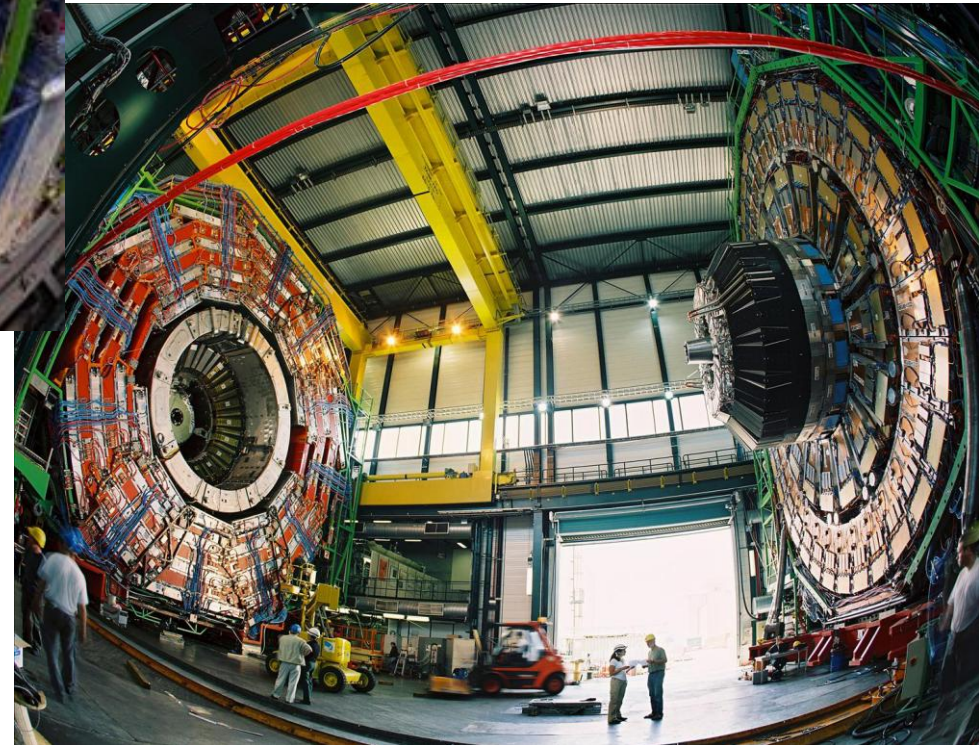
# Tante, troppe nuove particelle... quarks!

- Con l'aumentare dell'energia disponibile agli acceleratori si scopre una messe di nuove particelle oltre a protone, elettrone, neutrone, muone, neutrini;
- Particelle instabili che decadono in brevissimo tempo in altre particelle; sembrano raggruppate in famiglie di "mesoni" e "barioni" secondo caratteristiche proprie (numeri quantici): massa, spin, carica elettrica, modo di produzione e di decadimento, numero barionico, ...
- Negli anni '70 M. Gell-Mann G. Zweig concepiscono il modello a quarks: mesoni e barioni non sono altro che stati legati di **2 quarks** (mesoni) e **3 quarks** (barioni) a carica elettrica frazionata  $+2/3$   $-1/3$  ...
- Globalmente 6 quarks: *up, down, strange, charme, top, bottom* ciascuno con particolari "flavour" e con carica di colore *rosso, giallo e blu...* tenuti assieme da gluoni colorati...





*rivelatori ATLAS/CMS:  
una formidabile SFIDA  
scientifica/tecnologica!*

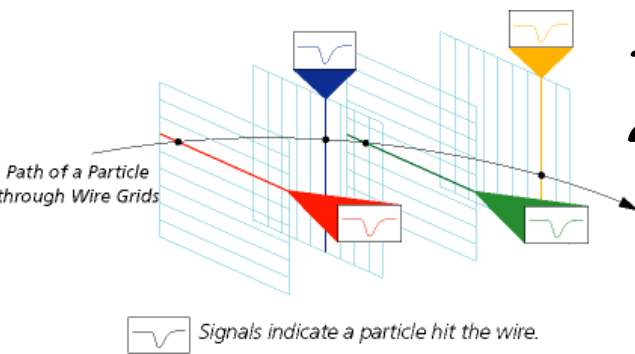


*LHC: un acceleratore di  
... SCIENZA!*

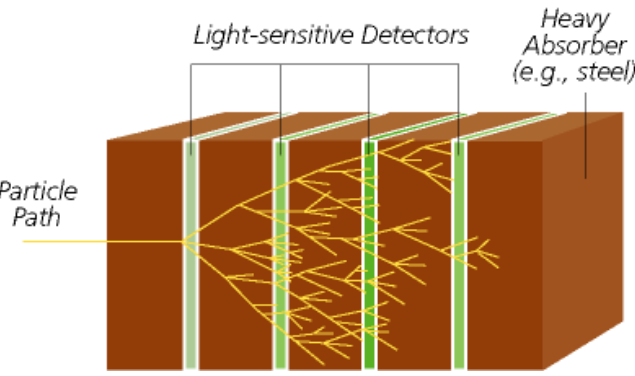
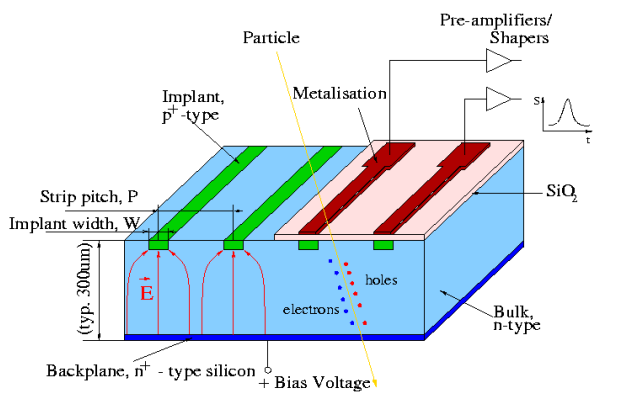
*l'evoluzione dell'infinitamente grande e' determinata  
dalle proprieta' dell'infinitamente piccolo!*



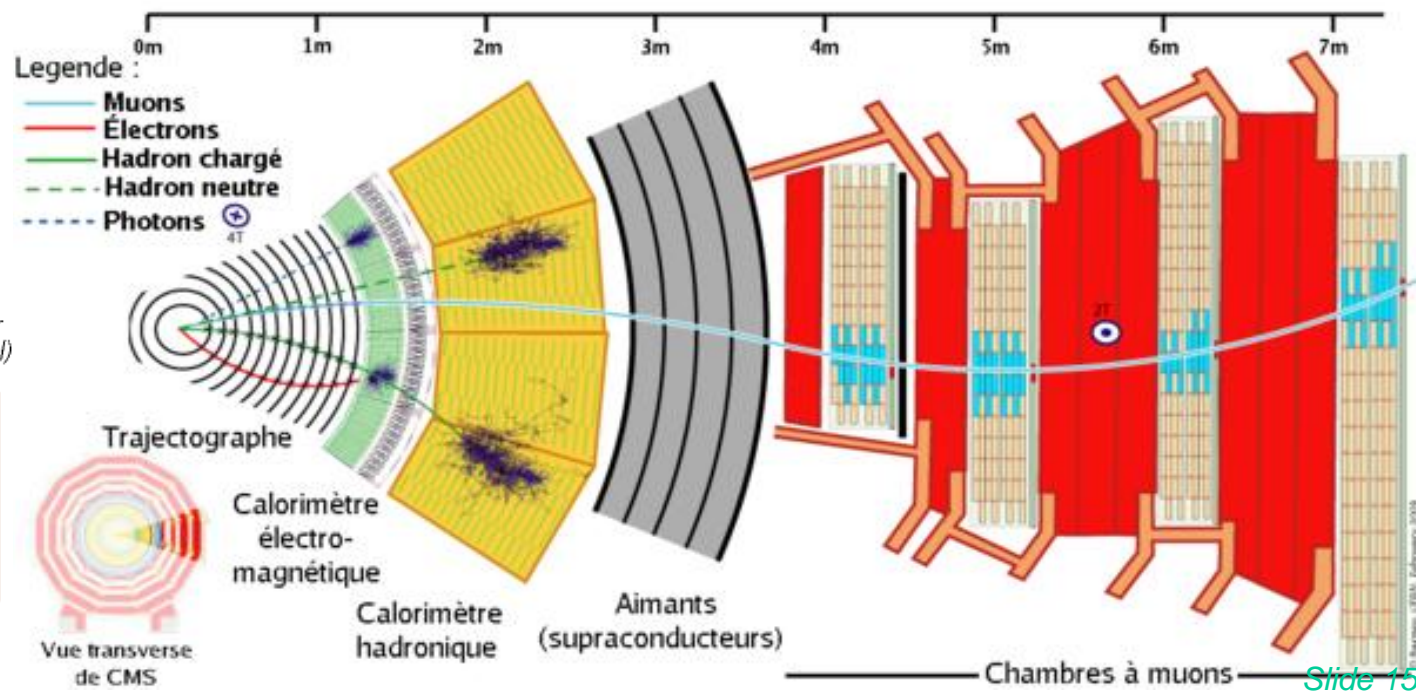
# alla ricerca del Bosone di Higgs: il rivelatore CMS



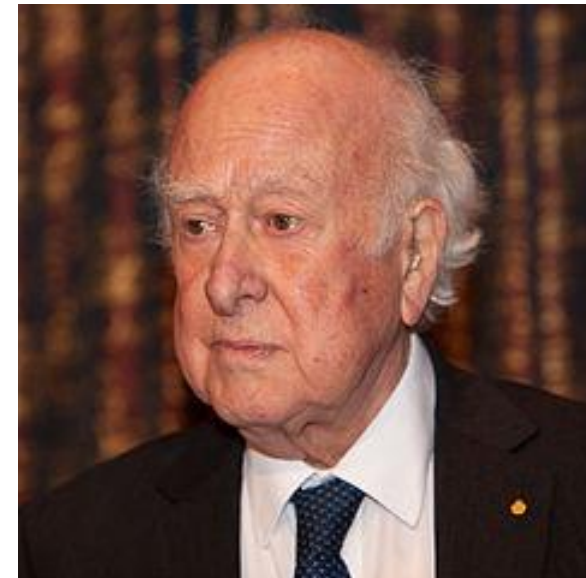
Principles of operation



1. **Tracciatori:** precisione  $\sim 100 \mu\text{m}$  su grande superficie
2. **Rivelatori al silicio:**  $\Delta x \sim 2-3 \mu\text{m}$  utilizzati nella parte centrale dei grandi detectors. La curvatura nel campo magnetico determina l'impulso delle particelle cariche
3. **Calorimetri:** lastre di piombo/ferro intervallate da materiali che "scintillano" quando sono attraversate dalle particelle => misura delle particelle neutre

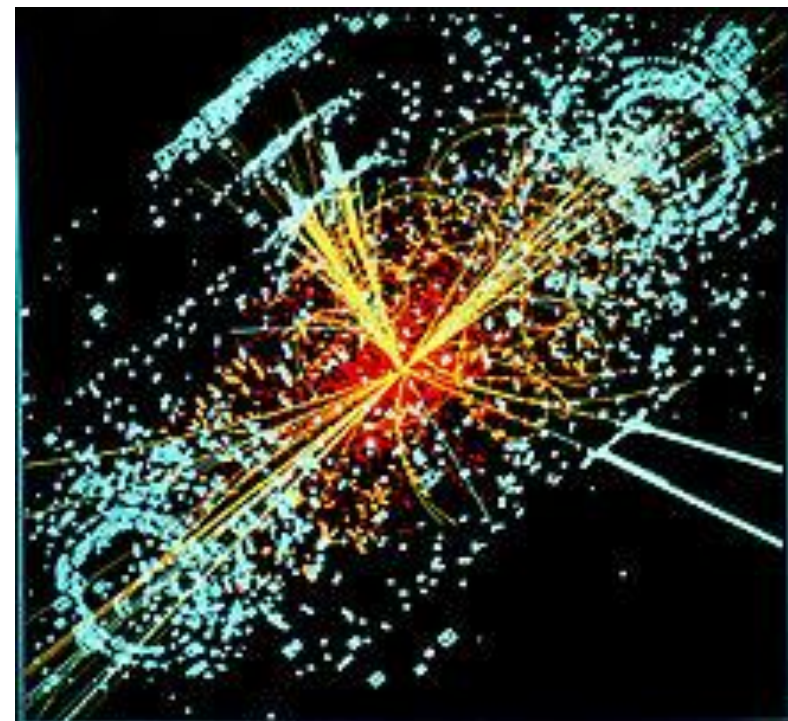
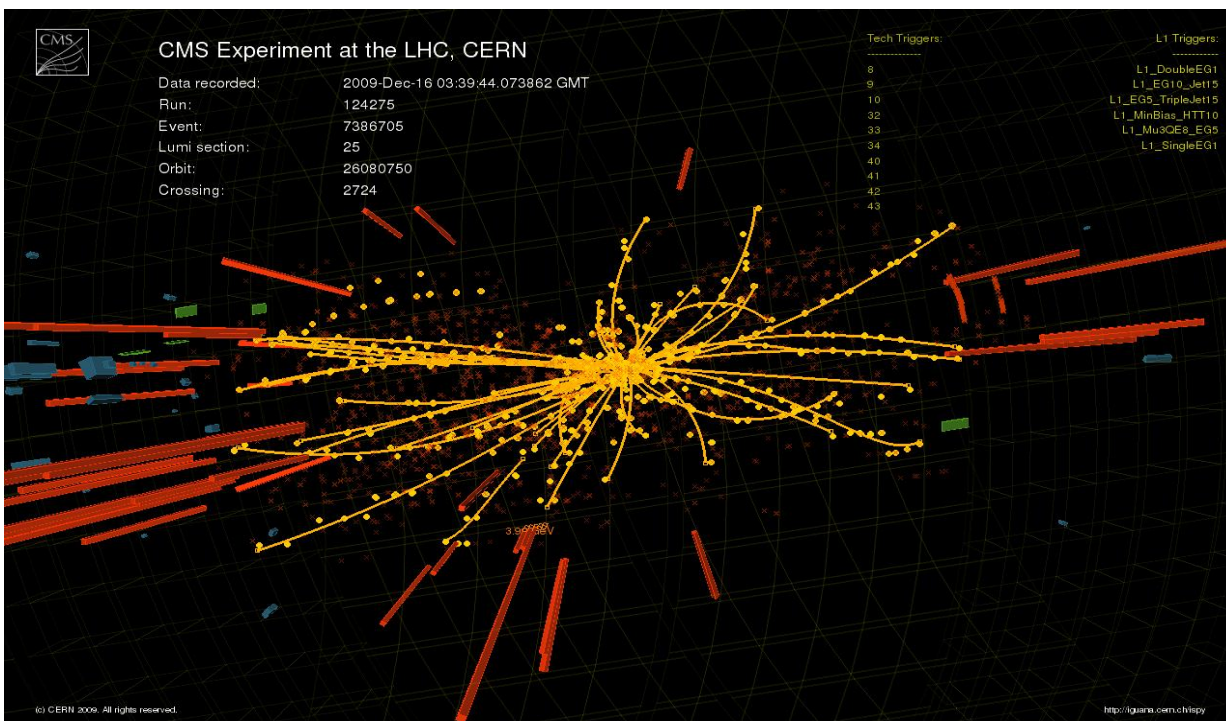


# The God particle: la particella (di) Dio



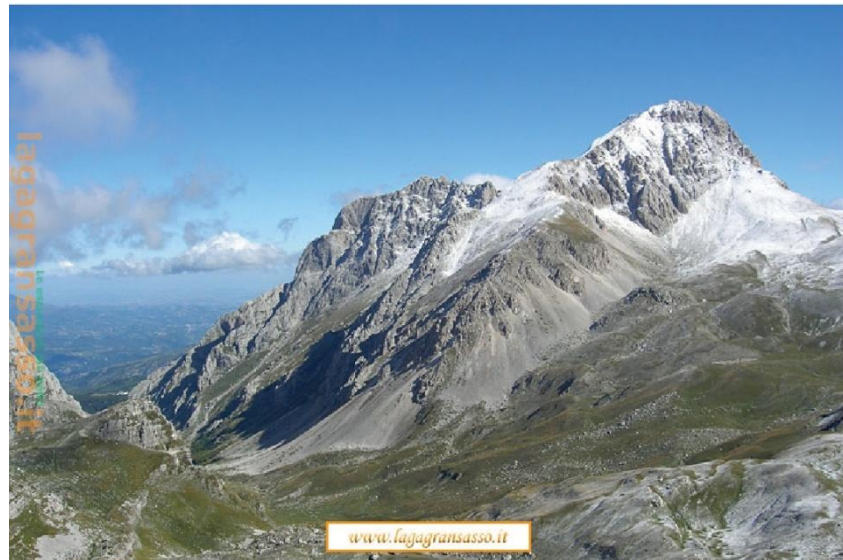
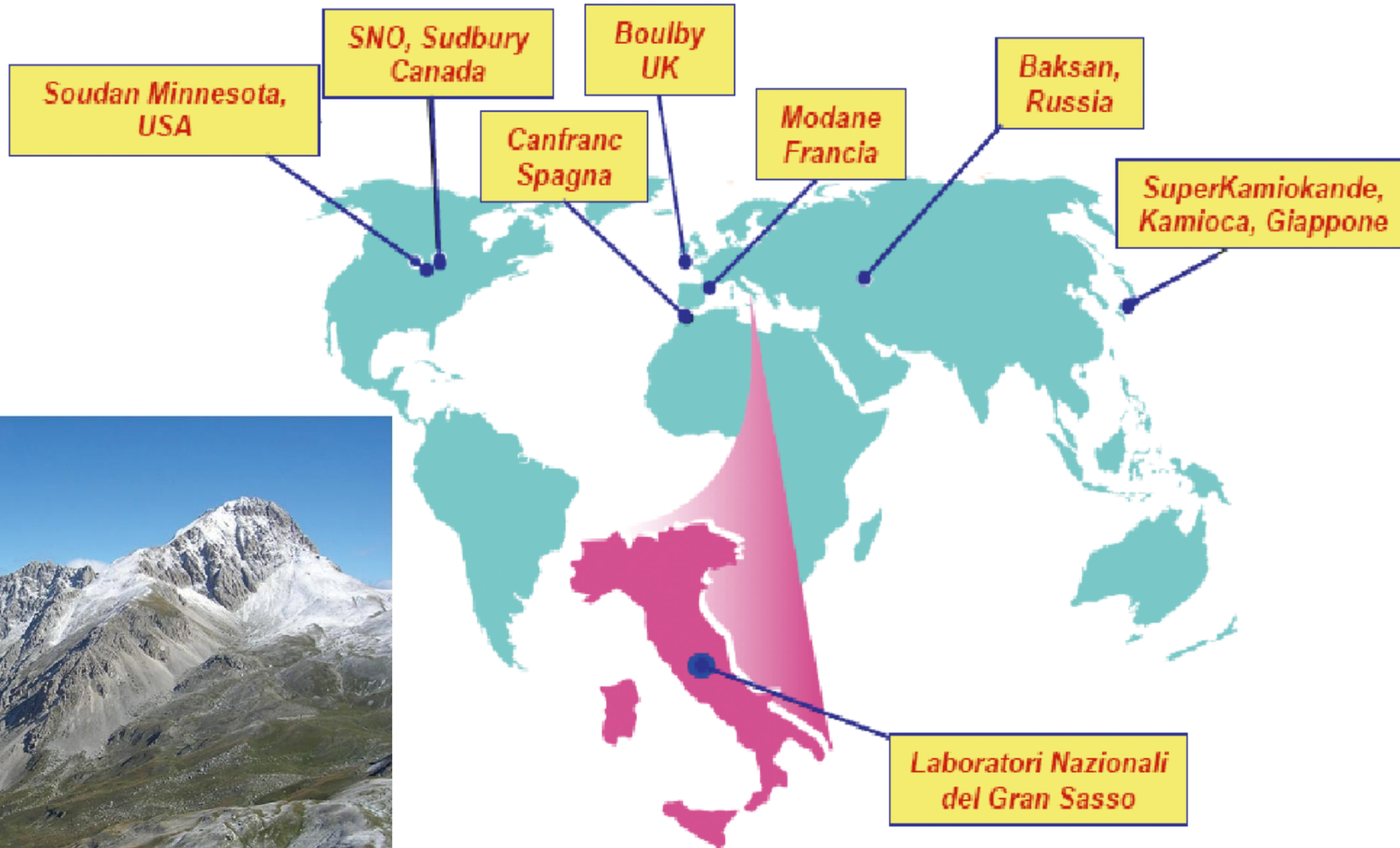
- 4 luglio 2012 F. Gianotti e G. Tonelli a capo delle Collaborazioni ATLAS e CMS annunciano al CERN la scoperta della particella di Higgs nelle collisioni di protoni ad altissima energia all'acceleratore LHC. Assiste al seminario Peter Higgs...

## eventi di collisione di 2 protoni ad altissima energia





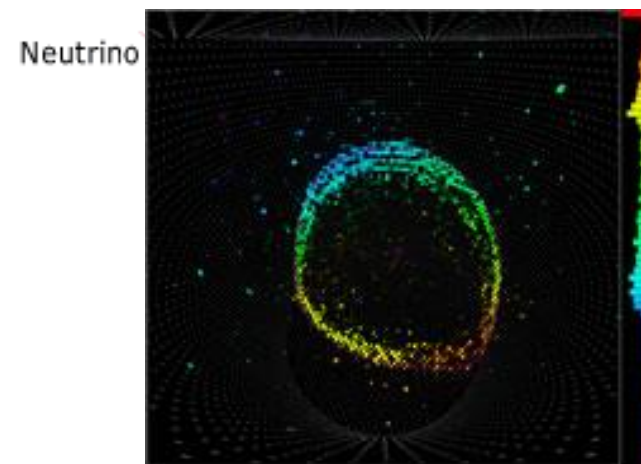
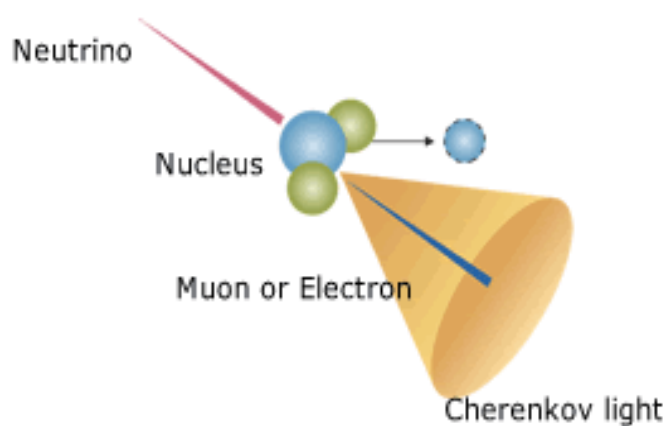
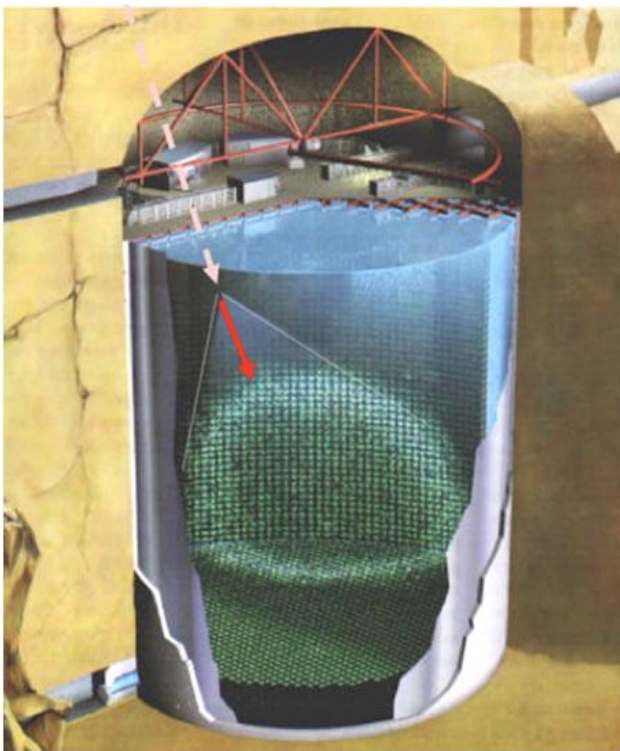
# *altro punto di forza: i laboratori underground*



[www.lagagransasso.it](http://www.lagagransasso.it)

# Superkamiokande: 50000 + di acqua

- Nella miniera di Kamioka (Japan) protetto dai raggi cosmici da 1000 m di roccia
- Rivelatore : 50 000 + acqua ultrapura, con immersi 13000 fotorivelatori che raccolgono la radiazione Cherenkov prodotta dalle particelle cariche nell'acqua



The generated charged particle emits the Cherenkov light.

- Rileva i neutrini prodotti dal Sole, dall'atmosfera terrestre, dall'esplosioni di Supernovae e dal fascio dall'acceleratore da Tokai a ~ 300 km di distanza
- Ricerca del decadimento protone e altri fenomeni rari



# *INFN: i Laboratori Nazionali del Gran Sasso*

- *1400 m di roccia riducono i raggi cosmici di un milione (x10 rispetto a Kamioka)*
- *i piu' grandi laboratori underground del mondo: 3 sale sperimentali con un volume per gli esperimenti di 180000 m<sup>3</sup>; edifici esterni.*
- *ricerca di segnali rari, neutrini dal Sole, dall'atmosfera e dal cosmo profondo, esplosioni di SuperNovae, decadimento  $\beta\beta$  dei neutrini e materia oscura*



# *magico neutrino!*

*Introdotta da Pauli per salvare le leggi di conservazione di energia e momento nei processi nucleari: banco di prova delle moderne teorie quantistiche di campo*

- *60  $10^9$ /cm<sup>2</sup>/s neutrini giungono dal Sole: siamo immersi in un "mare" di neutrini!*
  - *neutrini atmosferici: prodotti dai raggi cosmici che interagiscono con l'atmosfera*
  - *fasci di neutrini da acceleratori di particelle/ reattori nucleari*
  - *neutrini cosmici: rivelare quelli "relici" 1 s dopo Big-Bang e da allora in viaggio indisturbati... vorrebbe dire scattare la foto della nascita dell'Universo!*
- *inizialmente  $m = 0$ , poi scoperto che hanno massa piccolissima  $< 1$  milionesimo dell'elettrone - la particella piu' leggera!*
- *data la loro abbondanza il valore infinitesimo della massa e' cruciale per evoluzione dell'Universo... Dark Matter?*
- *Interagisce molto raramente con la materia: necessari rivelatori-bersaglio enormi (~1000 ton) installati in laboratori underground protetti dal bombardamento dei raggi cosmici...*

*l'evoluzione dell'infinitamente grande e' determinata dalle proprieta' dell'infinitamente piccolo!*



# Il neutrino oscilla! (B. Pontecorvo, '50)

- Elettricamente neutro, possiede "cariche deboli", si presenta in 3 flavors distinti  $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$  associati a  $e^- \mu^- \tau^-$  che differiscono minimissimamente in massa
- Un neutrino si presenta come una "miscela quantistica" di  $\nu_e \nu_\mu \nu_\tau$ : **puo' oscillare cioe' trasformarsi spontaneamente da un flavor all'altro** su distanze  $L \sim$  migliaia di km con una probabilita'

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) = \sin^2 2\theta \sin^2(\Delta m^2 L/E)$$

$E$ : energia neutrini

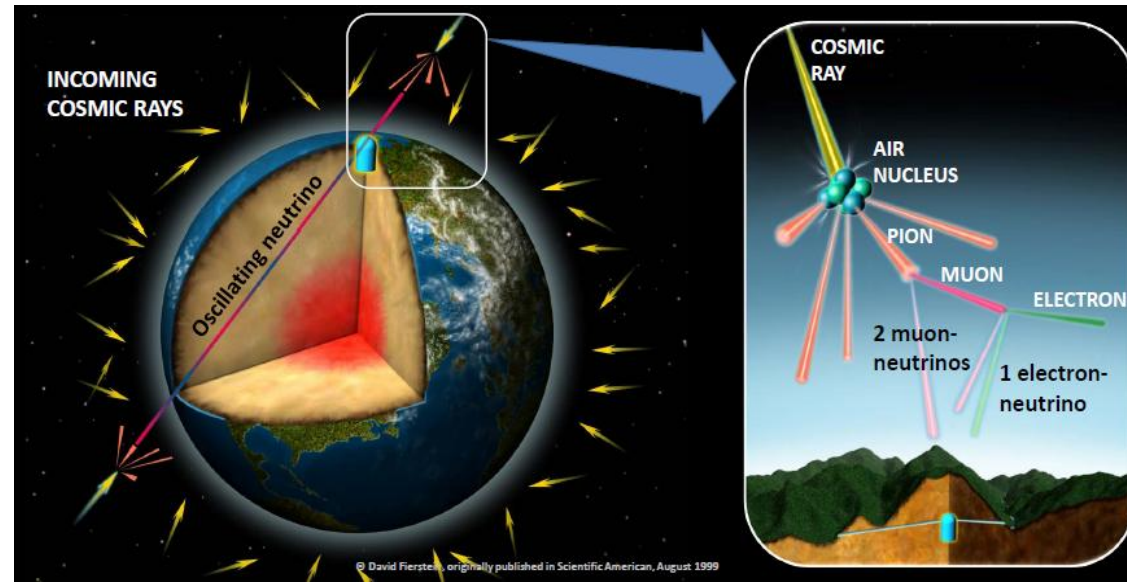
$\Delta m^2$ : differenza masse<sup>2</sup>  $\nu_\mu, \nu_\tau$

Scoperta fondamentale: SuperKamiokande- 1998, MINOS, OPERA, T2K,....

$\Delta m^2 \neq 0$ : vuol dire che il neutrino ha massa!

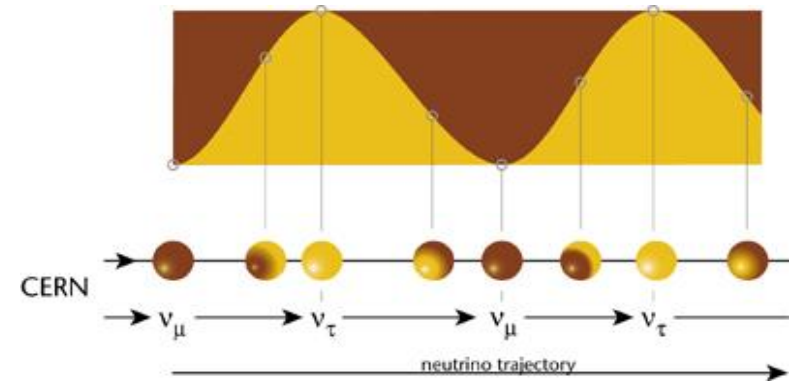
neutrini atmosferici:

il neutrino che viene dal basso e attraversa tutta la Terra ha una probabilita' di oscillare  $P \gg$  di quello che arriva dall'alto.

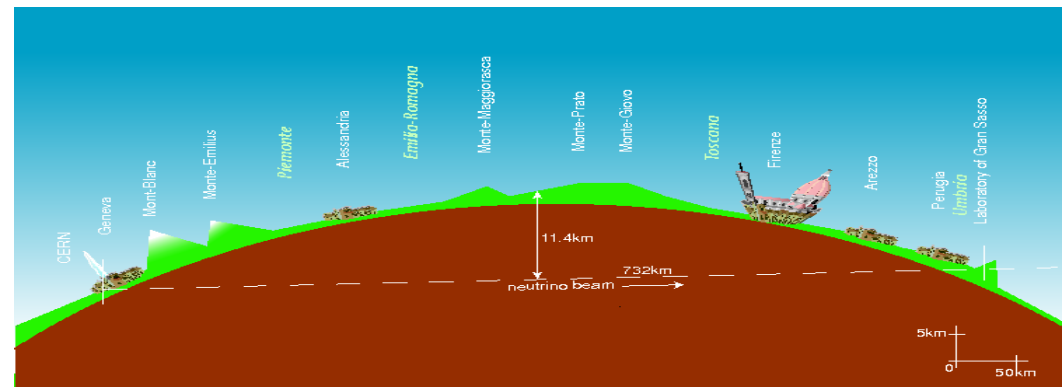


# *dal CERN al Gran Sasso: in viaggio con i neutrini $\nu_\mu$*

*alla scoperta della trasformazione del  
neutrino  $\nu_\mu$  in  $\nu_\tau$  secondo quanto  
previsto da B. Pontecorvo ...*

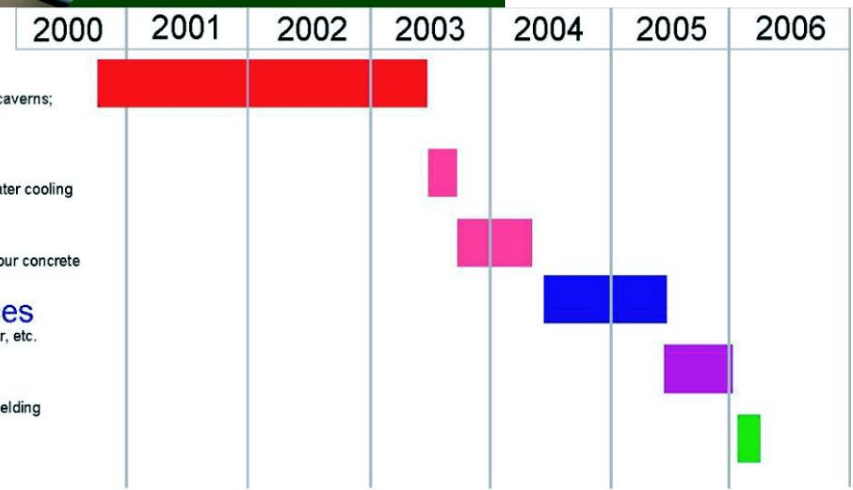
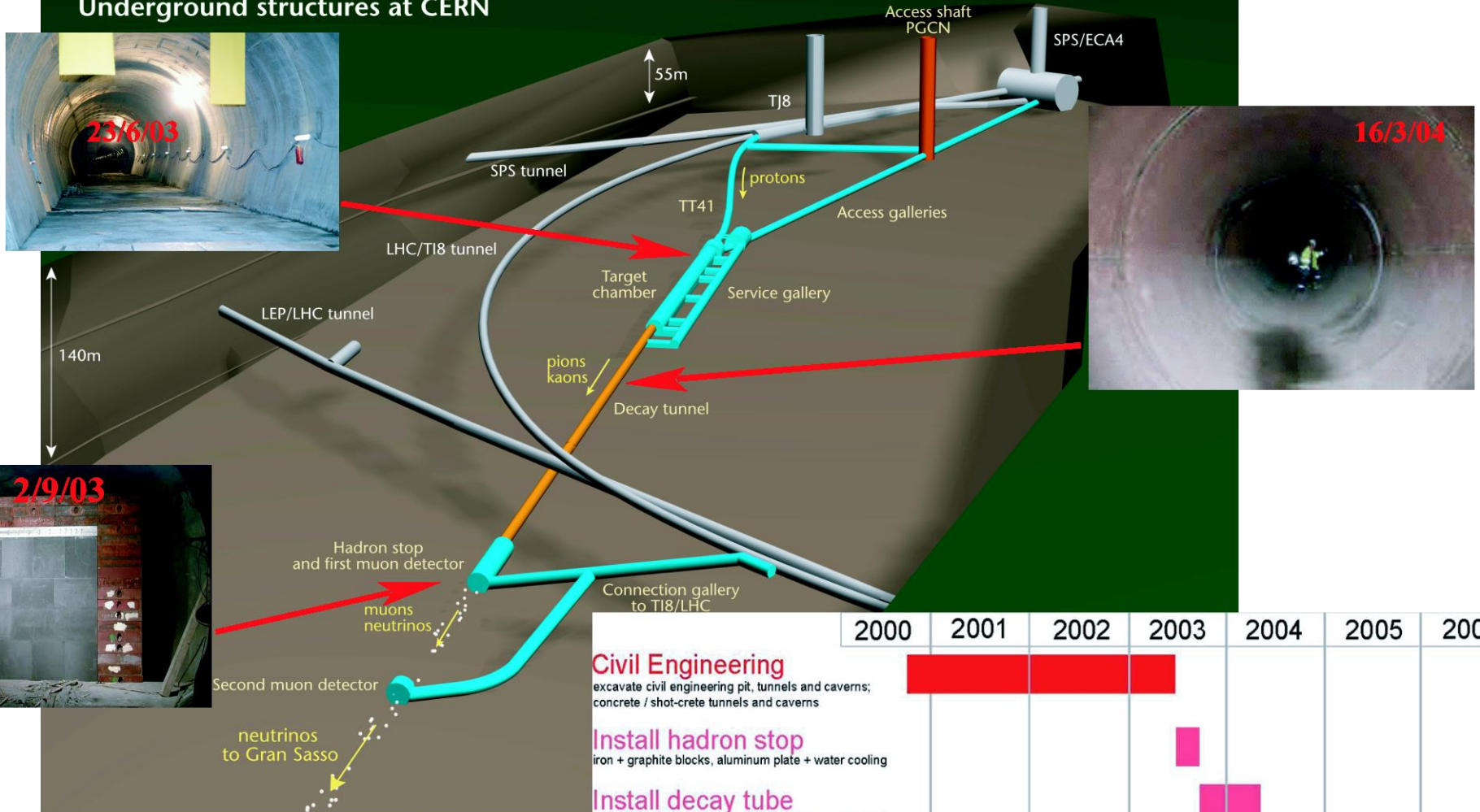


*Il fascio di  $\nu_\mu$  dal CERN al Gran Sasso  
viene intercettato dopo 732 km nella  
crosta terrestre da 2 rivelatori  
underground: ICARUS e OPERA.*



# CERN NEUTRINOS TO GRAN SASSO

## Underground structures at CERN



First beam to Gran Sasso:

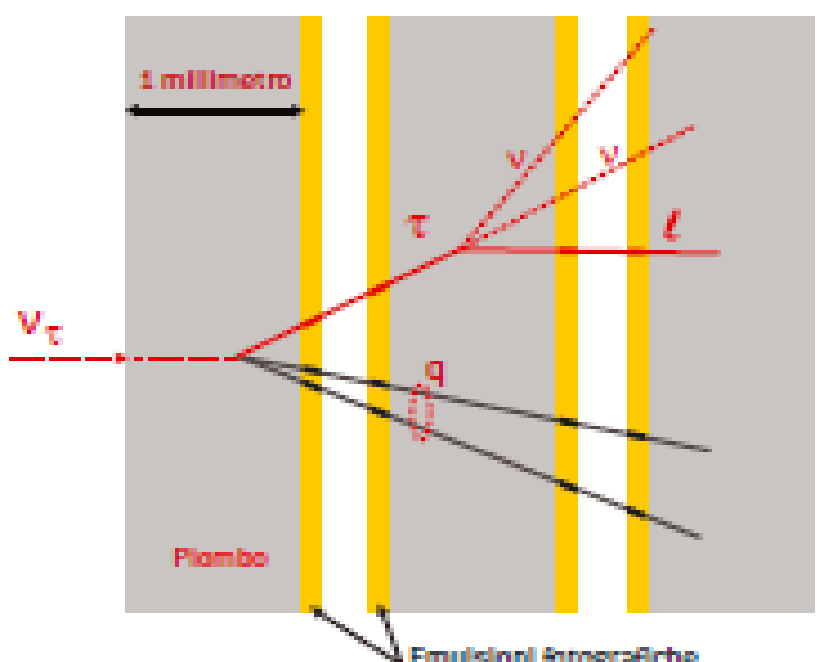
May 2006

*I neutrini raggiungono il Gran Sasso in ~ 2.4 ms viaggiando con una velocita' confrontabile a quella della luce.*



# OPERA: un gigantesco spettrometro magnetico, emulsioni fotografiche

- composto da 1.3 kt di brics di piombo ed emulsioni fotografiche e inseriti in uno spettrometro magnetico.
- I neutrini interagiscono nel piombo; le tracce delle particelle prodotte vengono rivelate da strati di emulsioni fotografiche (precisione  $\sim \mu\text{m}$ ) che vengono successivamente sviluppate.



- OPERA ha rilevato 5 eventi di  $\nu_\tau$  in un fascio originariamente puro in  $\nu_\mu$  alla partenza dal CERN dimostrando per la prima volta l'oscillazione in comparsa  $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$



# ICARUS\*

*\*Imaging Cosmic And Rare Underground Signals*



- *Tecnica introdotta da C. Rubbia nel 1977:  
3D imaging di ogni evento ionizzante:*
- *600 ton di Argon liquido ultrapuro  $-187^{\circ}\text{C}$  :  
costituiscono il bersaglio e anche l'elemento  
sensibile del rivelatore*
- *le interazioni prodotte dai neutrini nell'Ar  
sono ricostruite in 3D con una nuova  
sostificata tecnica elettronica, capostipite di  
una nuova generazione di rivelatori*





# ICARUS: una Camera a Bolle Elettronica

Elettroni di ionizzazione prodotti in Ar da particelle cariche sono "driftati" da un campo elettrico 500 V/cm verso arrays di fili posti ai lati che leggono il segnale:

- continuamente attiva, risoluzione  $\Delta x \sim 1$  mm
- eccellente misura dell'energia rilasciata
- identificazione particella da ionizzazione

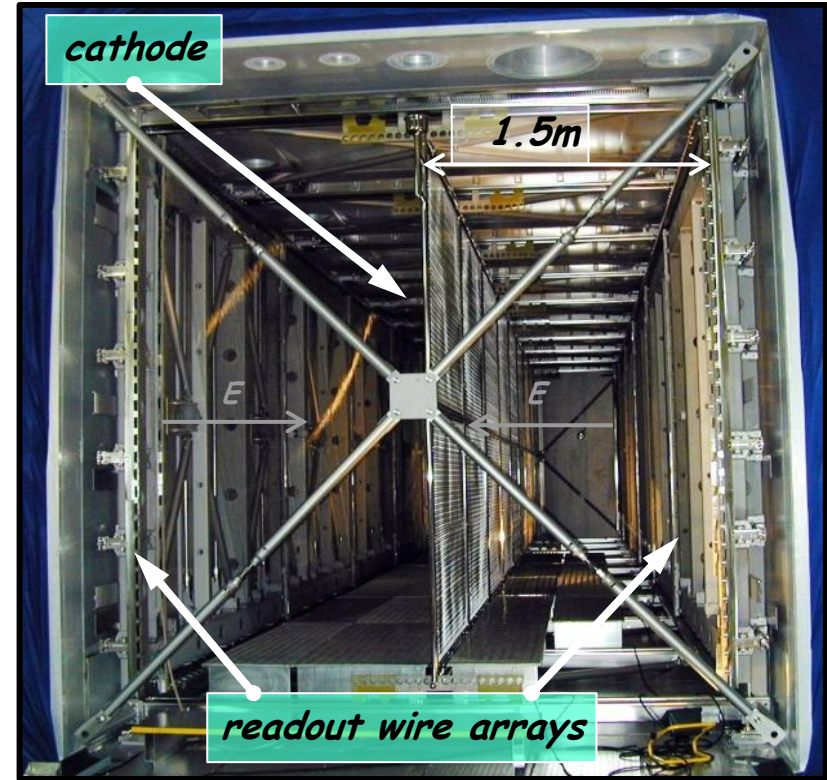
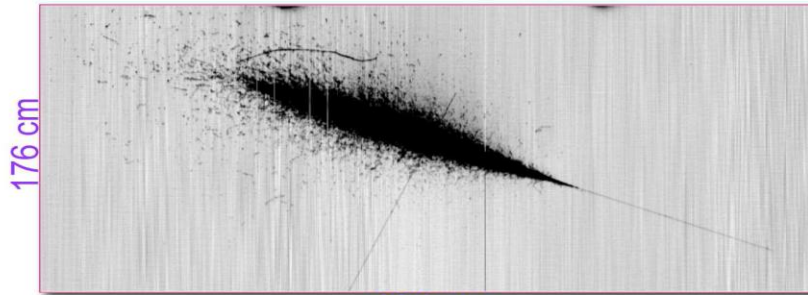
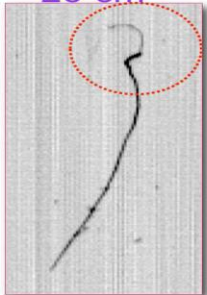


foto di camera a bolle

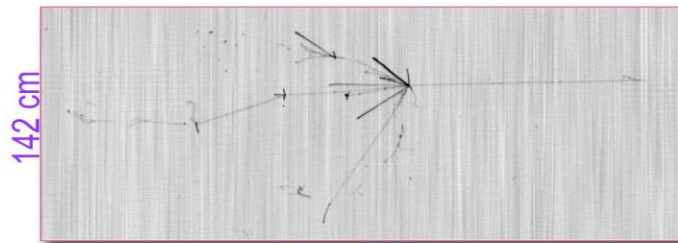
E.m. shower



25 cm

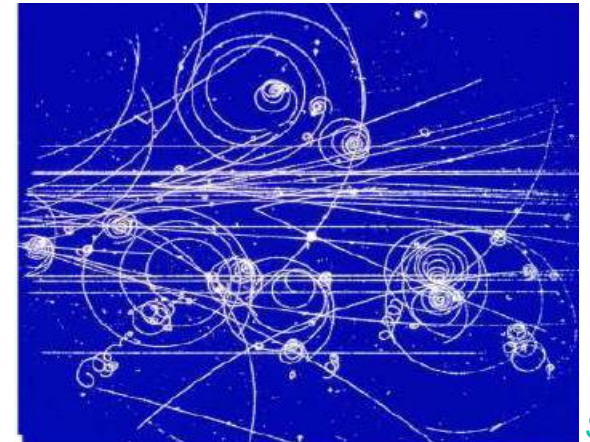


Muon decay



Hadronic interaction

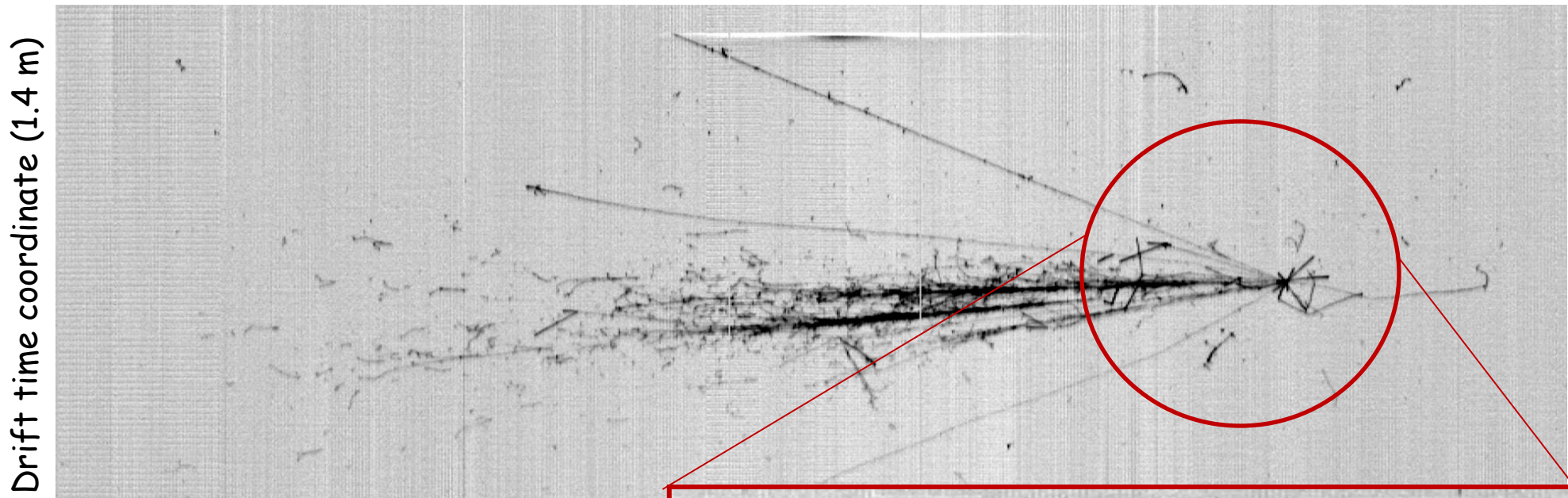
eventi cosmici in ICARUS



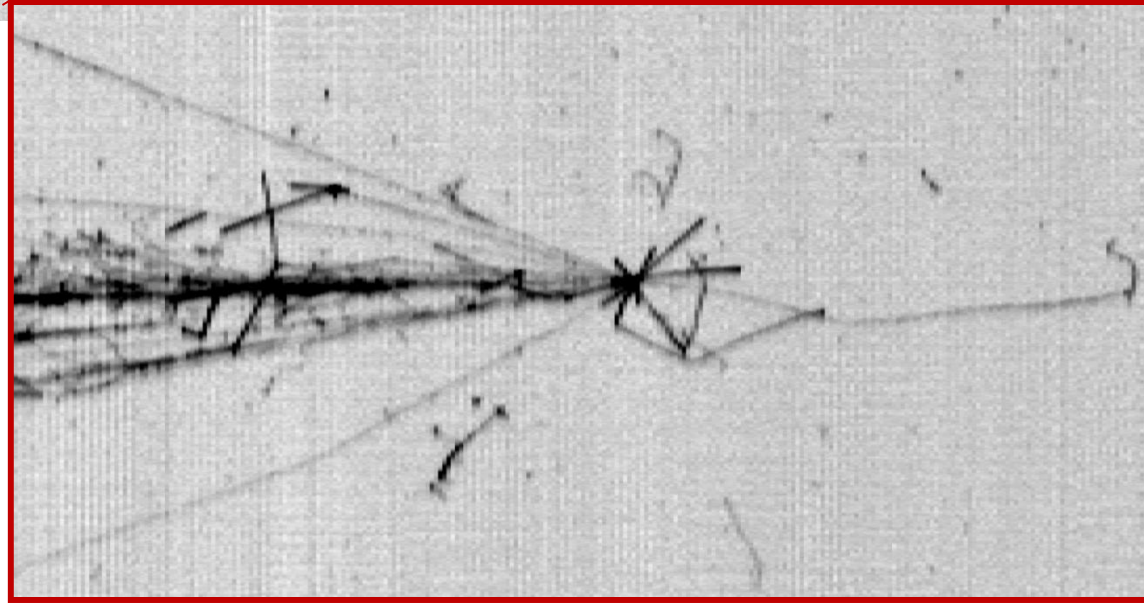
# La firma di un neutrino in ICARUS

CNGS  $\nu$  beam direction 

Collection view



Wire coordinate (8 m)



- *Osservazione di un neutrino del fascio CNGS prodotto all'acceleratore SPS del CERN dopo un volo di 732 km.*



# materia conosciuta e forze fondamentali (Modello Standard)

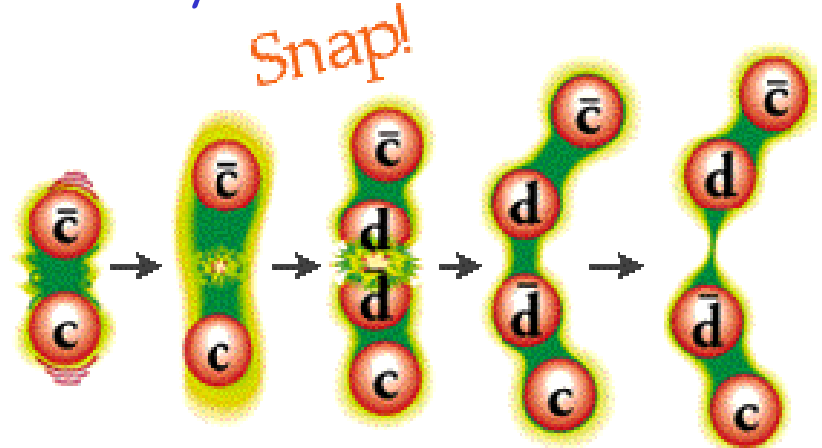
Three Generations of Matter (Fermions)

	I	II	III	
mass →	2.4 MeV	1.27 GeV	171.2 GeV	0
charge →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
name →	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top	<b><math>\gamma</math></b> photon
	4.8 MeV	104 MeV	4.2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quarks	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom	<b>g</b> gluon
	<2.2 eV	<0.17 MeV	<15.5 MeV	91.2 GeV <sup>0</sup>
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	<b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	<b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	<b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	<b>Z<sup>0</sup></b> weak force
	0.511 MeV	105.7 MeV	1.777 GeV	80.4 GeV
	-1	-1	-1	$\pm 1$
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptons	<b>e</b> electron	<b><math>\mu</math></b> muon	<b><math>\tau</math></b> tau	<b>W<sup>±</sup></b> weak force

## 3 forze con 3 diverse costanti K:

- **elettromagnetica**,  $k_{em}=1$ : tiene gli elettroni legati al nucleo atomico, mediata da fotoni
- **nucleare debole**,  $k_w=10^{-3}$ : unica interazione dei neutrini, responsabile decadimenti di leptoni e quarks, mediata da  $W^\pm, Z^0$
- **nucleare forte**  $K_s=100$ : interazione fra quarks di colore - QCD, mediata dai gluoni, energia potenziale di legame aumenta con la distanza, come quella di una molla: non si possono separare i quarks fra di loro!

+ Higg's particle: ~125 GeV

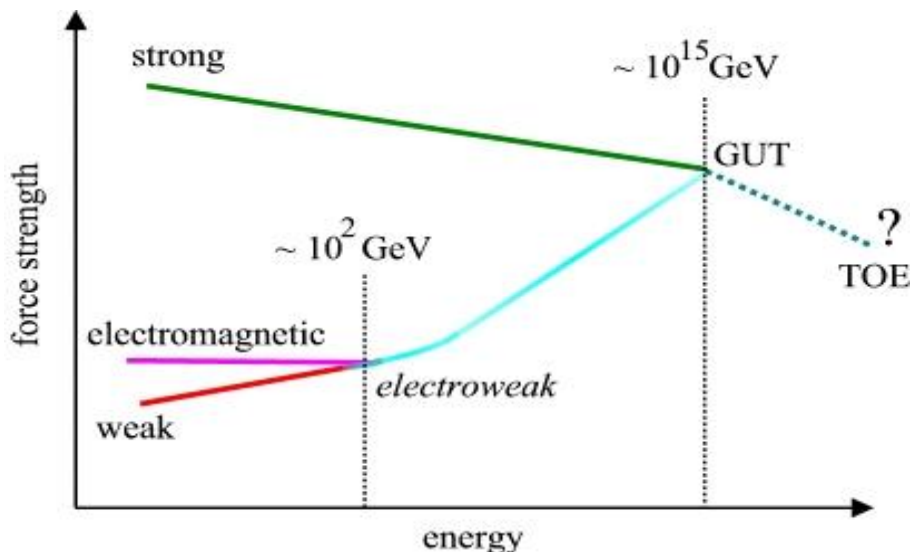


N.B. la forza di gravita'  $k_g=10^{-35}$  non e' inserita nel quadro microscopico

# Standard Model e Grande Unificazione (GUT)

- *Le simmetrie giocano un ruolo fondamentale: l'invarianza di una legge fisica per una simmetria corrisponde a una quantità che si conserva...*
  - *inv. per traslazione nel tempo: conservazione dell'energia  $E$*
  - *inv. per traslazione nello spazio : conservazione quantità di moto  $p = m v$*
  - *inv. per rotazione nello spazio: conservazione momento della  $q$ . di moto  $M$*

*Conservazione di  $E, p, M$  deriva da isotropia/omogeneità di spazio-tempo!*
- *Le leggi di simmetria, associate a conservazione di quantità osservabili (carica elettrica, debole, colore , etc) sono utilizzate per descrivere/capire proprietà delle interazioni fondamentali e costruire estensioni del Modello Standard verso una Teoria Grande Unificata (GUT)...*

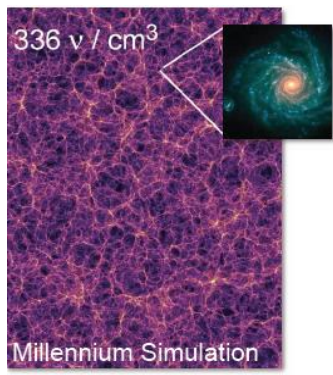


*...in realtà le costanti caratteristiche delle 3 interazioni non sono costanti...*

- $K_{em}$  e  $K_{weak}$ : si unificano  $E \sim 100$  GeV
- $K_{strong}$  si unifica con le altre a  $\sim 10^{15}$  GeV, l'energia stimata di Grande Unificazione

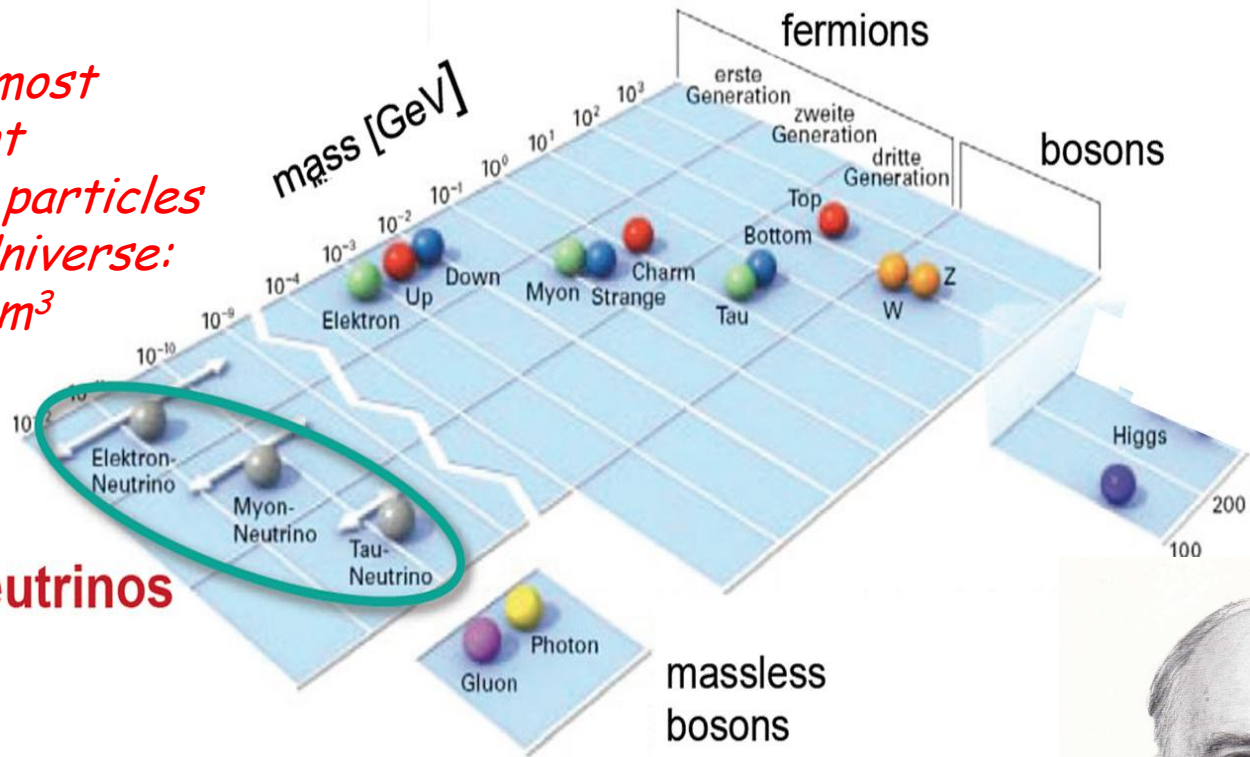
# E se i neutrini fossero 4 ?

● *Neutrino: unica particella elementare le cui proprieta' sono ancora largamente sconosciute... l'incredibile esiguita' della sua massa rispetto alle altre particelle sembra indicare scenari che aspettano di venire elucidati...*

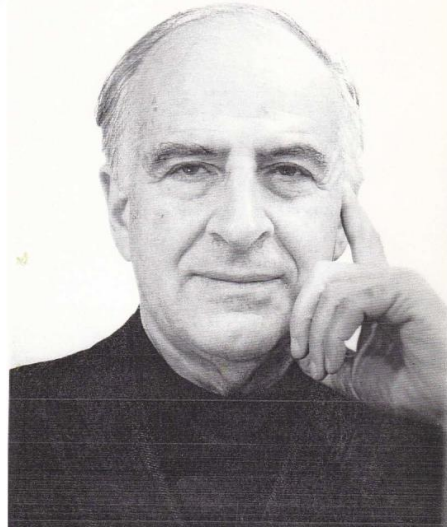


*vs :the most abundant massive particles in the Universe: 336 v/cm³*

**neutrinos**

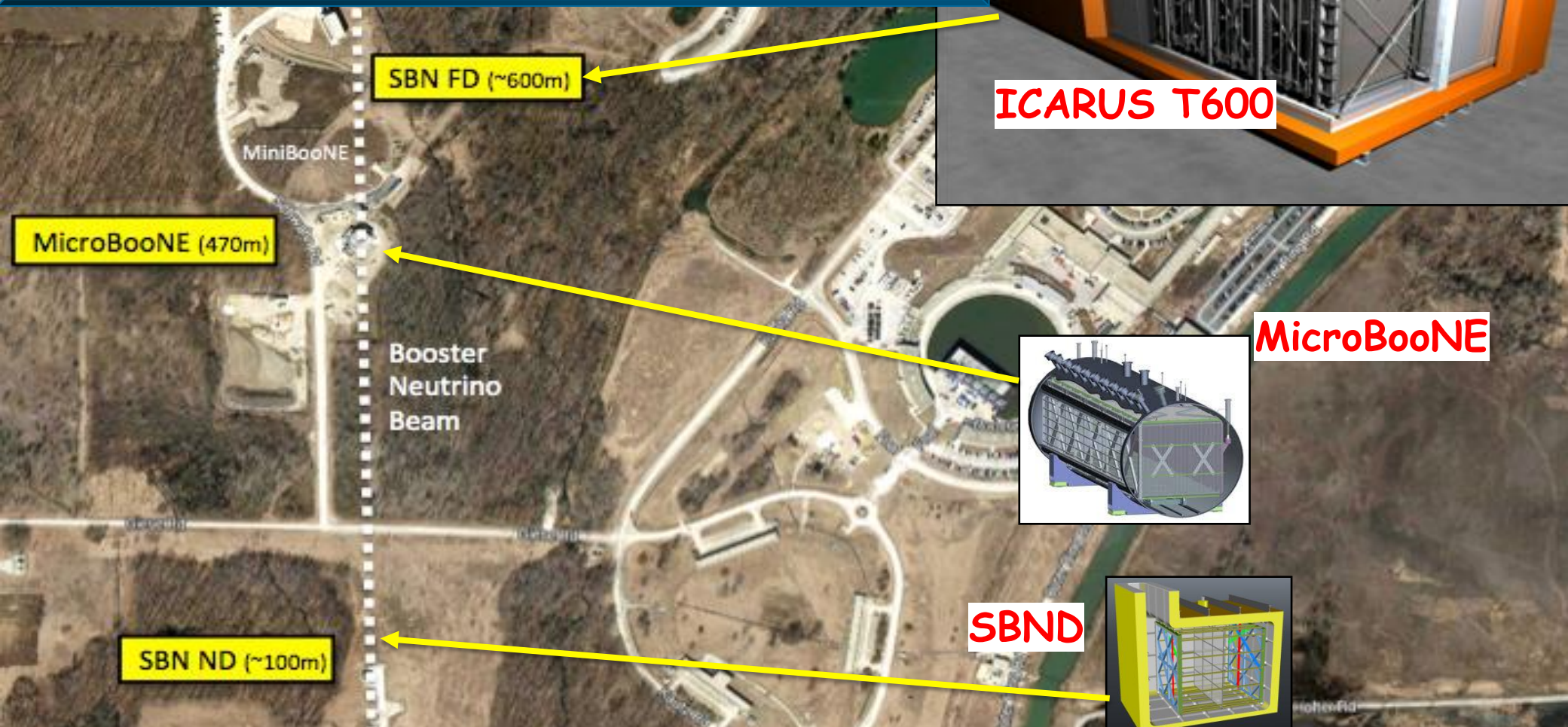


● *... indicazioni sperimentali, per un nuovo tipo "sterile", un po' piu' pesante degli altri neutrini, ipotizzato da Bruno Pontecorvo nel '57, non interagente secondo le leggi fondamentali del Modello Standard*





# FNAL Booster experiment: 3 LAr-TPCs as definitive answer to sterile neutrino puzzle

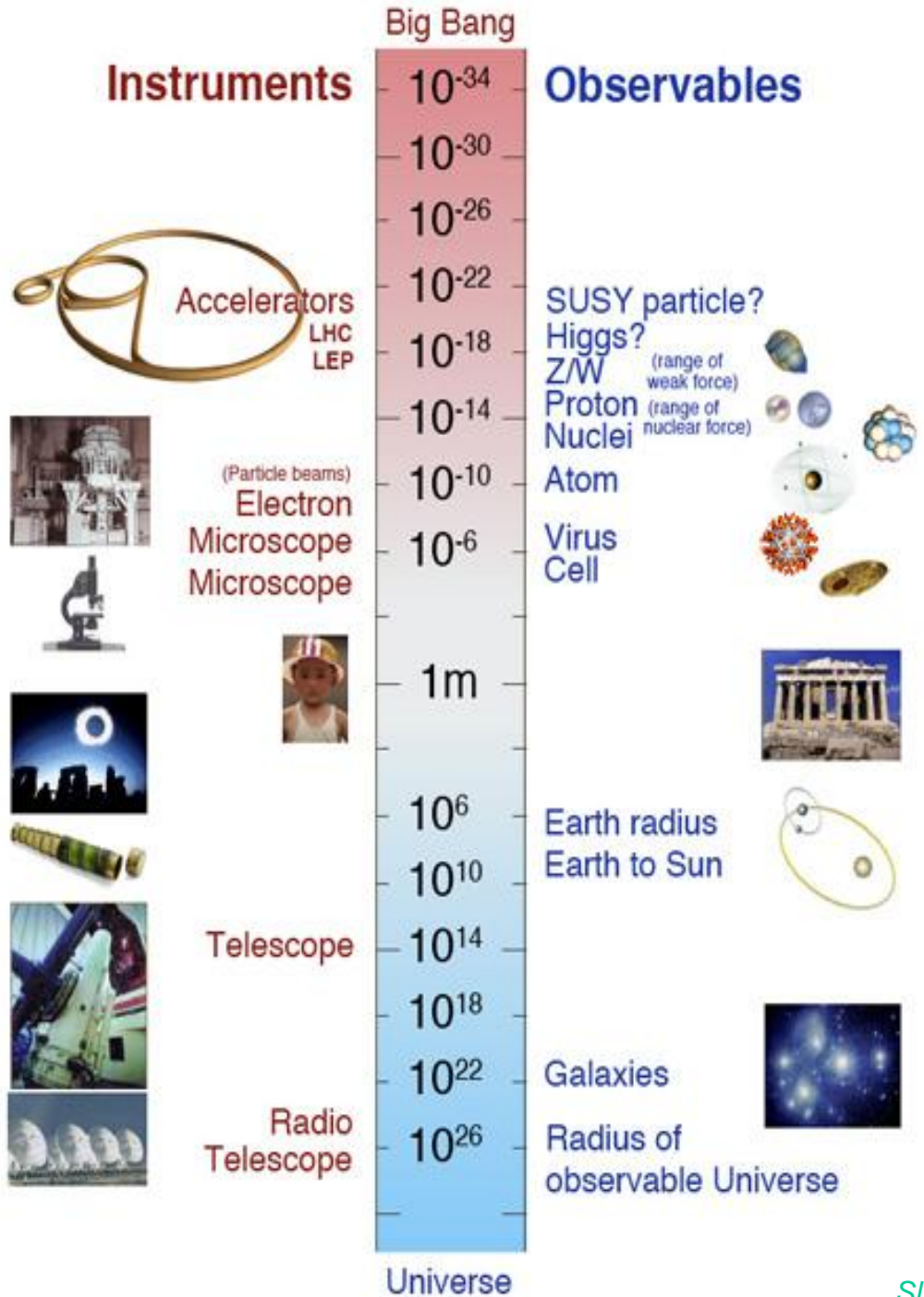


- *SBND, MicroBooNE e ICARUS: per rivelare a 3 distanze diverse dalla sorgente, la comparsa di un neutrino sterile in un fascio di  $\nu_\mu$  per effetto di un'oscillazione*
- *In assenza di "anomalies" gli spettri di  $\nu_\mu$  a 100, 470 e 600 m sono attesi molto simili*

*la scala dell'Universo:  
dall'infinitamente piccolo  
all'infinitamente grande*

*... sommando tutta  
la materia che riusciamo  
a percepire, tuttavia...  
manca oltre il 95 %!*

*Materia oscura ???  
Energia oscura ???*





# Evidenze della dark matter?



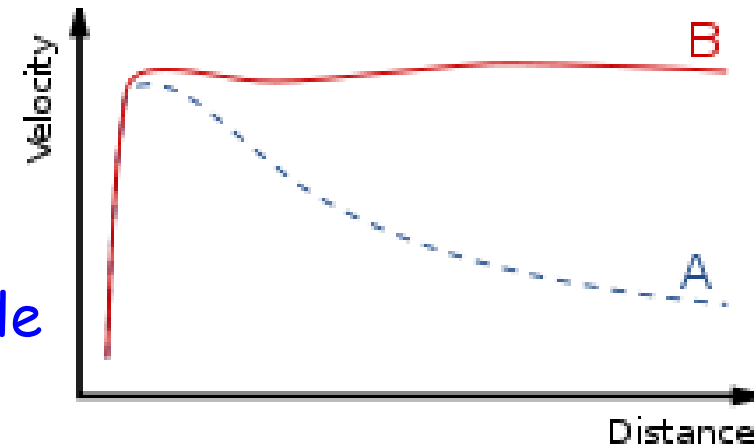
- Misura della velocità di rotazione idrogeno atomico alla periferia delle galassie spirali (NGC 3198) che emette un segnale radio  $\lambda = 21 \text{ cm}$

$m v^2/R = G Mm/R^2$   $M$ : materia visibile galassia,  
 $m$ : massa idrogeno a distanza  $R$

$$V_{\text{pred.}} = (GM/R)^{1/2} \quad (A)$$

$$V_{\text{mis.}} = \text{cost} \Rightarrow M = \alpha R \quad (B)$$

massa galassia si estende oltre regione visibile  
 $\Rightarrow$  presenza Dark Matter



- Misura deflessione radiazione emessa da una sorgente luminosa a causa di presenza di una massa tra sorgente e osservatore (lenti gravitazionali): consistente con presenza di Dark Matter!

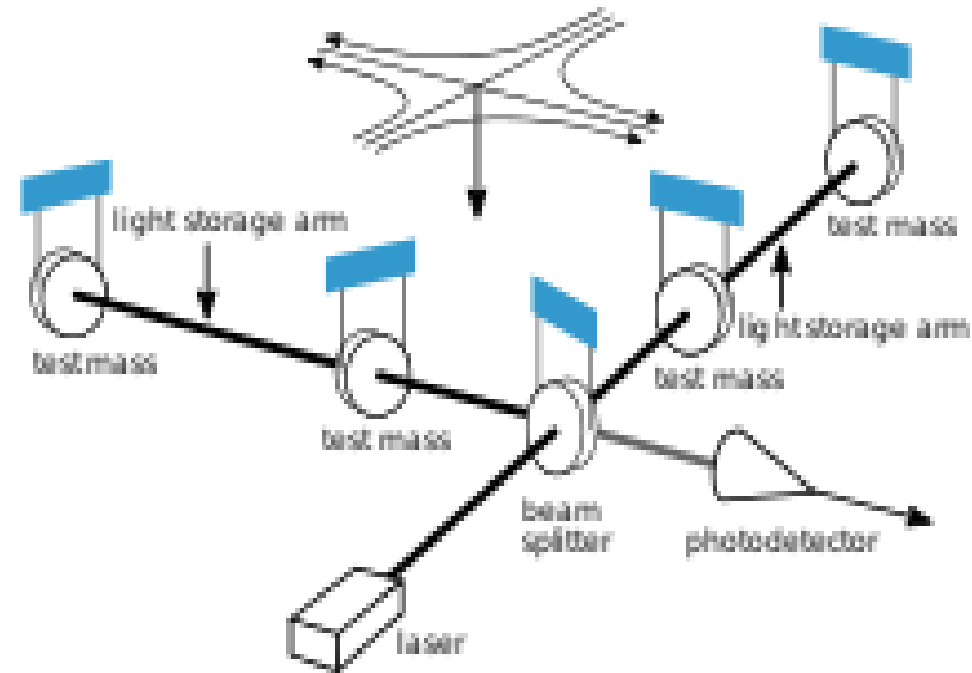


# e la forza di gravita' ?

- **14 settembre 2015**

*l'interferometro LIGO rivela per la prima volta segnali di onde gravitazionali: spettacolare conferma di una delle predizioni della Relativita' Generale di Einstein, a 100 anni dalla sua formulazione!*

- *Il segnale proviene dalla fusione di 2 black holes di 29 e 36 masse solari a 1 miliardo e trecento milioni di anni luce da noi. Nella fase finale del loro collasso in un sistema di 62 masse solari emettono in modo esplosivo onde gravitazionali che trasportano un'energia  $\sim 3$  masse solari*



# La scoperta delle onde gravitazionali

## LE ONDE GRAVITAZIONALI

Secondo la Relatività Generale di Einstein cataclismi cosmici come scontri di buchi neri o stelle rotanti producono increspature dello spazio tempo che si propagano nel cosmo alla velocità della luce

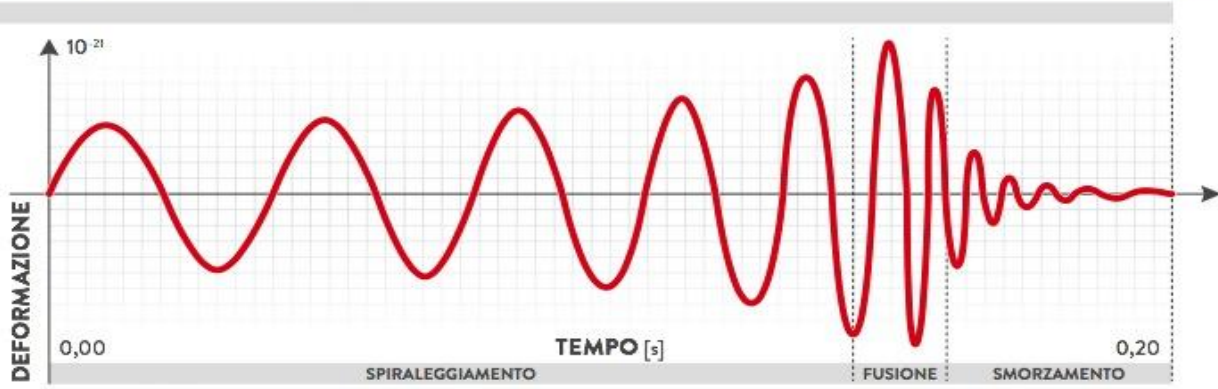


## IL SEGNALE

24 settembre 2015  
Ore 09:50:45 UTC

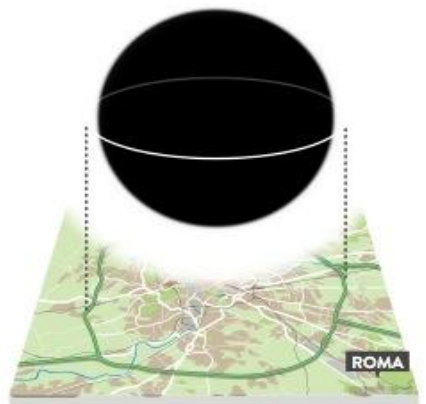
Prodotto dal passaggio di un'onda gravitazionale, è stato osservato simultaneamente dai due interferometri gravitazionali LIGO, distanti migliaia di km, in Louisiana e nello stato di Washington (USA)

Ha una durata di qualche frazione di secondo e una frequenza variabile: da 30 a 250 Hz



## NUOVE FRONTIERE DELLA GRAVITÀ

Lo studio dei dati raccolti aiuterà a descrivere meglio come agisce la forza gravitazionale in condizioni estreme mai esplorate prima, in cui le leggi della gravitazione e quelle della meccanica quantistica devono essere unificate

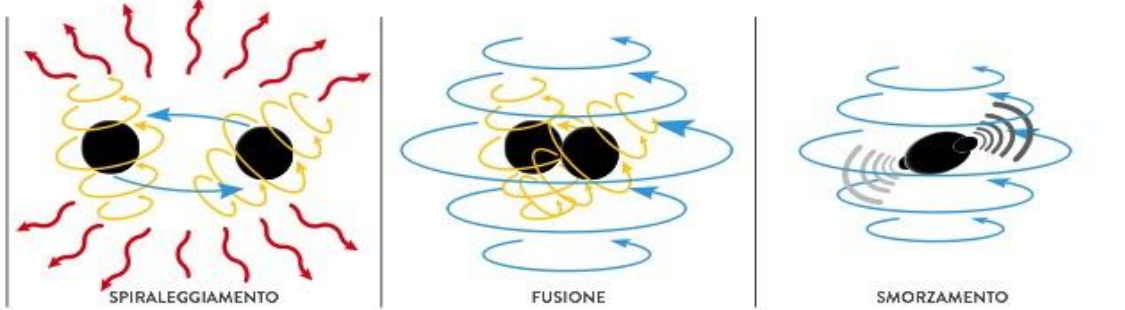


## UNO SCONTRO DI BUCHI NERI

L'onda è stata prodotta da un gigantesco scontro di due buchi neri distanti da noi 1,3 miliardi di anni luce e quindi avvenuto più di un miliardo di anni fa

I due buchi neri di massa circa uguale (36 e 29 masse solari) si sono scontrati a una velocità di 150.000 km/s (la metà della velocità della luce)

È la prima osservazione diretta mai realizzata di un fenomeno di questo tipo



## LA SCOPERTA

I dati sono stati analizzati e studiati dalle collaborazioni di LIGO e VIRGO, che è il terzo interferometro della rete internazionale. VIRGO è stato costruito presso l'European Gravitational Observatory (EGO) a Cascina (Pi), dall'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) e dal Centre National de la Recherche Scientifique (CNRS).

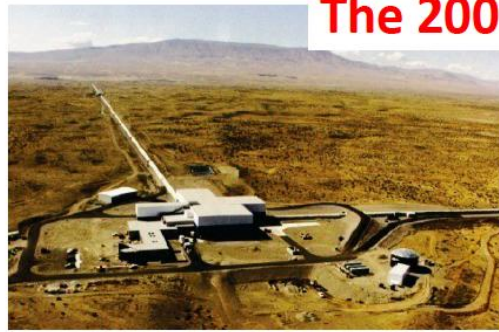
L'analisi dei dati ha confermato la prima rivelazione diretta di onde gravitazionali, che è stata annunciata l'11 Febbraio 2016 in modo congiunto a Washington e Cascina



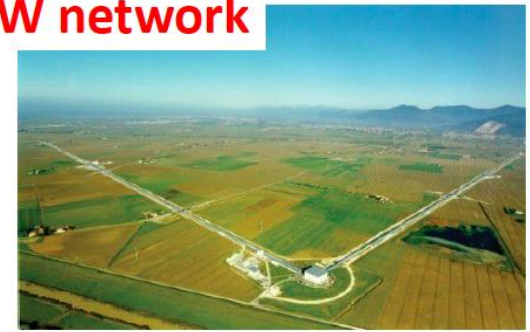
## IL FUTURO

Si inaugura una nuova stagione di esplorazione del Cosmo, in cui potremo ascoltare i fenomeni più remoti e violenti dell'universo e i sussurri dell'universo primordiale





H1- Hanford – Washington state



Virgo – Cascina (Pisa) – EGO site



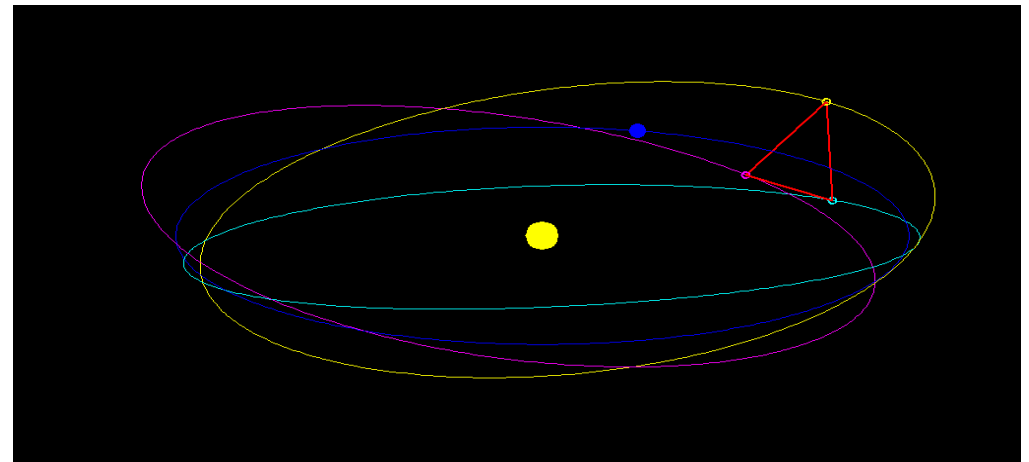
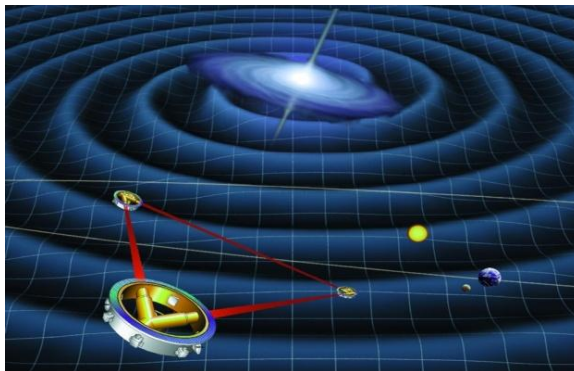
GEO600 – Hannover - Germany



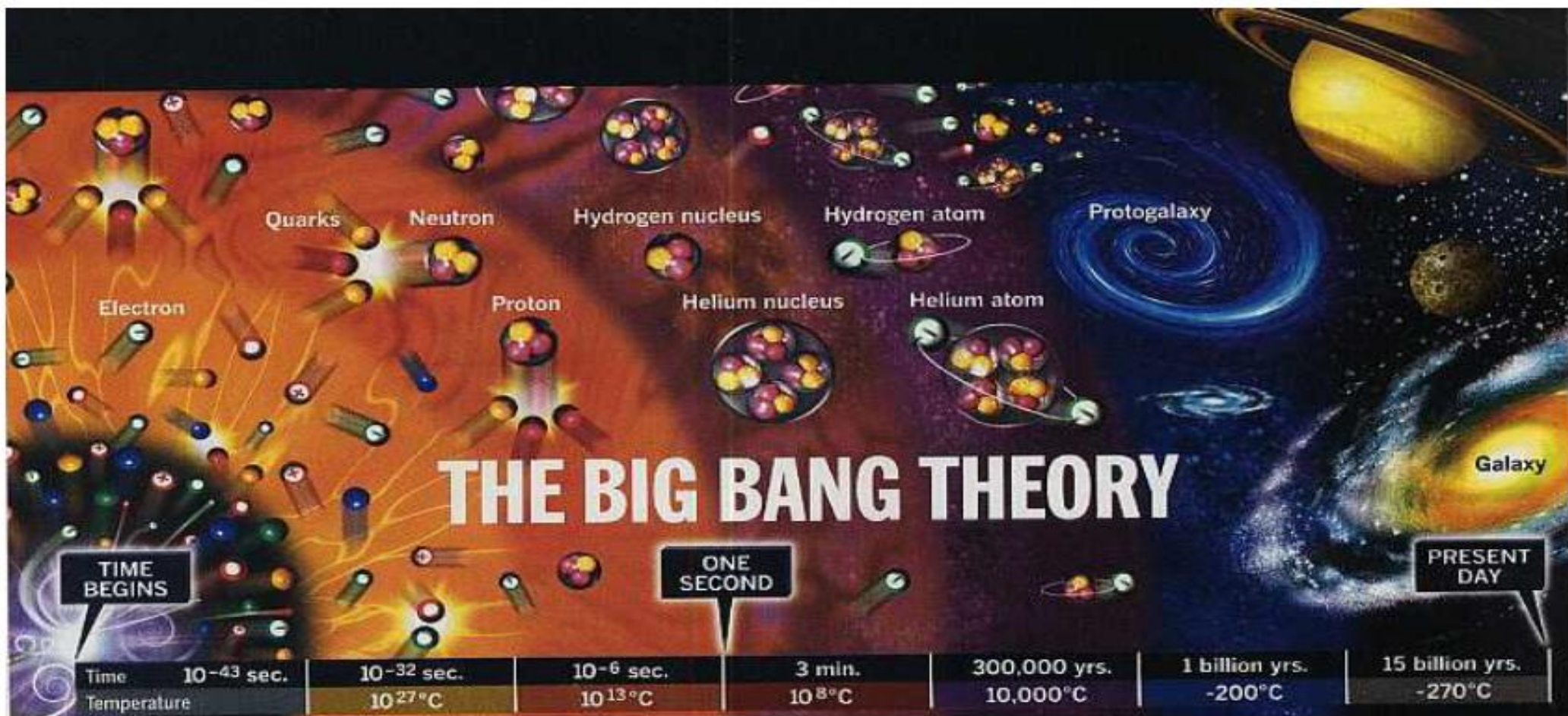
L1- Livingston – Louisiana state

- *rete di interferometri terrestri per la misura delle onde gravitazionali*

- *Evolved Laser Interferometer Space Antenna (eLISA) misura diretta delle onde gravitazionali - tecnica interferometrica con 3 satelliti distanti 1 milione di km, su orbita eliocentrica (2035)*







↑  
Decoupling dei Neutrini  
(CνB)

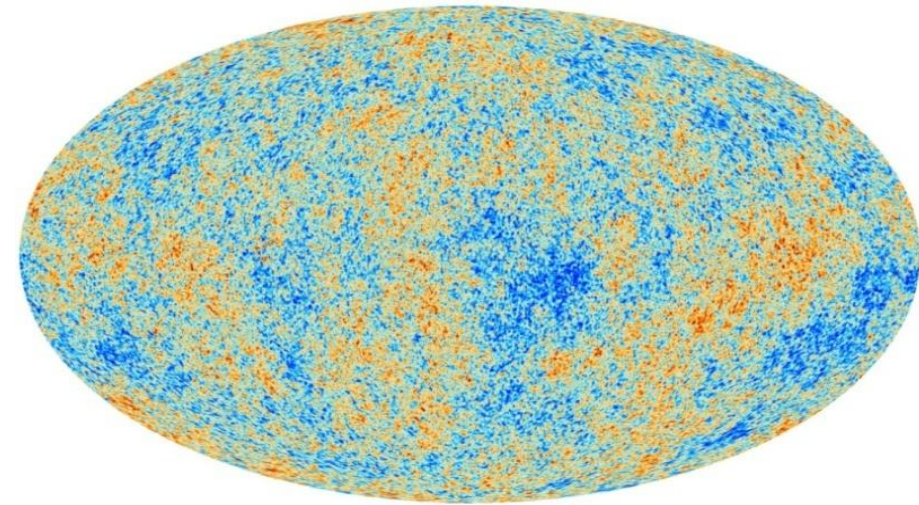
↑  
Decoupling dei gamma  
(CMB)  
Atomi neutri

*... un'unica interazione fondamentale tra particelle elementari ad altissima energia, densita' e temperatura, diversificata poi con il raffreddamento dall'espansione...  
via via verso la formazione della materia ordinaria come oggi noi la conosciamo ...*

# CMB $\nu$ B e Big-Bang

- *Penzias e Wilson nel 1965 scoprono con una radioantenna un segnale isotropo non associato ad alcuna stella, galassia o altro che permea tutto l'Universo: **Cosmic Microwave Background (CMB)** a 2.725 K, il residuo della radiazione prodotta alla nascita dell'Universo, la conferma chiave del modello del Big Bang*

- *Si ipotizza che l'Universo nei primissimi istanti abbia attraversato un brevissimo periodo di enorme dilatazione causata da un'espansione accelerata "Inflazione" che ha generato piccole disomogeneità nella materia. Le strutture cosmiche che oggi osserviamo avrebbero tratto origine da questo fenomeno...*

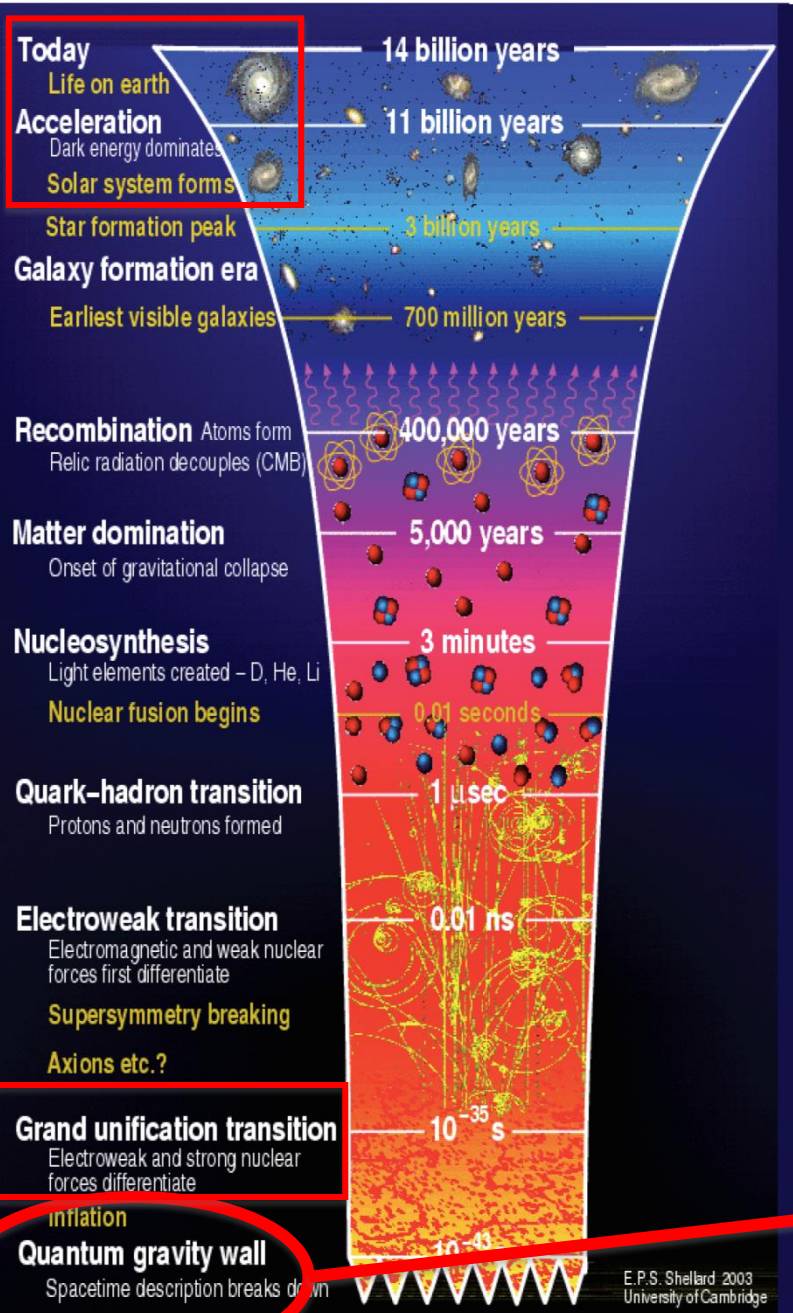


*Piccole anisotropie sono state rilevate dalle sonde COBE, WMAP, Planck*

- **$\nu$ B - Cosmic Neutrino Background:** *neutrini relitti, emessi 1 s dopo Big-Bang... e in viaggio nell'Universo* **Riusciremo a rivelarli ???**



# dal Big-Bang ad oggi



→ *Noi siamo qui*

## astrofisica *multi-messenger*":

- *l'Universo e' stato osservato con la radiazione e.m. (fotoni)*
- *Ora possiamo farlo con neutrini e onde gravitazionali (gravitoni) molto debolmente interagenti con la materia, capaci di giungere ai nostri rivelatori terrestri da enormi distanze.*

*e cerchiamo di ottenere informazioni sui primissimi istanti ... le abbiamo ottenute?*



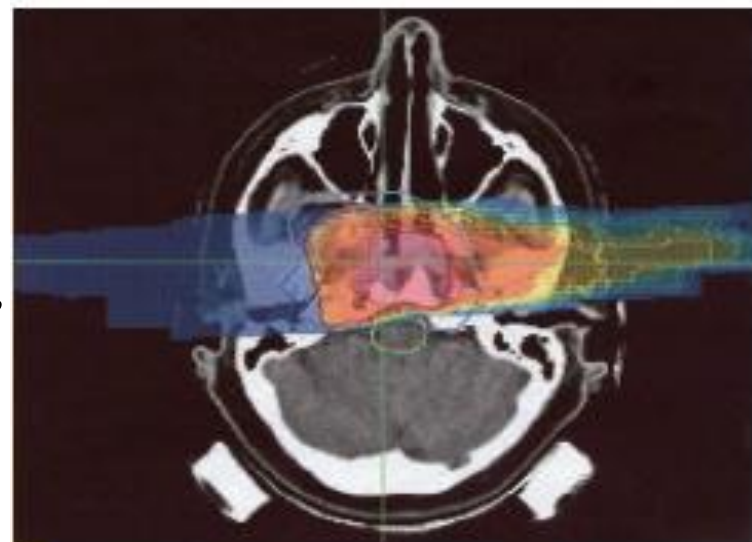
# *perche' la ricerca fondamentale?*

*Acceleratori e rivelatori di particelle richiedono altissima tecnologia di punta. Per questo il CERN e il mondo della ricerca subnucleare lavorano in stretta collaborazione con le industrie e con mutuo beneficio.*

*Oltre ai risultati della ricerca pura, gli spin-off in differenti domini sono diventati parte della vita di tutti i giorni:*

- *tecniche terapeutiche e diagnostiche,*
- *indagini non distruttive di materiali,*
- *superconduttivita',*
- *strumentazioni sofisticate, GPS,...*
- *www (Word Wide Web) e GRID*

*energia: fissione/ fusione nucleare e energie rinnovabili... a mission della ricerca!!!*



A section through the head of the first patient to undergo hadron therapy at the GSI laboratory in Darmstadt. It is overlaid with the physical dose distribution for a proton beam that comes from the right. Critical structures, like the brain stem, shown by a green line, are largely untouched by the beam. The GSI facility is in regular use to treat cancer, and has inspired a hospital-based facility in Heidelberg.



A simple plaque in a corridor at CERN marks the birthplace of the World Wide Web.

- *l'osservazione di nuovi fenomeni in fisica delle particelle quali le oscillazioni dei neutrini dischiude nuovi orizzonti nella comprensione dell'Universo in cui viviamo con rilevanti implicazioni in Cosmologia, Big-Bang, ricerca di Dark Matter...*
- *il ruolo della Scienza e Ricerca Fondamentale e' oggi centrale nella societa': dalla conoscenza del nucleo dell'atomo, alla fusione nucleare in laboratorio e nel Sole, l'attivita' di ricerca e sviluppo costituisce l'asse portante della societa' stessa come noi la conosciamo.*
- *CERN FermiLab Gran Sasso, luoghi deputati alla libera ricerca, sono l'esempio concreto di come persone di nazionalita', usi, costumi e religioni diversi, possono contribuire assieme a sviluppare dei progetti globali che impattano e modificano sensibilmente la nostra vita quotidiana in termini di ricadute tecnologiche e qualita' di vita...*

*Lo studio dell'Universo e le scoperte recenti in Fisica SubNucleare acquisiscono quindi una valenza nuova con una forte tensione morale per una comunita' estesa che puo' essere "fondante" in un momento delicato nei rapporti fra i vari Paesi*

## *una leggendaria ultima risposta...*

Bob Wilson fu invitato al Congresso USA a spiegare perche' i contribuenti dovessero spendere milioni di dollari per finanziare una macchina enorme e costosa la cui sola utilita' era quella di permettere ai fisici di dare la caccia a particelle subatomiche. Uno scambio di battute tra lo scettico senatore J. Pastore di Rhode Island e Bob Wilson divenne leggendario:

Pastore: *Nelle speranze legate a questo acceleratore c'e' qualcosa legato alla sicurezza del Paese?*

Wilson: *No, signore, non credo*

Pastore: *Niente di niente?*

Wilson: *Niente di niente*

Pastore: *Esso non ha dunque nessun valore sotto questo aspetto?*

Wilson: *Esso ha a che fare solo col rispetto con cui noi ci consideriamo l'un l'altro, con la nostra dignita' di uomini, col nostro amore per la cultura. Ha a che fare col fatto che siamo buoni pittori, buoni scultori, buoni poeti,...*

*Non ha niente a che fare direttamente con la difesa del nostro Paese, se non a renderlo degno di essere difeso.*



Be less curious  
about people  
and  
more curious  
about ideas.

*Marie Curie*

