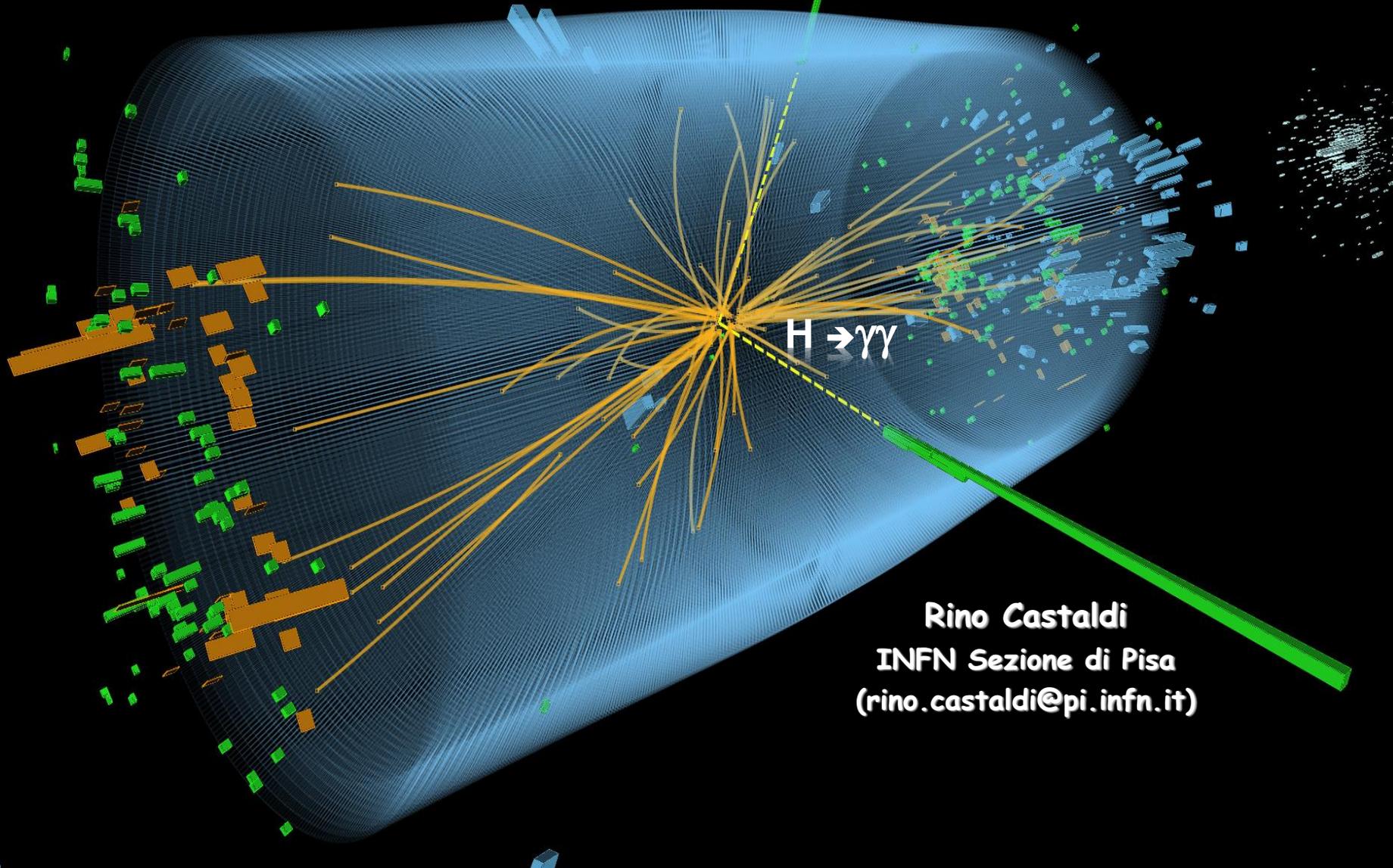


# Perché e come la Sezione di Pisa ha contribuito a scoprire il Bosone di Higgs a LHC

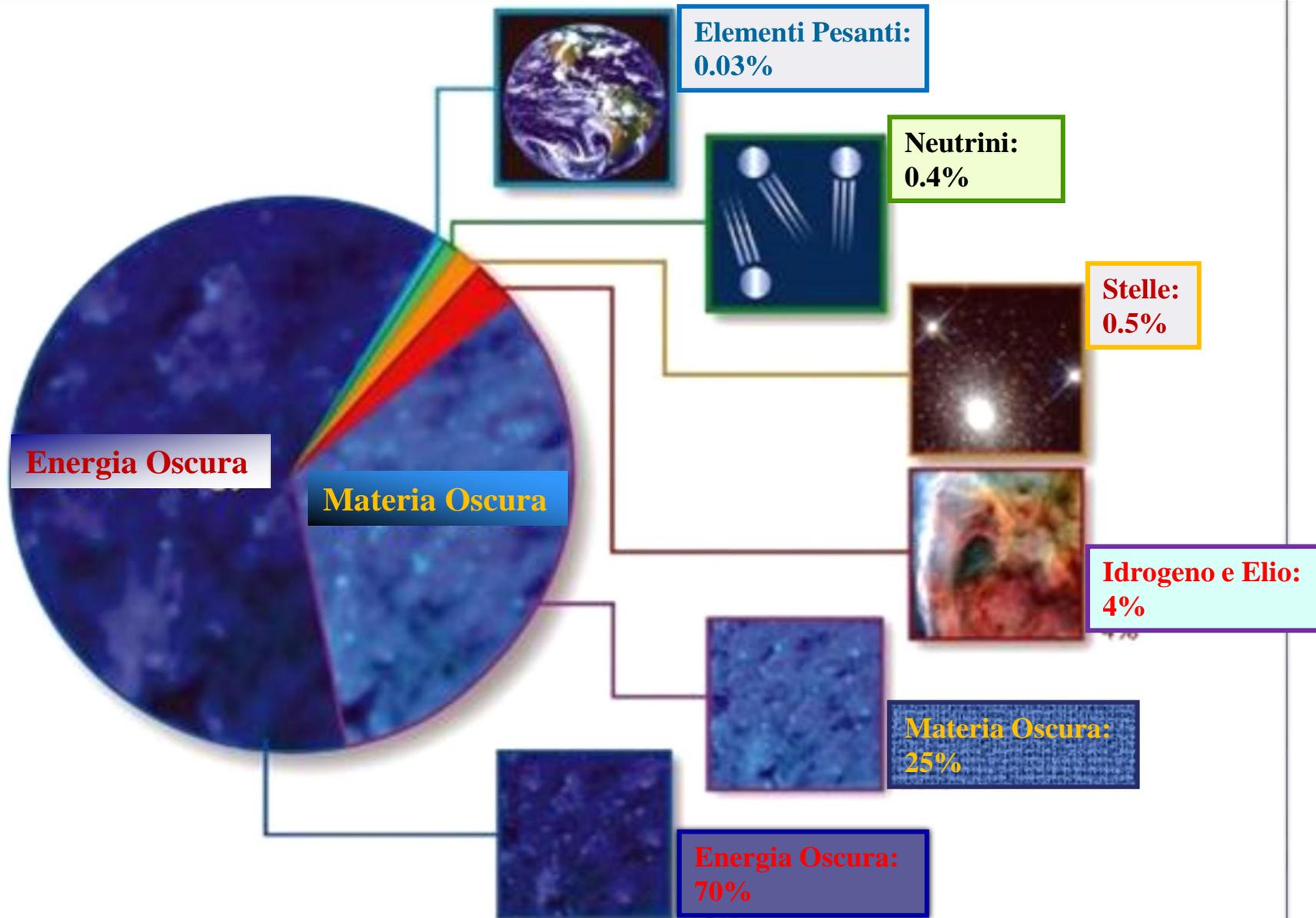


**Rino Castaldi**  
INFN Sezione di Pisa  
([rino.castaldi@pi.infn.it](mailto:rino.castaldi@pi.infn.it))

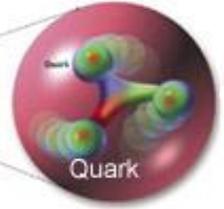
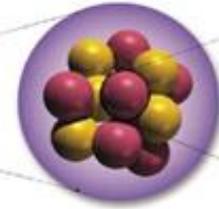
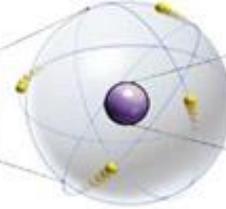
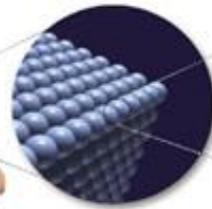
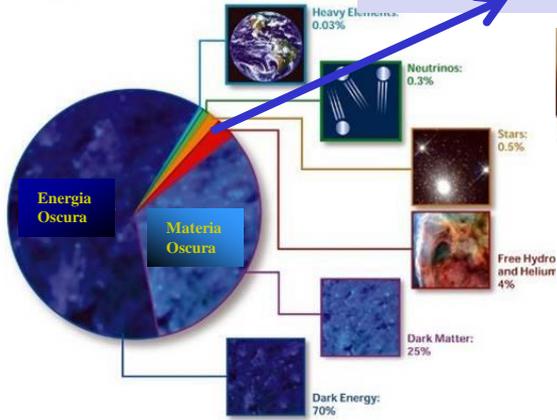
Vogliamo capire l'Universo che ci circonda



**La lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico**  
*(stelle e pianeti sono solo una piccola parte del nostro Universo !)*



# La materia ordinaria (~5%)



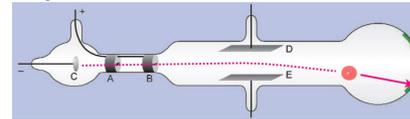
Sostanza

Atomo

Nucleo Protone/Neutrone

1896: Scoperta della radioattività, H. Becquerel, P. Curie, M. Curie

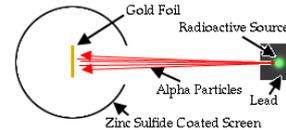
1897: Scoperta dell'elettrone, J.J. Thomson (tubi di Crookes)



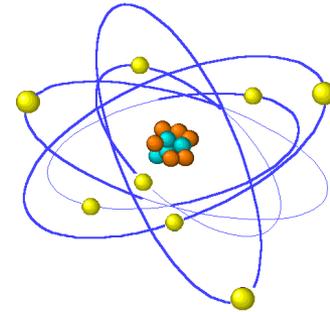
**Atomo**

(ingrandito mille miliardi di volte)

1911: Scoperta del nucleo, E. Rutherford



atomo  $\sim 10^{-10}$  m  
nucleo  $\sim 10^{-15}$  m



L'atomo di Rutherford è instabile !

1913: L'atomo di Bohr:

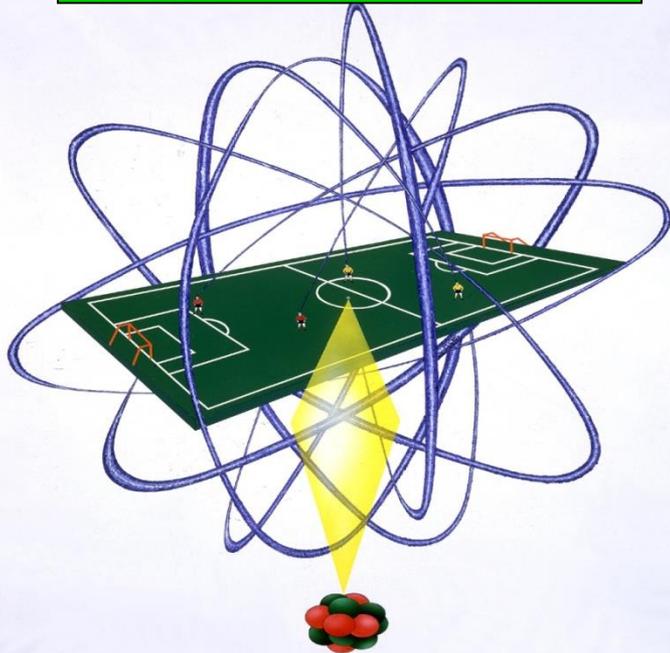
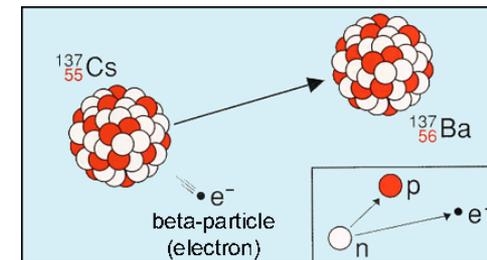
Le orbite sono quantizzate

1919: Scoperta del protone, E. Rutherford (E. Goldstein)

1932: Scoperta del neutrone, J. Chadwick

1930: Pauli:..

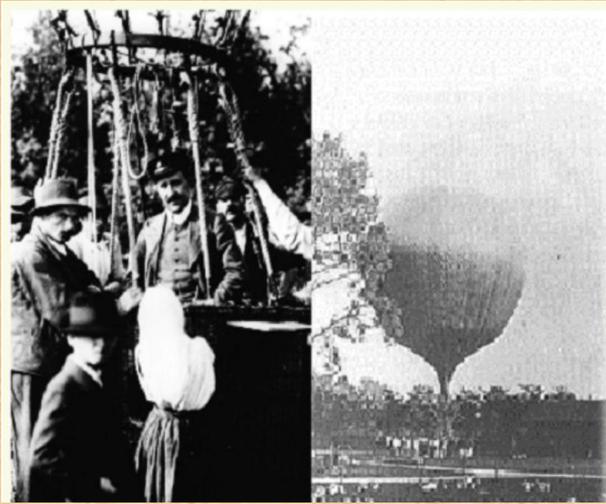
ci sono anche i neutrini!  
(il problema del decadimento  $\beta$ )



A questa scala, il Nucleo è  $\sim 1$  cm

# Oltre la materia ordinaria...

## scoperta con i Raggi Cosmici

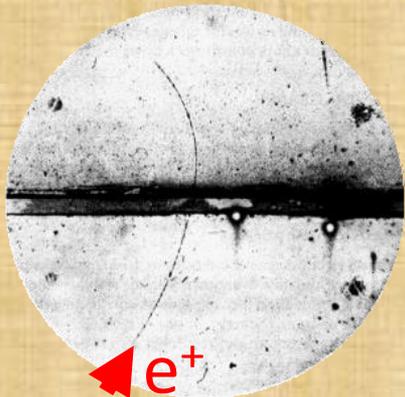


Victor Hess nel 1912 scopre con esperimenti ad alta quota i raggi cosmici

**I raggi cosmici primari producono sciame di particelle nell'atmosfera**



**Sulla superficie della Terra :~ 1/sec/dm<sup>2</sup>**

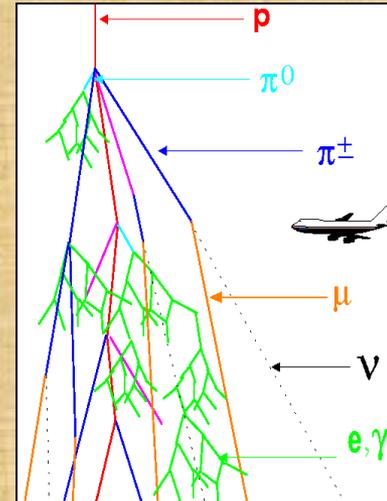


1932- Anderson scopre il positrone

E questo chi lo ha ordinato?  
(I. I. Rabi)



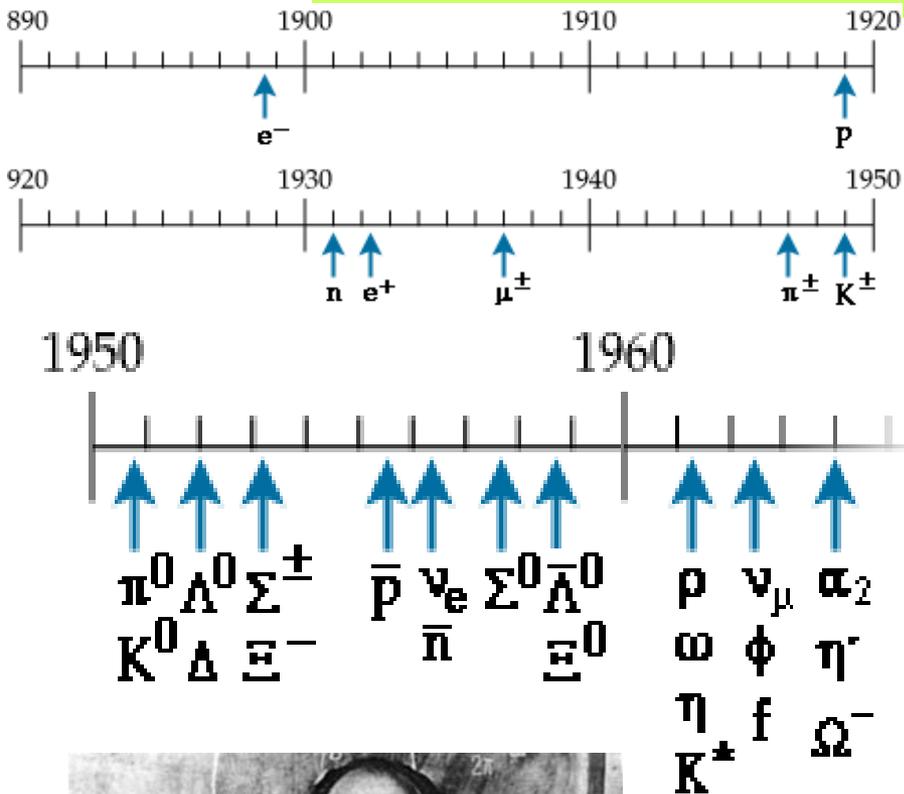
1937-Anderson & Neddermeyer scoprono il mesotrone (muone)



**Raggi cosmici primari:**  
**p 80 %, α 9 %, n 8 %  
 e 2 %, nuclei pesanti 1 %  
 γ 0.1 %, ν 0.1 %**

**Raggi cosmici secondari  
 sulla superficie della Terra:**  
**ν 68% ; μ 30%; p, n,...2 %**

# Oltre la materia ordinaria ...



- 1952, scoperta della  $\Delta$  (Fermi et al.)
- 1955, scoperta dell'antiprotone (Segrè et al.) 1955,
- .....

Tra gli anni '50 e gli anni '60 con l'avvento degli acceleratori e della camera a bolle (un nuovo rivelatore molto migliore della camera a nebbia) vengono scoperte moltissime nuove particelle, forse troppe.. c'è ora molto da fare per i teorici !



"Young man, if I could remember the names of these particles, I would have been a botanist!" disse E. Fermi al suo studente L. Lederman (anch'egli premio Nobel)

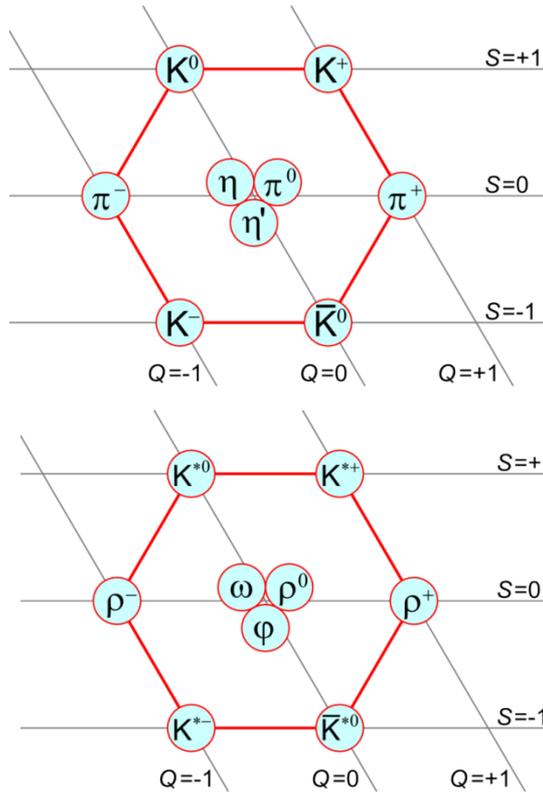
Nel 1964 per mettere ordine nello zoo delle particelle fino ad allora scoperte, Gell-Mann (e Zweig) intuì l'esistenza di una struttura di simmetria ( $SU(3)$ ), ipotizzando l'esistenza di tre particelle che chiamò quark.

- 1964, scoperta dello  $\Omega^-$

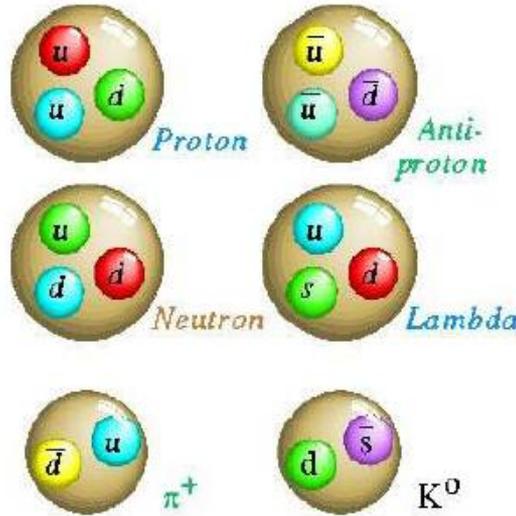
# L'ipotesi dei quark

("The 8-fold way")

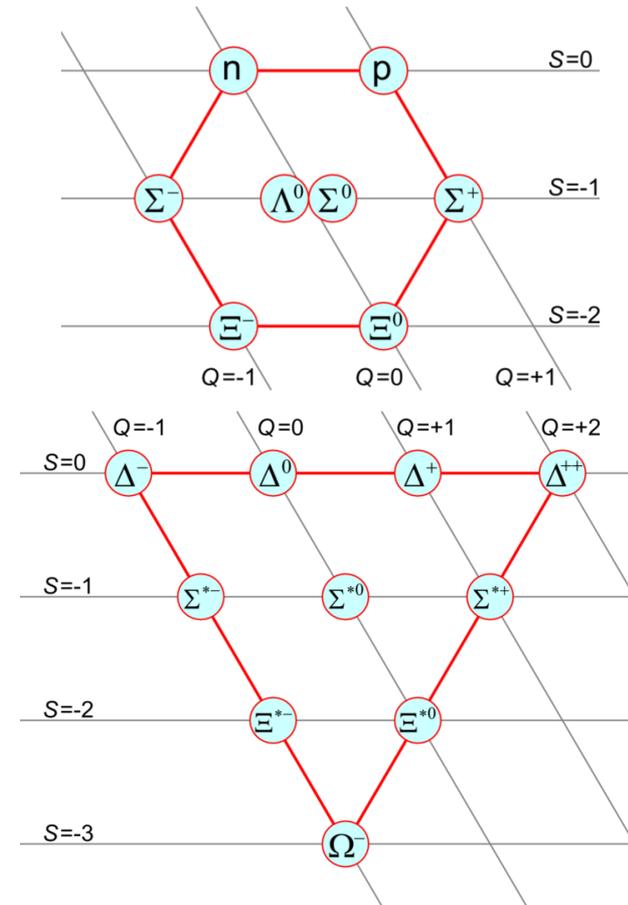
## Mesoni ( $q_1 q_2^{\text{bar}}$ )



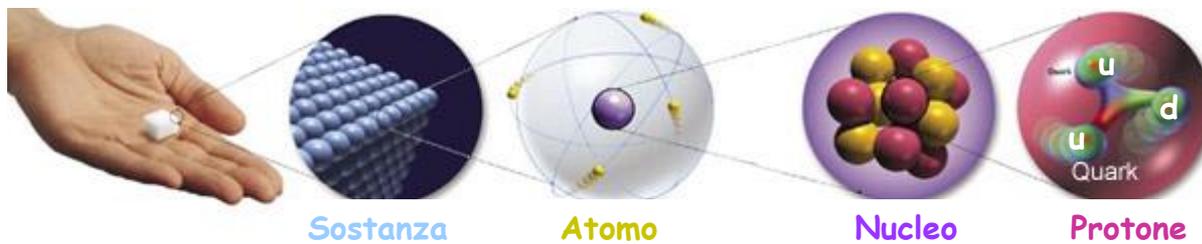
quark	carica	stranezza
up	+2/3 e	0
down	-1/3 e	0
strange	-1/3 e	-1



## Barioni ( $q_1 q_2 q_3$ )



C'è molta riluttanza nell'accettare l'ipotesi dei quark con carica frazionaria e, nonostante che questa ipotesi permetta di organizzare tutte le particelle scoperte in semplici strutture di multipletti e abbia predetto nuovi stati poi realmente scoperti ( $\Omega^-$ ), rimane per molti un artificio matematico fino al 1974.



## Riassumendo:

i costituenti fondamentali della materia sono i fermioni

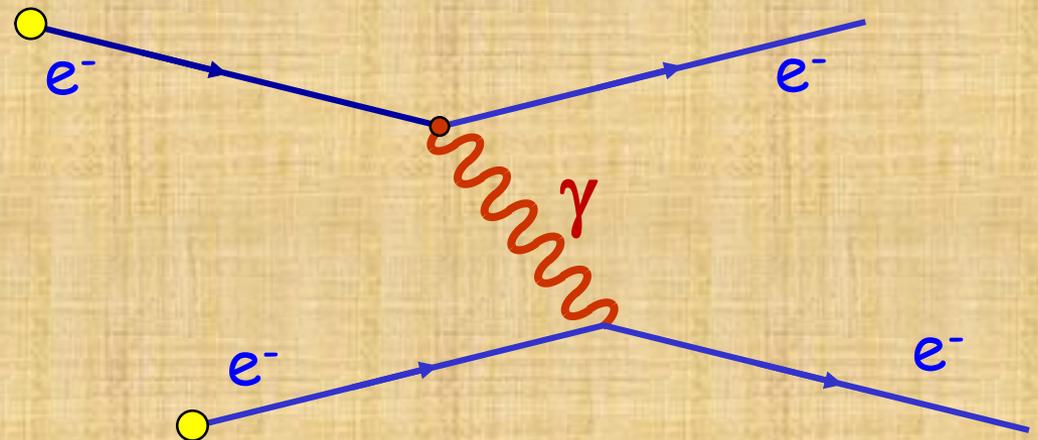
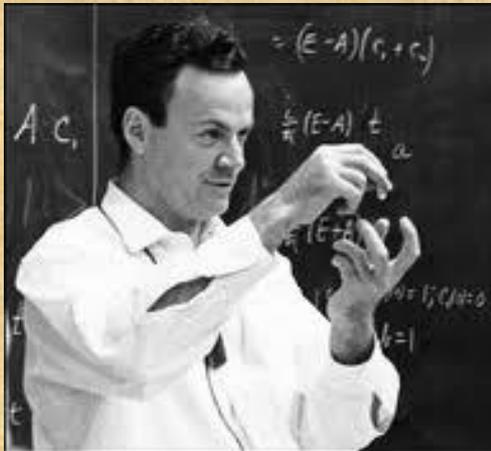
		Quarks		Leptoni	
Le generazioni di materia	I	up	down	e - neutrino	e electron
	II	charm	strange	$\mu$ - neutrino	$\mu$ muon
	III	top	bottom	$\tau$ - neutrino	$\tau$ tau

- Tutta la materia ordinaria è composta dalle particelle di prima generazione
- Tutte le particelle di seconda e terza generazione sono instabili e decadono rapidamente in particelle di prima generazione
- Inoltre si identificano tre classi di decadimenti corrispondenti a tempi diversi con cui essi avvengono e che dipendono dall'intensità dell'interazione responsabile del decadimento:
  - ✓ **Interazione forte:** le particelle decadono in tempi di circa  $10^{-20}$  secondi o inferiori
    - ✧ Esempio:  $\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$
  - ✓ **Interazione elettromagnetica:** le particelle decadono in tempi intorno ai  $10^{-15}$  secondi
    - ✧ Esempio: il pione neutro  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
  - ✓ **Interazione debole:** le particelle decadono in tempi di  $10^{-12}$  secondi e superiori
    - ✧ Esempio: i pioni carichi  $\pi \rightarrow \mu\nu$ , i kaoni  $K \rightarrow \pi e\nu$

# La Forza Elettromagnetica: la QED

- 1860's: Maxwell, introducendo il concetto di campo, scrive le sue famose equazioni e dimostra che la forza elettrica e quella magnetica sono facce diverse di una stessa interazione, e le unifica nella forza elettromagnetica.
- 1940's: Feynman, Schwinger, Tomonaga rendono la teoria di Maxwell compatibile con la meccanica quantistica e la relatività ristretta quantizzando il campo elettromagnetico.
  - ✓ Le oscillazioni del campo elettromagnetico sono interpretate come particelle (i fotoni) che si propagano e fungono da mediatori dell'interazione.
  - ✓ Imponendo che la teoria sia una **teoria di Gauge** (goda cioè dell'invarianza di Gauge (invarianza di calibrazione)) le interazioni elettromagnetiche sono completamente determinate e sono mediate da una particella di massa nulla: il fotone.

**Nasce la QED !**



# Cosa deve fare una buona teoria?

Deve poter calcolare le sezioni d'urto, cioè calcolare la probabilità che in un urto tra due particelle si ottenga un dato stato finale

Esempio:  $e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

Deve poter calcolare le larghezze parziali, cioè calcolare la probabilità che una particella decada in un dato stato finale

Esempio:  $Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$

**Nota Bene:**

La probabilità deve essere minore o uguale ad 1 (1 vuol dire sempre!). Se la teoria dà come risultato un numero maggiore di 1, la teoria è sicuramente sbagliata (violazione dell'unitarietà).

# Invarianza di gauge

In meccanica quantistica lo stato di un sistema di particelle è descritto da una funzione d'onda:

$$\Psi(\mathbf{x}, t)$$

Il quadrato del modulo della funzione d'onda esprime la probabilità di trovare il sistema in un certo stato:

$$\text{Probabilità} = |\Psi(\mathbf{x}, t)|^2$$

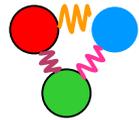
La probabilità non cambia moltiplicando la funzione d'onda per un "fattore di fase" (invarianza di gauge)

$$\Psi(\mathbf{x}, t) \rightarrow \Psi'(\mathbf{x}, t) = e^{iQ(\mathbf{x}, t)} \cdot \Psi(\mathbf{x}, t)$$

Le equazioni (la lagrangiana) di una buona teoria devono quindi rispettare l'invarianza di gauge

# La Forza Forte: la QCD

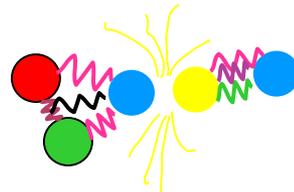
La forza forte fra i quarks decresce con il diminuire della loro distanza e all'interno degli adroni si comportano come se fossero liberi (*libertà asintotica*). Quando si cerca di allontanare i quarks tra loro la forza aumenta e obbliga i quarks a restare *confinati* all'interno degli adroni. Questo e' ciò che succede quando si cerca di estrarre un quark da un barione :



barione



L'energia nel campo aumenta fino a quando non è sufficiente a produrre una coppia di **quark-antiquark**



Un **quark** rimarrà nel barione, mentre l'**antiquark** si unirà al quark strappato per formare un mesone

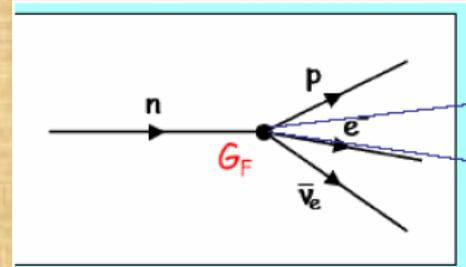
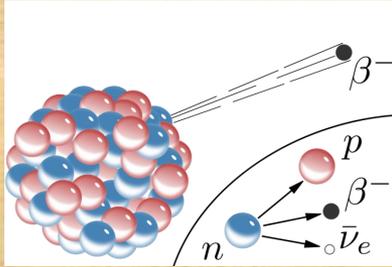


Gross, Wilczek and Politzer, nel 1974 capirono che una **teoria di gauge** era l'unica teoria di campo compatibile con una forza che godesse contemporaneamente della **libertà asintotica** e del **confinamento**:

## Nasceva così la QCD !

# La Forza Elettrodebole

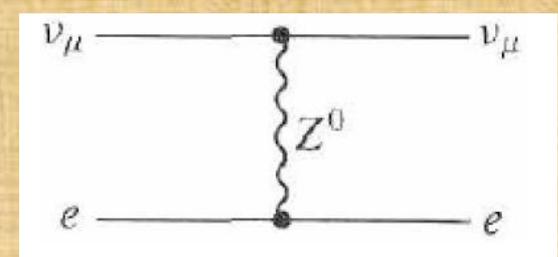
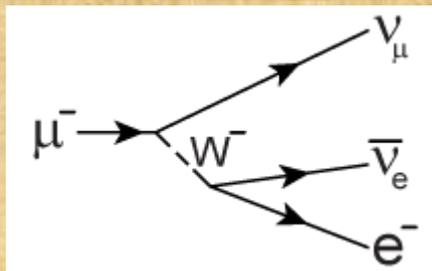
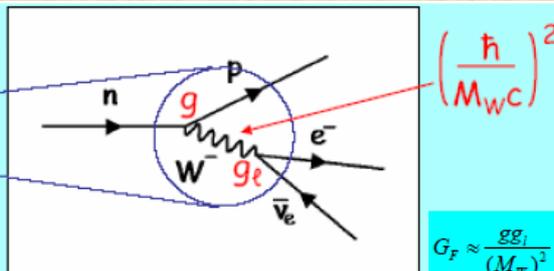
Agli inizi degli anni 60 la teoria di Fermi era ancora considerato il modello migliore per spiegare la fenomenologia delle interazioni deboli, ma non era completamente soddisfacente e ad alte energie violava l'unitarietà.



Verso la fine degli anni 60 Glashow, Salam e Weinberg concepiscono una teoria nell'ambito delle teorie di gauge in cui l'interazione elettromagnetica e l'interazione debole sono due manifestazioni dello stesso meccanismo che a distanze molto piccole ( $\approx 10^{-18}$  m) mostrano la stessa intensità.

L'interazione elettromagnetica è mediata da un bosone di gauge, il fotone, con massa nulla che quindi è mediatore di una forza con raggio d'azione infinito

L'interazione debole è mediata da tre bosoni di gauge (i due bosoni vettori carichi  $W^\pm$  e il bosone vettore neutro lo  $Z^0$ ) tutti molto massivi che quindi sono mediatori di forze con un raggio di azione molto limitato



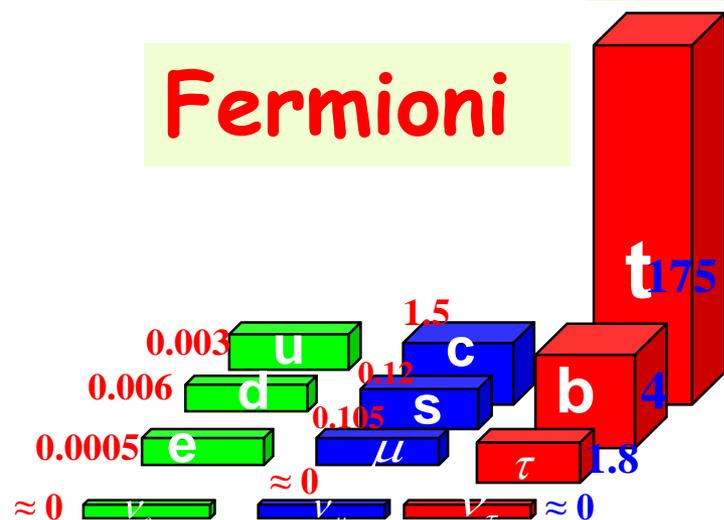
# Il modello standard prende forma... ma ci sono difficoltà !

L'unificazione della forza elettromagnetica e della forza debole proposta da *Glashow, Salam e Weinberg* nell'ambito di una teoria di gauge sembrerebbe poter funzionare ma c'è un serio problema.

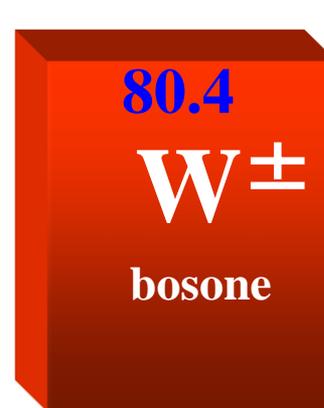
l'invarianza di gauge richiede che le particelle mediatrici dell'interazione abbiano massa nulla come il fotone e i gluoni; ma i  $W^\pm$  e lo  $Z^0$ , mediatori di una interazione a corto raggio come l'interazione debole, non possono avere masse nulle !

## Le masse (in GeV)

### Fermioni



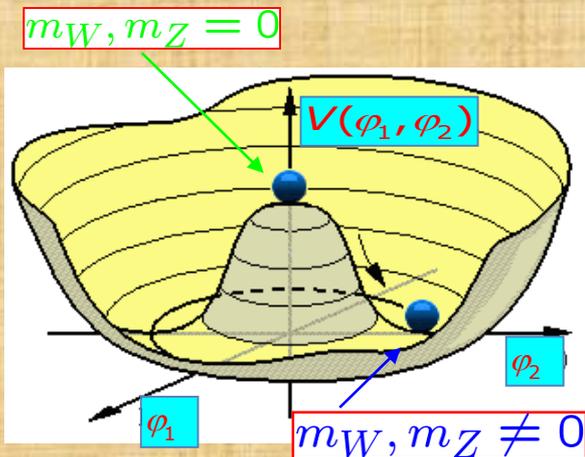
### Bosoni



# Rottura spontanea della simmetria

Il meccanismo di Higgs (rottura spontanea della simmetria proposta nel 1964 da Higgs, Hengler e Brout) potrebbe risolvere il problema.

Tale meccanismo permette di avere una teoria di gauge con bosoni massivi a condizione che esista in natura un nuovo campo, il campo di Higgs, con cui  $W^\pm$  e  $Z$  (ma anche tutte le altre particelle) possano interagire acquistando una massa definita, mentre il fotone mantiene nulla la sua massa.



## Ipotesi:

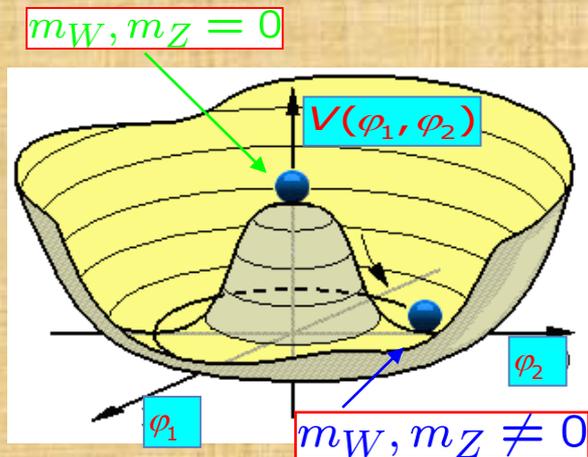
$10^{-10}$  secondi dopo il Big Bang l'Universo raffreddandosi subisce una transizione di fase e il vuoto si porta ad uno stato energetico più basso (rottura spontanea della simmetria) riempiendo lo spazio con il campo di Higgs.

La Lagrangiana (da cui si ricavano le equazioni del sistema) mantiene la simmetria di gauge, ma la scelta di un qualsiasi stato fondamentale rompe la simmetria.

# Rottura spontanea della simmetria

Il meccanismo di Higgs (rottura spontanea della simmetria proposta nel 1964 da Higgs, Hengler e Brout) potrebbe risolvere il problema.

Tale meccanismo permette di avere una teoria di gauge con bosoni massivi a condizione che esista in natura un nuovo campo, il campo di Higgs, con cui  $W^\pm$  e  $Z$  (ma anche tutte le altre particelle) possano interagire acquistando una massa definita, mentre il fotone mantiene nulla la sua massa.



# Il campo di Higgs

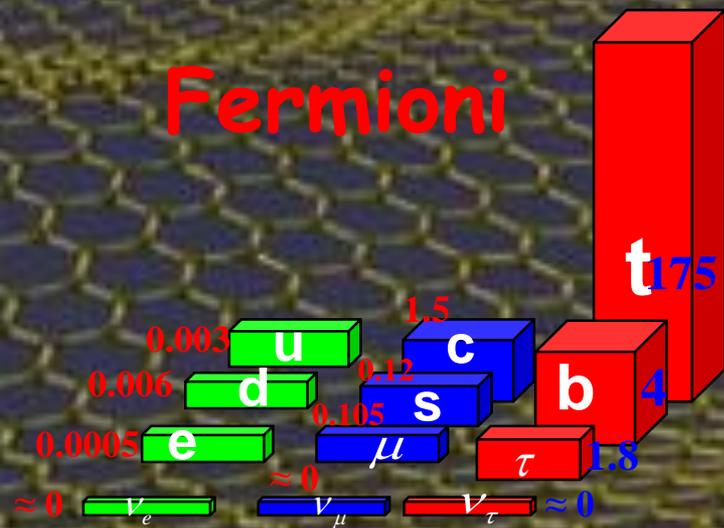
## Ipotesi

Il campo di Higgs permea tutto l'Universo: i Bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$  e tutte le particelle di materia interagendo con questo campo non possono più muoversi alla velocità della luce perché hanno acquistato una massa. Più forte è l'interazione della particella col campo di Higgs più grande è la sua massa. Il fotone ed i gluoni non interagiscono col campo e restano senza massa.

## Le masse (in GeV)

### Fermioni

### Bosoni



# Il campo di Higgs

Possiamo pensare al campo di Higgs come ad un campo di neve che riempie il vuoto di tutto l'Universo. La massa di una particella è proporzionale alla resistenza che questo mezzo offre al suo movimento



top quark



elettrone

# Il campo di Higgs

Se questo campo che permea tutto l'Universo esiste davvero e non è solo una mera speculazione teorica allora deve esistere anche la particella che media questa interazione....

## Il Bosone di Higgs !

# Il Modello Standard

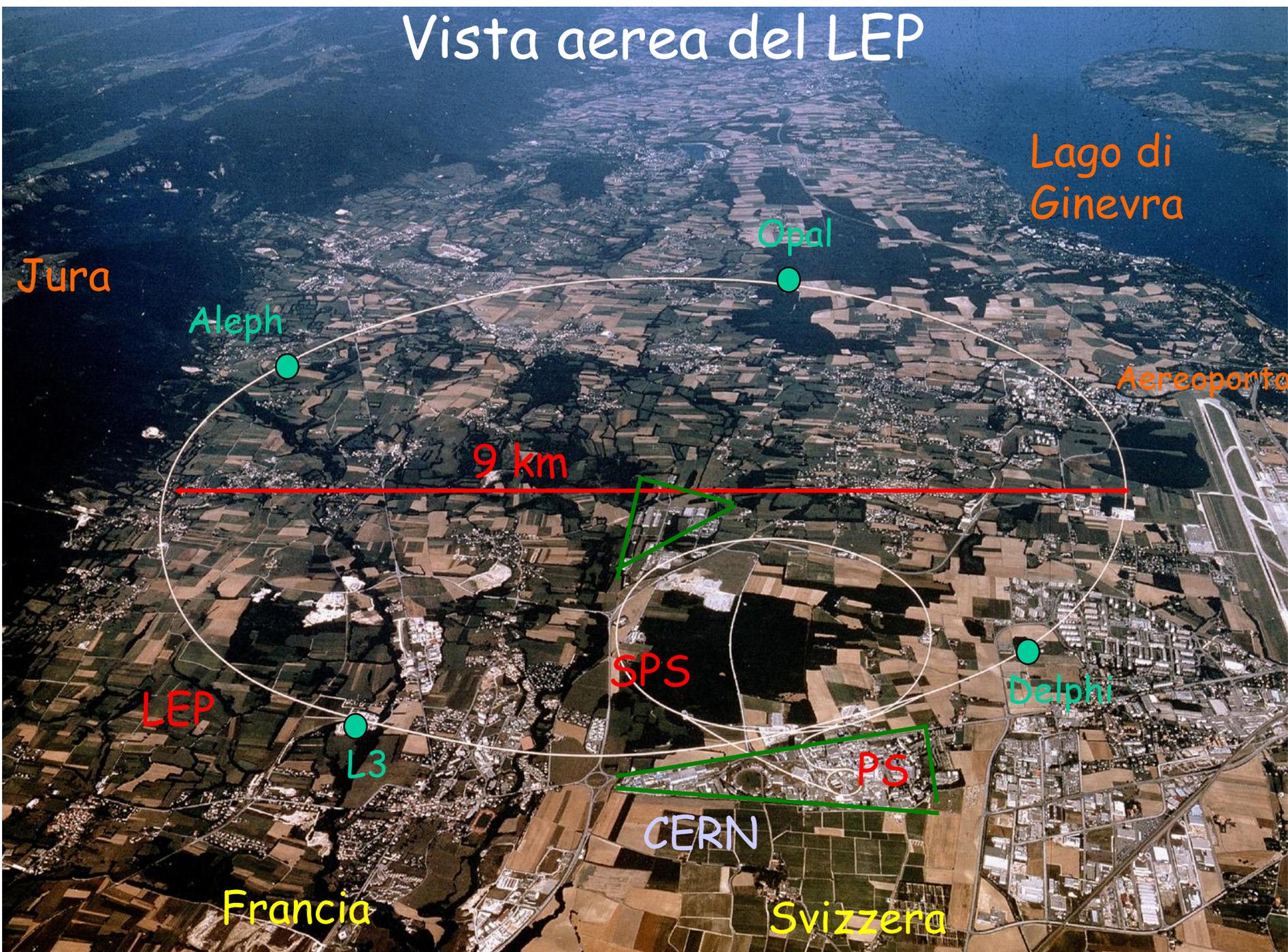
- ✓ 1967/68: l'unificazione dell'interazione elettromagnetica e debole prende la sua forma definitiva con l'integrazione nel modello del meccanismo di Higgs.
- ✓ 1973: La scoperta al CERN delle "correnti neutre" nelle interazioni neutrino-nucleone, spiegabili con lo scambio di uno  $Z^0$  sancisce definitivamente la credibilità della teoria.

→ Inizia la caccia ai bosoni  $W^\pm$ ,  $Z^0$ , Higgs

- ✓ **1983**: I bosoni  $W$  e  $Z$  sono puntualmente scoperti al collider protone-antiprotone del CERN
- ✓ **1989-2000**: Esperimenti di precisione condotti a SLAC e al CERN avvalorano l'ipotesi che esistano tre e solo tre generazioni di particelle fondamentali. Tantissime altre misure di precisione verificano la bontà del Modello Standard.

ma del Bosone di Higgs nemmeno l'ombra !

# Vista aerea del LEP



Jura

Lago di Ginevra

Aleph

Opal

Aeroporto

9 km

LEP

L3

SPS

PS

Delphi

CERN

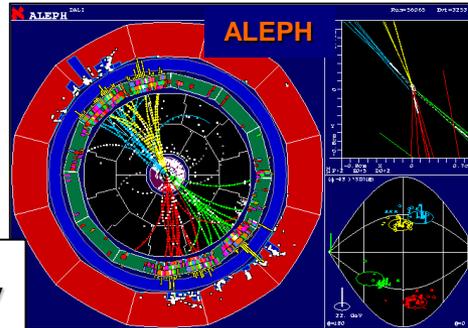
Francia

Svizzera

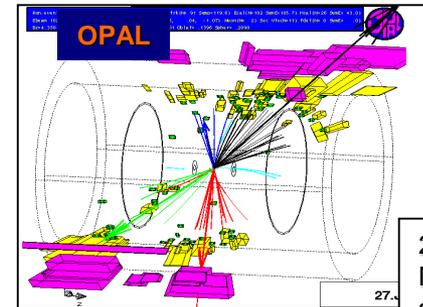
# Ricerca dell'Higgs a LEP

Fino a tutto il 2000 i quattro rivelatori di LEP (ALEPH, OPAL, DELPHI, L3) hanno cercato la produzione del bosone di Higgs nella reazione  $e^+e^- \rightarrow Z^0+H$  spingendo l'energia dell'acceleratore fino a 209 GeV

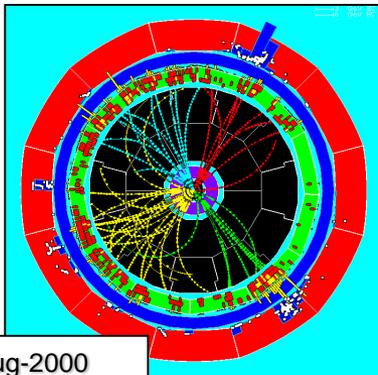
Sono stati visti alcuni eventi compatibili con una massa di un H intorno a 114 GeV: troppo pochi per poter affermare che si trattava del bosone di Higgs !



31-Jul-2000  
Mass: 112 GeV  
 $s/b_{115} = 2.0$

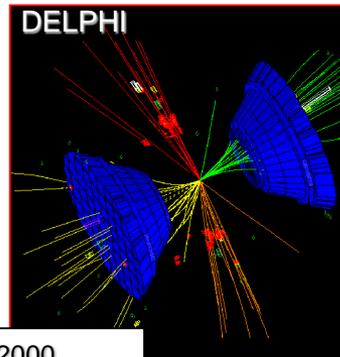


27-Jun-2000  
Mass: 113 GeV  
 $s/b_{115} = 0.52$

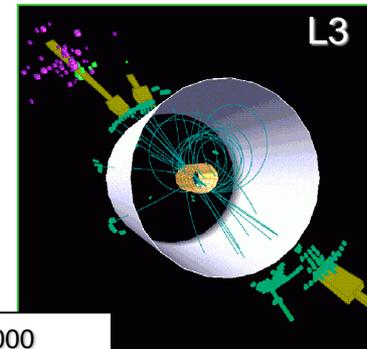


21-Aug-2000  
Mass: 110 GeV  
 $s/b_{115} = 0.9$

ALEPH

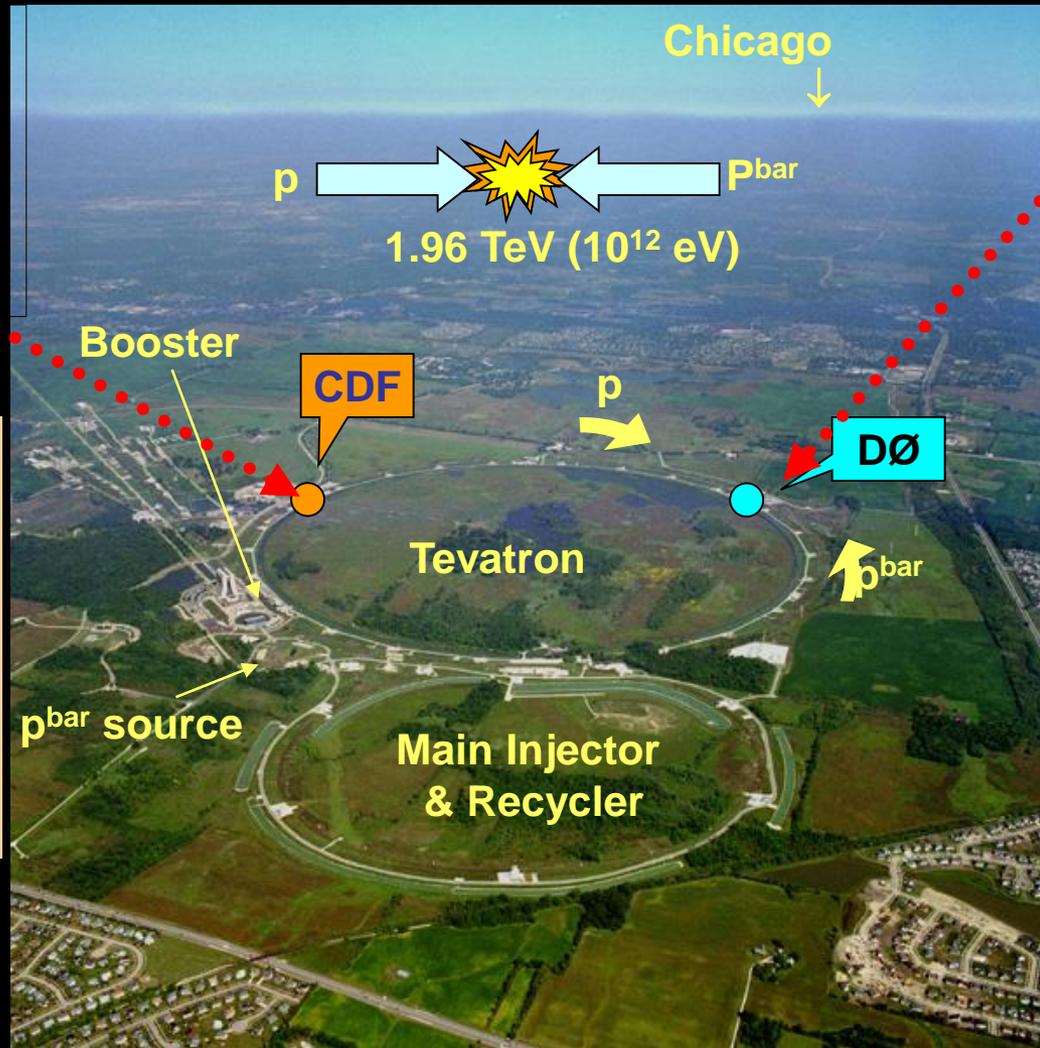


21-Jul-2000  
Mass: 114 GeV  
 $s/b_{115} = 0.4$



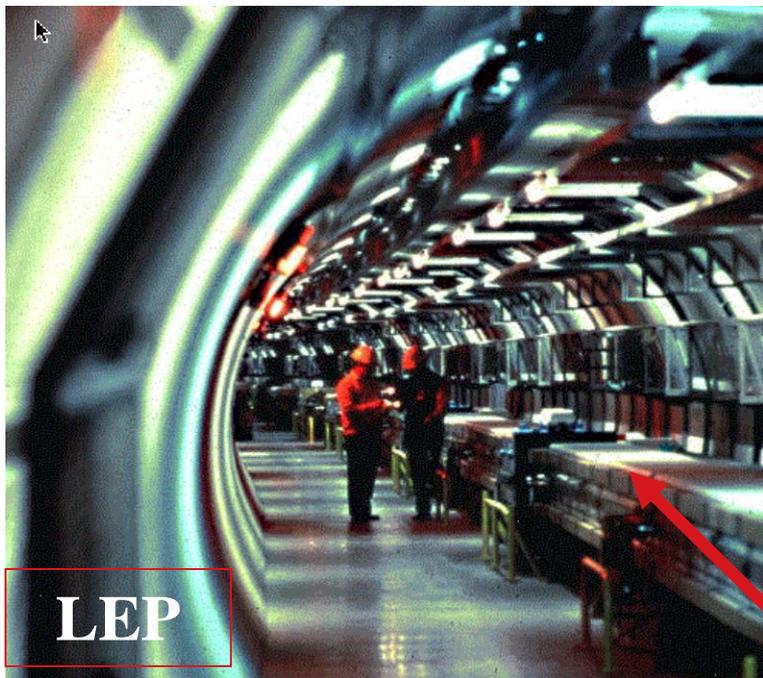
14-Oct-2000  
Mass: 114 GeV  
 $s/b_{115} = 2.0$

# Ricerca dell'Higgs al TeVatron



Al TeVatron ( $p$ - $p^{\text{bar}}$  a 1.96 TeV) il bosone di Higgs può essere prodotto, da solo o insieme a un W o uno Z, in un vasto intervallo di massa ma la probabilità di produrlo è molto bassa (un evento su centinaia di miliardi).

Per molti anni i due esperimenti CDF e DØ accumulano dati e sviluppano analisi molto raffinate per identificare possibili eventi di Higgs dagli innumerevoli eventi di fondo, ma senza arrivare mai ad avere la sensibilità sufficiente ad identificare il bosone di Higgs.



LEP



LHC



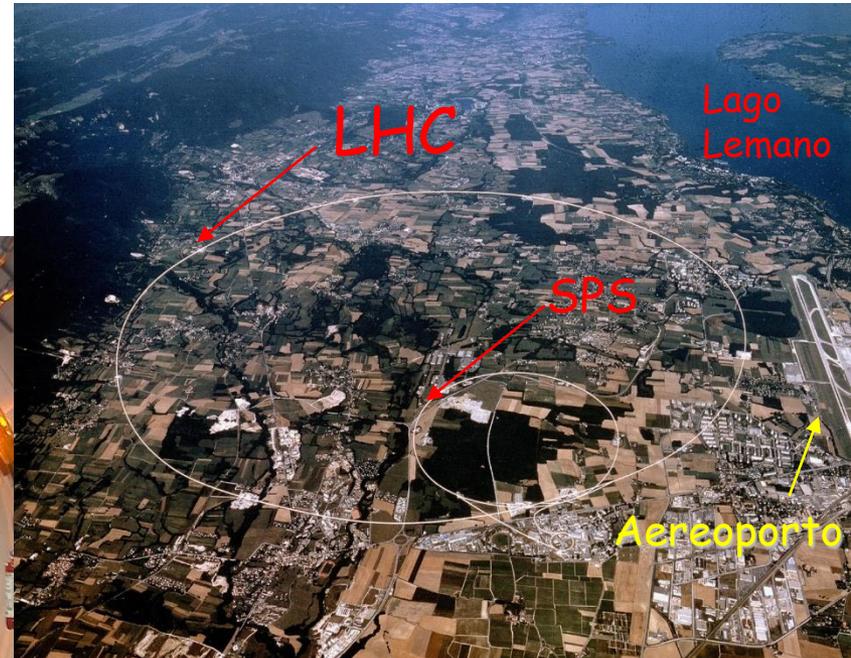
Nel 2000 i magneti di LEP vengono rimossi e inizia l'istallazione di LHC

SPS

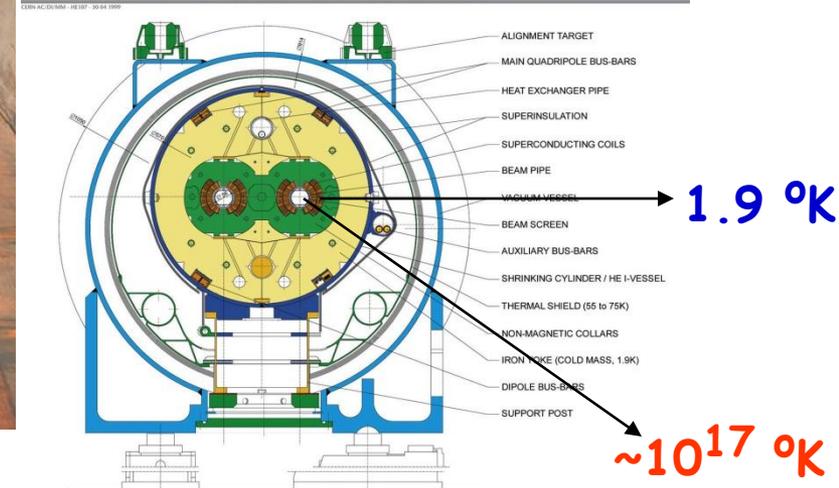
# Il Large Hadron Collider del CERN



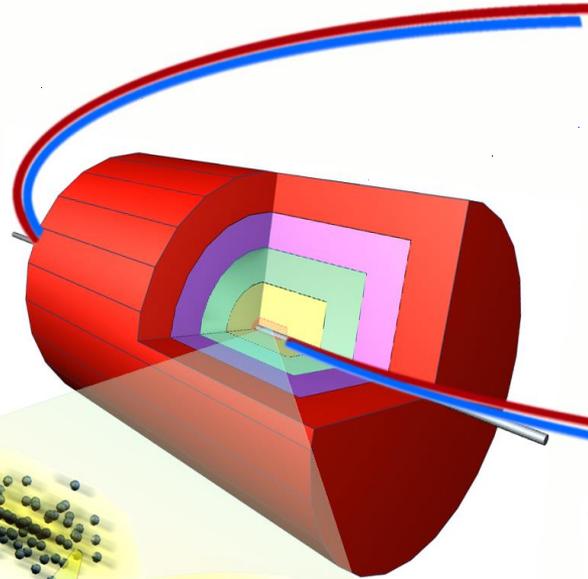
9300 Magneti superconduttori  
1232 Dipoli (15m, 1.9 °K) 8.4 tesla 11700 A  
448 Main Quads, 6618 Correttori.  
Circonferenza 26.7 km



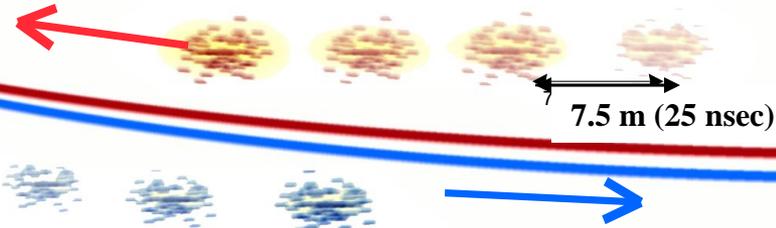
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



# LHC : collisioni protone-protone fino a 14 TeV



Protoni accelerati fino a 7 TeV  
1 TeV = mille miliardi di eV  
2808 pacchetti con cento miliardi di protoni  
circolanti per molte ore (11245 giri al secondo)



14 TeV

$\sim 10^{17}$  °K  
 $\sim 10^{-15}$  sec

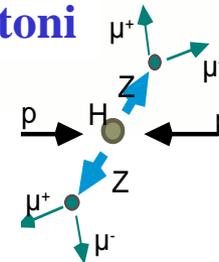
Si incontrano  $\approx 32$  milioni di pacchetti al secondo in  $\sim 16 \times 16 \mu\text{m}^2$  e quindi  $\approx 3200$  milioni di miliardi di protoni incontrano  $10^{11}$  protoni (un pacchetto) al secondo

$\approx 600$  milioni di collisioni al secondo tra protoni

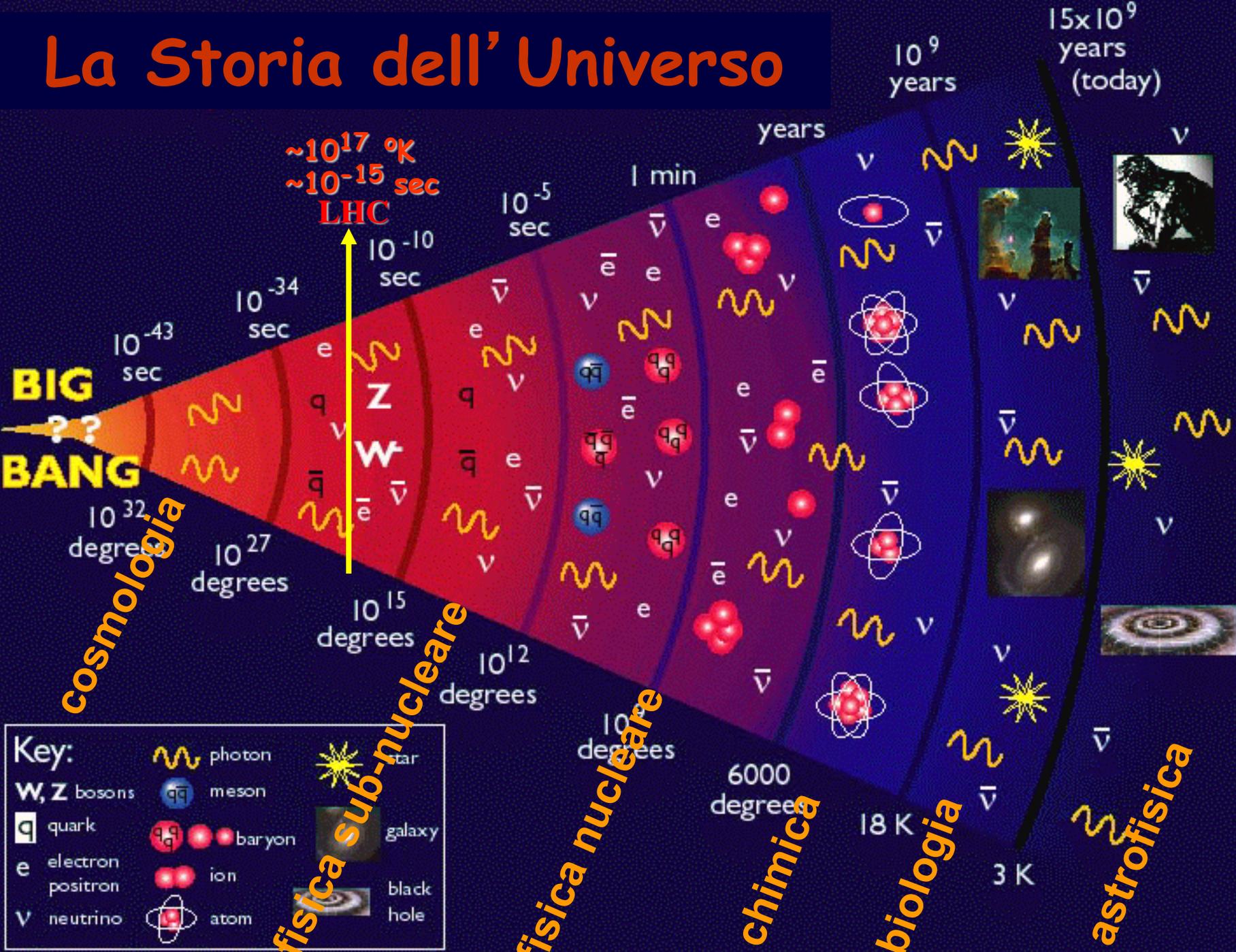
Collisione tra i “partoni” dei due protoni

“quasi” mini-Big Bang

Solo raramente ( $\sim$  ogni centomila secondi) si prevede che venga prodotto un bosone di Higgs in  $4\mu$ : selezione di 1 evento su centomila miliardi



# La Storia dell' Universo



**Key:**

	photon		star
<b>W, Z</b>	bosons		meson
<b>q</b>	quark		baryon
<b>e</b>	electron		ion
<b>e</b>	positron		atom
<b>v</b>	neutrino		galaxy
			black hole

*cosmologia*

*fisica sub-nucleare*

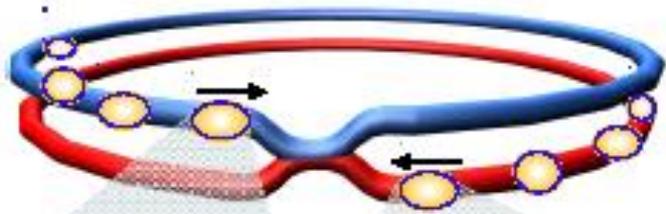
*fisica nucleare*

*chimica*

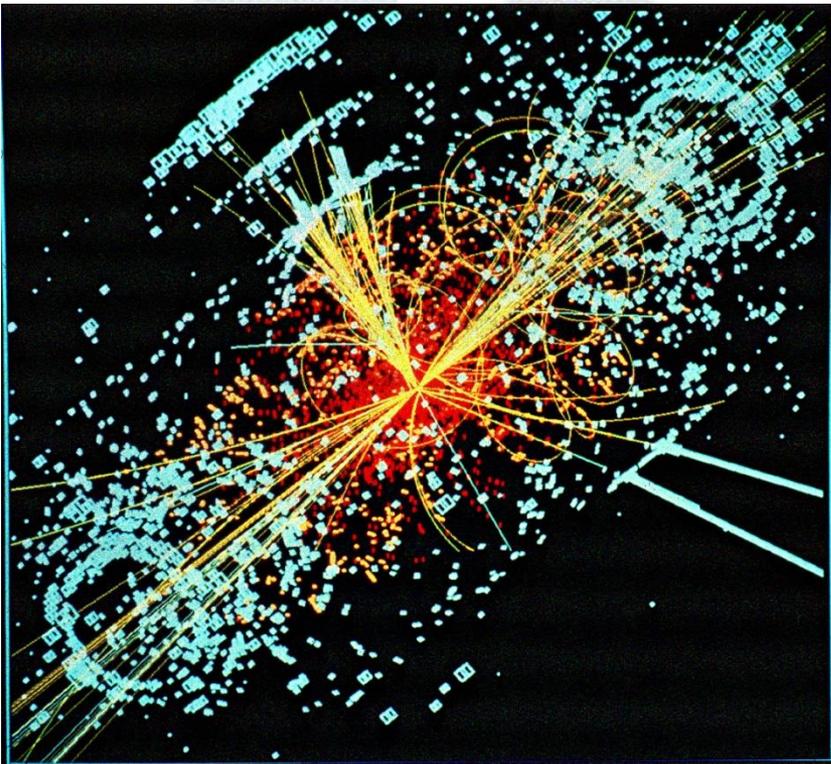
*biologia*

*astrofisica*

# Collisioni protone-protone a LHC



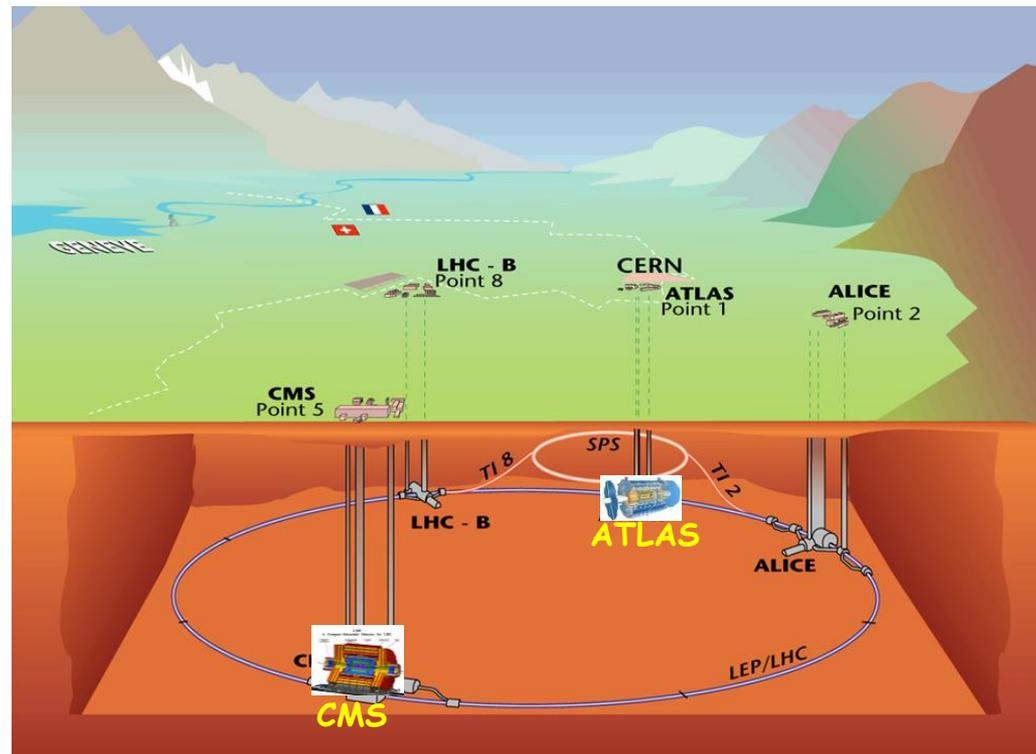
- ~600 milioni di eventi al secondo
- ~40 miliardi di particelle al secondo
- ~1000 particelle ogni 25 ns
- Selezione di 1 evento su diecimila miliardi



“quasi” mini-Big Bang

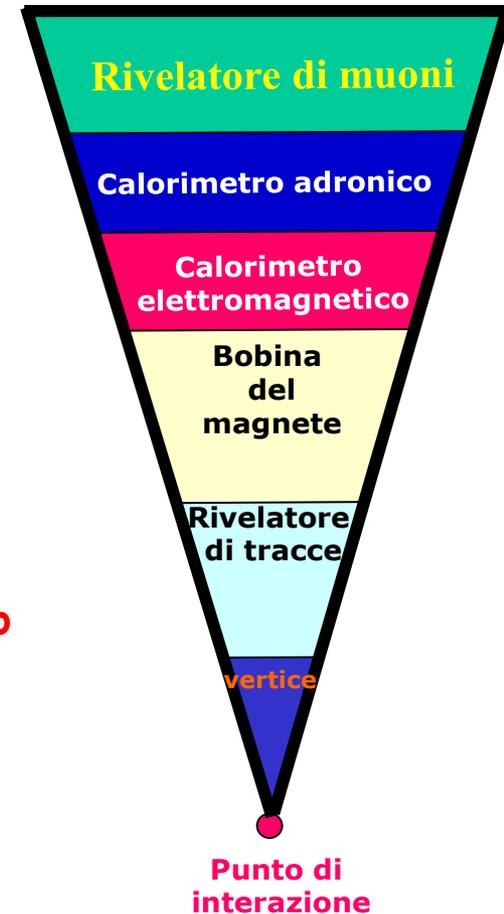
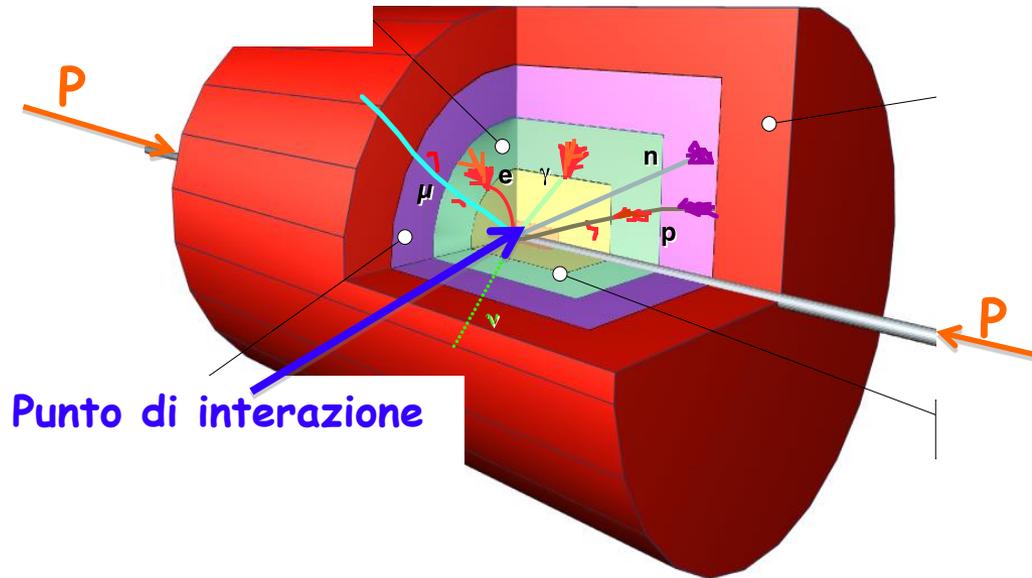
$\sim 10^{17}$  °K ,  $\sim 10^{-15}$  sec

⇒ Rivelatori altamente performanti



# Struttura dei Rivelatori a LHC

rivelatori di particelle di tipo diverso vengono disposti insieme uno dentro l'altro (come in una matrioska) a formare un grande sistema di rivelazione intorno al punto di interazione



Molte particelle prodotte nell'interazione sono instabili e decadono immediatamente. Solo le particelle stabili o quelle che vivono abbastanza<sup>(\*)</sup> a lungo possono essere rivelate direttamente :

**Cariche:**  $e^-$ ,  $e^+$ ,  $p$  (protoni),  $\pi^\pm$  (pioni),  $K^\pm$  (mesoni K),  $\mu^\pm$  (muons)

**Neutre:**  $\gamma$  (fotoni),  $n$  (neutroni),  $K^0$  (mesone K)

**Energia mancante:**  $\nu$  (neutrini)

(\*)

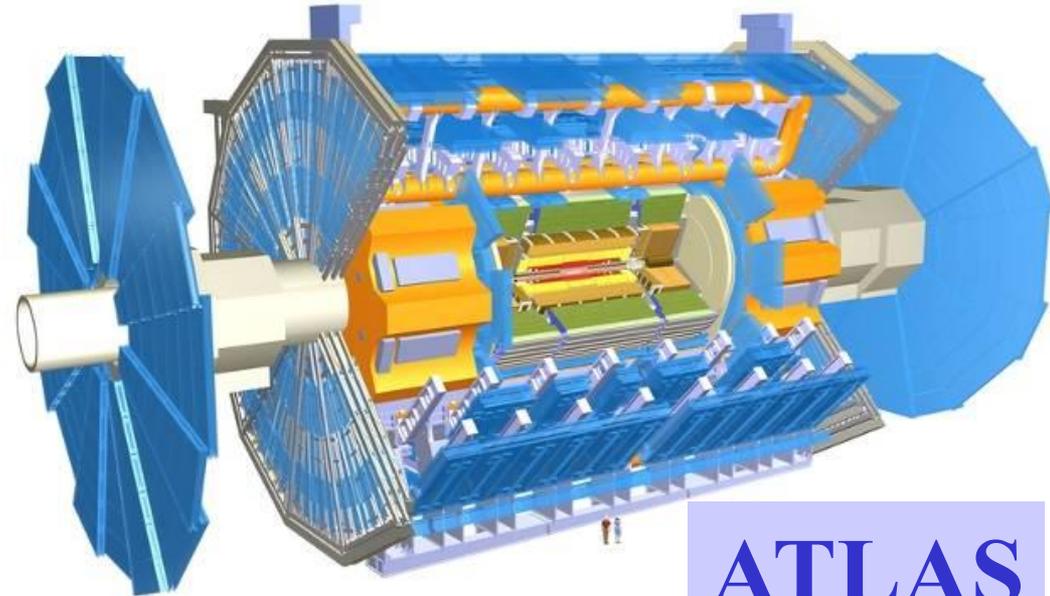
**Pioni**,  $\tau=2.6 \times 10^{-8}$  sec,  $E=20$  GeV,  $\gamma = E/m = 20/0.140 = 142.86$ ,  $\gamma\tau = 0.0037$  msec, distanza media percorsa =  $c \gamma \tau = 1.1$  km

**Muoni**,  $\tau=2.2 \times 10^{-6}$  sec,  $E=20$  GeV,  $m = 0.1$  GeV/ $c^2 \Rightarrow \gamma\tau = 0.44$  msec, distanza media percorsa = **132 km!**

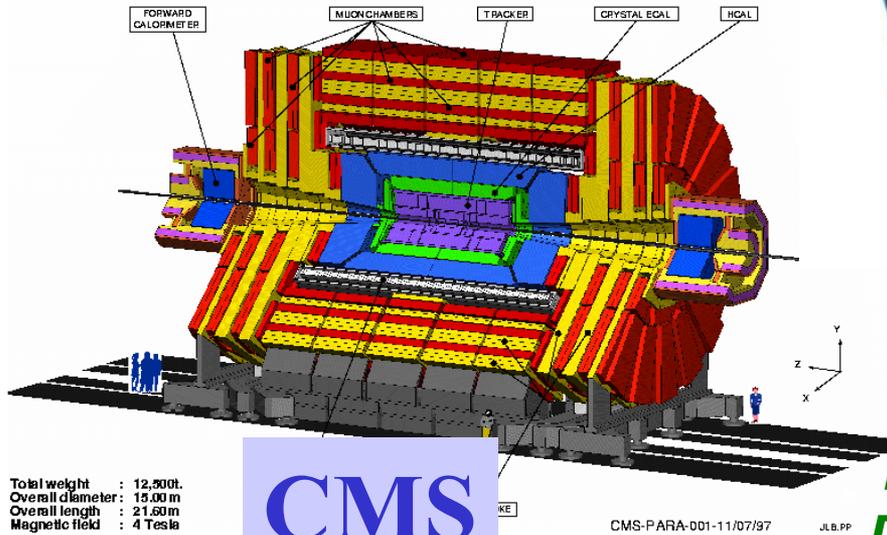
# Quanto sono grandi ATLAS e CMS?



**ATLAS e CMS accostati ad un edificio di 5 piani**



**ATLAS**



**CMS**

Total weight : 12,500t.  
Overall diameter : 15.00 m  
Overall length : 21.60 m  
Magnetic field : 4 Tesla

CMS-PARA-001-11/07/97

JLB,PP

	<u>ATLAS</u>	<u>CMS</u>
<b>Peso totale (tons)</b>	<b>7000</b>	<b>12500</b>
<b>Diametro</b>	<b>22 m</b>	<b>15 m</b>
<b>Lunghezza</b>	<b>46 m</b>	<b>22 m</b>
<b>Campo magnetico</b>	<b>2 T</b>	<b>4 T</b>

A questo punto (~ 1992) interveniamo pesantemente anche noi come Sezione di Pisa con due gruppi:

il gruppo CMS

il gruppo ATLAS

Il gruppo CMS di Pisa si propone come capofila di un ambizioso gigantesco rivelatore di tracce.

Il gruppo ATLAS di Pisa propone di collaborare alla realizzazione del calorimetro adronico.



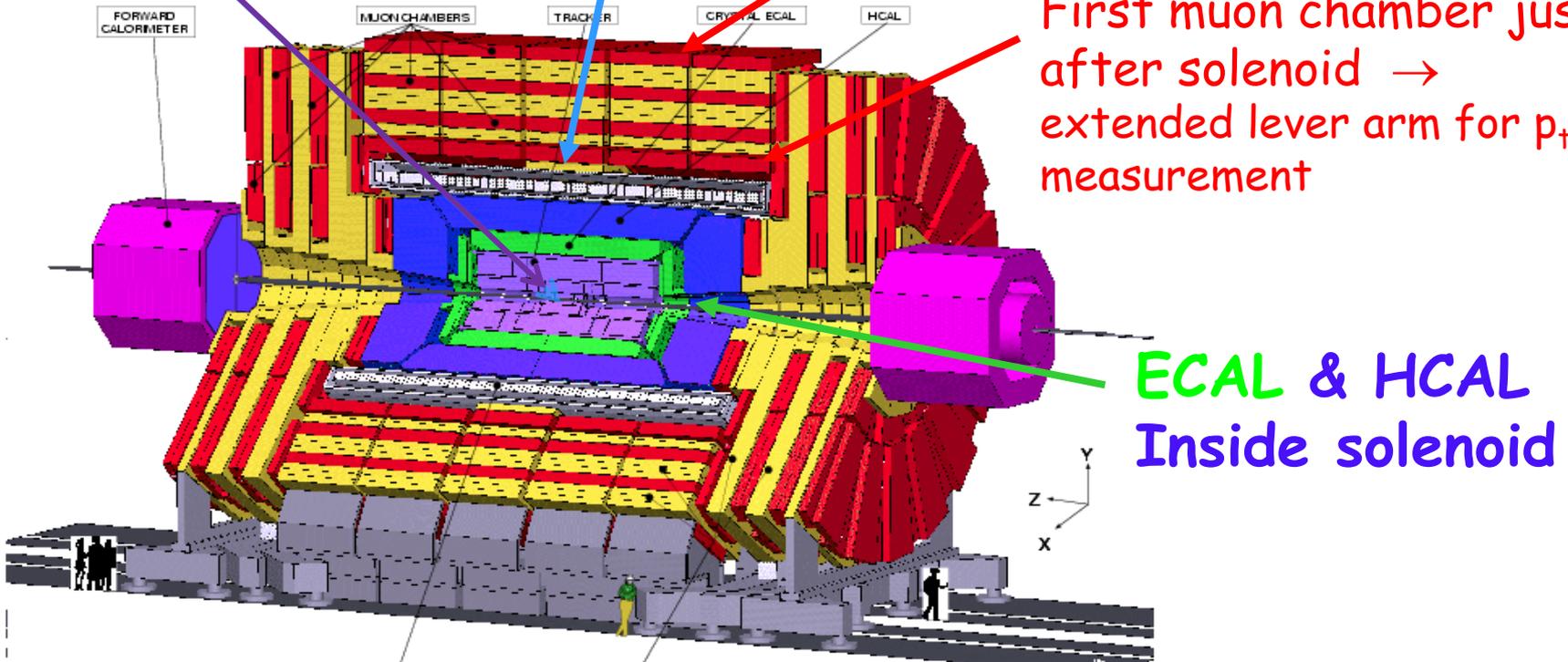
# CMS Detector

## 13m x 6m Solenoid: 4 Tesla Field

Tracking up to  $\eta \sim 2.4$

Muon system in return yoke

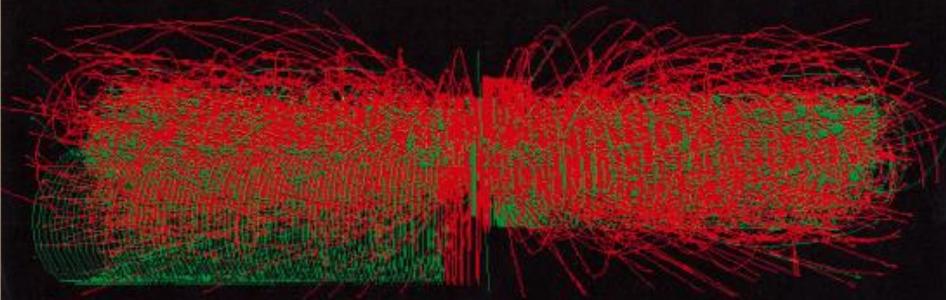
First muon chamber just after solenoid  $\rightarrow$  extended lever arm for  $p_T$  measurement



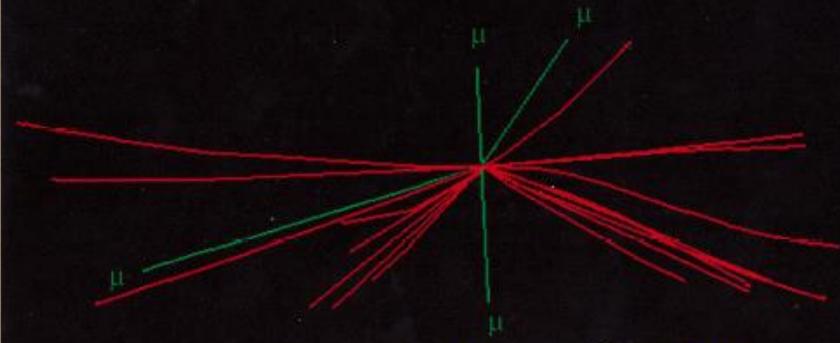
22m Long, 15m Diameter, 14'000 Ton Detector

# La sfida del tracciatore di CMS

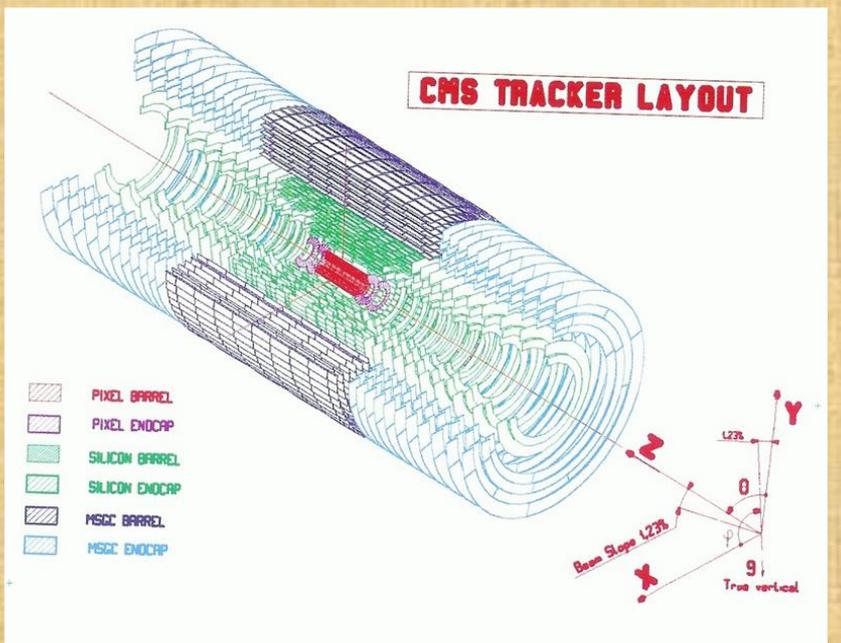
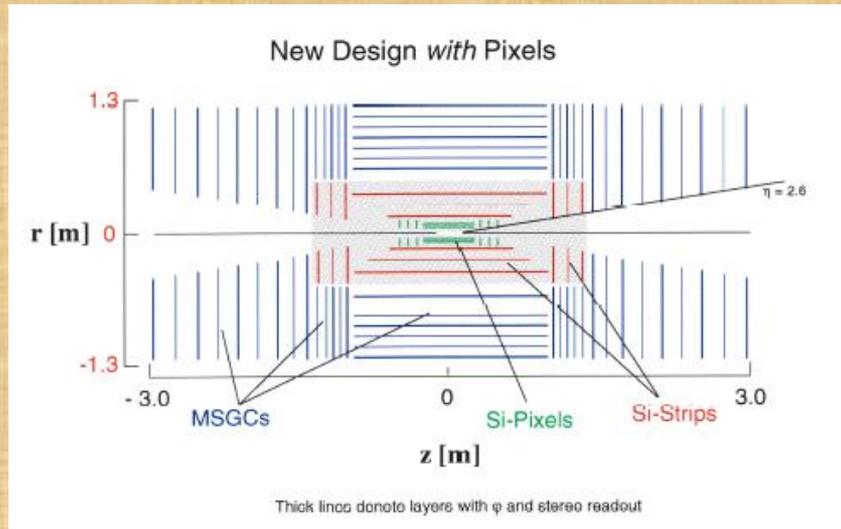
30 minimum bias events +  $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4\mu$



all charged particles with  $|\eta| < 2.5$



reconstructed tracks with  $p_t > 2.0$  GeV

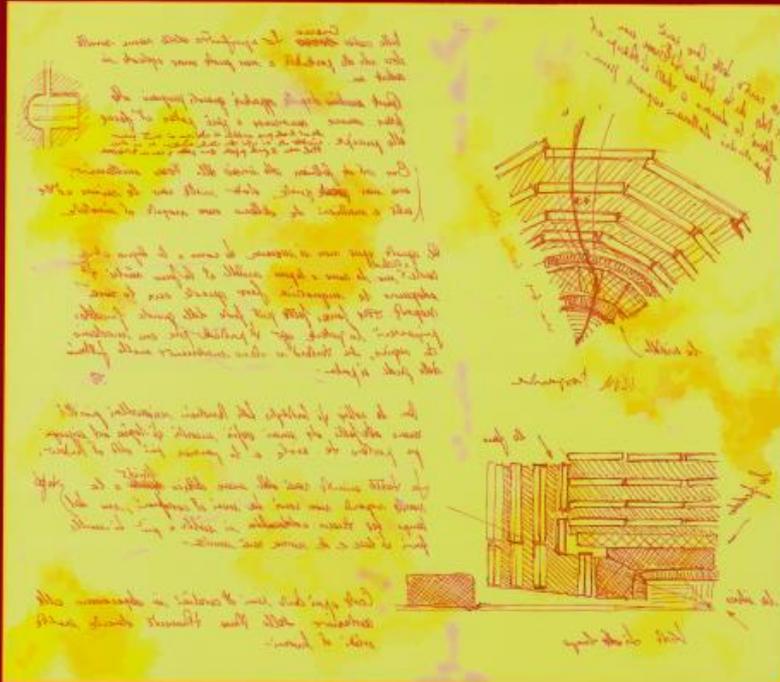


# 15 Dicembre 1994: CMS Technical Proposal

LABORATOIRE EUROPÉEN POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES  
CERN EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS

CERN/LHCC 94-38  
LHCC/P1  
15 December 1994

# CMS



## The Compact Muon Solenoid Technical Proposal

### Tracking Project

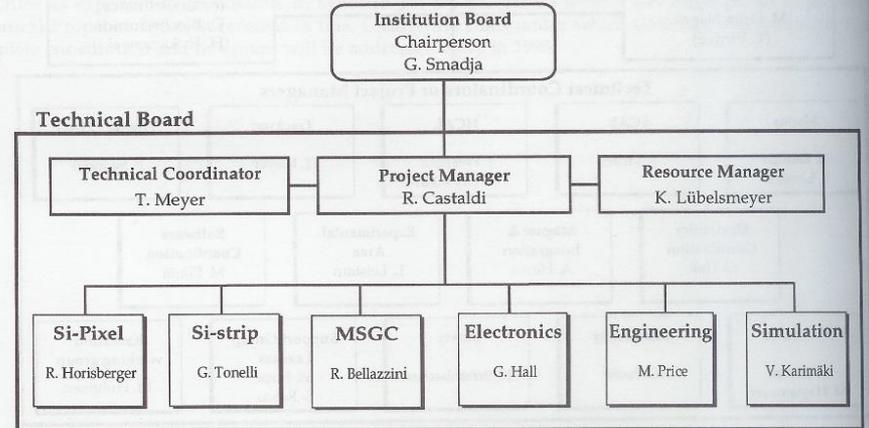
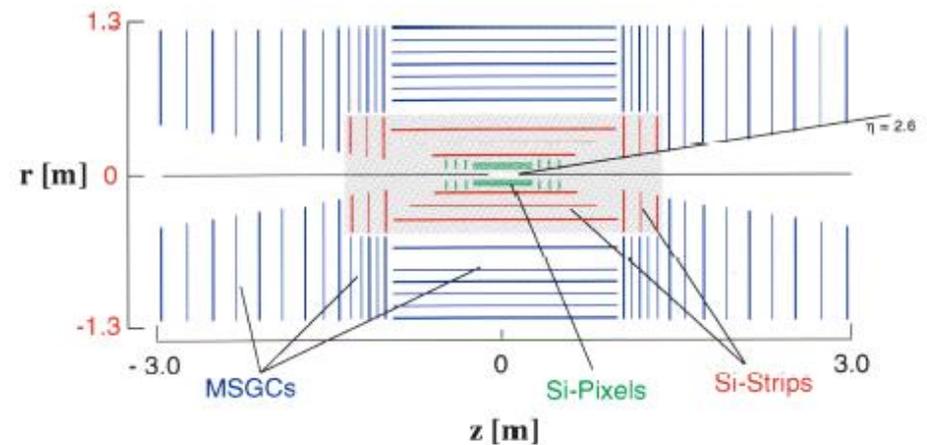


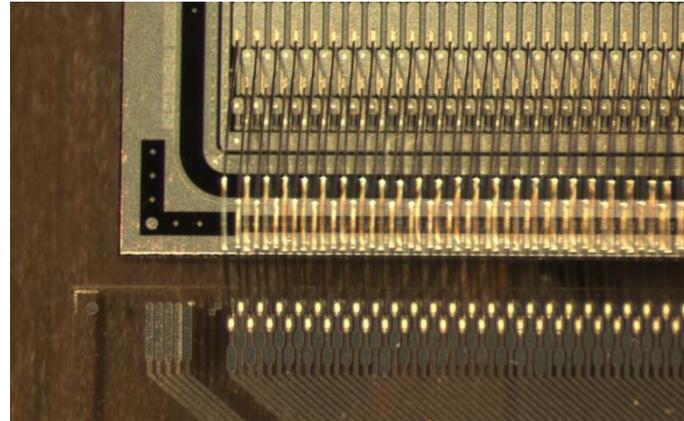
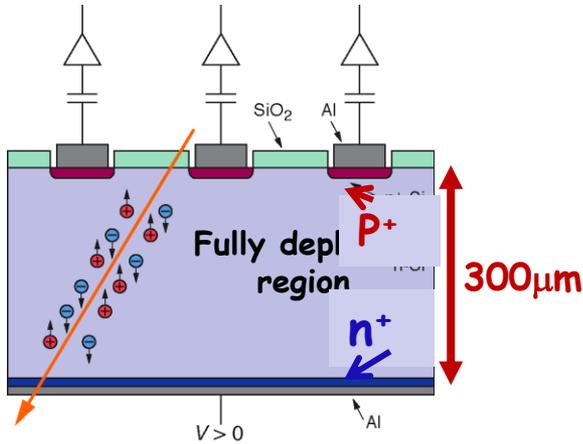
Fig. 20.4

### New Design with Pixels

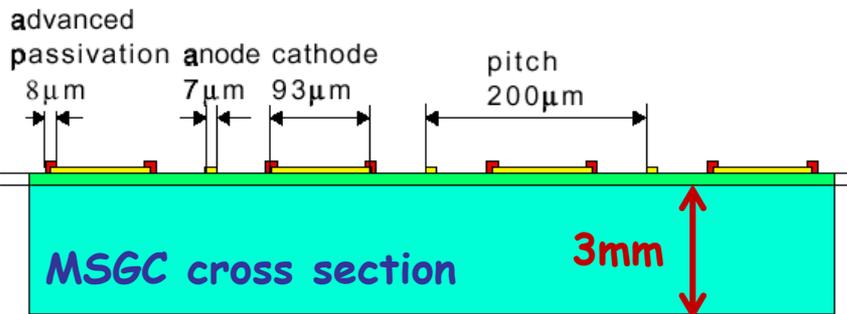


Thick lines denote layers with  $\phi$  and stereo readout

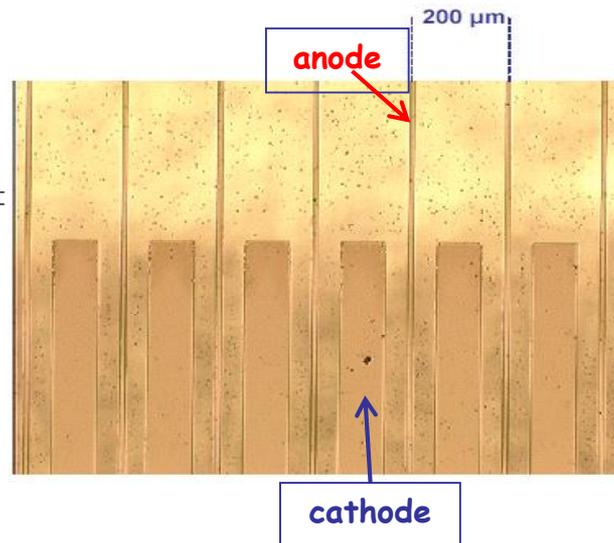
# Si-Detector ( wafer 4", 300 $\mu\text{m}$ )



# Micro Strip Gas Chamber



- advanced passivation: polyimide (2  $\mu\text{m}$ )
- metal: gold (0.6-0.8  $\mu\text{m}$ )
- undercoating: Pestov or S8900 glass (0.5-1  $\mu\text{m}$ )
- substrate: Desag glass (300  $\mu\text{m}$ )



# 13 Settembre 1955: LHCC Closed Session

## Milestones richieste al Tracker

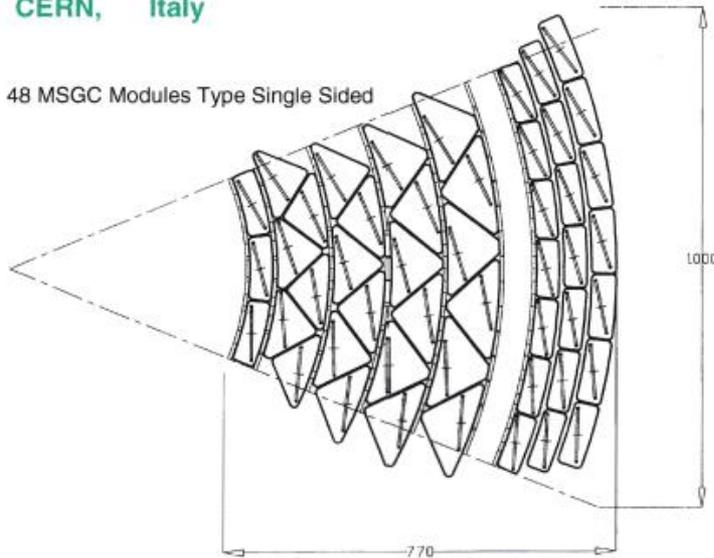
### Milestones for MSGC/MGC Tracker

06.1997: Prototype of a sector of a wheel partially equipped with engineered prototype modules

**Responsibility:**

CERN, Italy

48 MSGC Modules Type Single Sided



06.1997: Prototype of a forward disk partially equipped with engineered prototype modules

**Responsibility:**

Belgium, CERN, France, Germany, Russia

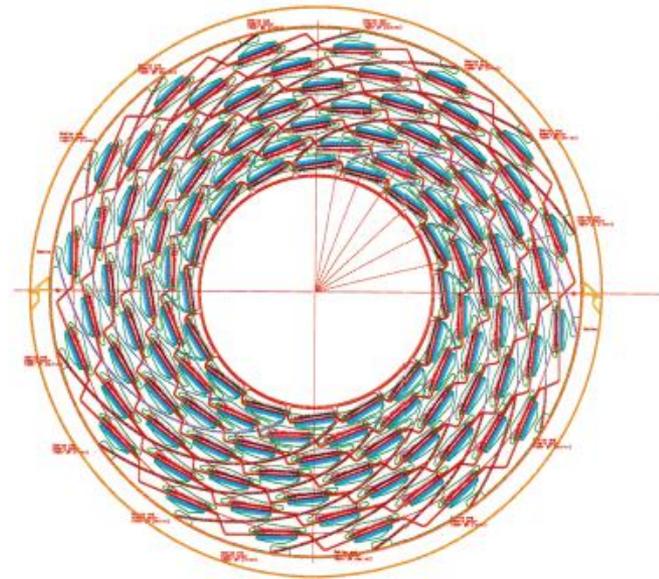
### Milestones for Si Systems

06.1997: Barrel Si-Wheel partially equipped  
06.1997: Forward Disk partially equipped

**Responsibility:**

Aachen I, CERN, Florence, Pisa

20 Si Modules Type Single Sided



## I primi prototipi LHCC: milestones 1997

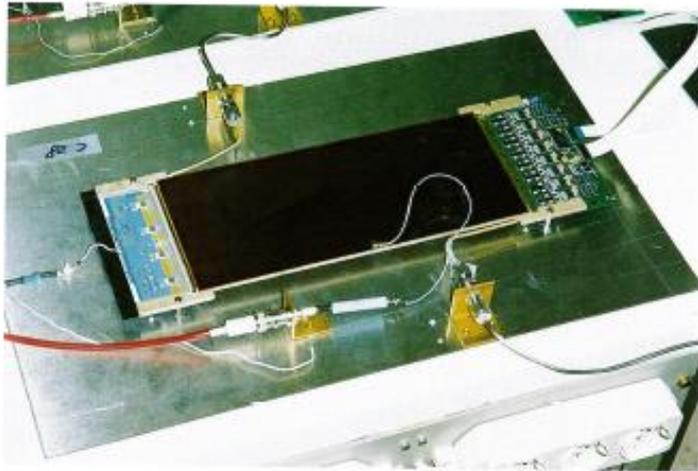


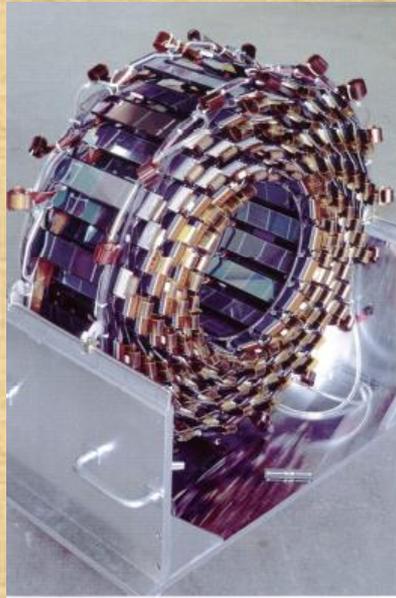
Fig. 4.xi: The MSGC B1 module under test.

MSGC B1 milestone:  
modulo di MSGC sotto  
test a Pisa assemblato e  
industrializzato da Laben-  
Proel Technologies



Fig. 4.xii: The MSGC B1 milestone. Sixteen rods are installed in the mechanical structure. Water and gas pipes, that act as cable supports, are visible on the front plane.

MSGC B1 milestone: 16  
rods ciascuna con tre  
moduli funzionanti e  
istallati nella struttura  
meccanica



## I primi prototipi LHCC: milestones 1997

SiB1 milestone: 112 moduli  
assemblati nella wheel:  
14 moduli funzionanti, i  
restanti moduli dummies



SiF1 milestone: 2 dischi  
con 36 moduli assemblati  
in ciascun disco:  
13 moduli funzionanti, i  
restanti moduli dummies

# 15 Aprile 1998: Tracker Technical Design Report

LABORATOIRE EUROPÉEN POUR LA PHYSIQUE DES PARTICULES  
**CERN** EUROPEAN LABORATORY FOR PARTICLE PHYSICS

CERN/LHCC 98-6  
CMS TDR 5  
15 April 1998

# CMS



## The Tracker Project Technical Design Report



CERN/LHCC 98-6  
CMS TDR 5  
15 April 1998

## CMS

### Tracker Technical Design Report

#### CMS Tracker

Project Manager	Technical Coordinator	Resource Manager
Rino Custaldi INFN Pisa Rino.Custaldi@pi.infn.it	Patrice Siegrist CERN Patrice.Siegrist@cern.ch	Jean-Eudes Augustin IPN Lyon Augustin@in2p3.fr
Chairperson Inst. Board: Günter Flügge, Aachen III B, Fluegge@physik.rwth-aachen.de		

CMS Spokesperson	CMS Technical Coordinator
Michel Della Negra CERN Michel.Della.Negra@cern.ch	Ernst Radermacher CERN Ernst.Radermacher@cern.ch

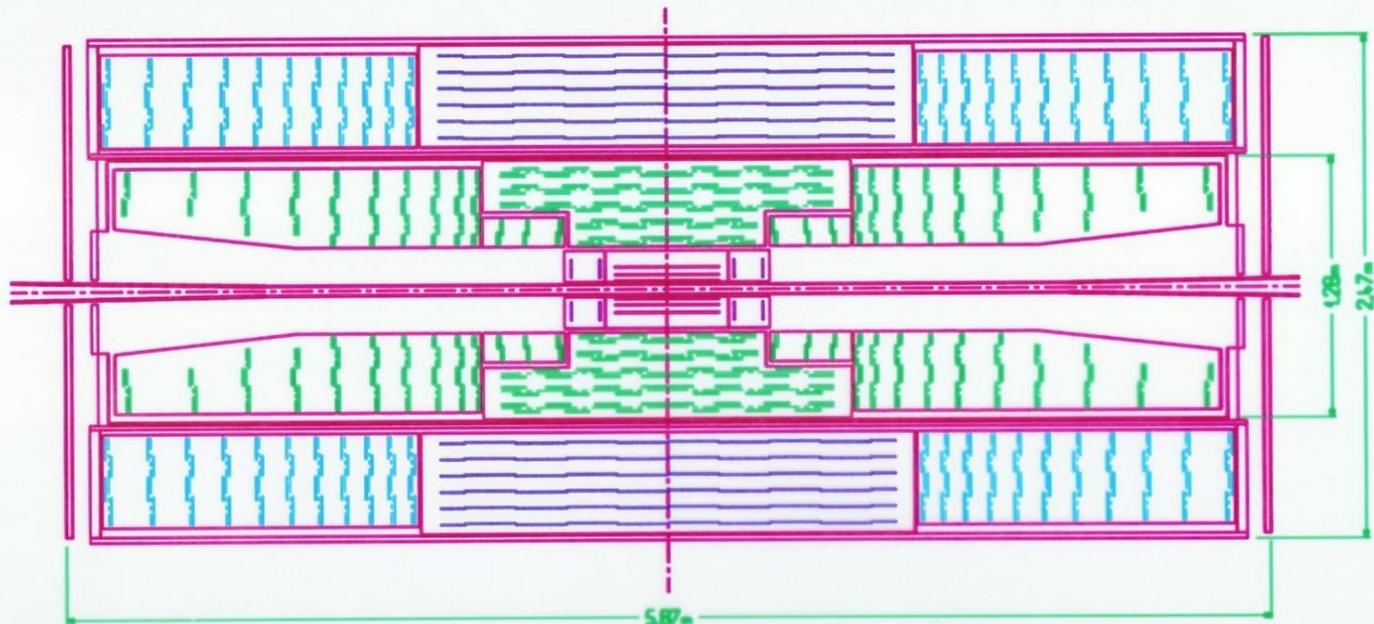
# 7 Maggio 1998: Presentazione del TDR a LHCC



## TRACKER LAYOUT (Phase II)

CMS TRACKER PHASE II

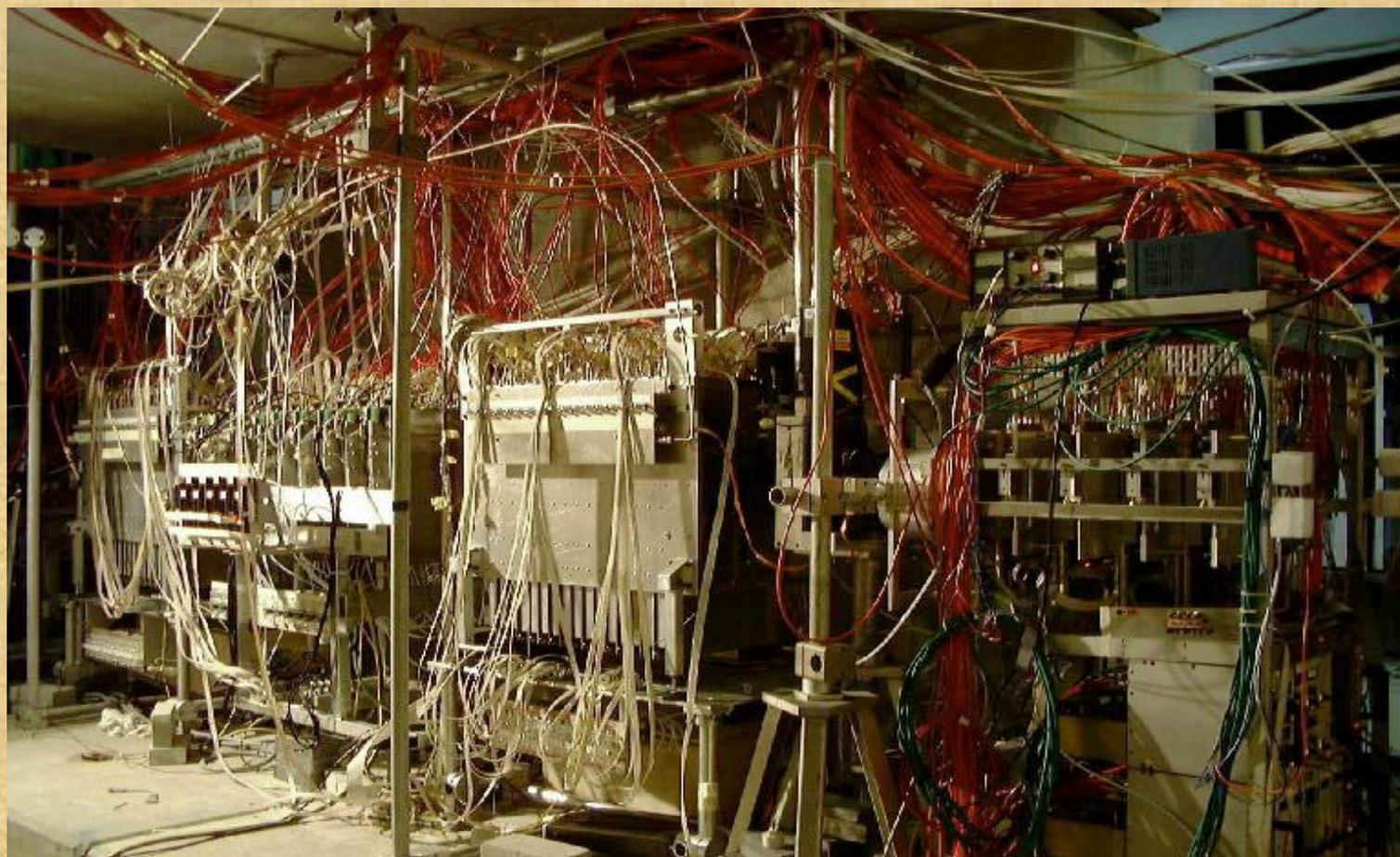
- PIXEL BARREL
- SILICON BARREL
- MSGC BARREL
- PIXEL ENDCAP
- SILICON ENDCAP
- MSGC ENDCAP



Pixel  $32.8 \times 10^6$  Channels  
Silicon  $5.2 \times 10^6$  Channels  
MSGC  $6.5 \times 10^6$  Channels

# Milestone: Novembre 1999

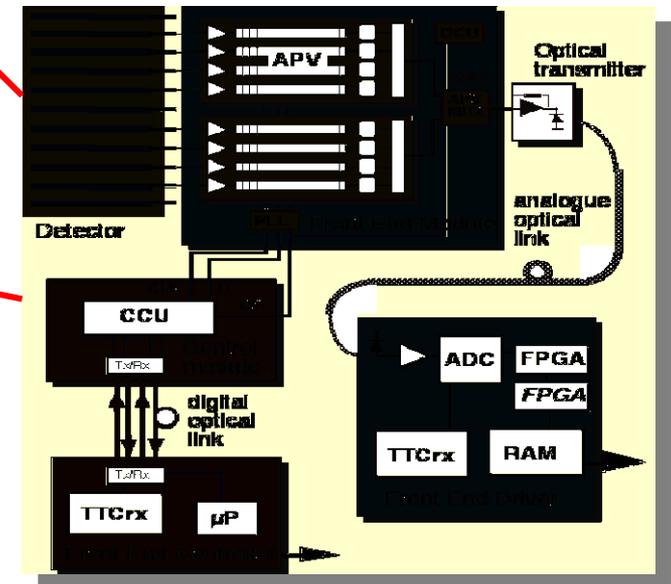
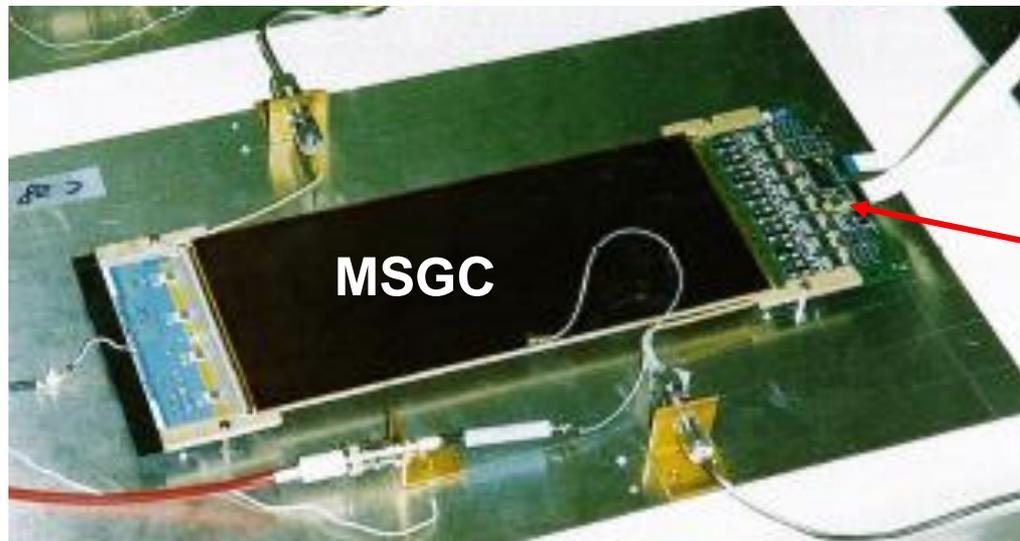
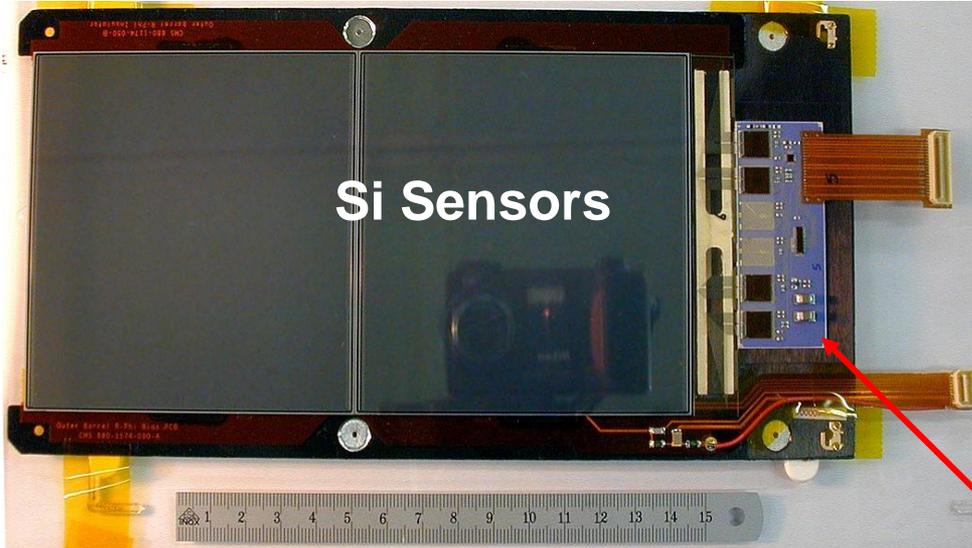
## Telescopio di 32 MSGCs sotto test al PSI



From the Addendum to the CMS tracker TDR by the CMS collaboration:  
" In the fall of 1999, the large scale PSI Milestone (~40 k strips exposed for 5 weeks) resulted in an unambiguous demonstration of the viability of the CMS MSGC's for tracking at the LHC."



# Sensori Si grandi (wafer 6") vs MSGC

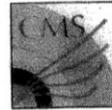


# 8 Marzo 2000: Presentazione Addendum Tracker a LHCC



## The Tracking Project

- **The All-Silicon Tracker proposed in the Addendum is based on the results obtained in the developments for the Inner Silicon Tracker of the TDR solution with a number of additional features:**
  - ❑ **Availability of 6" wafer technology in large quantity for silicon detectors with the required specs. and at a reasonable price**  
*(Market Survey done and producers identified)*
  - ❑ **Possibility to produce large area silicon modules with larger charge collection from thicker wafers in order to compensate the higher noise due to longer strip length (~16 cm)**
  - ❑ **Availability of 0.25  $\mu\text{m}$  electronics at a reduced price and with better performances than the previously available technologies**
  - ❑ **Capability to make some automated operations on the assembly of the silicon modules**
  - ❑ **Important contribution in terms of resources and facilities for module production from the USA Community**



## The Tracking Project

- *The 17<sup>th</sup> of December 1999, at the end of a complete review of the tracking project, the Tracker Steering Committee and the Tracker Institution Board decided to abandon the MSGC technology and to submit to LHCC a new project all based on silicon technology*
- *The 10<sup>th</sup> of January 2000 the CMS Steering Committee unanimously endorsed the decision*
- *The 17<sup>th</sup> of January 2000 the CMS Management Board endorsed the decision with a very large consensus*
- *The 28<sup>th</sup> of January 2000 the decision was approved by the CMS Collaboration Board.*

### *This was a very difficult decision*

taken by the Tracker Community after an extensive public discussion in the General Tracker Meeting (13-15 December). The decision was certainly not motivated by arguments of poor reliability or weakness to cope with the LHC environment of the MSGC technology developed in industry, but by the simple and important argument of a sizeable simplification of the tracking system by using a single all-silicon technology.

# 8 Marzo 2000: Presentazione Addendum Tracker a LHCC



## The Tracking Project

- A first clear conclusion of the Review at the end of December was that

**“both MSGC and All-Silicon solutions are viable technologies”**

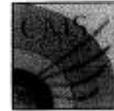
*The discussion was then focused on the system aspects and on the schedule for the construction of a very large detector like the CMS Tracker:*

- A single all-silicon technology requires:

- the engineering of a single F.E. chip
- the engineering of a single power supply system
- only one kind of cables and connectors
- only one kind of slow controls
- only one kind of quality control and data base procedures during construction
- one kind of beam tests
- no gas system
- .... in conclusion ↗

**only one system has to be engineered**

This simplification on the system aspects implies important advantages on the schedule of the construction; this was considered by the Tracker Community so important to face a deep reorganization of the resources in the Community

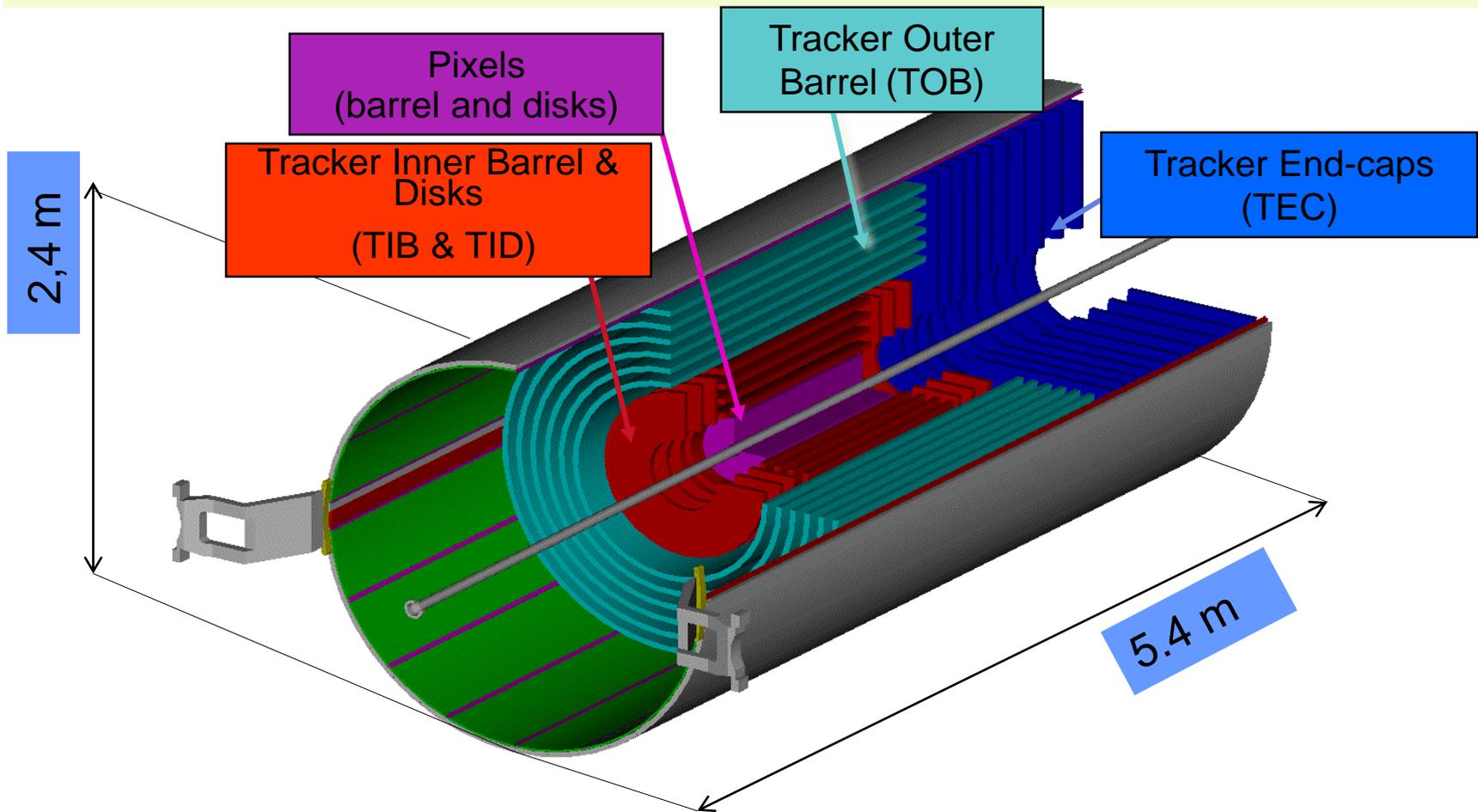


## The Tracking Project

### Toward the Tracker Construction

- ⇒ 21 Feb. Submission of the Addendum to LHCC
- ⇒ 8 March Open presentation of the Addendum
- ⇒ 17 April TK Week: schedule & milestones for construction
- ⇒ 18 May Possibly approval by LHCC
- ⇒ 25 May Project Readiness Review on sensors
- ⇒ 5 June CMS Week: end of the Tracker layout optimization
- ⇒ 1<sup>st</sup> July Start the tender on sensors
- ⇒ October End of the tender on sensors
- ⇒ November Engineering Design Review and Annual Tracker Review
- ⇒ End 2000 Start the Tracker construction

# Full Silicon Tracker



Strip lengths **10 cm** (innermost) to **20 cm** (outermost)  
Strip pitches **80 $\mu$ m** (innermost) to **205 $\mu$ m** (outermost)

320  $\mu$ m thick  
low resistivity

500  $\mu$ m thick  
high resistivity

- **24 K** sensori a strisce di silicio con un'area attiva di **206 m<sup>2</sup>**
- **9.6M** di canali a strisce
- **65 M** di canali a pixel



# ATLAS DETECTOR

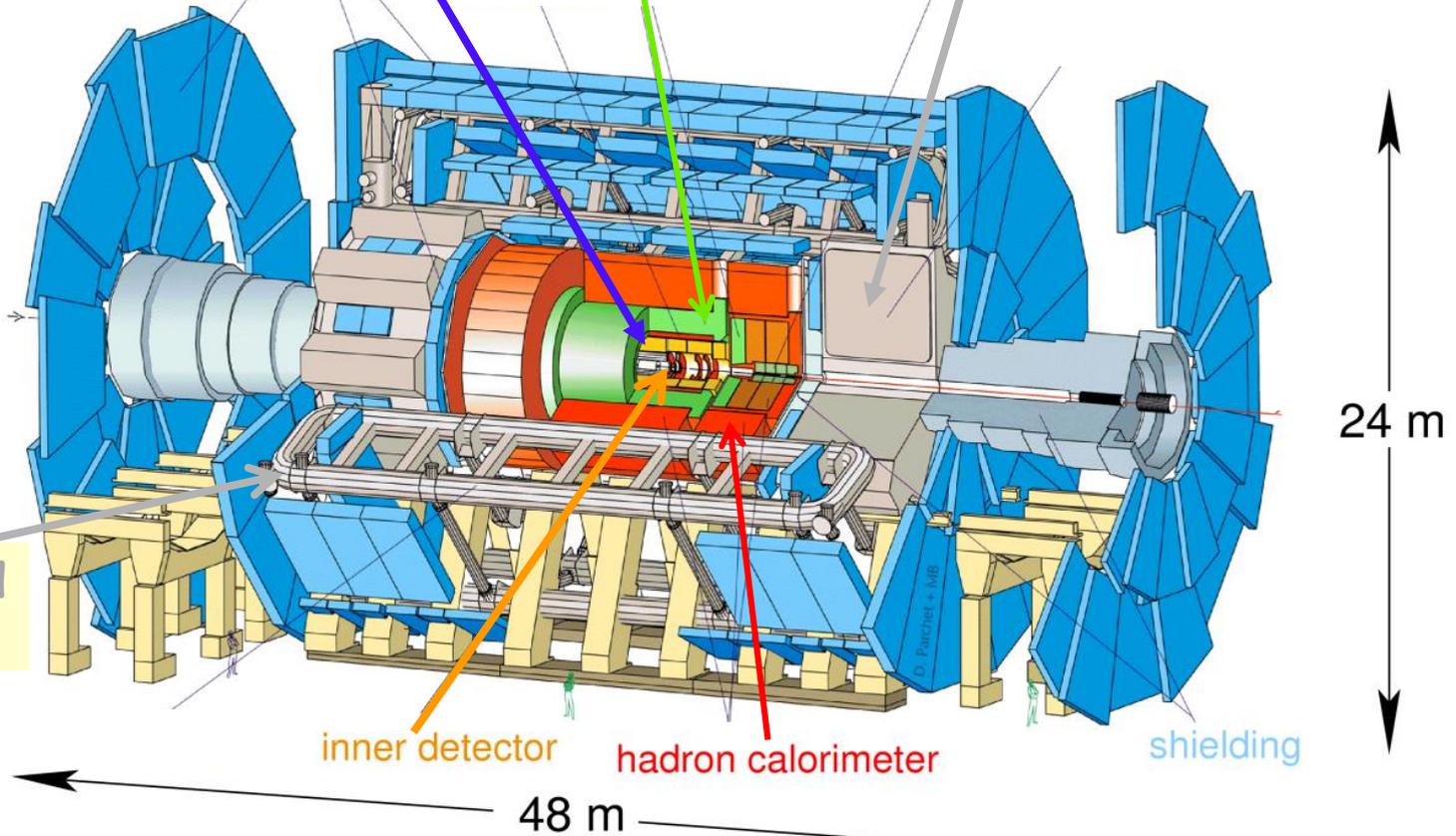
2.3m x 5.3m Solenoid ~ 2 Tesla Field

End Cap Toroid

muon detectors

electromagnetic calorimeters

forward calorimeters



24 m

48 m

48m Long, 24m Diameter, 7'000 Ton Detector

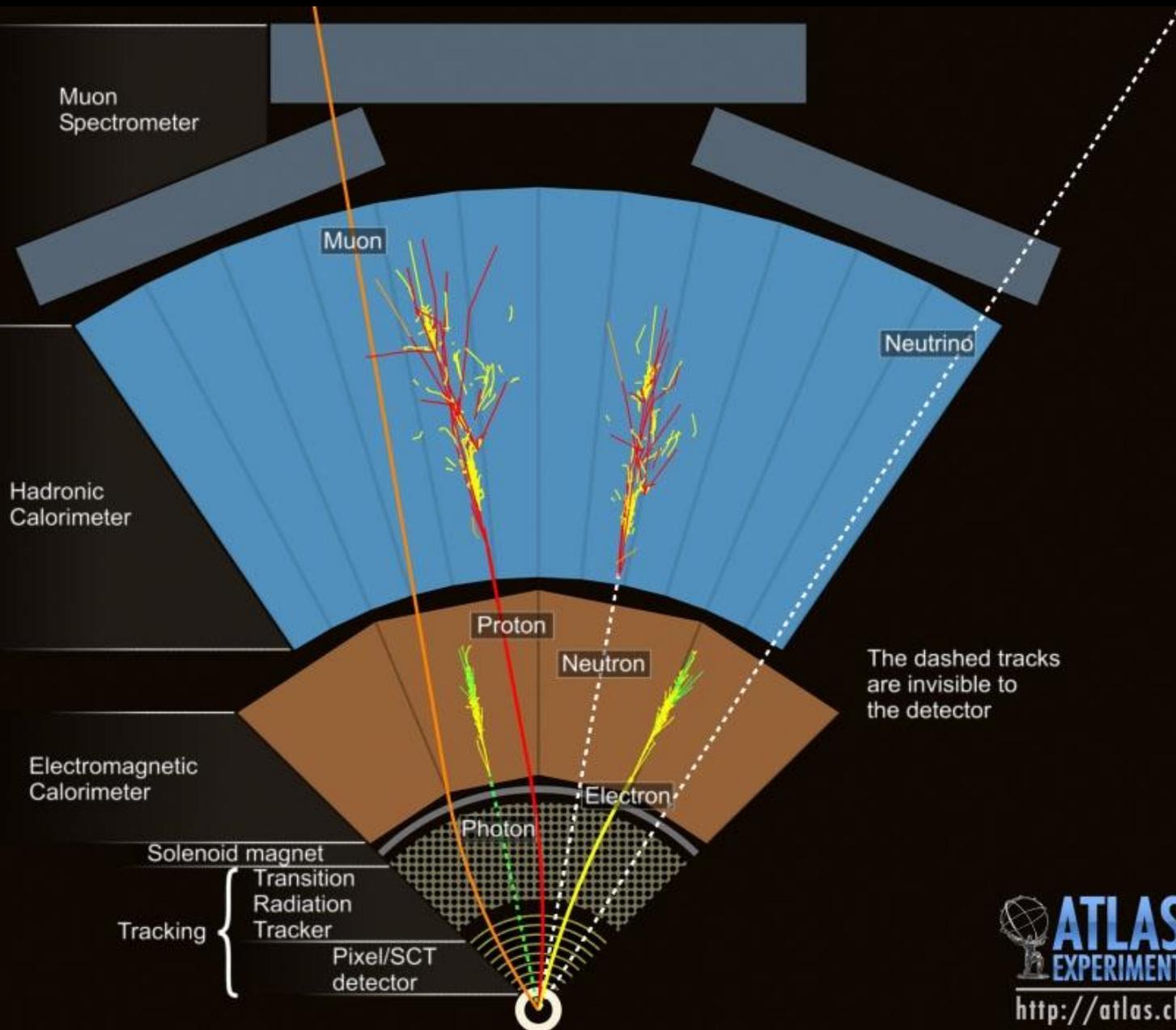
Barrel Toroid  
<B> = 0.4 T

inner detector

hadron calorimeter

shielding

# Come ATLAS vede le particelle

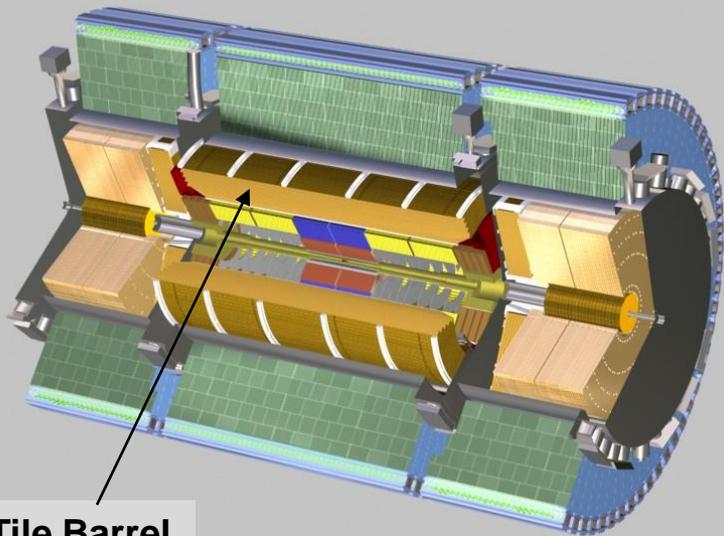




# ATLAS: 1996 costruzione di 3 moduli prototipi nell'officina di S. Piero



# Responsabilità dei gruppi di Pisa

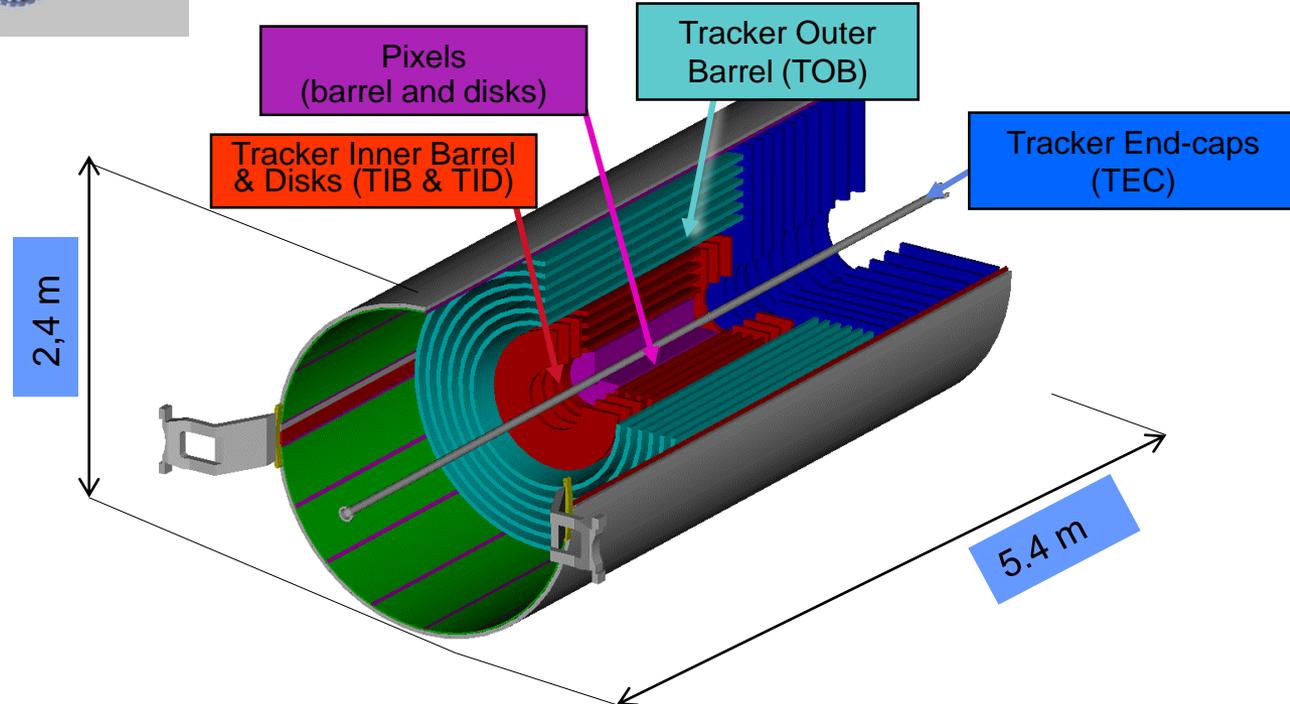


Tile Barrel

## ATLAS: Tile Barrel

$\frac{1}{4}$  dei moduli + assemblaggio delle fibre di tutto il calorimetro  
(1997 ÷ 2005)

CMS: Tracker Inner Barrel & Disks (TIB & TID)  
(2000 ÷ 2008)



# La Storia della Sezione



1972



2003



Pisa → S. Piero → Pisa

# *Officina a S. Piero*



*ATLAS  
prototipi*



*Meccanica  
TK di CMS*

# *Nuova Officina a Marzotto*



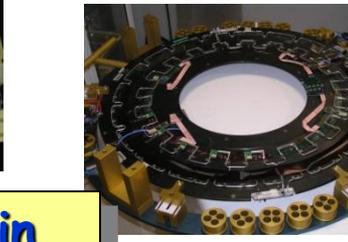
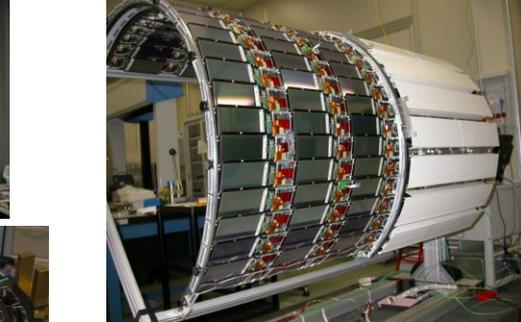
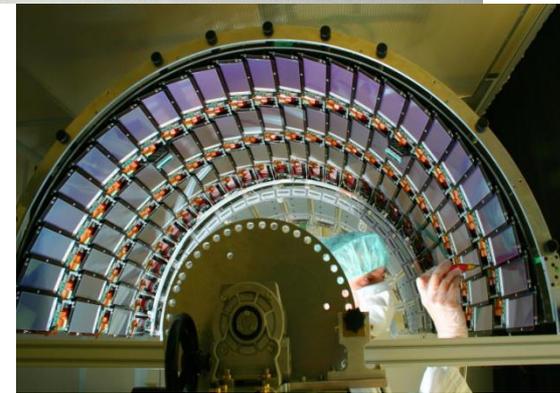
*Fresatrice a controllo numerico*



*Stazione di lavoro per elettroerosione a filo*



*Zona tornitura*



**Clean Room in  
S. Piero  
CMS TK  
Integration**





# Clean Room facilities in Marzotto



# Servizio Alte Tecnologie

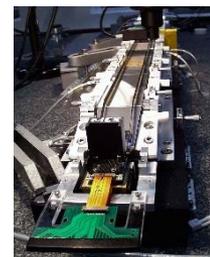
## Laboratori

- ❑ Clean room a Marzotto:  
450m<sup>2</sup> classe 8; 100 m<sup>2</sup> classe 7  
n.6 post. (1.6x0.8m<sup>2</sup>) classe 5
- ❑ Clean room a S.Piero:  
220m<sup>2</sup> classe 8; 30m<sup>2</sup> classe 7
- ❑ Lab. Diagnostica Strutturale



## Tecnologie

- Metrologia tridimensionale (a contatto e senza contatto)
- Contaminazione Controllata
- Microsaldatura
- Ispezione ottica
- Test e caratterizzazione sensori al Si
- Tecnologia degli Adesivi
- Termografia
- Micromontaggi di precisione di Meccanica
- Micromontaggi di precisione di Elettronica
- Analisi Vibrazionale (Sistema ESPI e Shaker dinamico fino a 6 Kg)
- Caratterizzazione meccanica dei materiali e della giunzione incollata (macchina di test a trazione fino a 50.000 Nw).
- Test Termici ambientali (camere climatiche)
- Analisi della deformazione (Strain Gauge) ed analisi fotoelastica delle tensioni.

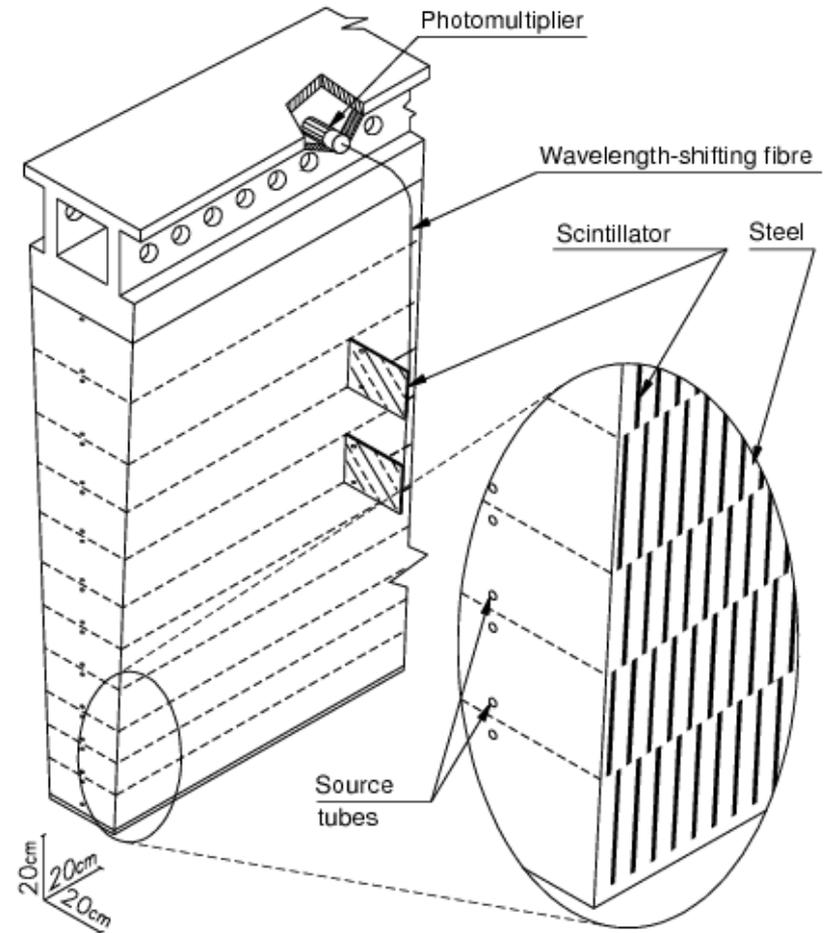
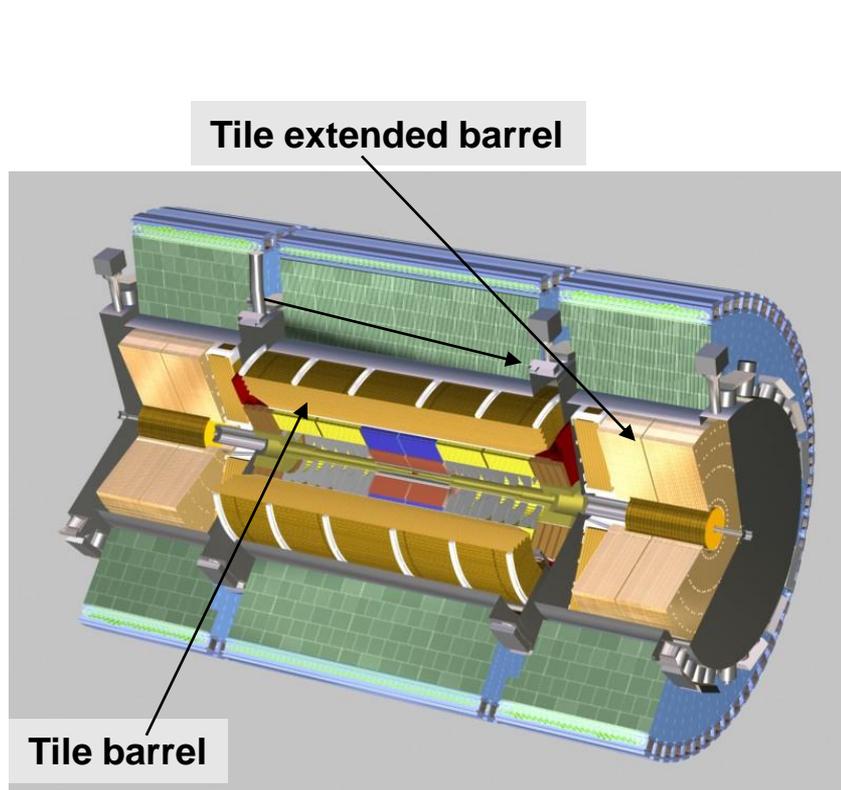


# Organigramma dei Servizi

- Servizio Amministrazione (Resp. Patrizia BENFATTI)
- Servizio Direzione (Resp. Paolo VILLANI)
- Servizio Tecnico Generale (Resp. Mario IACOPONI)
- Servizio Elettronica (Resp. Fabio MORSANI)
- Servizio Progettazione meccanica (Resp. Fabrizio RAFFAELLI)
- Servizio Officina meccanica (Resp. Andrea DISACCO)
- Servizio Calcolo e reti (Resp. Silvia AREZZINI)
- Servizio Alte Tecnologie (Resp. Filippo BOSI)
- Servizio Prevenzione e Protezione (Resp. Giancarlo DE CAROLIS)

## Riunione dei Servizi

# ATLAS Tile Calorimeters



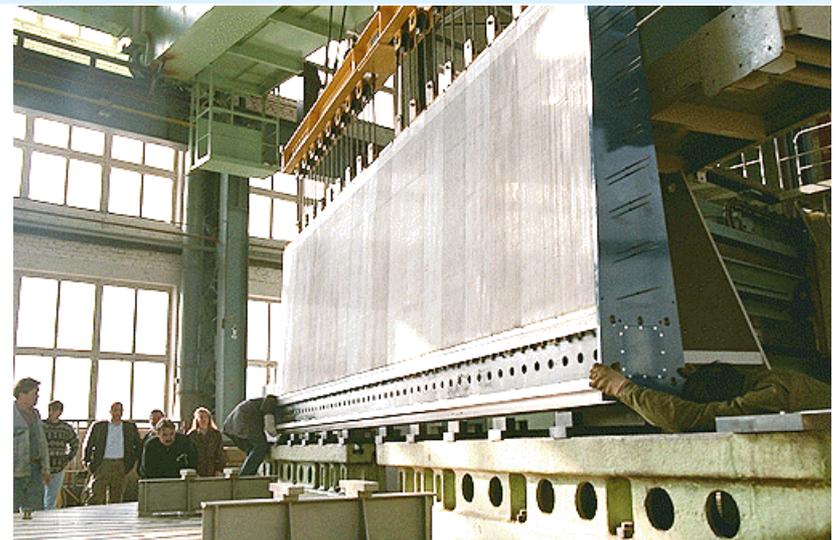
- ✓  $\frac{1}{4}$  of the Tile Barrel built in Italy: 320 modules 1.2 tons each (Galli Morelli, Lucca)
- ✓ Fibres equipping the full TILE calorimeter (700.000 fibres)) qualified and assembled in bundles in ITALY (Pol Hi Tech, Carsoli (AQ))



The upper figure shows one of the sub-modules while being assembled. Each of the modules is made of 18 elements.

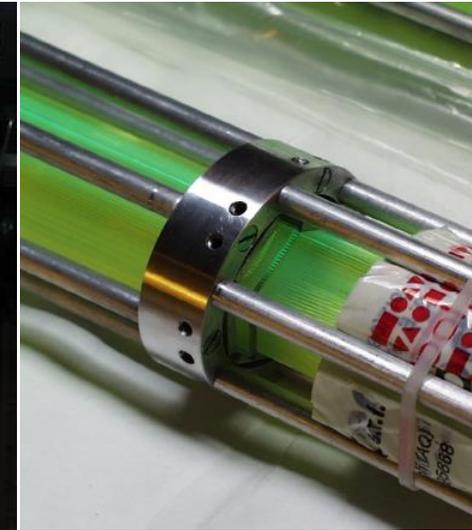
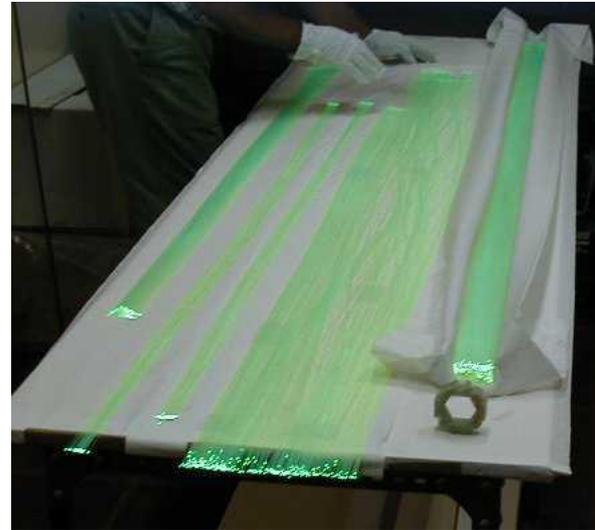
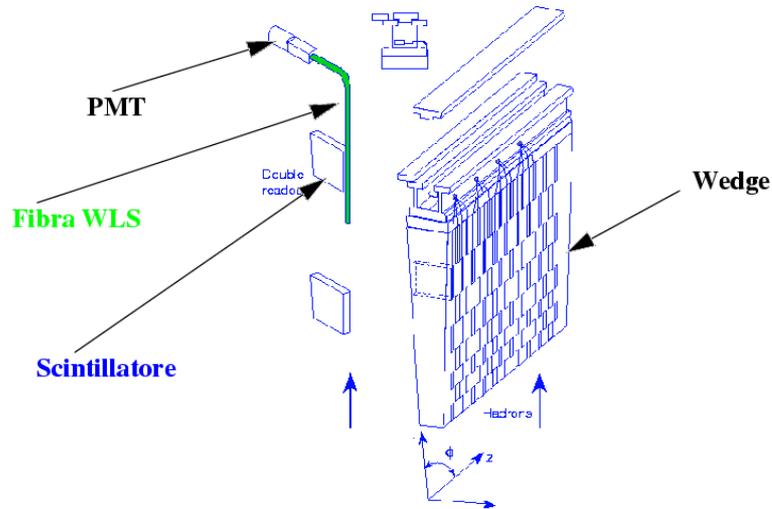


Module assembly (18 submodules each), 64 modules form the TILE barrel

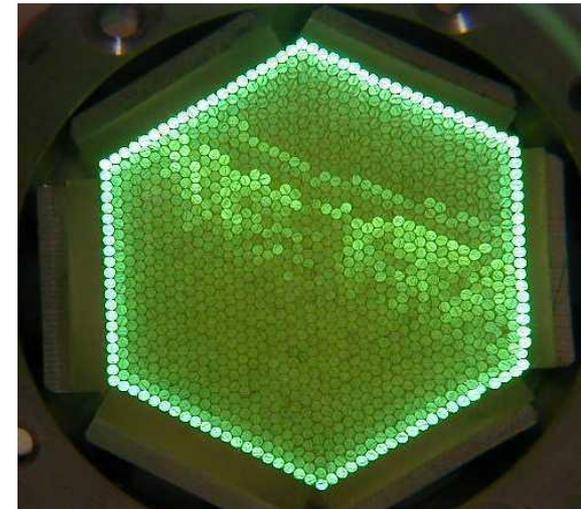


# PolHiTech, (Carsoli, AQ)

Principio di funzionamento:

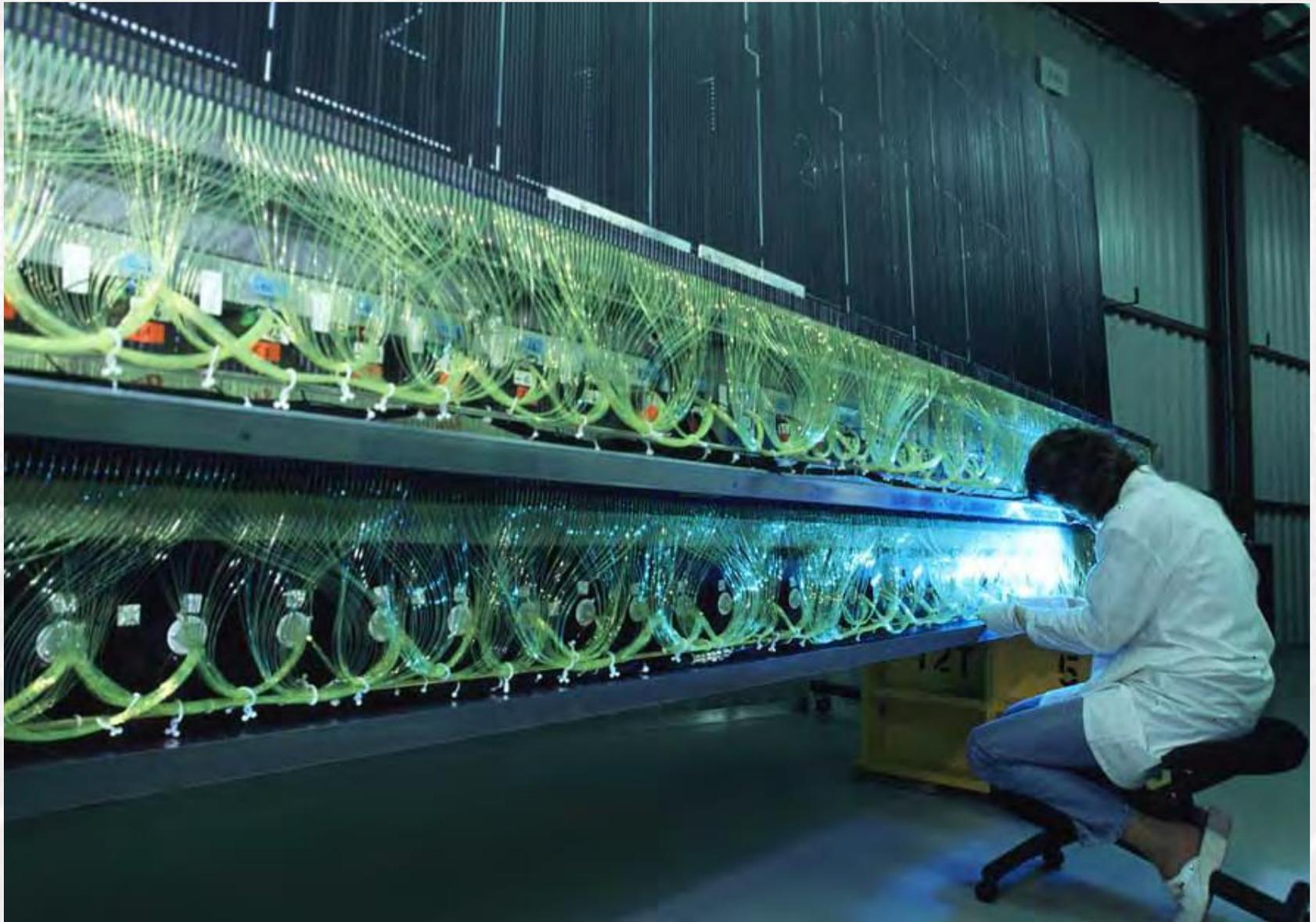


Fibre bundling



Fibre bundling assembled in the calorimeter

# ATLAS tile calorimeter



# ATLAS tile calorimeter

ATLAS



14mm iron / 3mm scintillator,  
WLS optical fibres, PMT readout

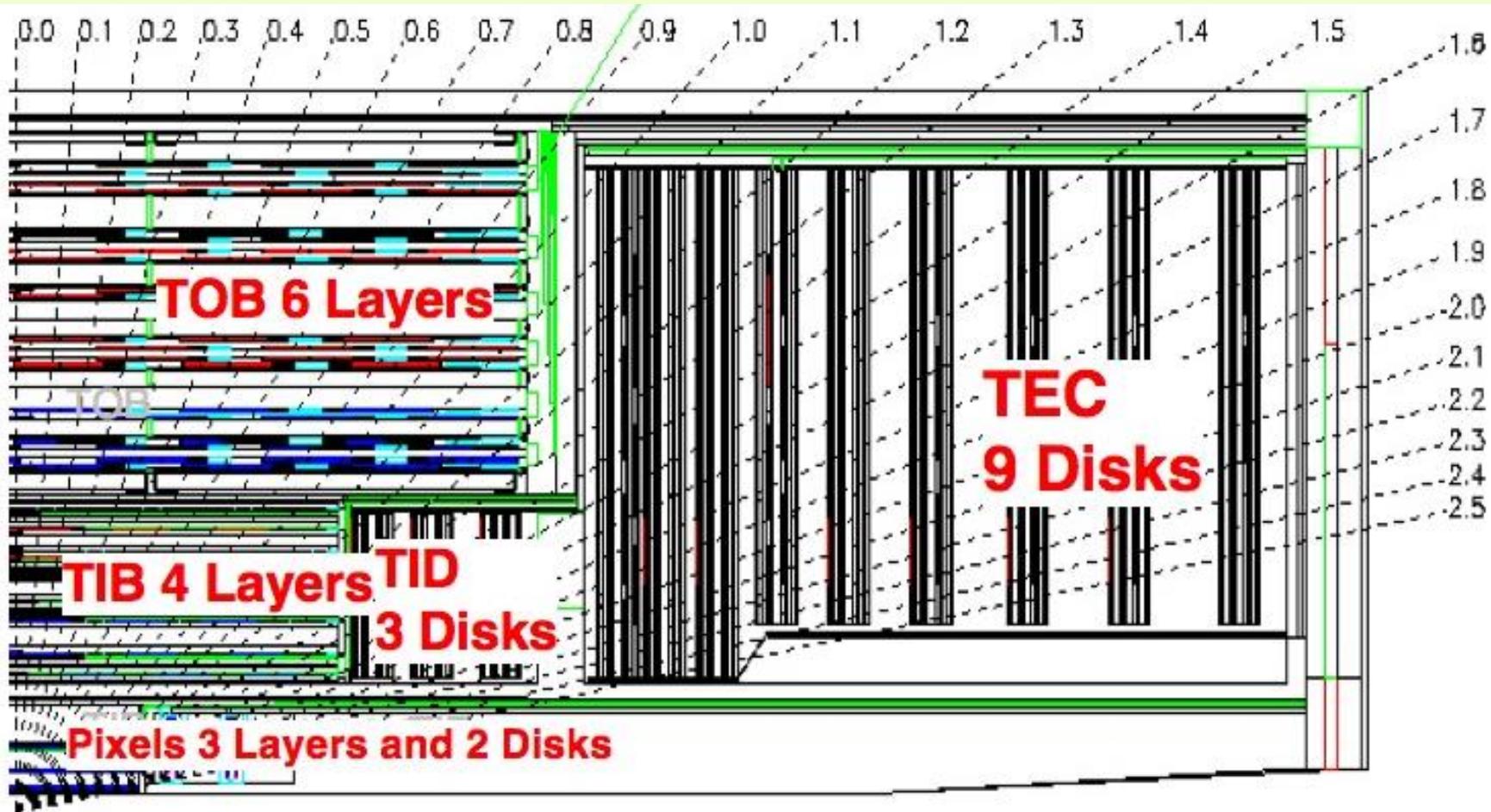
# Barrel installation completed on 10/12/2005



Commissioning is being done by all Institutes: F/E electronics, bus, HV, LV etc.

Move to  $z=0$  +final alignment based on survey data for tiles+LAR ~25 Aug. 05.

# Full Silicon Tracker



Strip lengths **10 cm** (innermost) to **20 cm** (outermost)  
Strip pitches **80 $\mu\text{m}$**  (innermost) to **205 $\mu\text{m}$**  (outermost)

- **24 K** sensori a strisce di silicio con un'area attiva di **206 m<sup>2</sup>**
- **9.6M** di canali a strisce
- **65 M** di canali a pixel

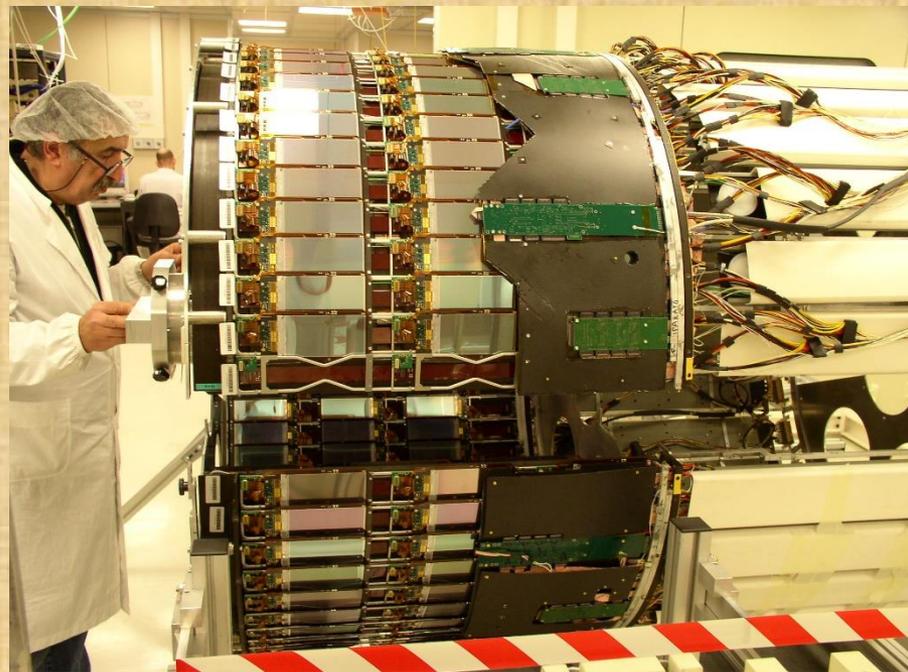
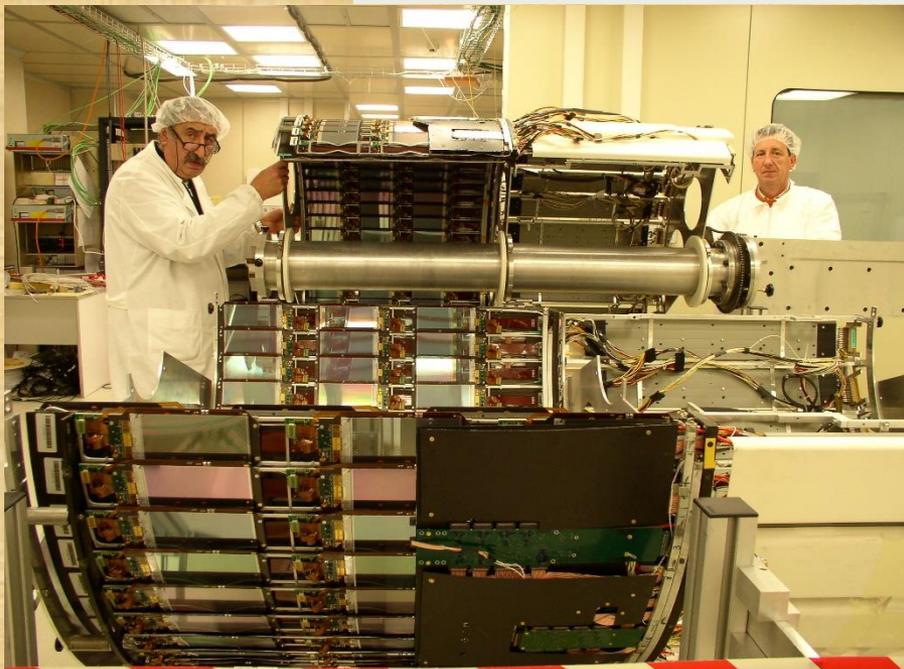
320  $\mu\text{m}$  thick  
low resistivity

500  $\mu\text{m}$  thick  
high resistivity

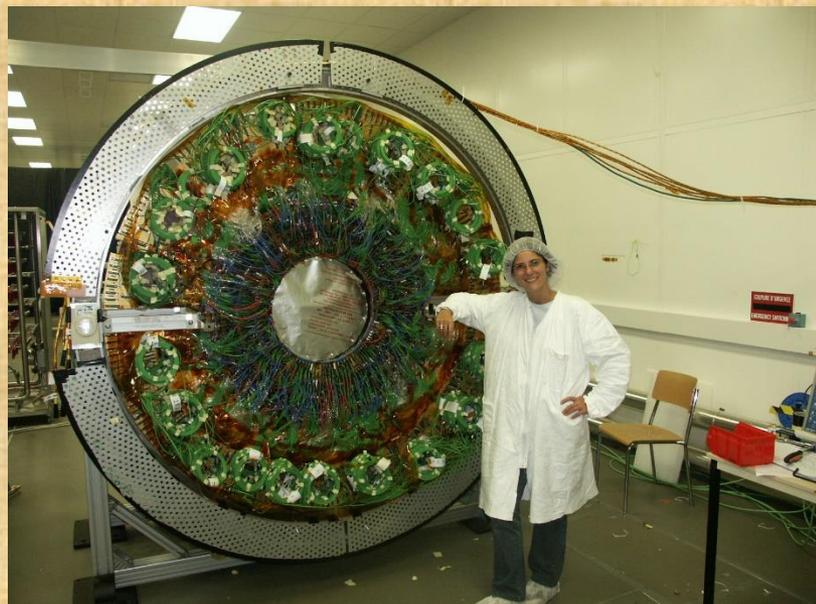
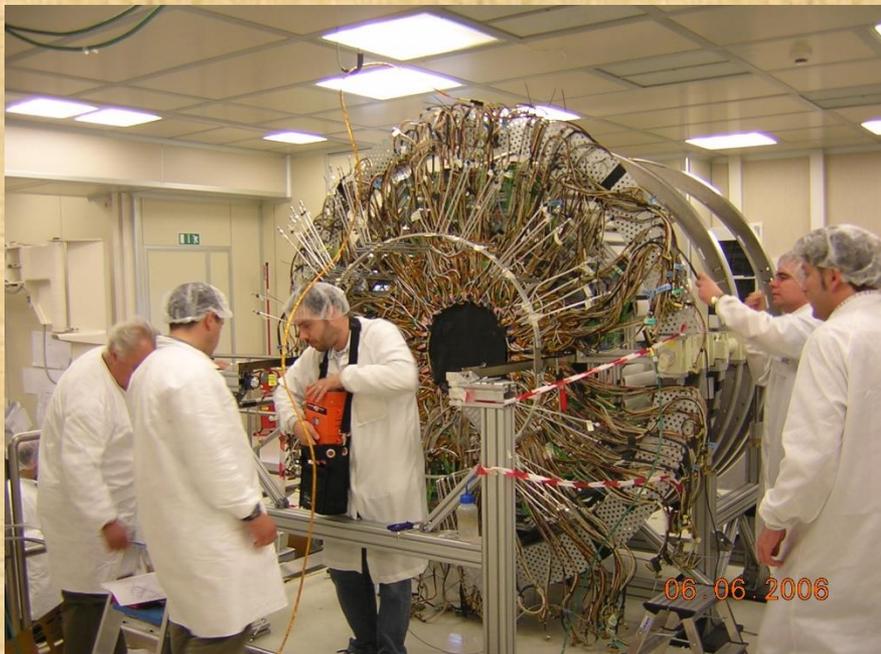
# Tecnici, Ingegneri, Dottorandi e Professori si lanciano nella costruzione



# Fasi dell'assemblaggio a San Piero.



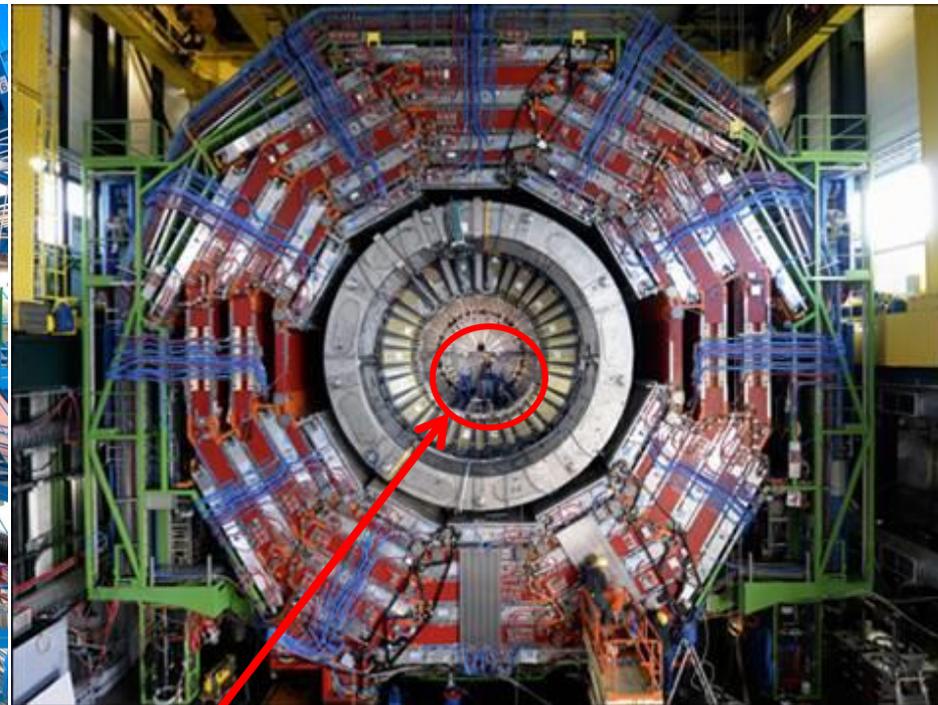
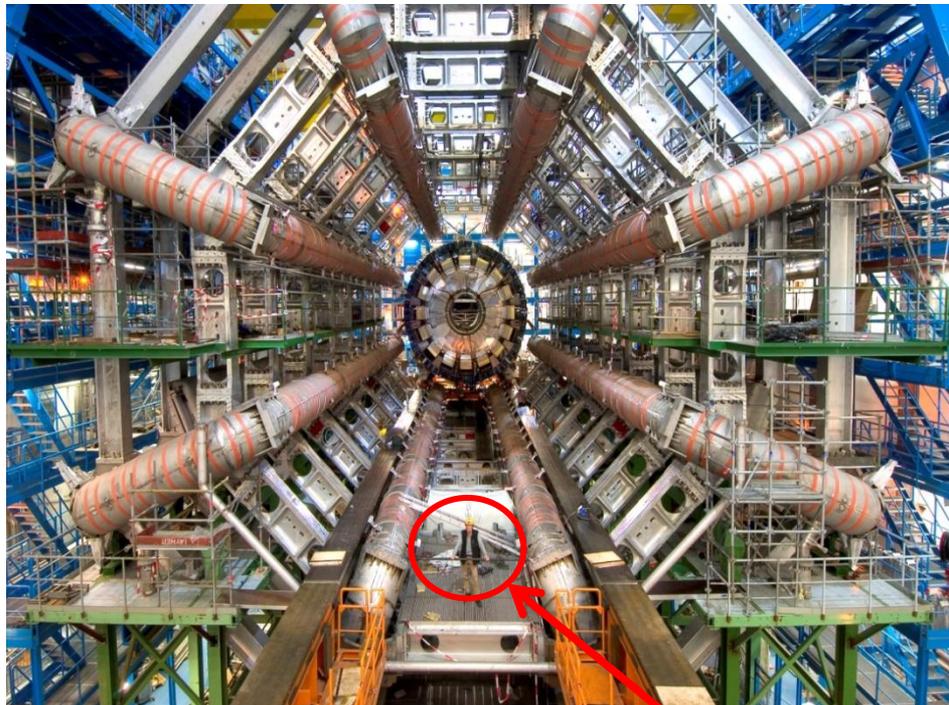
# Fasi dell'assemblaggio a San Piero.



# ATLAS e CMS

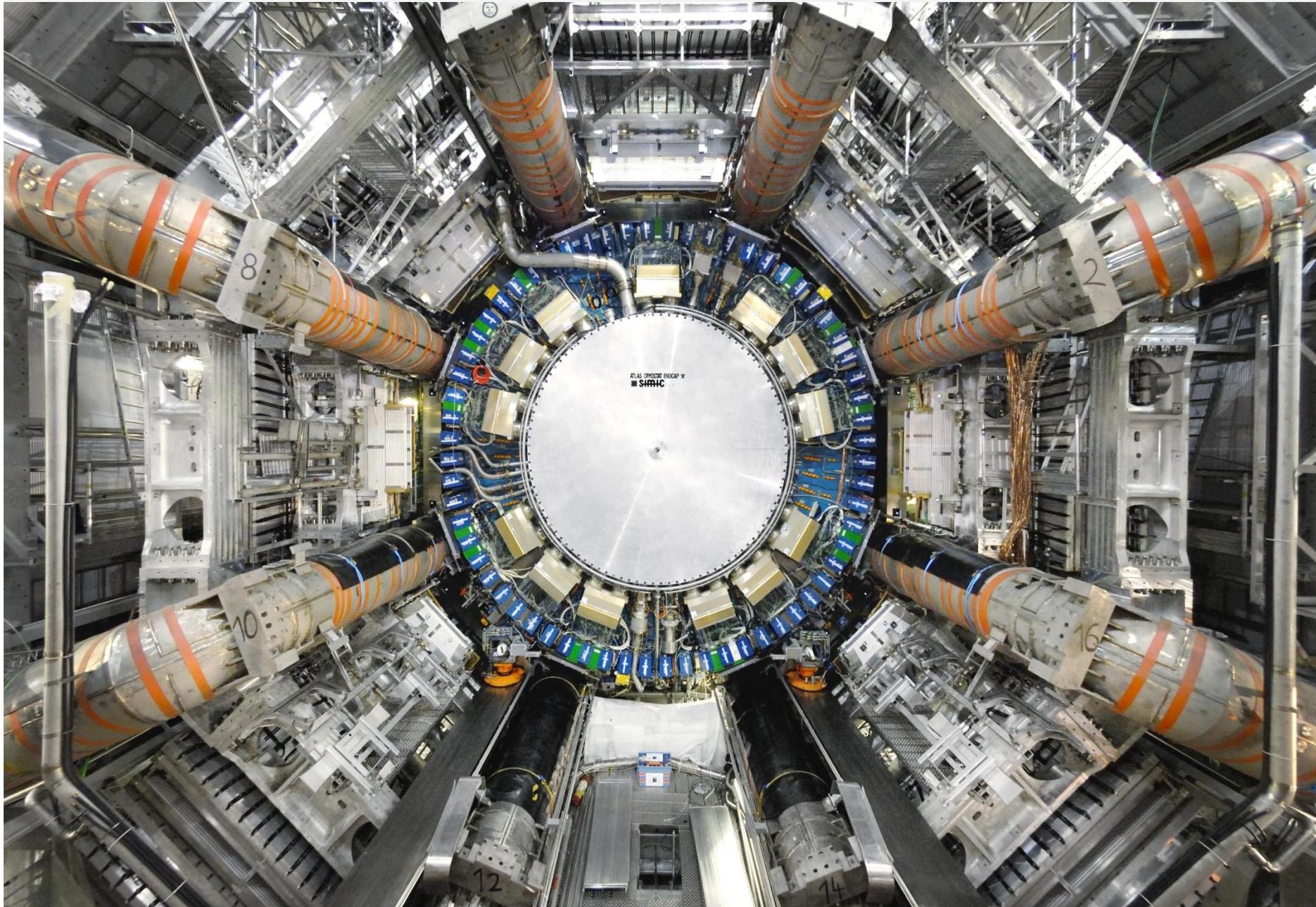
~ 3000 persone tra fisici, ingegneri e studenti lavorano in ciascun dei due esperimenti

Rivelatori giganteschi di particelle progettati per scoprire (o escludere) l'esistenza del Bosone di Higgs

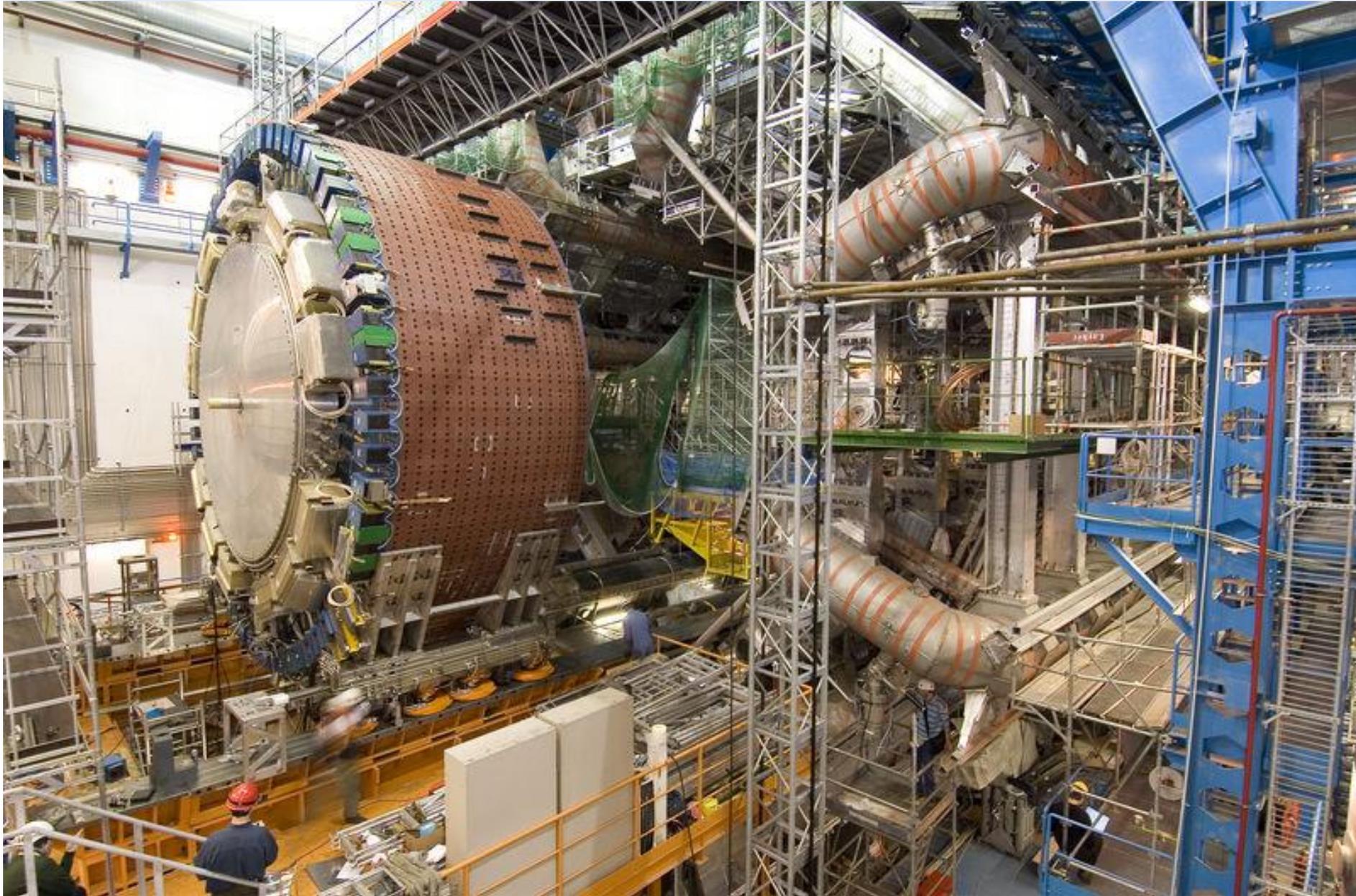


Persone

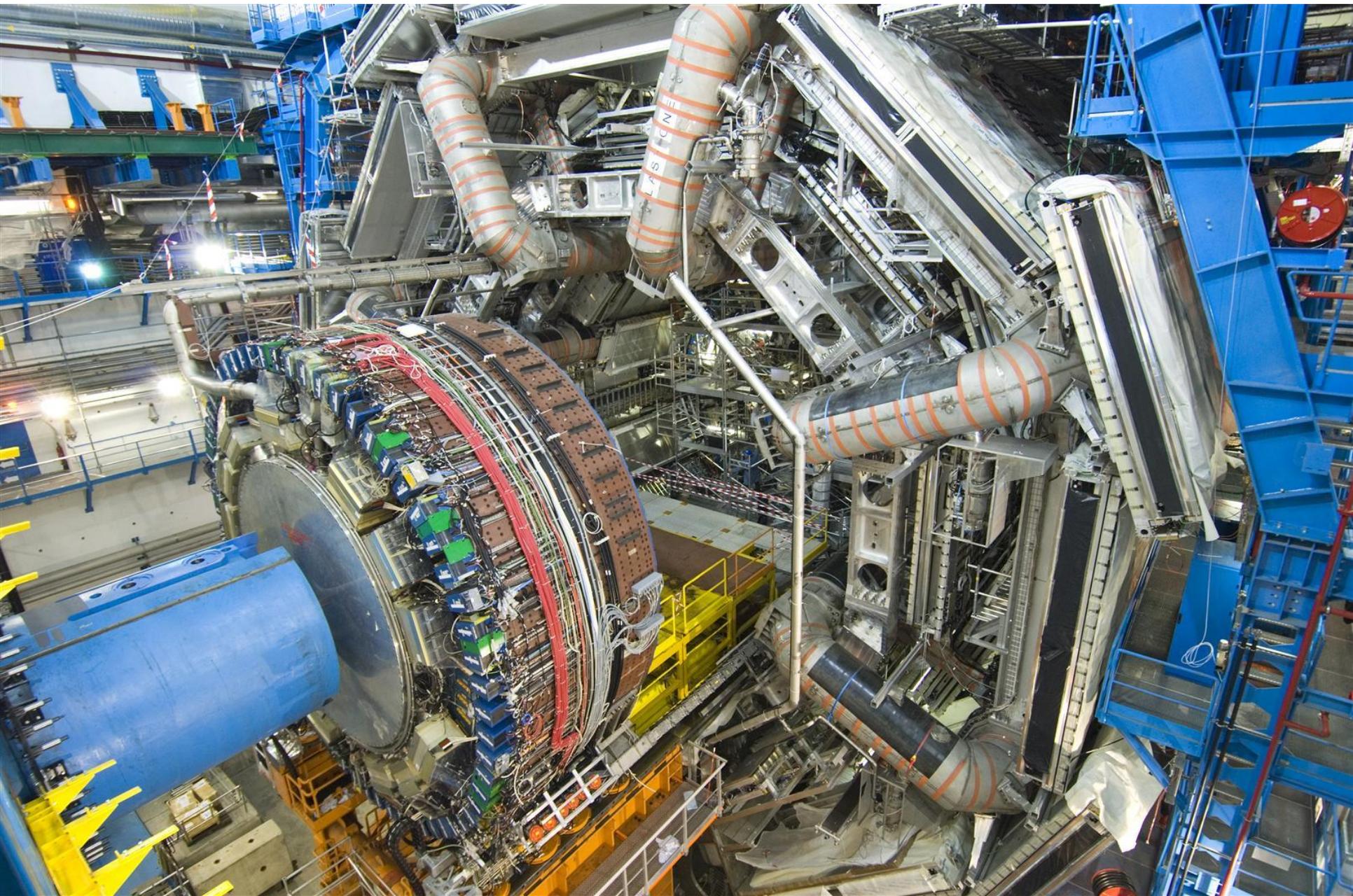
# Il rivelatore ATLAS



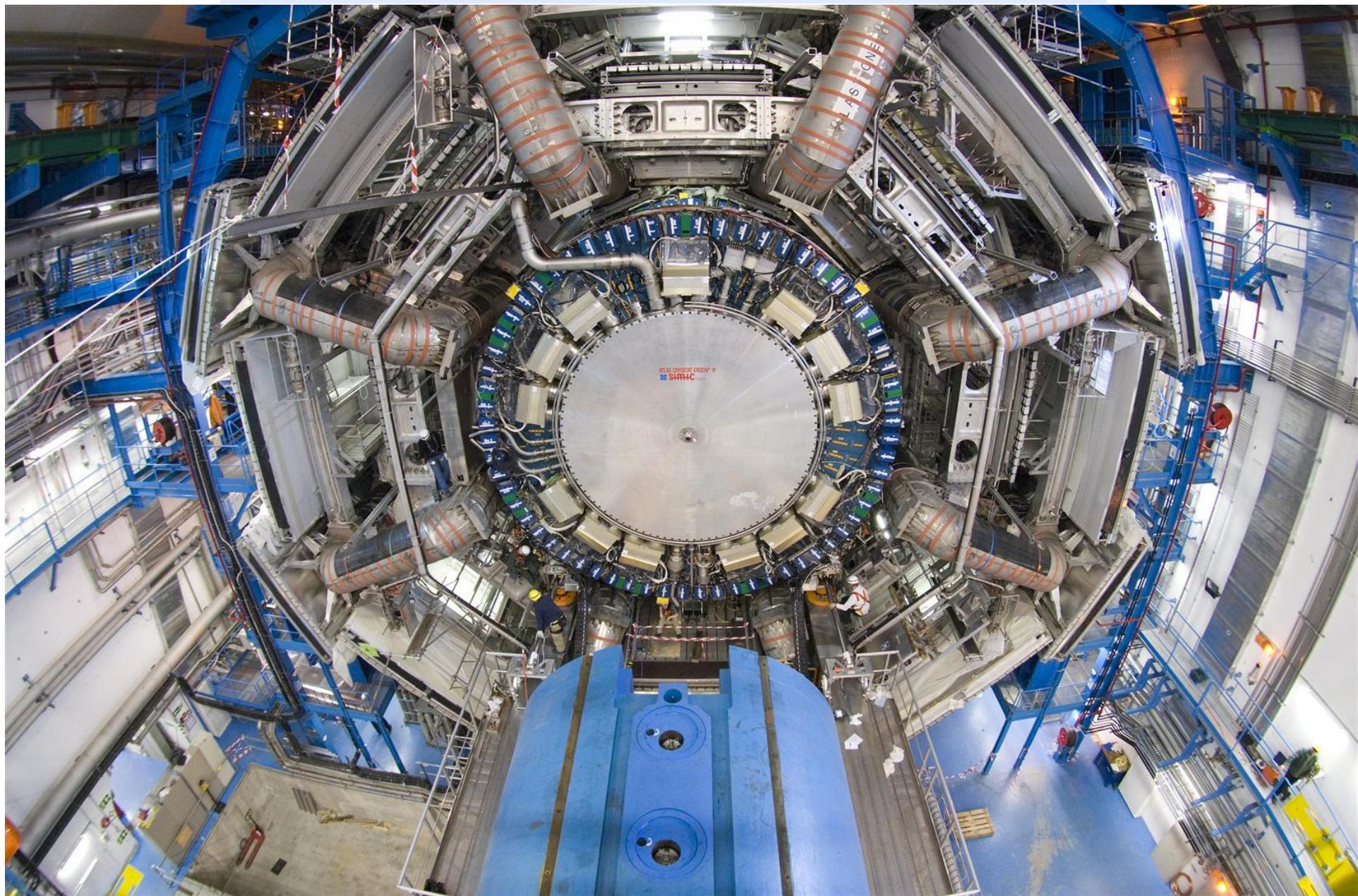
# ATLAS



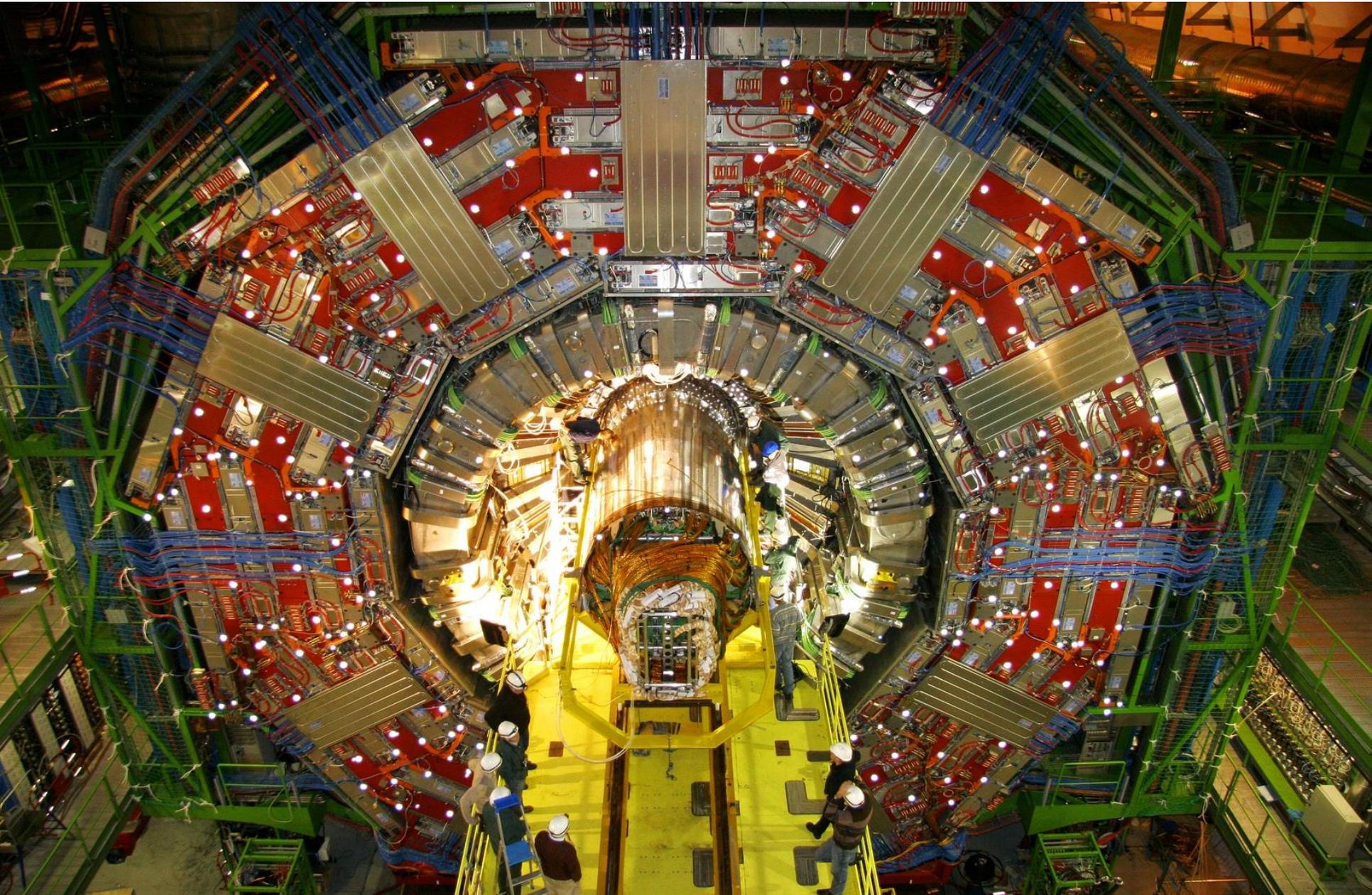
# Il rivelatore ATLAS



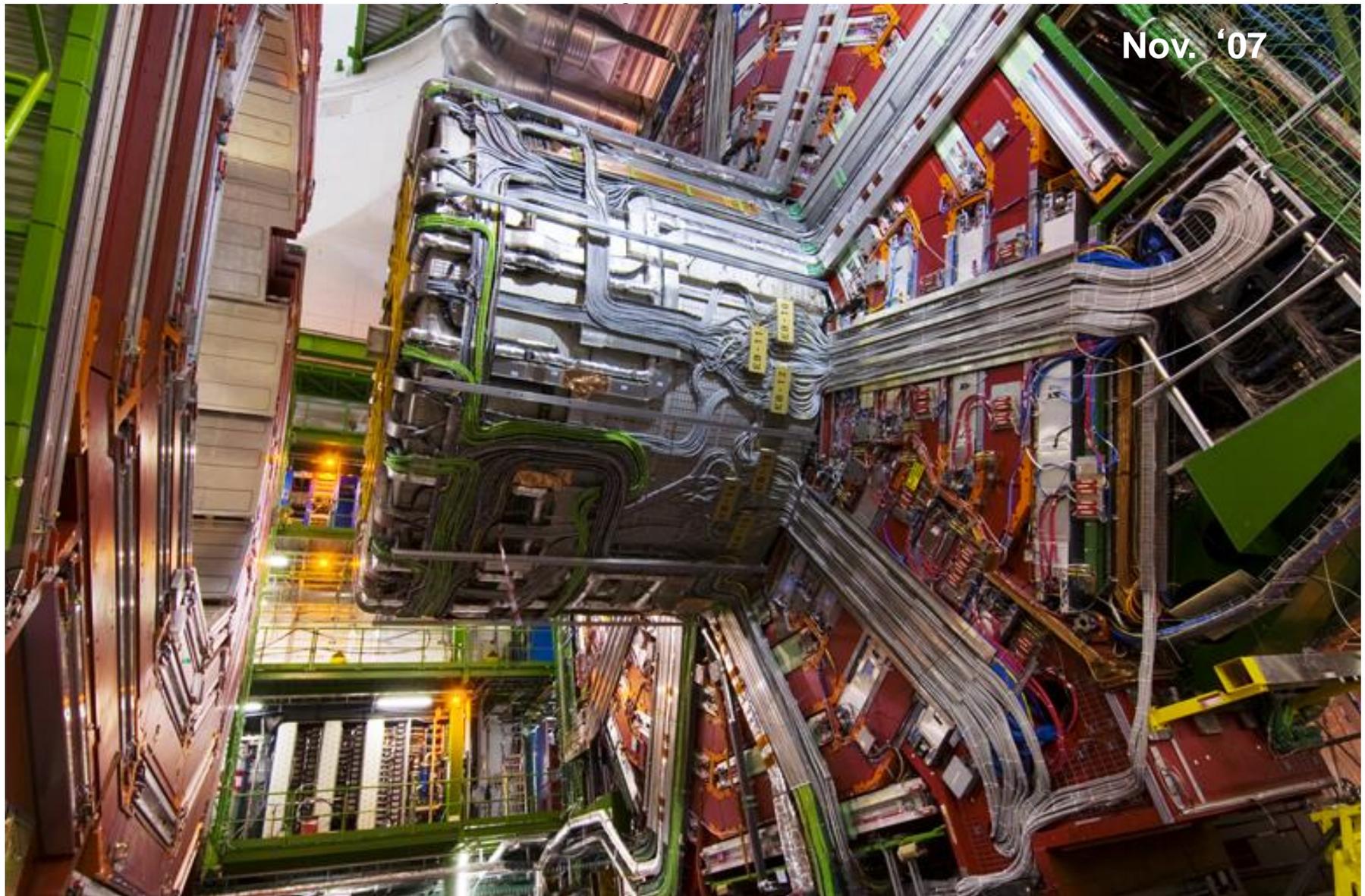
# ATLAS - barrel completo



# Il rivelatore CMS

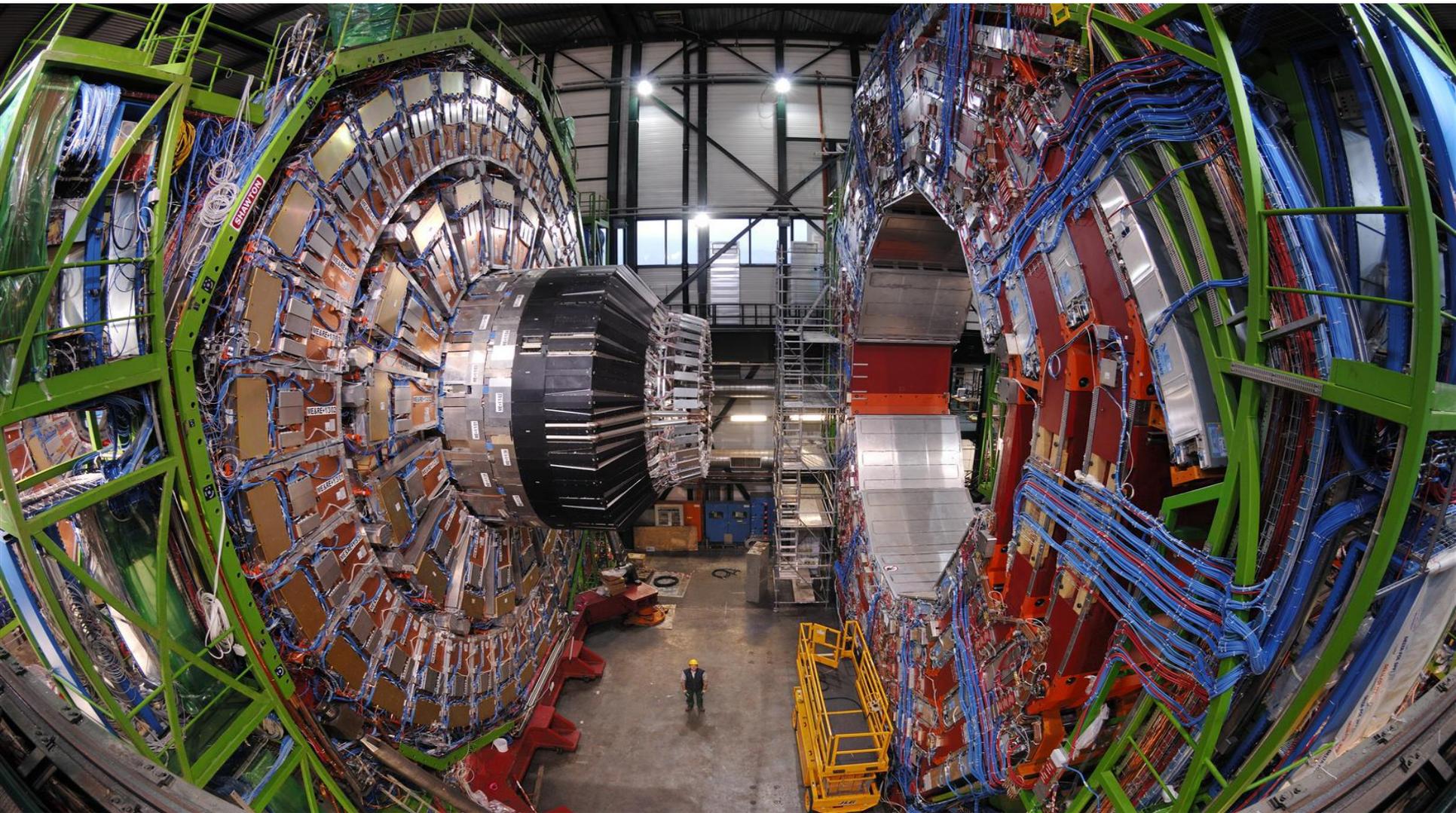


# Il rivelatore CMS



Nov. '07

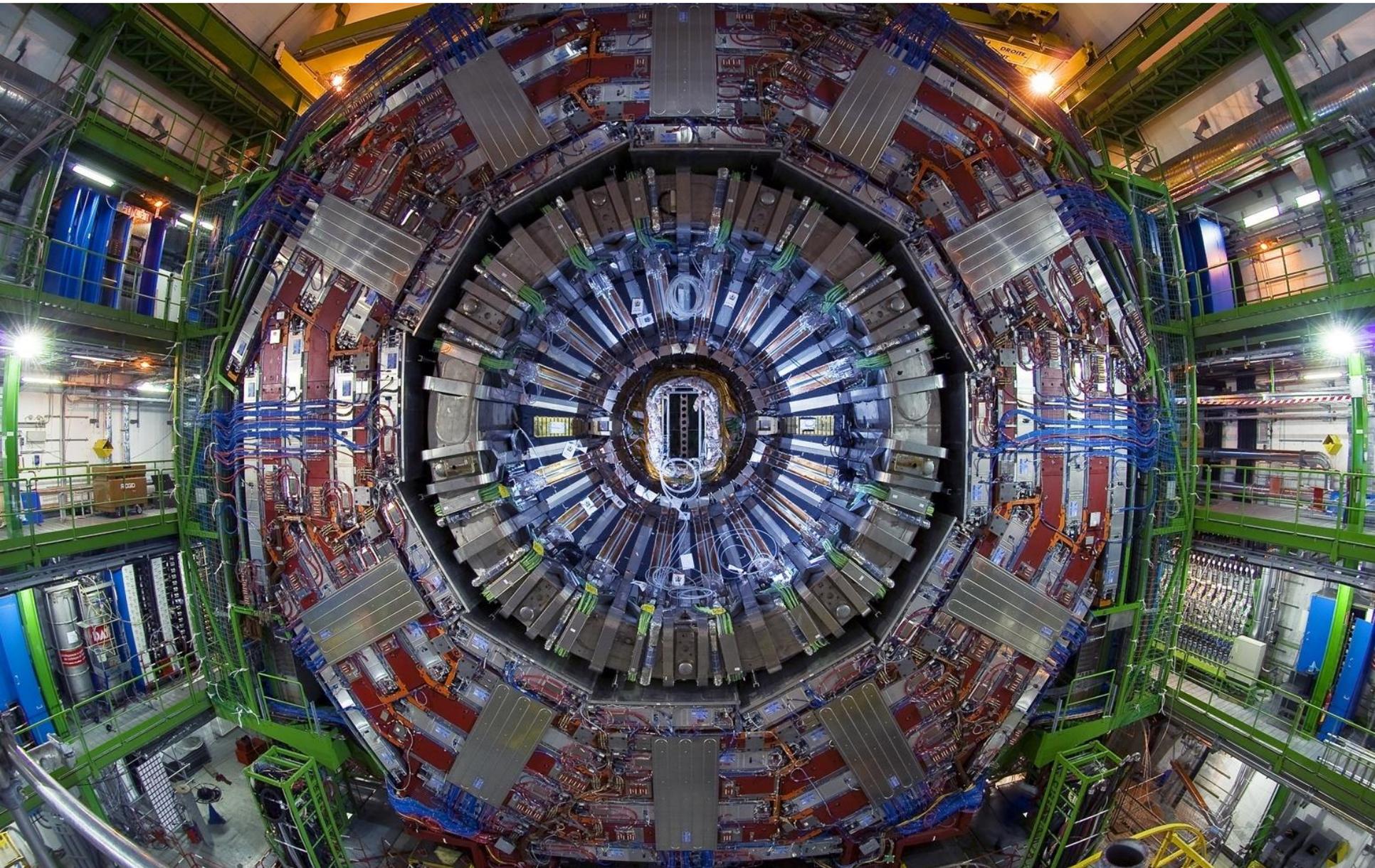
# Il rivelatore CMS

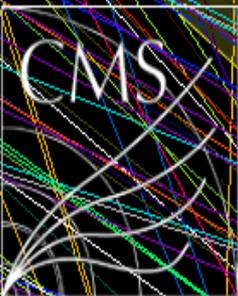


# Una riunione della Collaborazione CMS

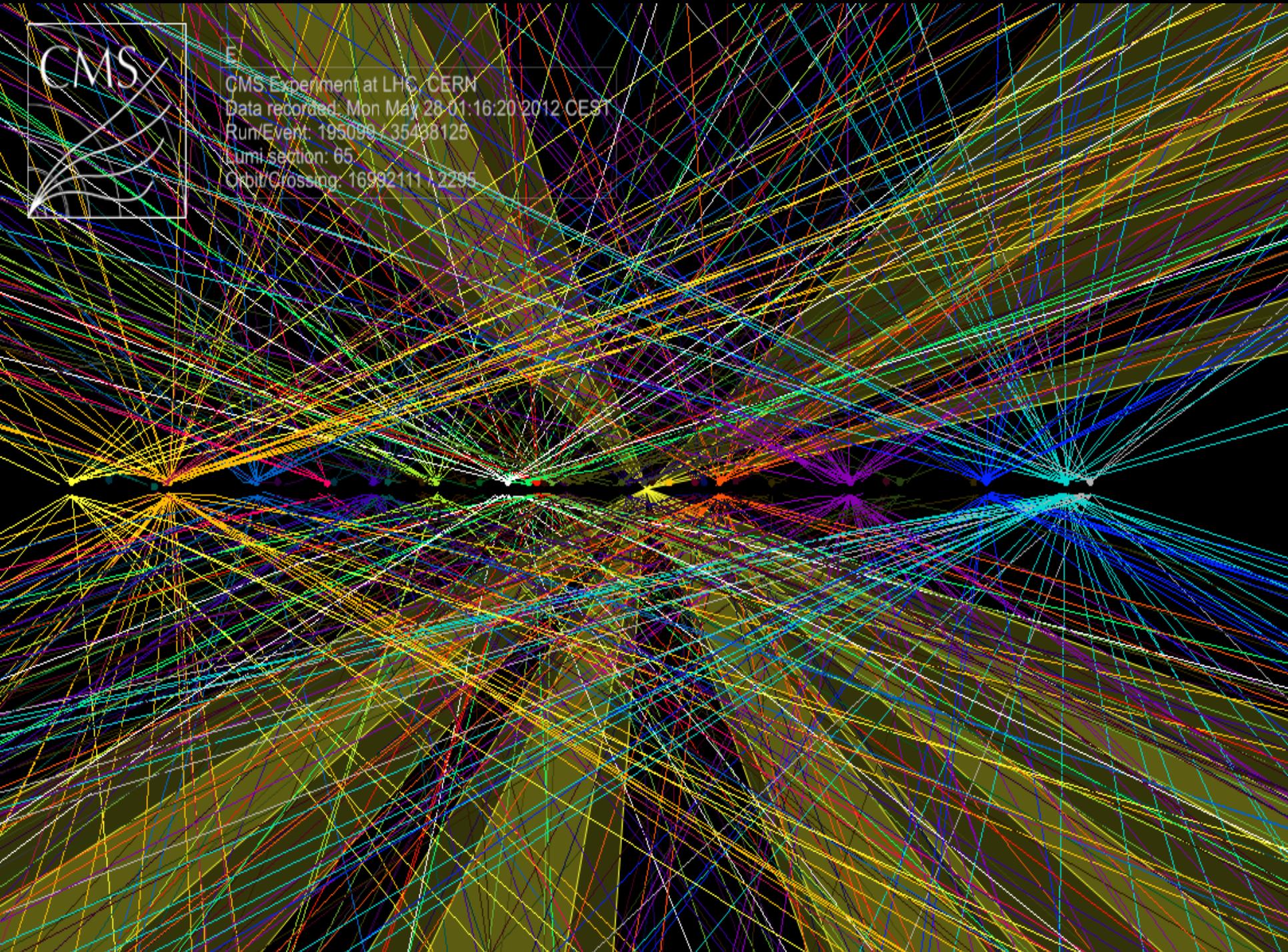


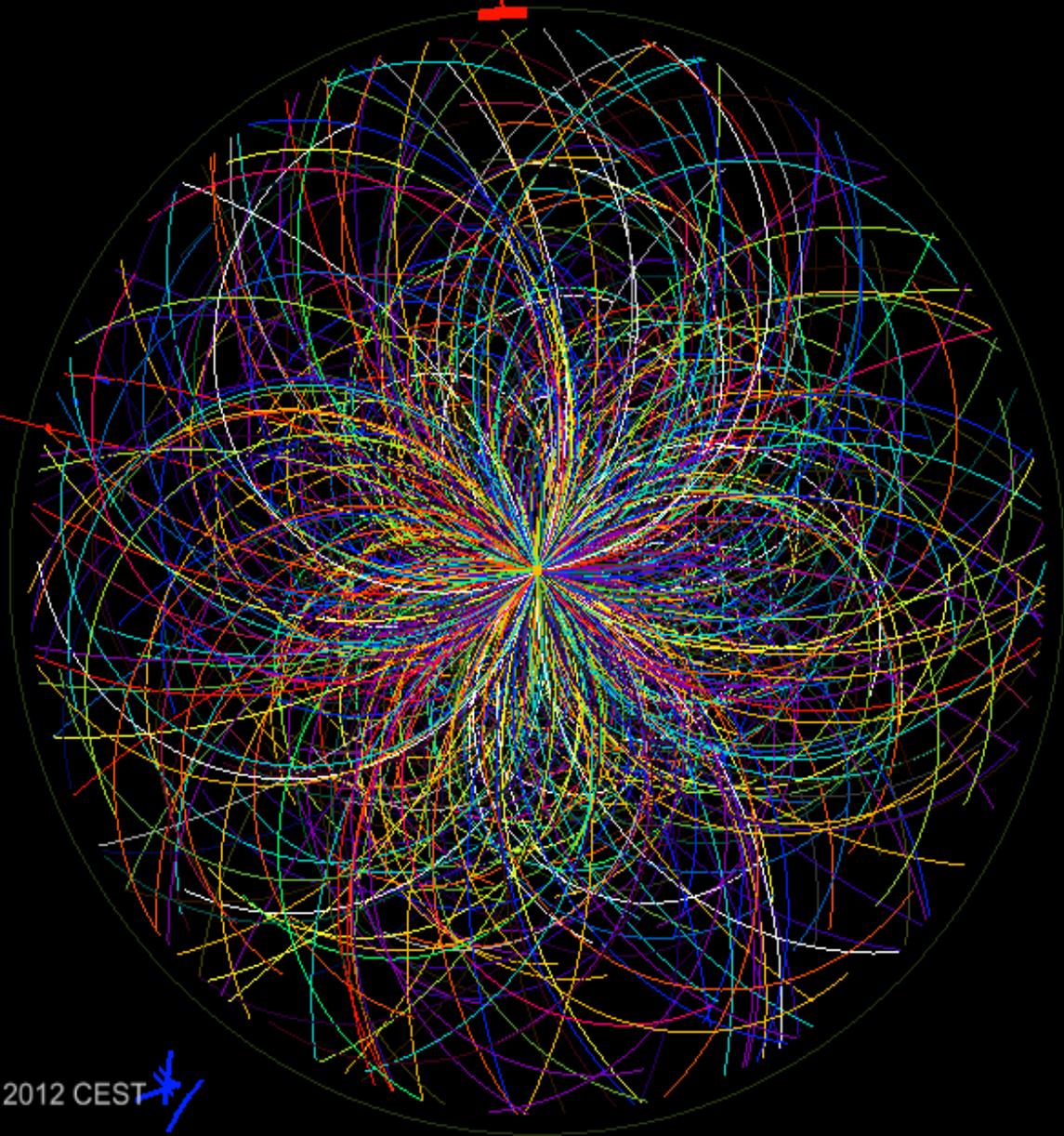
**Macchine fotografiche digitali con migliaia di milioni di pixels capaci di scattare una foto tridimensionale delle collisioni protone-protone a 14 TeV di LHC 40 milioni di volte al secondo.**





E  
CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST  
Run/Event: 195099 / 35438125  
Lumi section: 65  
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295





CMS Experiment at LHC, CERN

Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST 

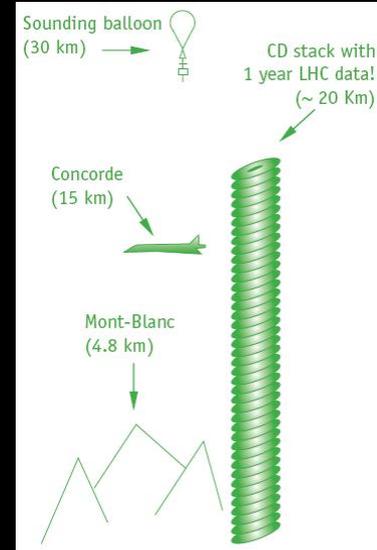
Run/Event: 195099 / 35438125

Lumi section: 65

Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

# The LHC Computing Grid

Scheduled = 15301  
Running = 10525



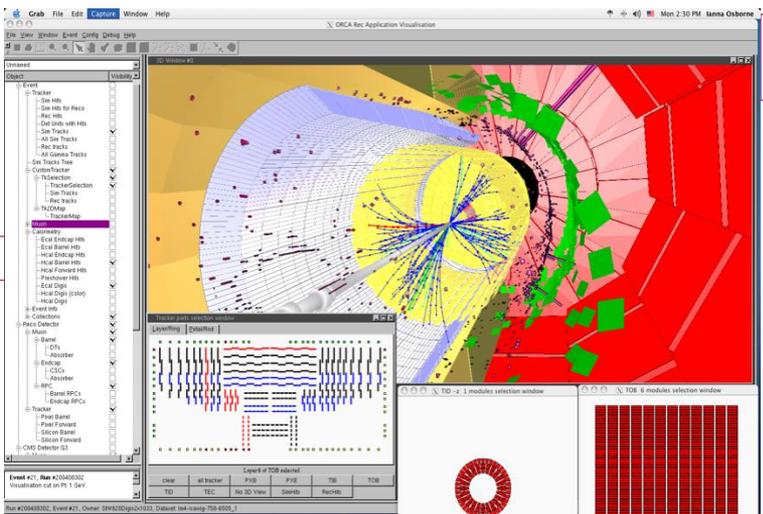
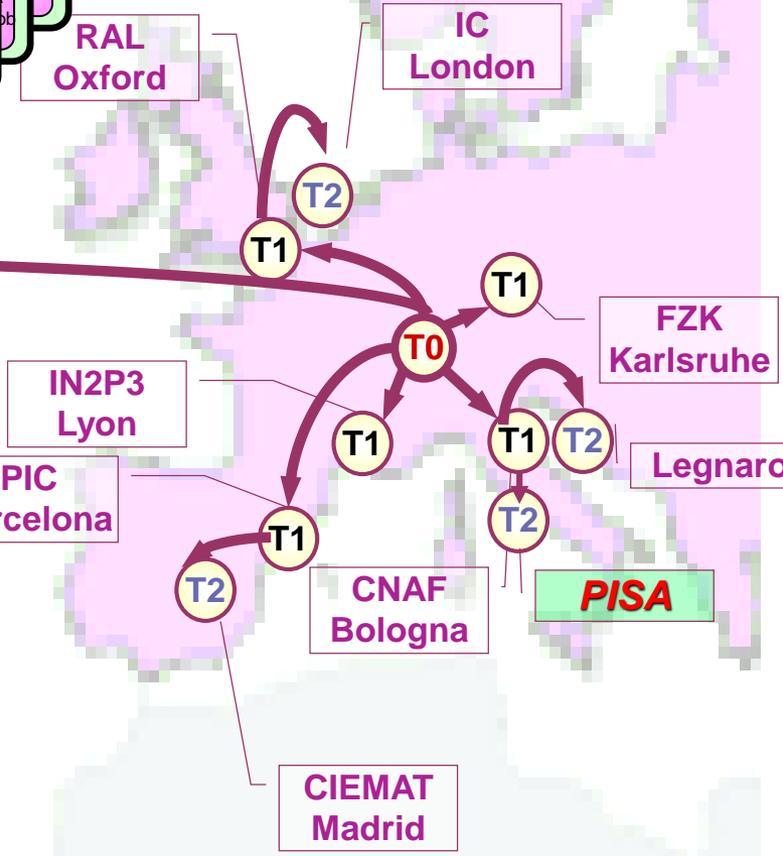
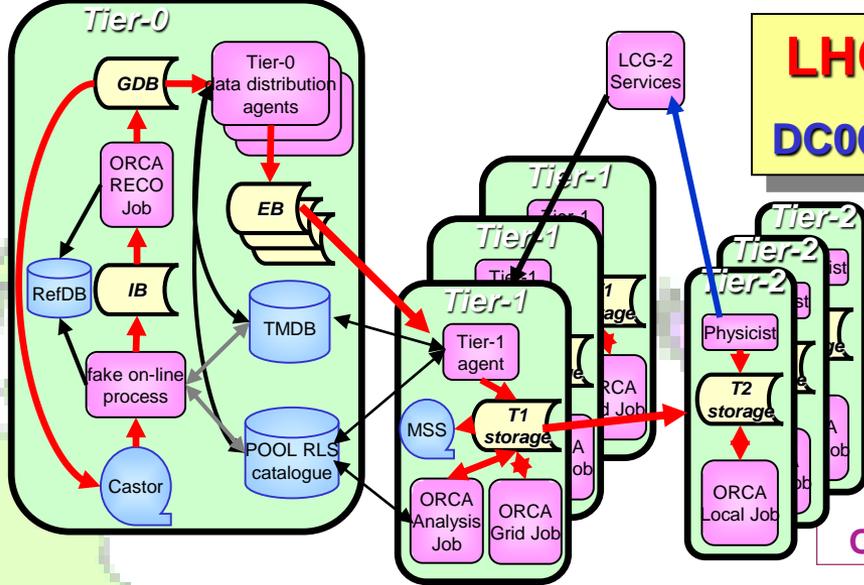
09:25:20 UTC

Gli esperimenti di LHC producono circa 15 Milioni di Gigabytes di dati ogni anno (circa 20 milioni di CD, una pila alta 20 Km! ). Questo corrisponde a scrivere ~30,000 Enciclopedie Britanniche ogni secondo!

L'analisi dei dati di LHC richiede una potenza di calcolo equivalente a ~100,000 dei più veloci processori oggi esistenti.

# LHC Computing GRID ( LCG )

## DC06 Data Challenge (CMS-managed)



# Servizio Calcolo a Pisa

# Sala Calcolo (fino al 2006)

- Farms della Sezione (fino al 2006)

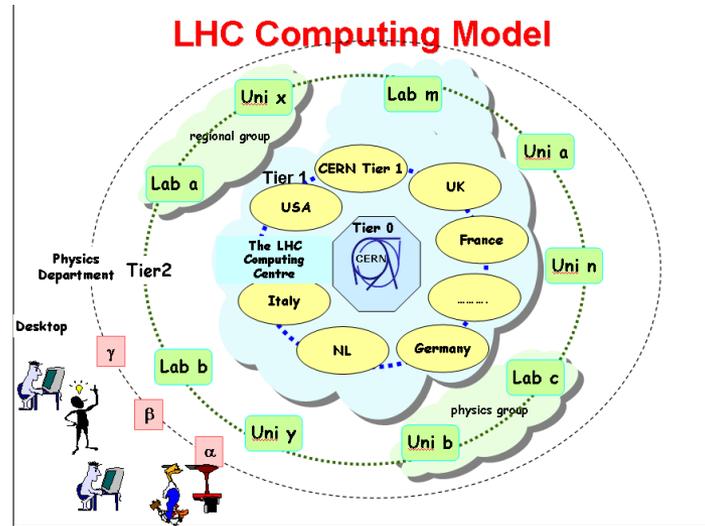
– CMS/GRID	23 CPU
– ATLAS	20 CPU
– MAGIC	6 CPU
– MEG	6 CPU
– SIENA	25 CPU
– CDF	12 CPU
– TEORICI	30 CPU
– GRID	20 CPU
– EPSI	30 CPU
– APE	



<http://www.pi.infn.it/index.php?id=26>

# Prospettive del calcolo a Pisa

## Proposta per un Tier 2 nel quadro di



**ma non solo...**

La realizzazione del Tier2 di CMS potrebbe essere il catalizzatore per la realizzazione di una

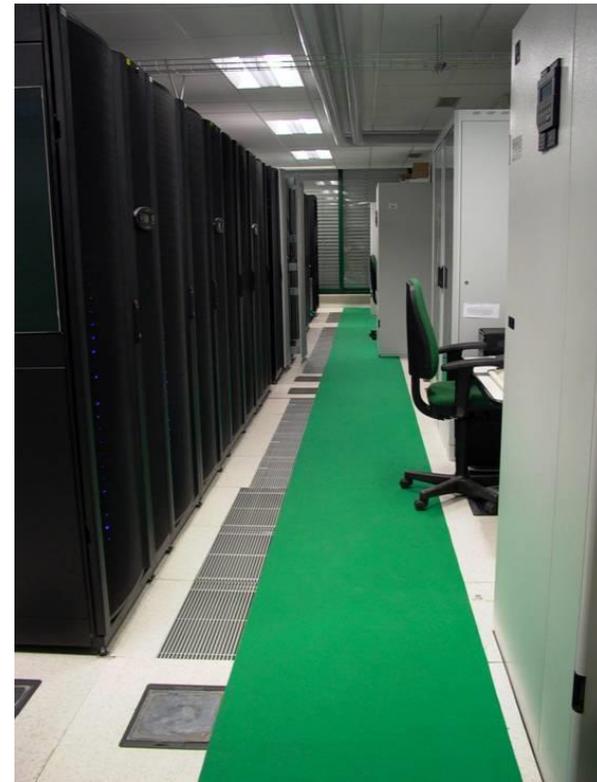
« Facility di calcolo integrata in Sezione »

# Dal 2007: Facility di calcolo integrata in Sezione

Sottoprodotto: Tier2 di CMS

Sinergie tra:

- Dipartimento di Fisica
- Scuola Normale Superiore
- CMS\_Sezione di Pisa

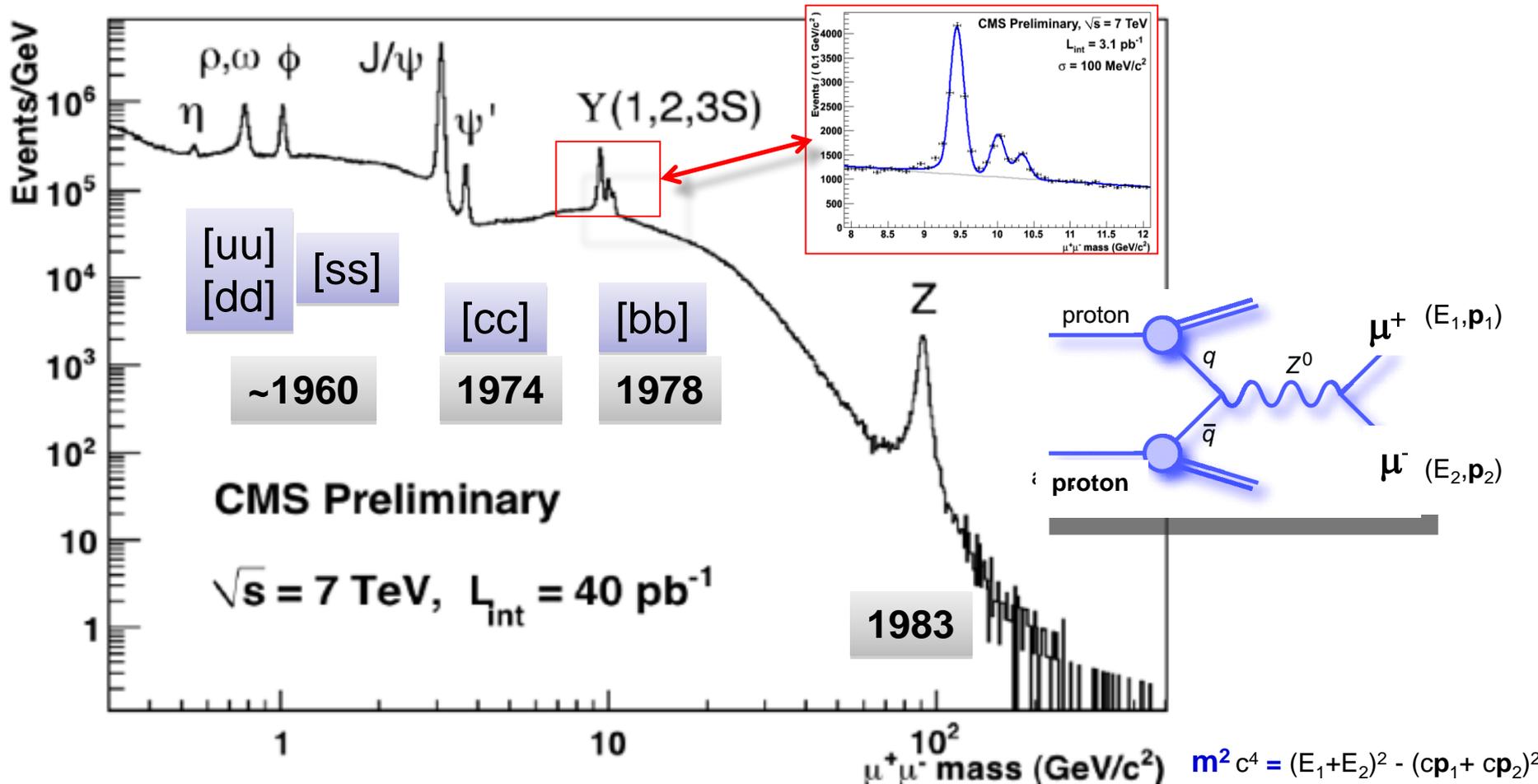


# INFN Pisa GRID Data Center e (2011) Cluster Nazionale Fisica Teorica





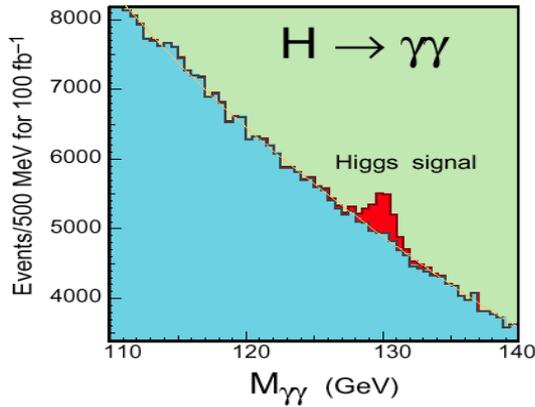
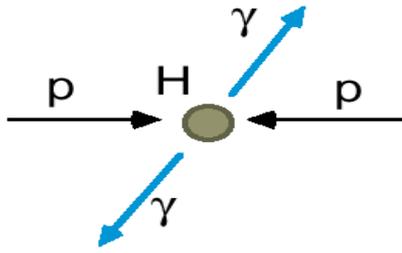
# La riscoperta del Modello Standard



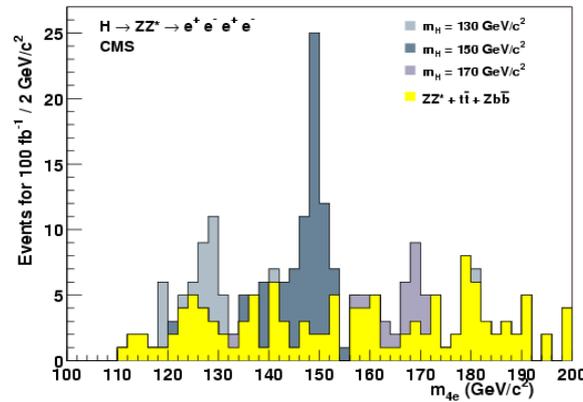
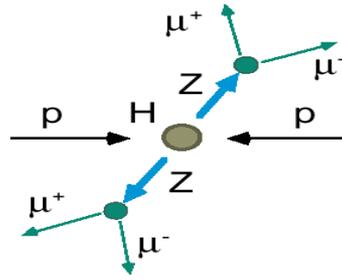
Dati raccolti (CMS) subito dopo la partenza di LHC nel 2010

# Eventi di Higgs in CMS

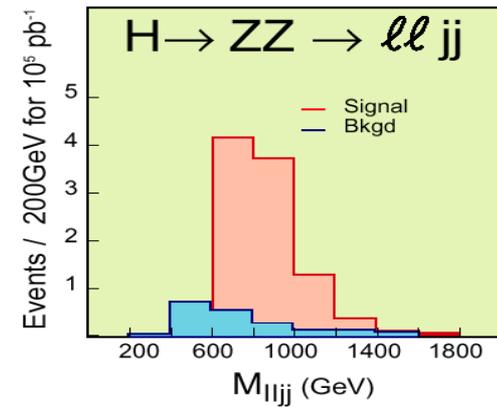
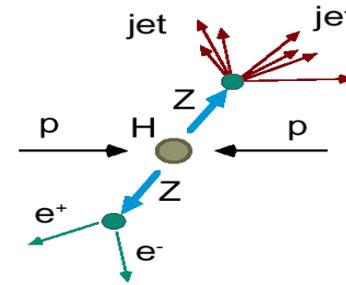
$M_H < 150 \text{ GeV}$



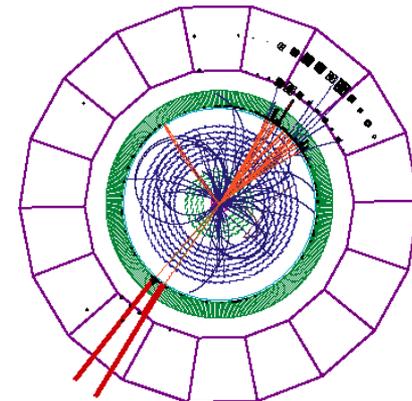
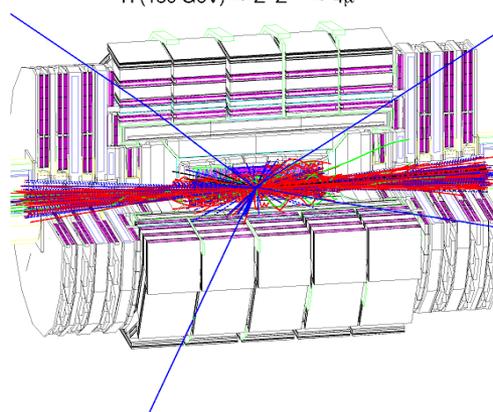
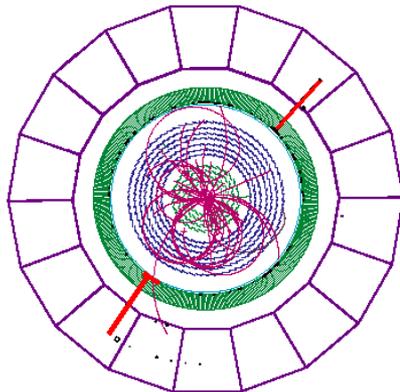
$130 < M_H < 500 \text{ GeV}$



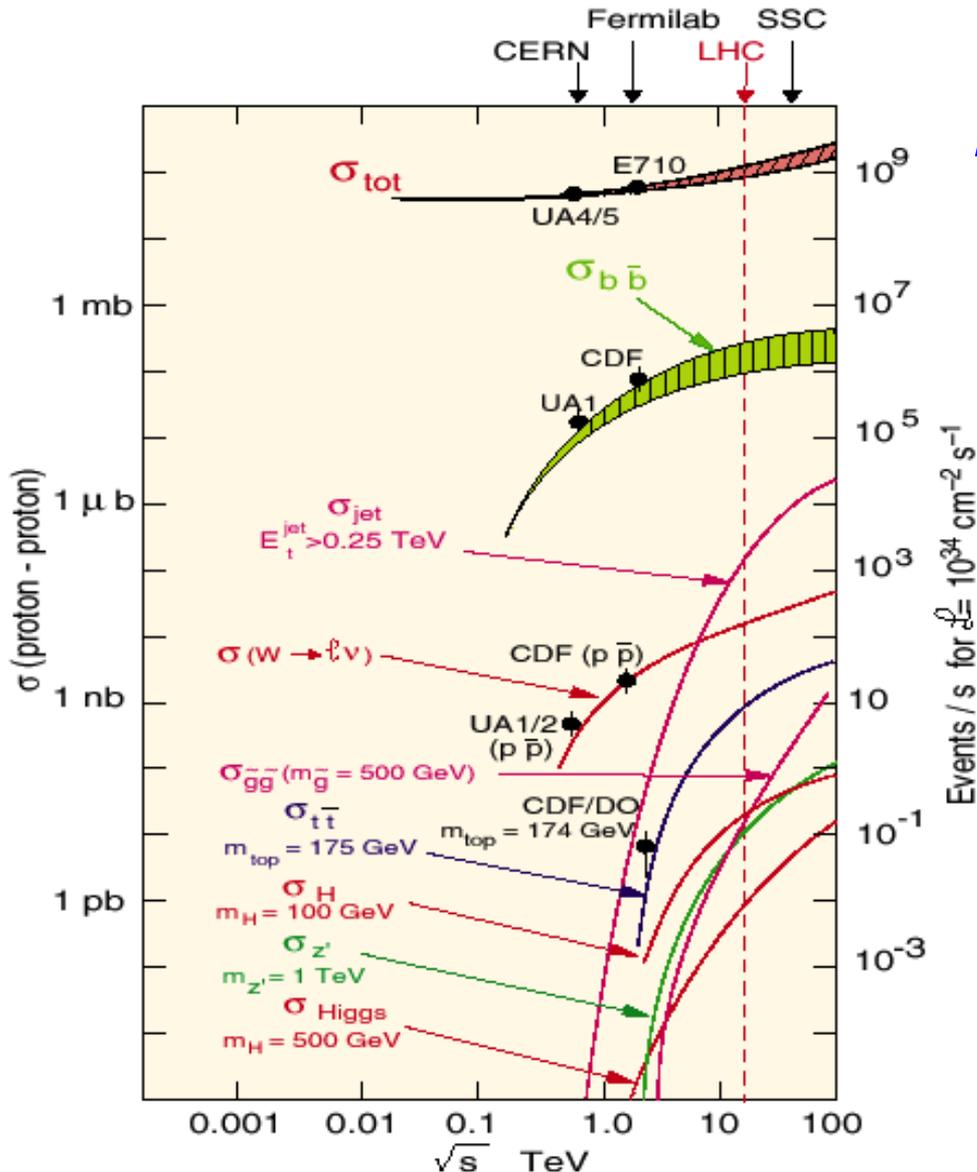
$M_H > \sim 500 \text{ GeV}$



H (150 GeV) → Z<sup>0</sup>Z<sup>0\*</sup> → 4μ



# Frequenza delle interazioni p-p a LHC



$$N_{ev}/sec = \sigma_{ev} \times L$$

$$L \approx 10^{34} cm^{-2} sec^{-1}; 1pb = 10^{-36} cm^2$$

$$\sigma_{tot} \approx 10^{11} pb$$

$$\Rightarrow N_{tot}/sec \approx 10^9$$

$$\sigma_{higgs} \approx 15 pb \quad (M_{Higgs} = 125 GeV)$$

$$\Rightarrow N_{higgs}/sec \approx 0.15$$

$\Rightarrow$  Per ogni evento di Higgs  
ci sono circa 7 miliardi  
di eventi di altro tipo



# Cercare un ago in un pagliaio ...

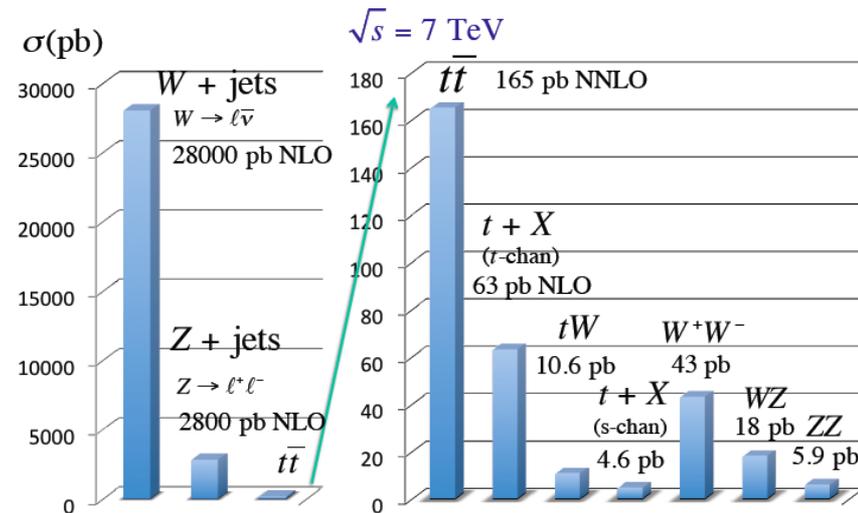


... non solo i pochi aghi prodotti sono nascosti in un enorme pagliaio (un evento su 7 miliardi di eventi), ma ci sono anche molti eventi che producono stati finali molto simili a quelli in cui si ha il bosone di Higgs

Per ogni evento  $pp \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$

ci sono 10 milioni di eventi  $pp \rightarrow b\bar{b}$

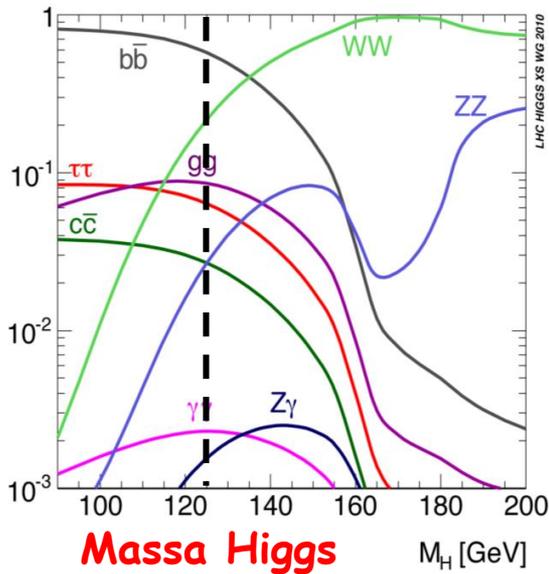
- È necessario scegliere i canali di decadimento con meno fondo dove cercare l'Higgs...



Alcuni esempi di eventi che potrebbero sembrare aghi !!

Con una massa  $M_H \sim 125 \text{ GeV}$  (per cui  $\sigma_H \sim 15 \text{ pb}$ ) con  $\int L dt = 10 \text{ fb}^{-1}$  si prevede che siano stati prodotti 150.000 Higgs che decadono in:

Frazione di decadimento BR



### $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4l$ :

➤  $BR = 1.2 \cdot 10^{-4}$ , canale con ottima risoluzione in massa e pochi eventi di fondo:  $\sim 18$  eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 6 eventi e 1 di fondo nel bin della risoluzione di  $\sim 2 \text{ GeV}$

### $H \rightarrow \gamma\gamma$ :

➤  $BR = 2.3 \cdot 10^{-3}$ , canale con ottima risoluzione in massa ma molti eventi di fondo:  $\sim 350$  eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 200 eventi e 3000 di fondo nel bin della risoluzione di  $\sim 2 \text{ GeV}$

### $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$ :

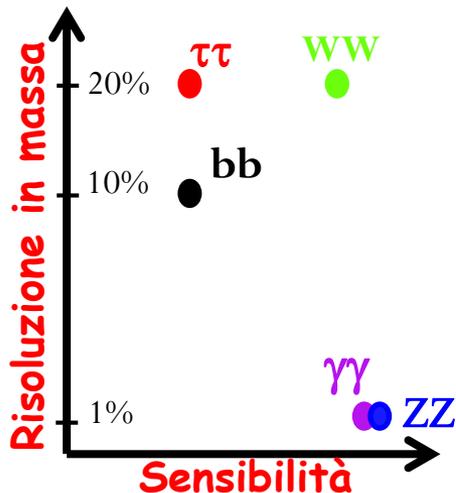
➤  $BR = 1.0 \cdot 10^{-2}$ , canale con risoluzione in massa del 20% e molti eventi di fondo:  $\sim 1500$  eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 60 eventi e 300 di fondo

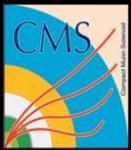
### $H \rightarrow \tau\tau$ :

➤  $BR = 6.0 \cdot 10^{-2}$ , canale con risoluzione in massa del 20% e molti eventi di fondo:  $\sim 9000$  eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 14 eventi e 140 di fondo

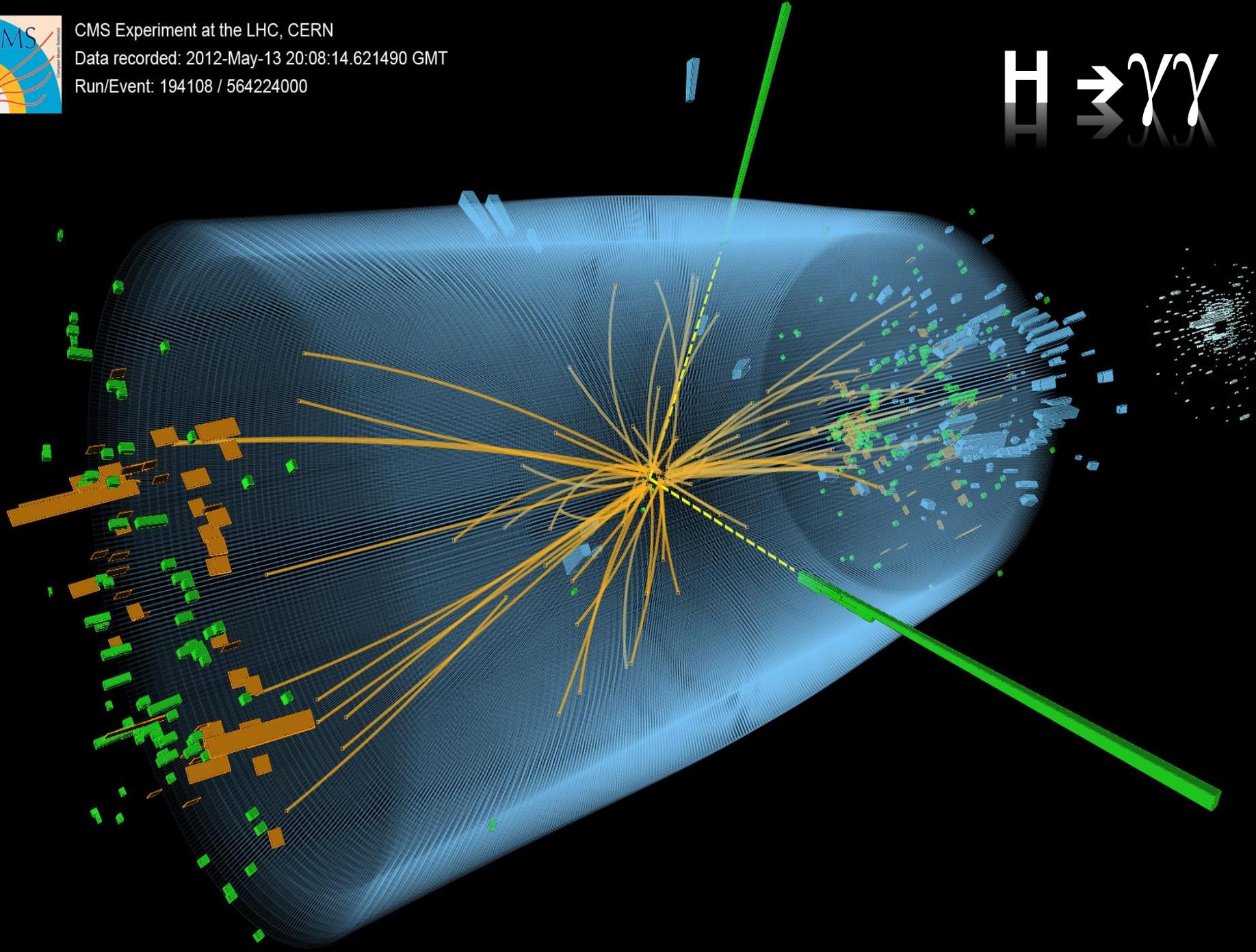
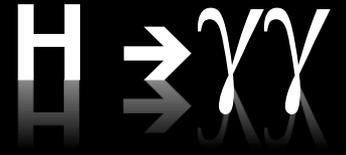
### $H \rightarrow bb$ :

➤  $BR = 5.8 \cdot 10^{-1}$ , canale con risoluzione in massa del 10% e molti eventi di fondo:  $\sim 90000$  eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 8 eventi e 80 di fondo



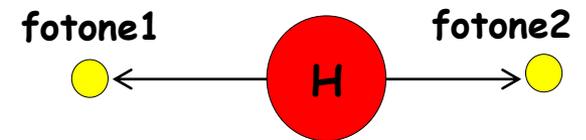
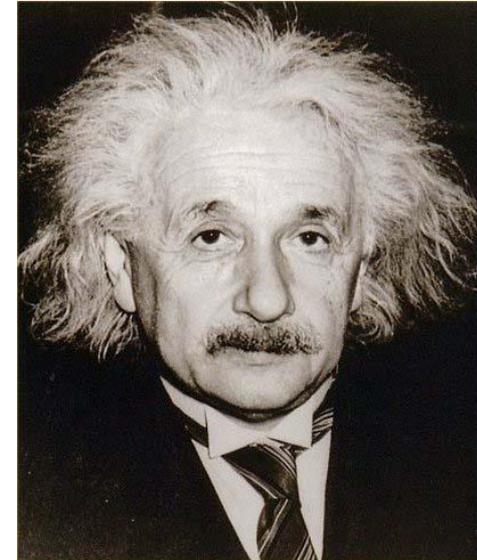


CMS Experiment at the LHC, CERN  
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT  
Run/Event: 194108 / 564224000



# Come si misura la massa ?

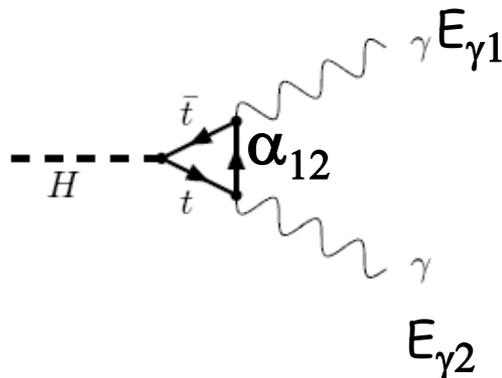
- Come si misura la massa di una particella che decade in un insieme di particelle? Misurando le energie e gli impulsi di tutte le particelle in cui decade.
- Caso semplice: per esempio un bosone di Higgs fermo che decade in due fotoni. grazie alla conservazione dell'energia sappiamo che la somma dell'energia dei due fotoni deve essere pari alla massa dell'Higgs moltiplicata per  $c^2$
- Più in generale misurando le energie e gli impulsi di tutte le particelle in cui una particella decade si può ricostruire la massa della particella iniziale che le ha generate.



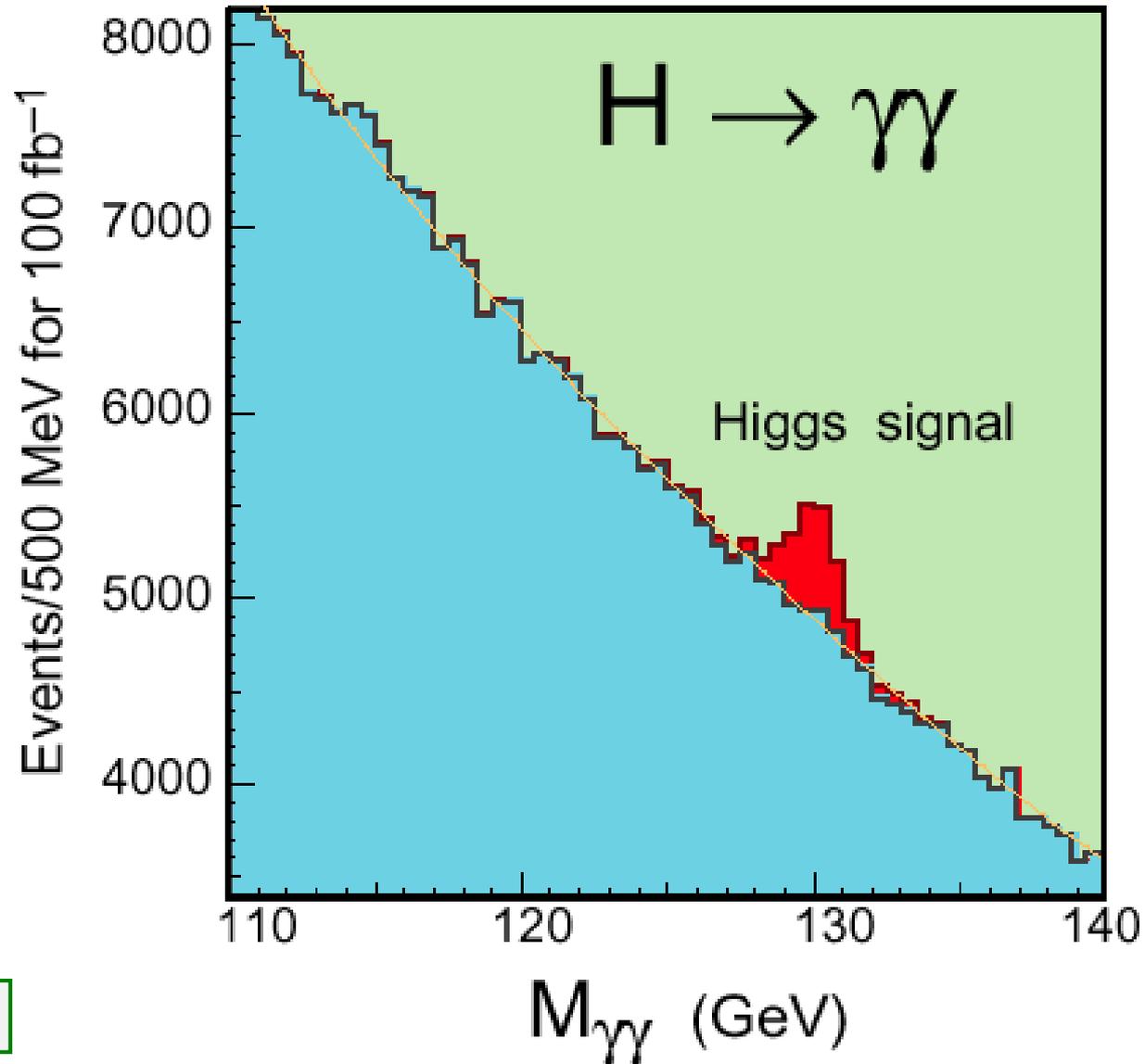
$$M_H c^2 = E_1 + E_2$$

# Decadimento dell'Higgs in due fotoni

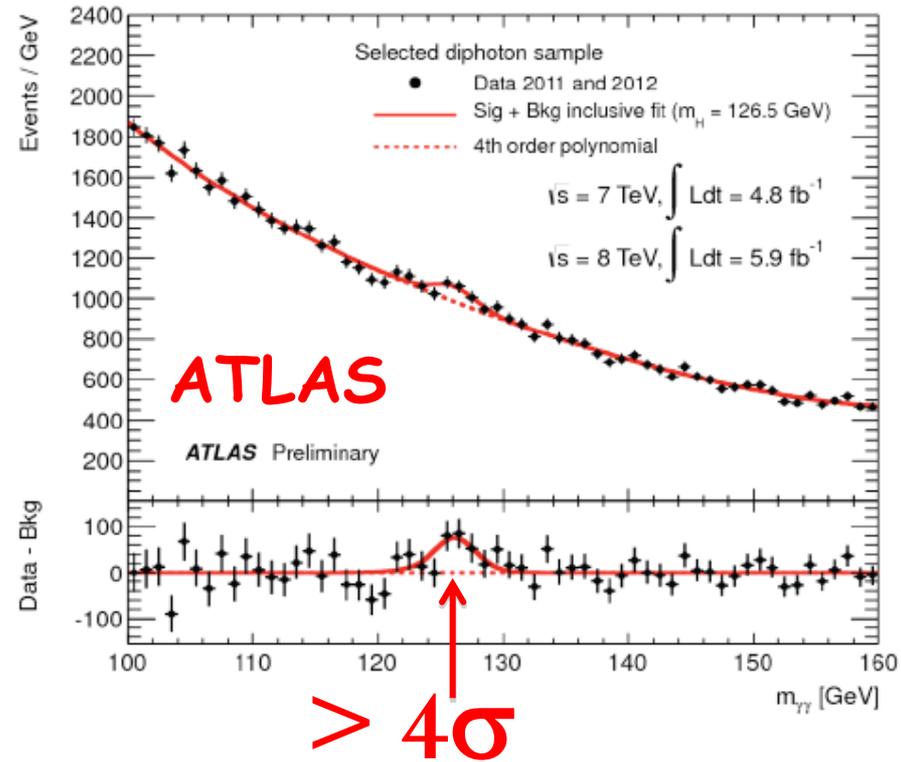
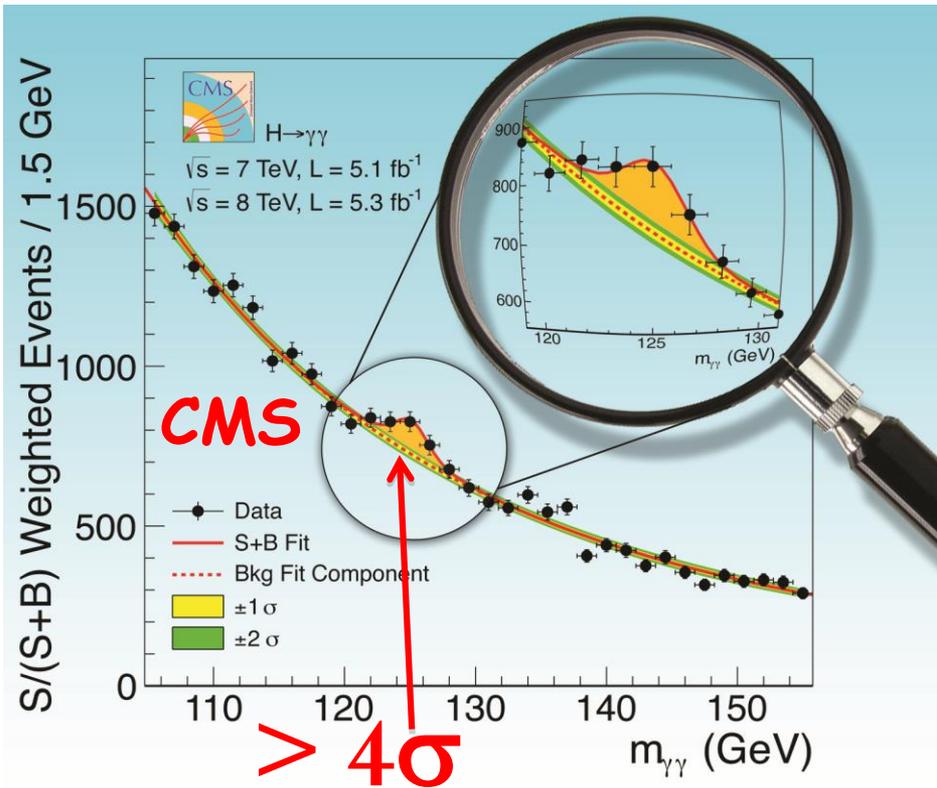
Segnale dell'Higgs di massa 130 GeV per una luminosità integrata di  $100 \text{ fb}^{-1}$ . Con questa luminosità ci si aspettano 2.000 eventi di Higgs su 30.000 eventi di fondo nell'intervallo di 2 GeV della risoluzione dell'apparato



$$M_{\gamma\gamma}^2 = 2 E_{\gamma 1} E_{\gamma 2} (1 - \cos \alpha_{12})$$



# Ricerca di $H \rightarrow \gamma\gamma$

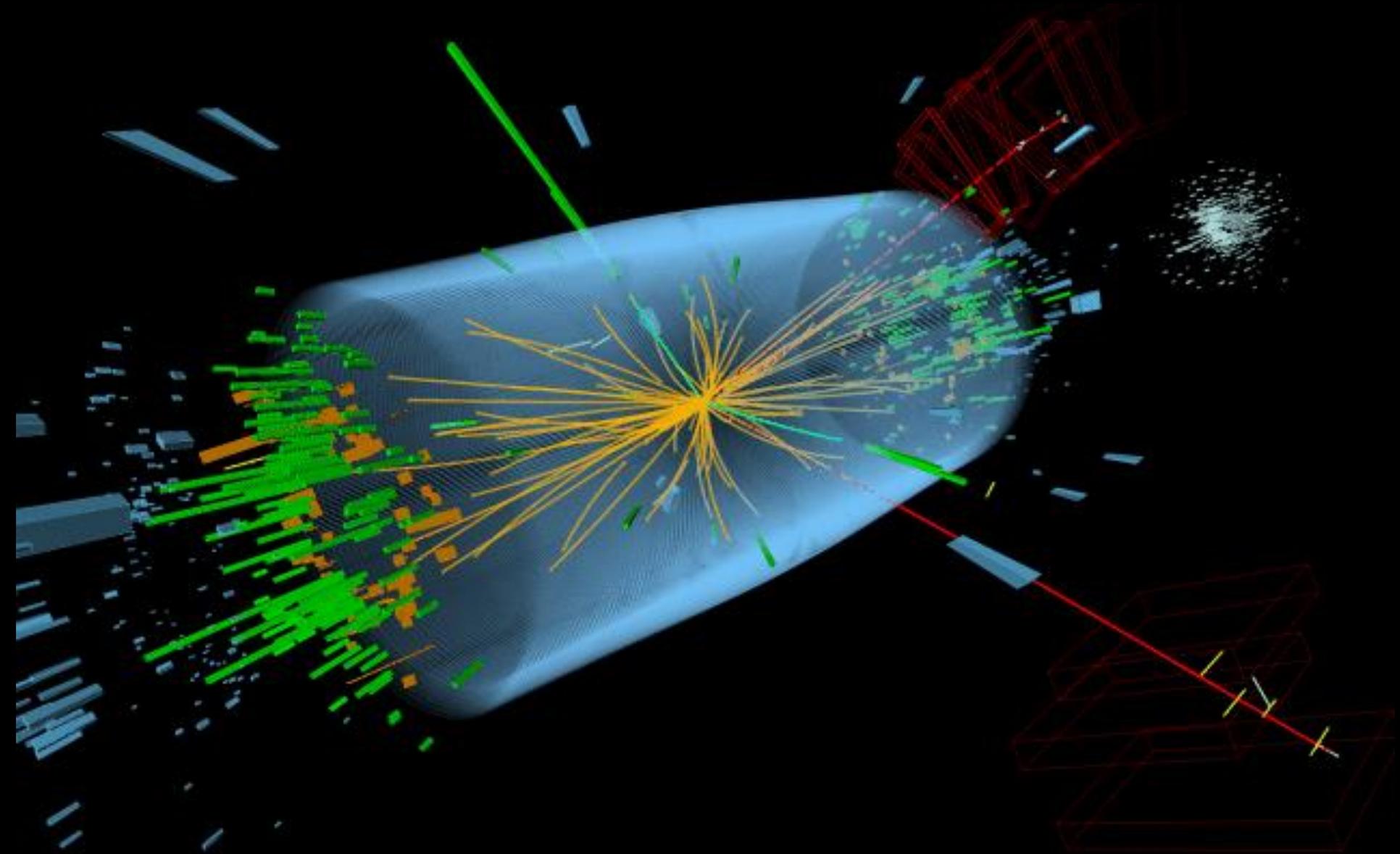


" $4\sigma$ "  $\Rightarrow 3.15 \times 10^{-5}$  è la probabilità di assenza di segnale:

--> evidenza notevole di segnale

" $4\sigma$ " vuol dire che si ha una probabilità di  $3.15 \times 10^{-5}$  (cioè solo un caso su 31.746) che si ottengano questi risultati anche se il Bosone di Higgs non esistesse; cioè 1 su 31.746 è la probabilità che le distribuzioni osservate da ciascun esperimento indipendentemente nel canale di decadimento in 2 fotoni siano solo dovute al fondo (cioè solo ad eventi dovuti ad altri processi già noti) con le sue fluttuazioni statistiche.

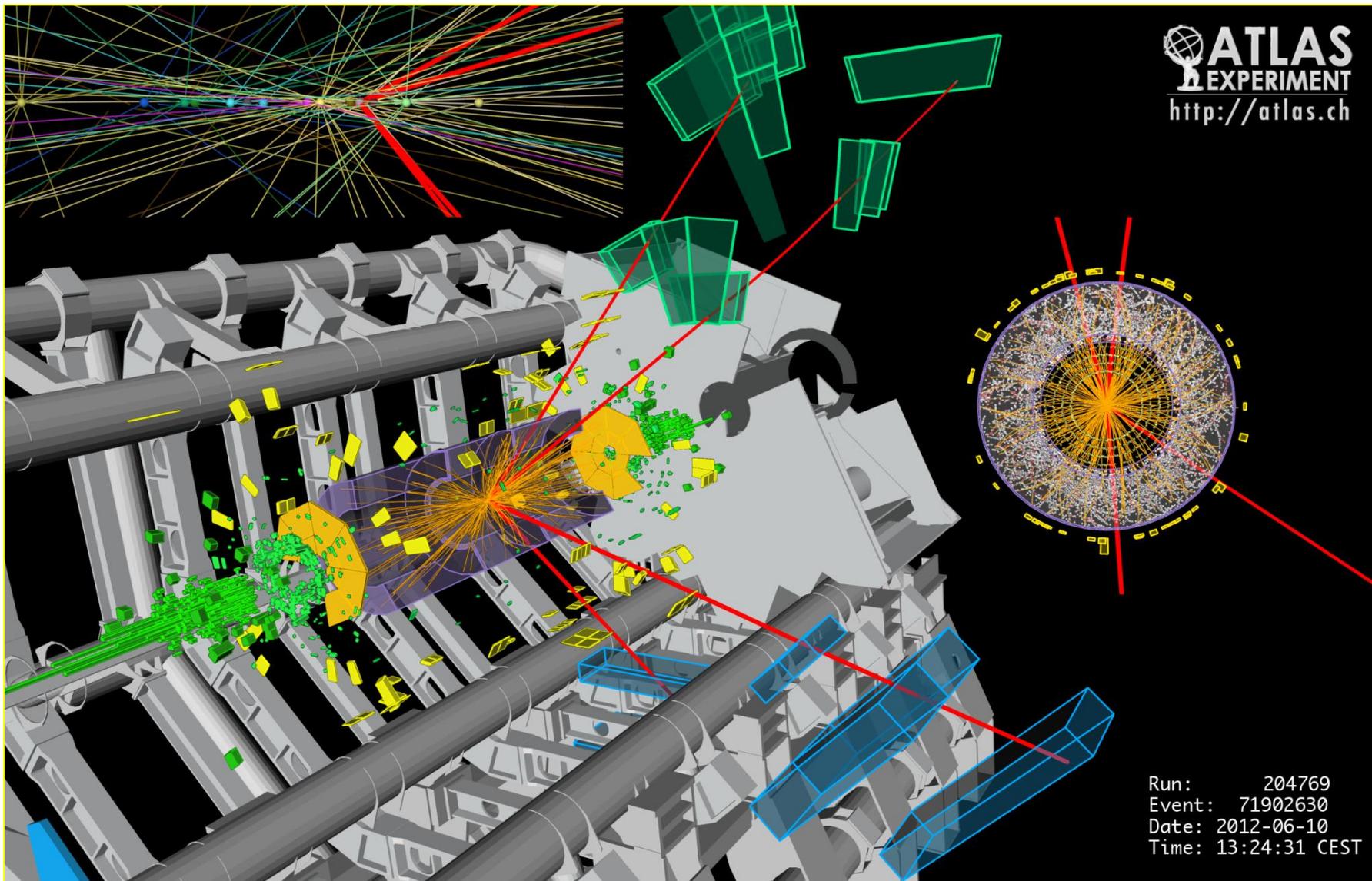
**CMS**



candidate ZZ event with two electrons and two muons

4 $\mu$  candidate with  $m_{4\mu} = 125.1 \text{ GeV}$

$p_T$  (muons) = 36.1, 47.5, 26.4, 71.7 GeV  $m_{12} = 86.3 \text{ GeV}$ ,  $m_{34} = 31.6 \text{ GeV}$   
15 reconstructed vertices



4e candidate with  $m_{4e} = 124.6 \text{ GeV}$

$p_T$  (electrons) = 24.9, 53.9, 61.9, 17.8 GeV  $m_{12} = 70.6 \text{ GeV}$ ,  $m_{34} = 44.7 \text{ GeV}$   
12 reconstructed vertices

**ATLAS**  
EXPERIMENT

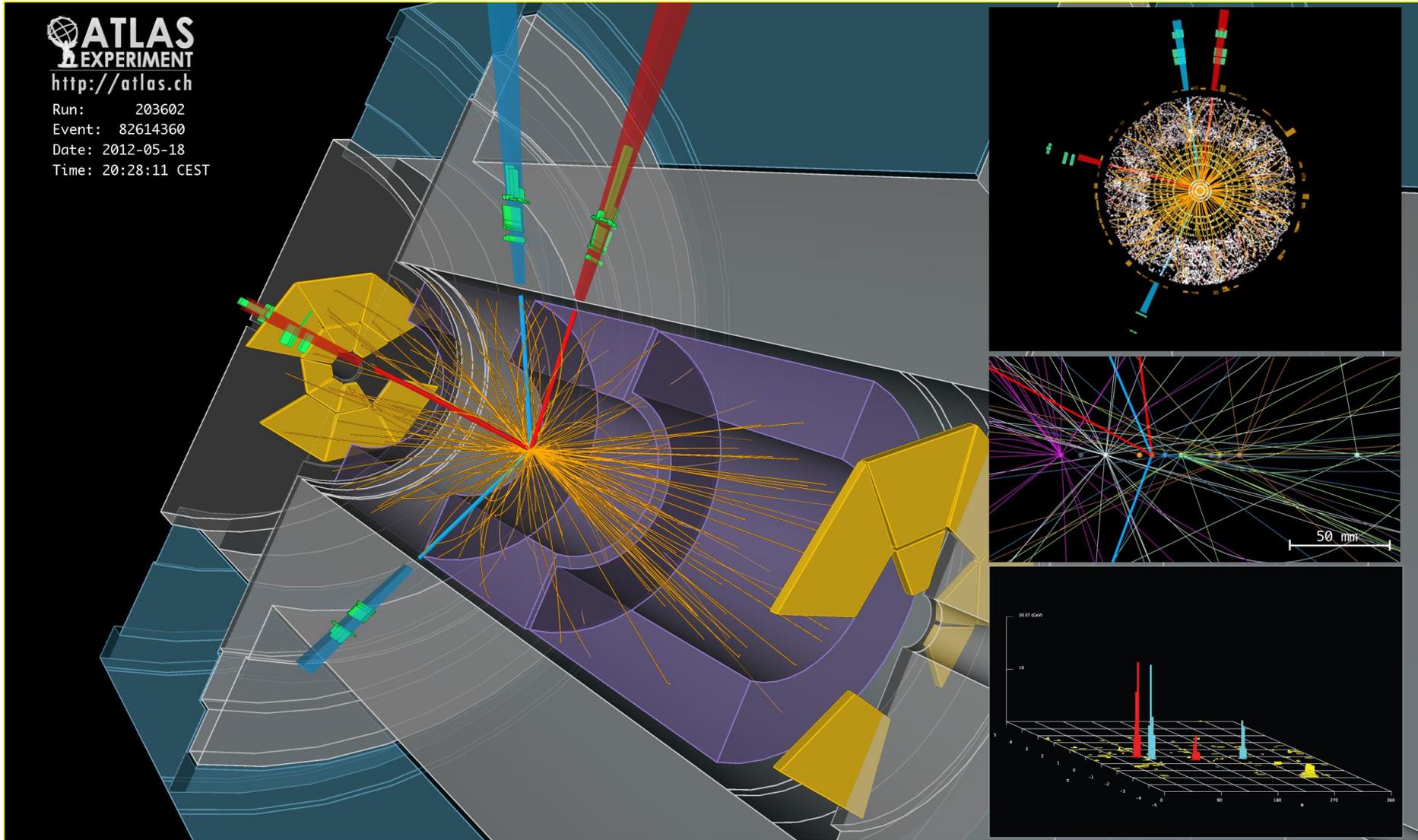
<http://atlas.ch>

Run: 203602

Event: 82614360

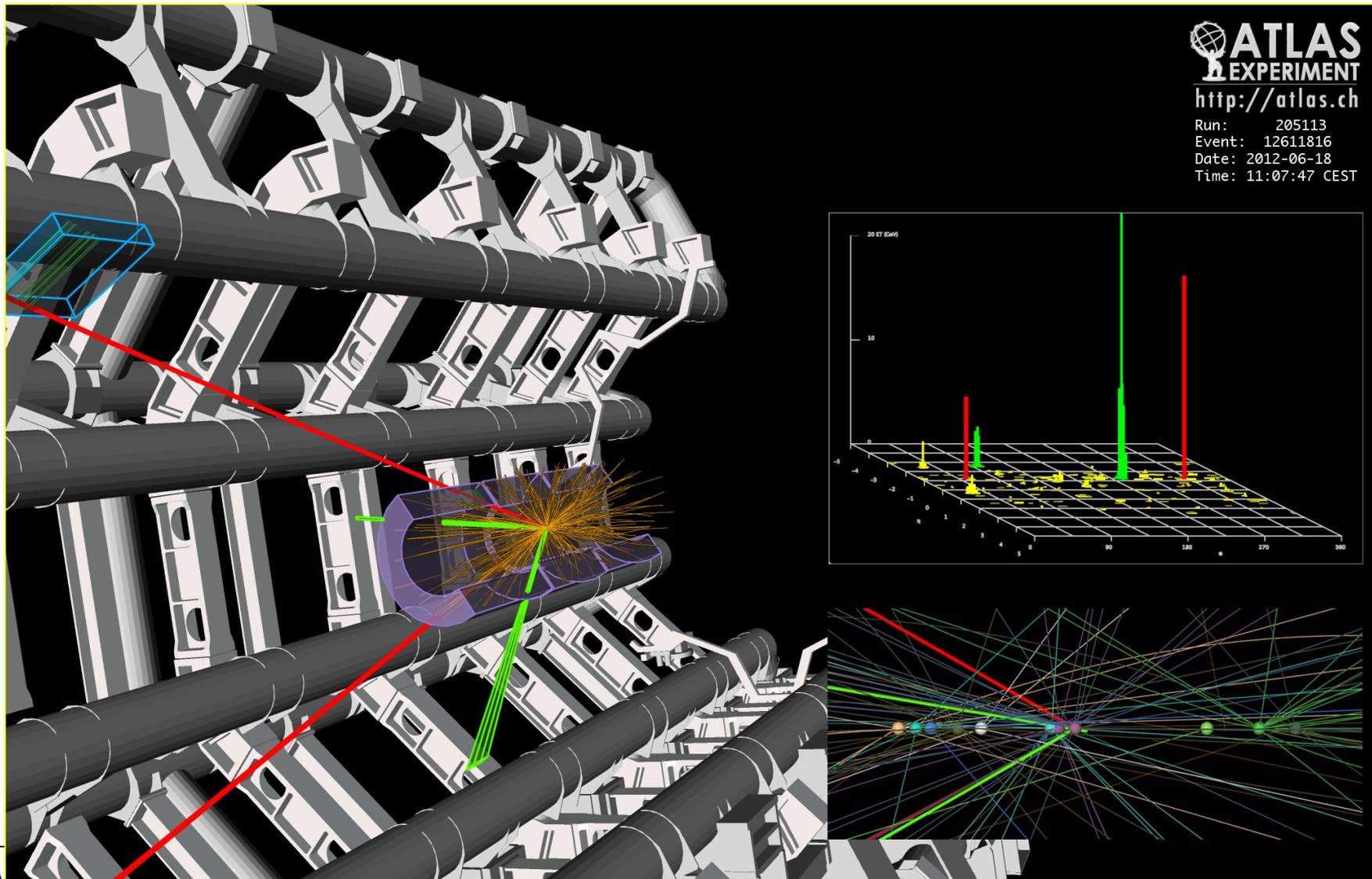
Date: 2012-05-18

Time: 20:28:11 CEST

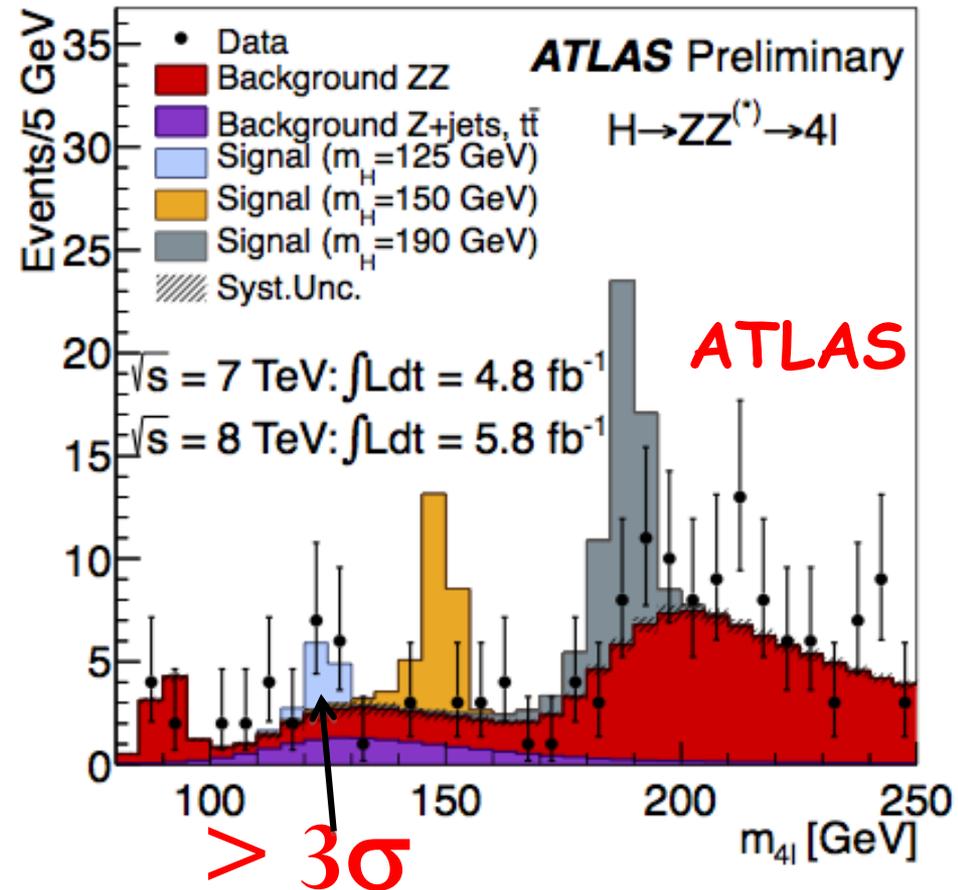
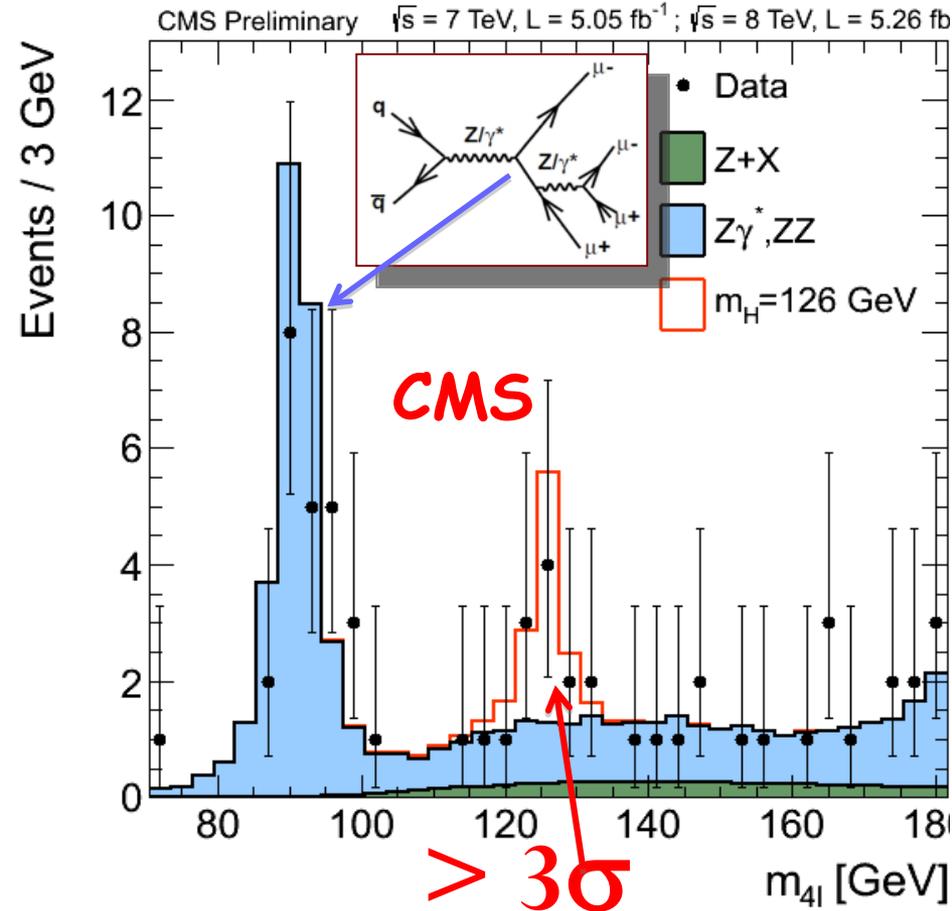


$2e2\mu$  candidate with  $m_{2e2\mu} = 123.9 \text{ GeV}$

$p_T(e, e, \mu, \mu) = 18.7, 76, 19.6, 7.9 \text{ GeV}$ ,  $m(e^+e^-) = 87.9 \text{ GeV}$ ,  $m(\mu^+\mu^-) = 19.6 \text{ GeV}$   
12 reconstructed vertices



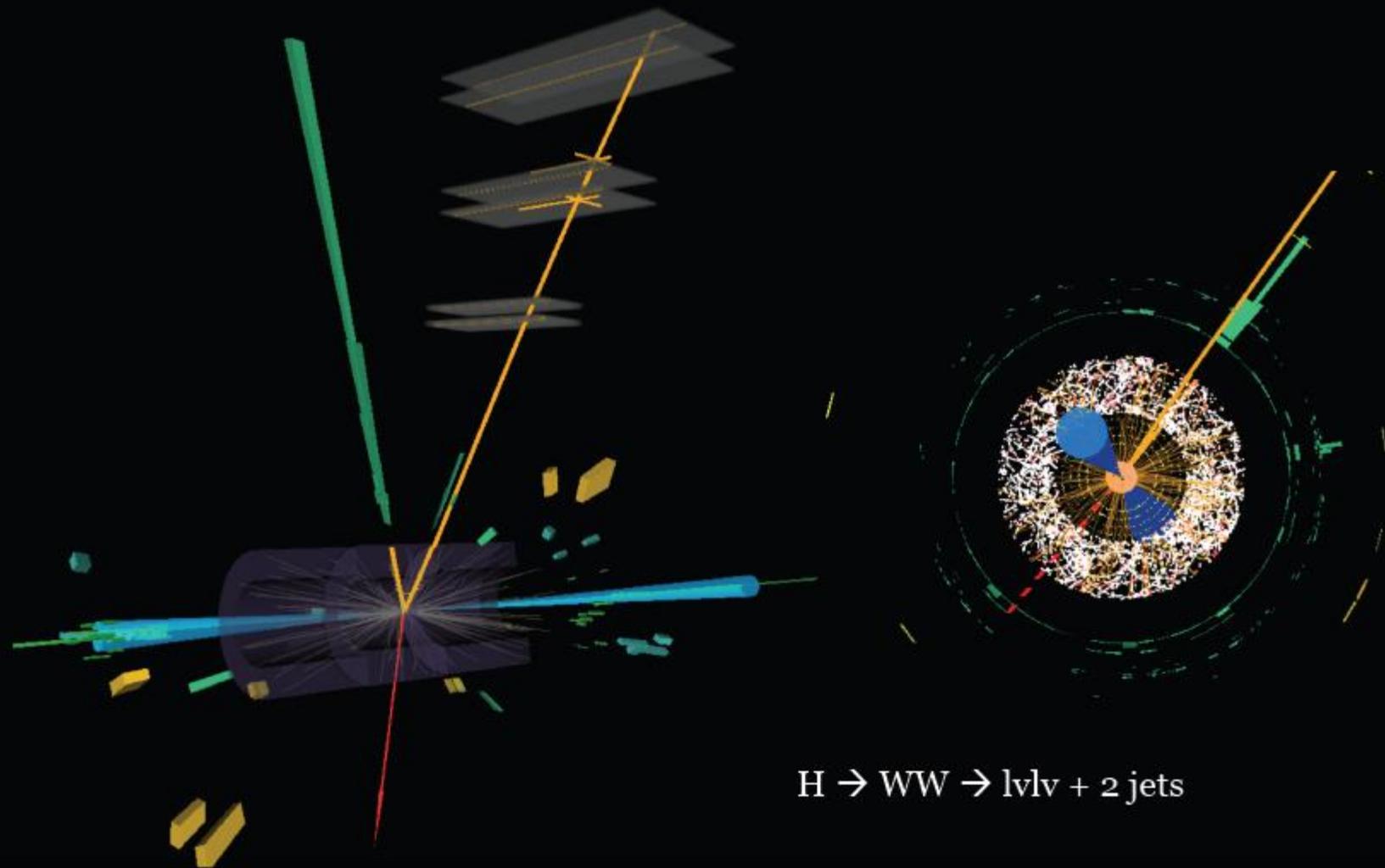
# Ricerca di $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$



" $3\sigma$ "  $\Rightarrow 1.35 \times 10^{-3}$  è la probabilità di assenza di segnale --> evidenza di segnale

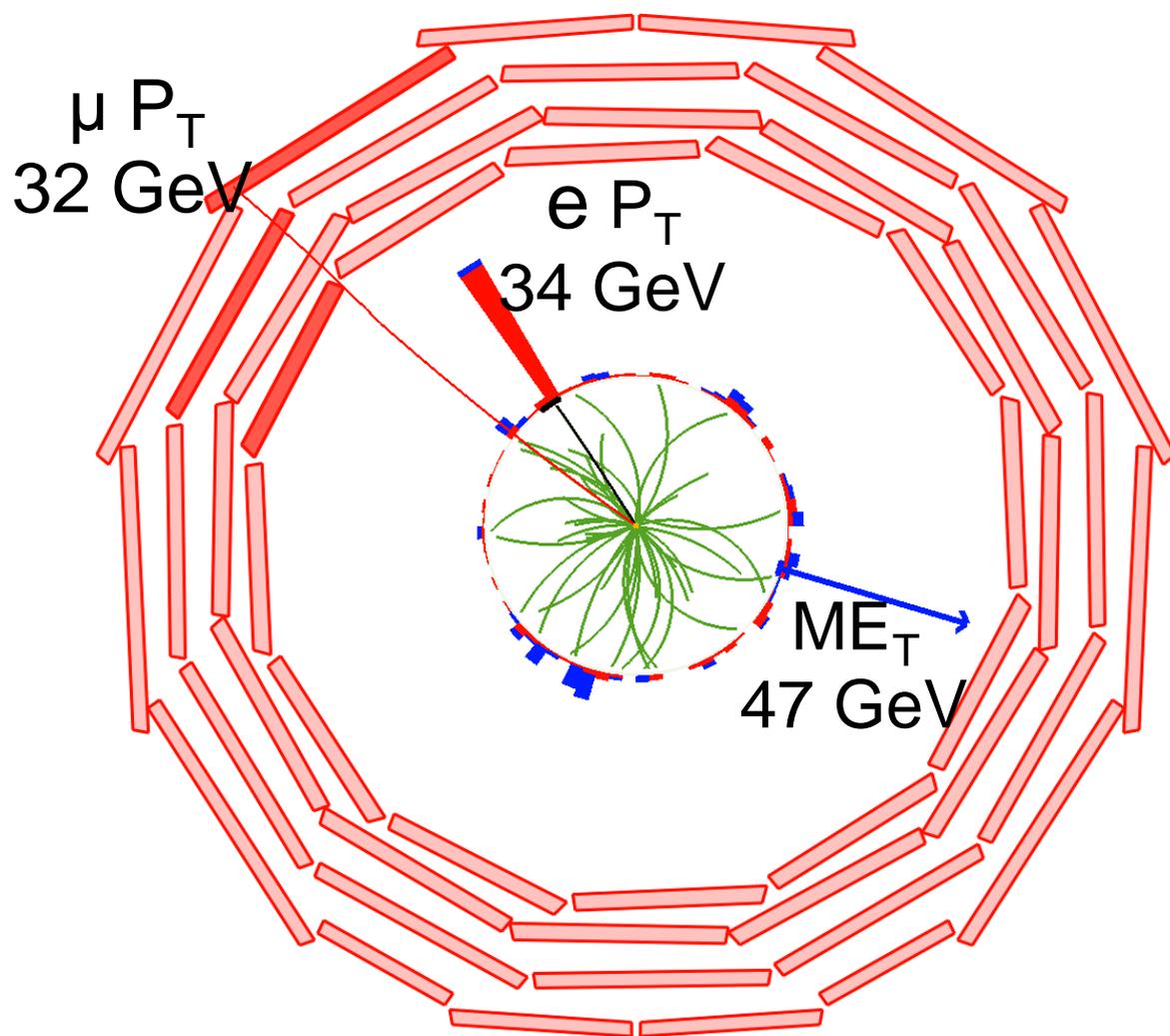
" $3\sigma$ " vuol dire che si ha una probabilità di  $1.35 \times 10^{-3}$  (cioè solo un caso su 750) che si ottengano questi risultati anche se il Bosone di Higgs non esistesse; cioè 1 su 750 è la probabilità che le distribuzioni osservate da ciascun esperimento indipendentemente nel canale di decadimento in 4 leptoni siano solo dovute al fondo (cioè solo ad eventi dovuti ad altri processi già noti) con le sue fluttuazioni statistiche.

$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu + 2 \text{ jets}$

# CMS: Possibile evento di $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



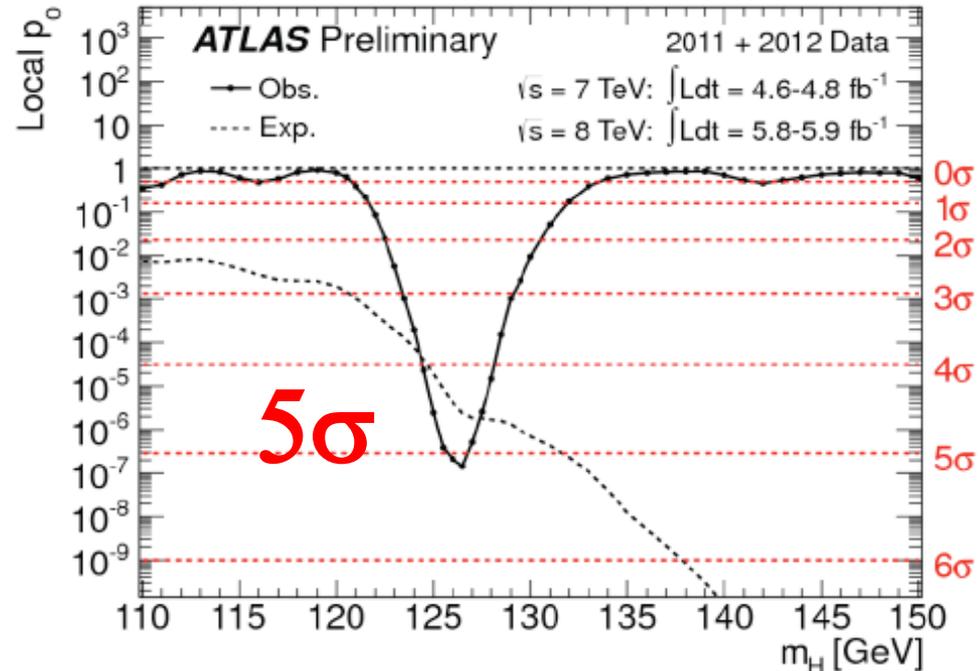
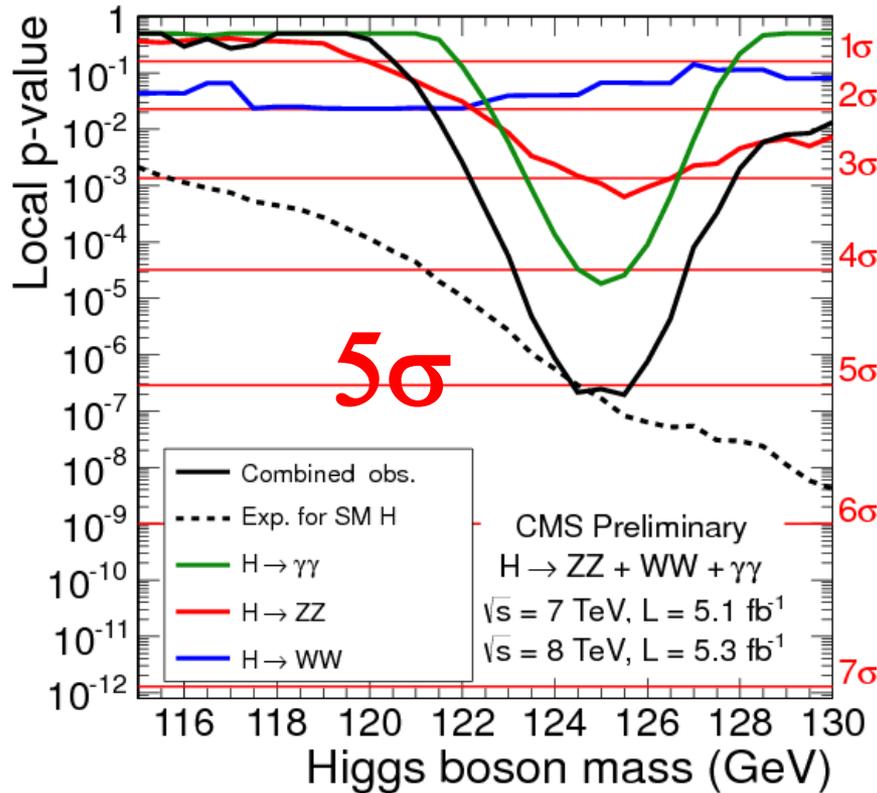
Eventi caratterizzati dalla presenza di:  
2 leptoni ( $e/\mu$ ) di alto  $p_T$   
e grande  $E_T$  mancante

Canale di decadimento con scarsa risoluzione in massa ( $\approx 20\%$ ) per la presenza di neutrini e con molti eventi di fondo. Per una luminosità integrata di  $10 \text{ fb}^{-1}$  ci si aspettano  $\sim 1500$  eventi di Higgs. Dopo tutte le selezioni restano  $\sim 60$  eventi di segnale e  $\sim 300$  di fondo.

➤  $\geq 2\sigma$

Si somma la statistica dei dati in  $\gamma\gamma$ , ZZ, e WW

$$\sigma_{\gamma\gamma} + \sigma_{ZZ} + \sigma_{WW} \rightarrow 4+3+2=5 !$$



**"5 $\sigma$ "  $\rightarrow 2.85 \times 10^{-7}$  = probabilità di assenza di segnale  $\rightarrow$  scoperta !**

**"5 $\sigma$ " vuol dire che si ha una probabilità di  $2.85 \times 10^{-7}$  (cioè solo un caso su 3.5 milioni) che si ottengano questi risultati anche se il Bosone di Higgs non esistesse; cioè 1 su 3.5 milioni di casi è la probabilità che tutti i dati osservati nei tre canali di decadimento dai due esperimenti indipendentemente siano solo dovuti al fondo (cioè solo ad eventi dovuti ad altri processi già noti) con le sue fluttuazioni statistiche**

# 3,4,5 sigma

Probabilità

Interpretazione

12 volte croce ?!

" $3\sigma$ "  $\Rightarrow 1.35 \times 10^{-3}$



“evidenza di  
segnale”

18 volte croce ??!

" $4\sigma$ "  $\Rightarrow 3.15 \times 10^{-5}$



“notevole evidenza  
di segnale”

26 volte croce !!!

" $5\sigma$ "  $\Rightarrow 2.85 \times 10^{-7}$

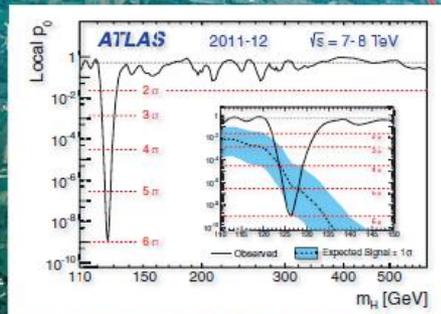
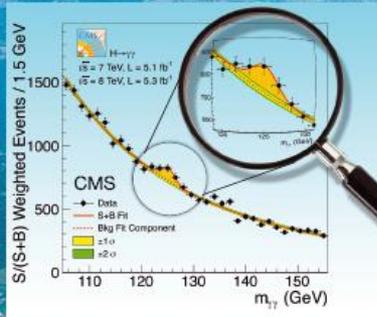


“scoperta”

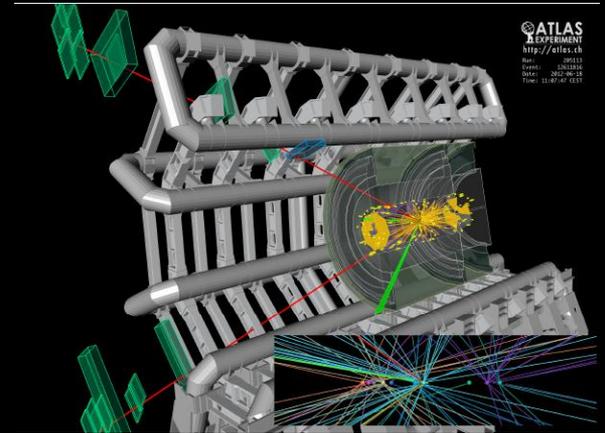
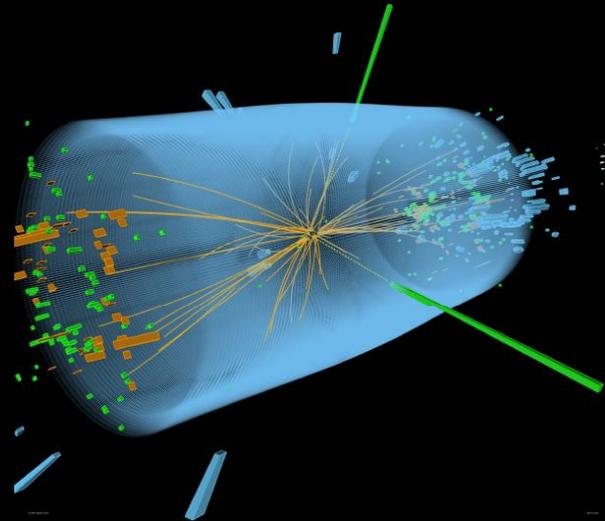
4 luglio 2012



# First observations of a new particle in the search for the Standard Model Higgs boson at the LHC



[www.elsevier.com/locate/physletb](http://www.elsevier.com/locate/physletb)



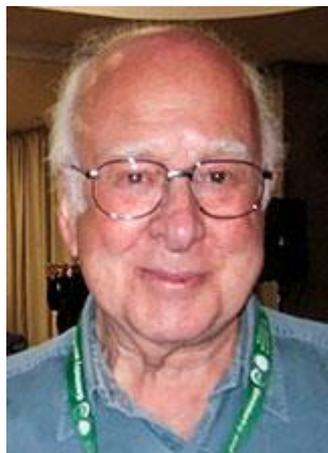
*Congratulations to both  
Atlas and CMS Collaborations  
and to the builders of the LHC  
on a magnificent achievement!*

*Peter Higgs*

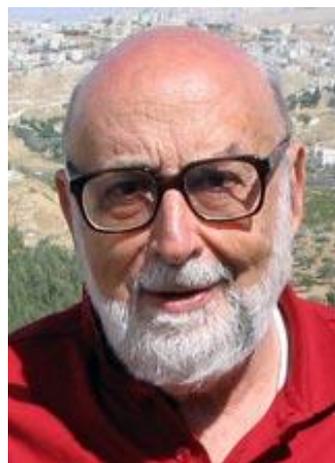
*30 August 2012*



# Premio Nobel per la Fisica 2013



Peter W. Higgs



François Englert

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*.

Il così detto meccanismo di Higgs fu proposto nel 1964 in due articoli pubblicati separatamente, il primo dai fisici belgi Robert Brout e François Englert e il secondo, subito dopo, dal fisico britannico Peter Higgs.

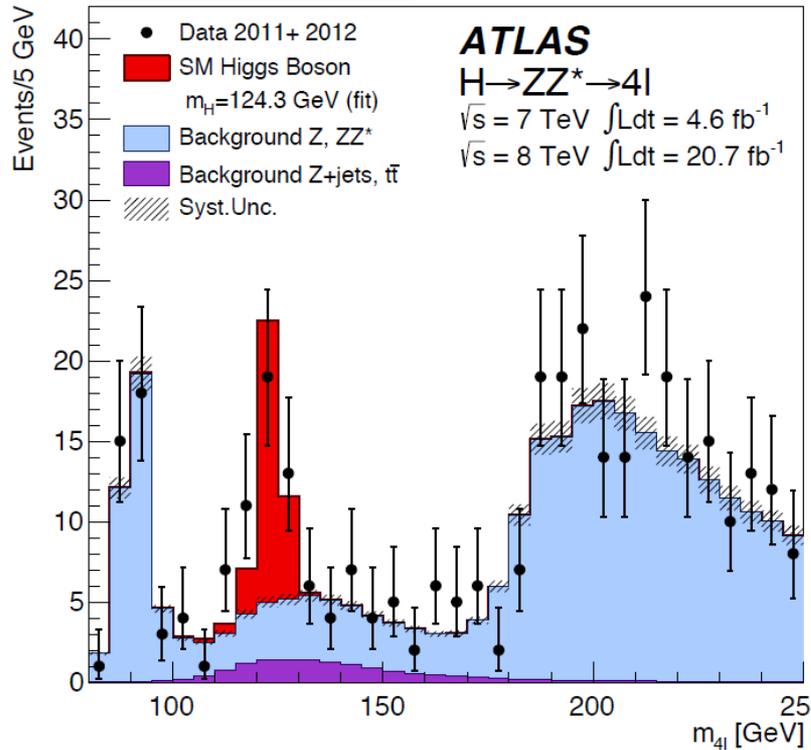


Robert Brout

# H $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4 leptoni

Tutta la statistica

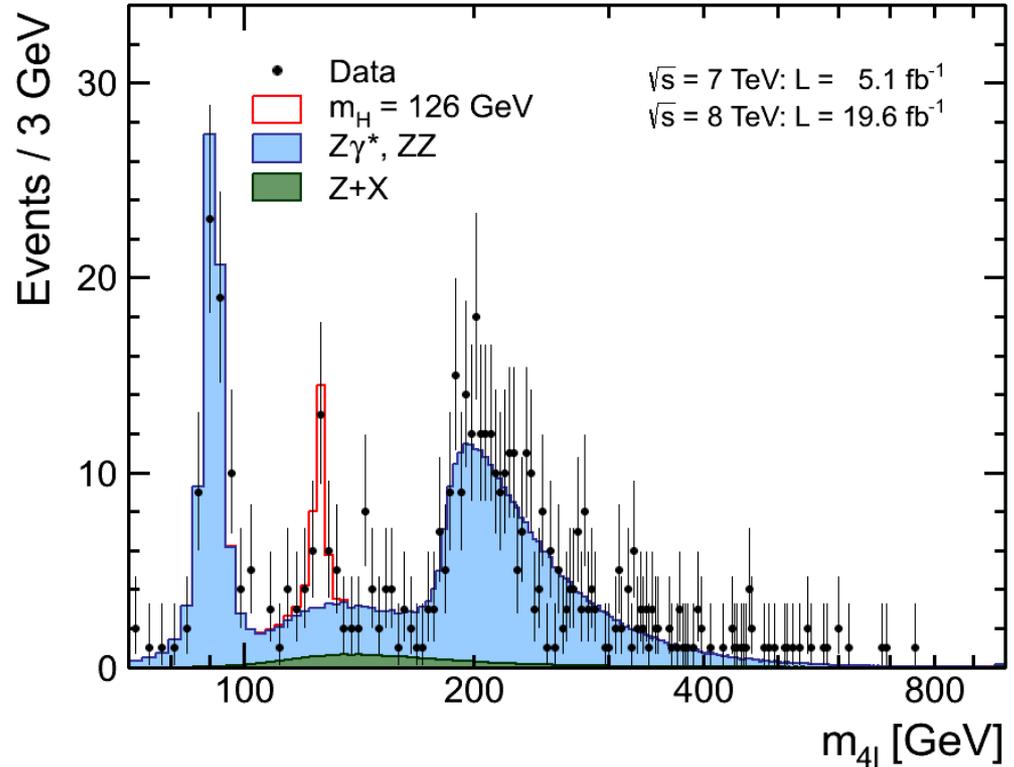
**ATLAS**



**6.6 $\sigma$  (4.4 $\sigma$  asp.)**

$m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.5}_{-0.3}(\text{syst})$  GeV

**CMS**



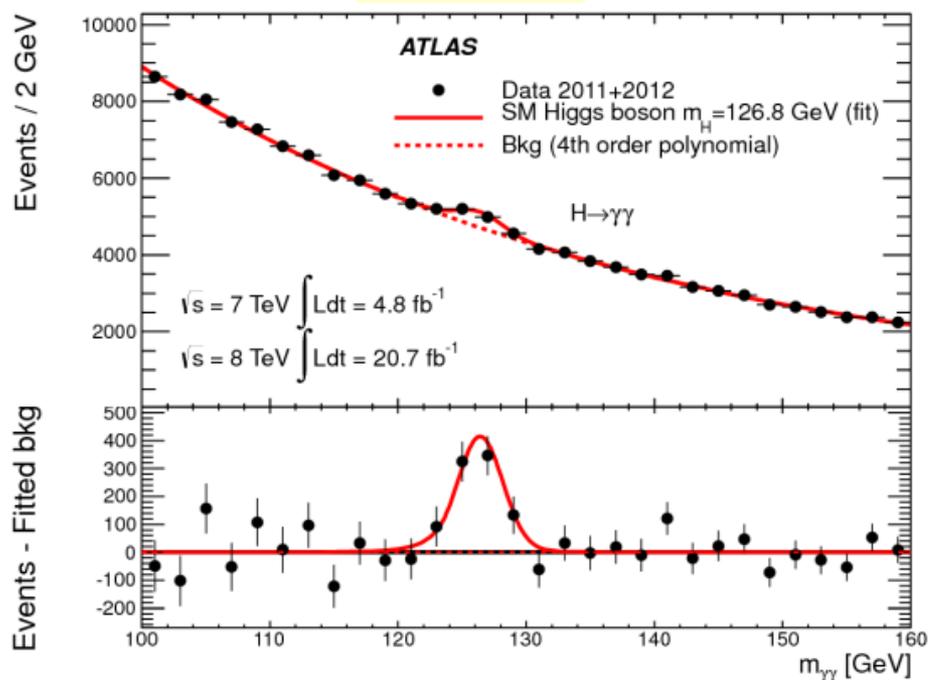
**6.7 $\sigma$  (7.1 $\sigma$  asp.)**

$m_H = 125.8^{+0.5}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.2}_{-0.2}(\text{syst})$  GeV

# $H \rightarrow \gamma\gamma$

Tutta la statistica

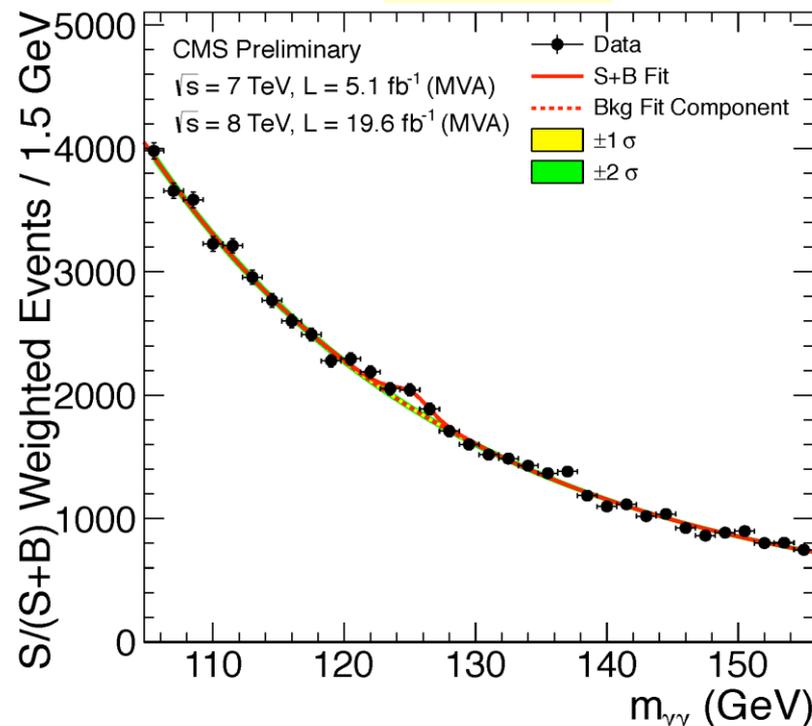
**ATLAS**



**$7.6\sigma$  ( $4.1\sigma$  asp.)**

**$m_H = 126.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})$  GeV**

**CMS**



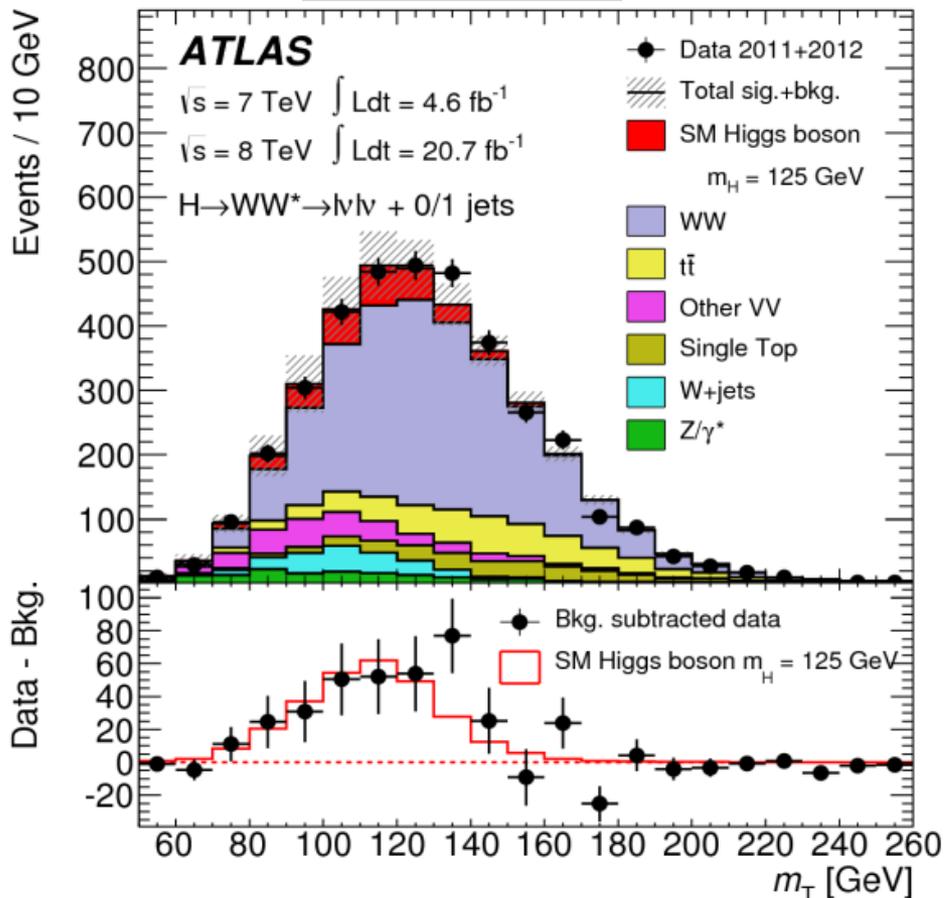
**$3.2\sigma$  ( $4.2\sigma$  asp.)**

**$m_H = 125.4 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst})$  GeV**

# $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$

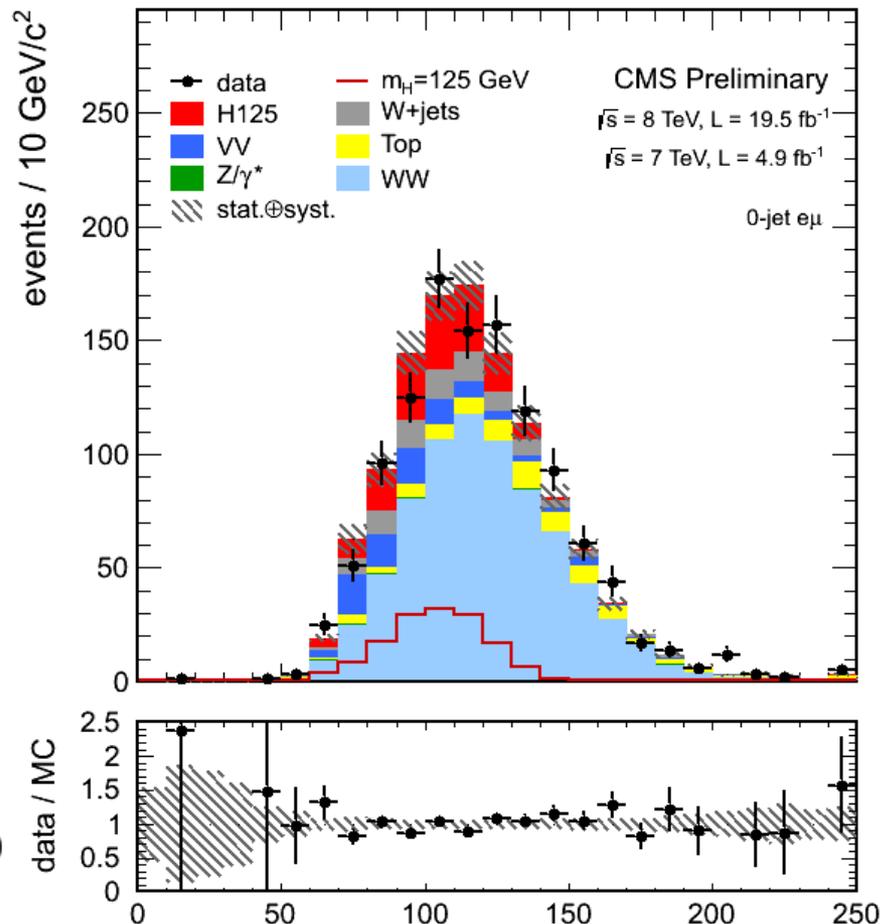
## Tutta la statistica

**ATLAS**



**3.8 $\sigma$ , (3.7 $\sigma$  asp.)**  
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

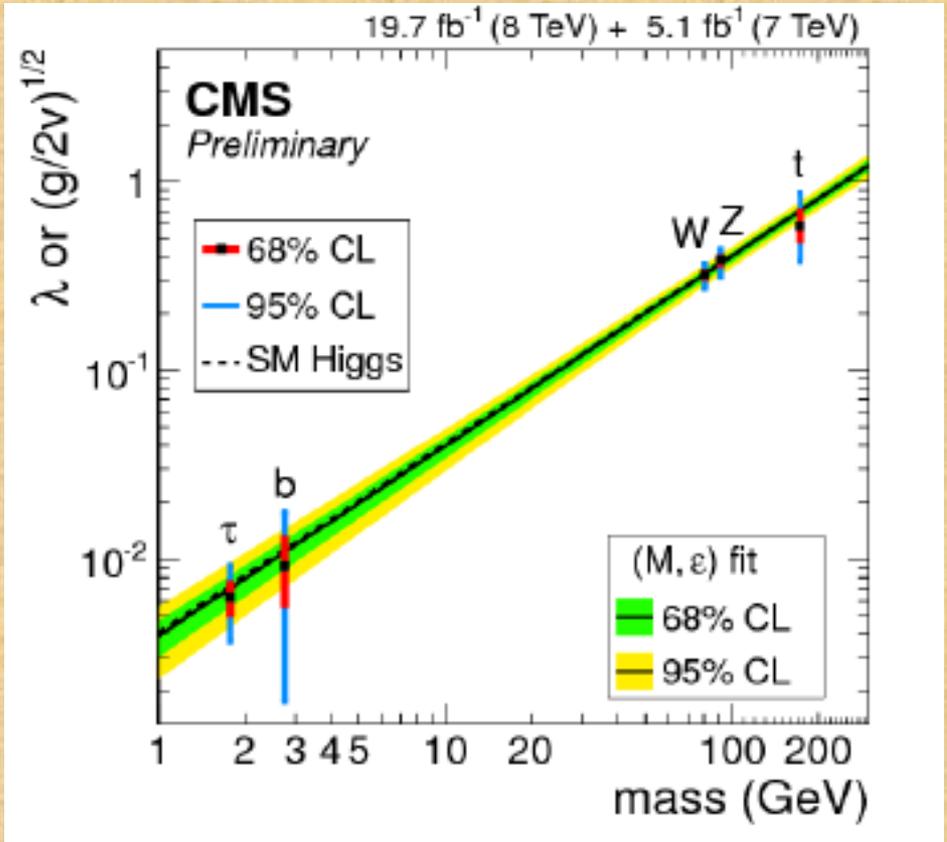
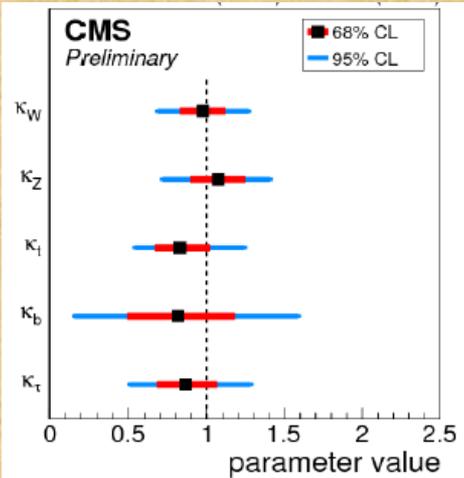
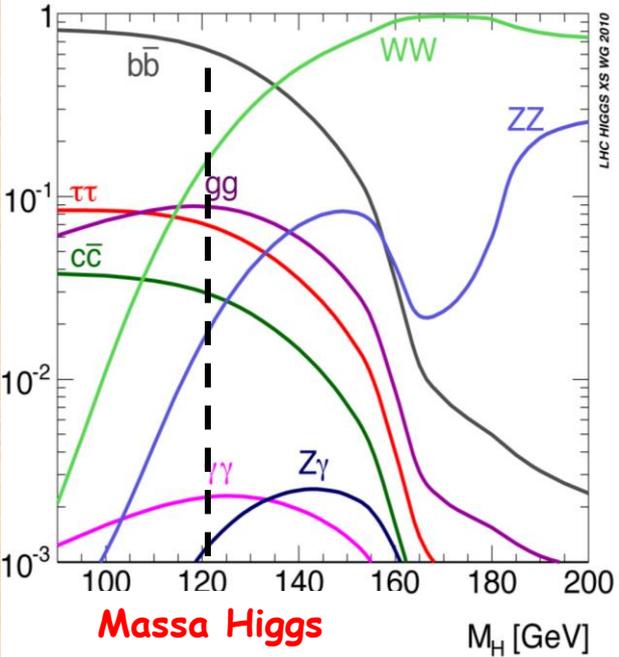
**CMS**



**4.0 $\sigma$ , (5.1 $\sigma$  asp.)**  
 $m_H = 125 \text{ GeV}$

# Gli accoppiamenti (nel limite degli errori sperimentali) sono quelli previsti dal Modello Standard

Frazione di decadimento BR



$$pp \xrightarrow{\text{VBF}} \text{jet jet H} \rightarrow \text{jet jet } t(m\ldots) t(\text{hadrons}\ldots)$$

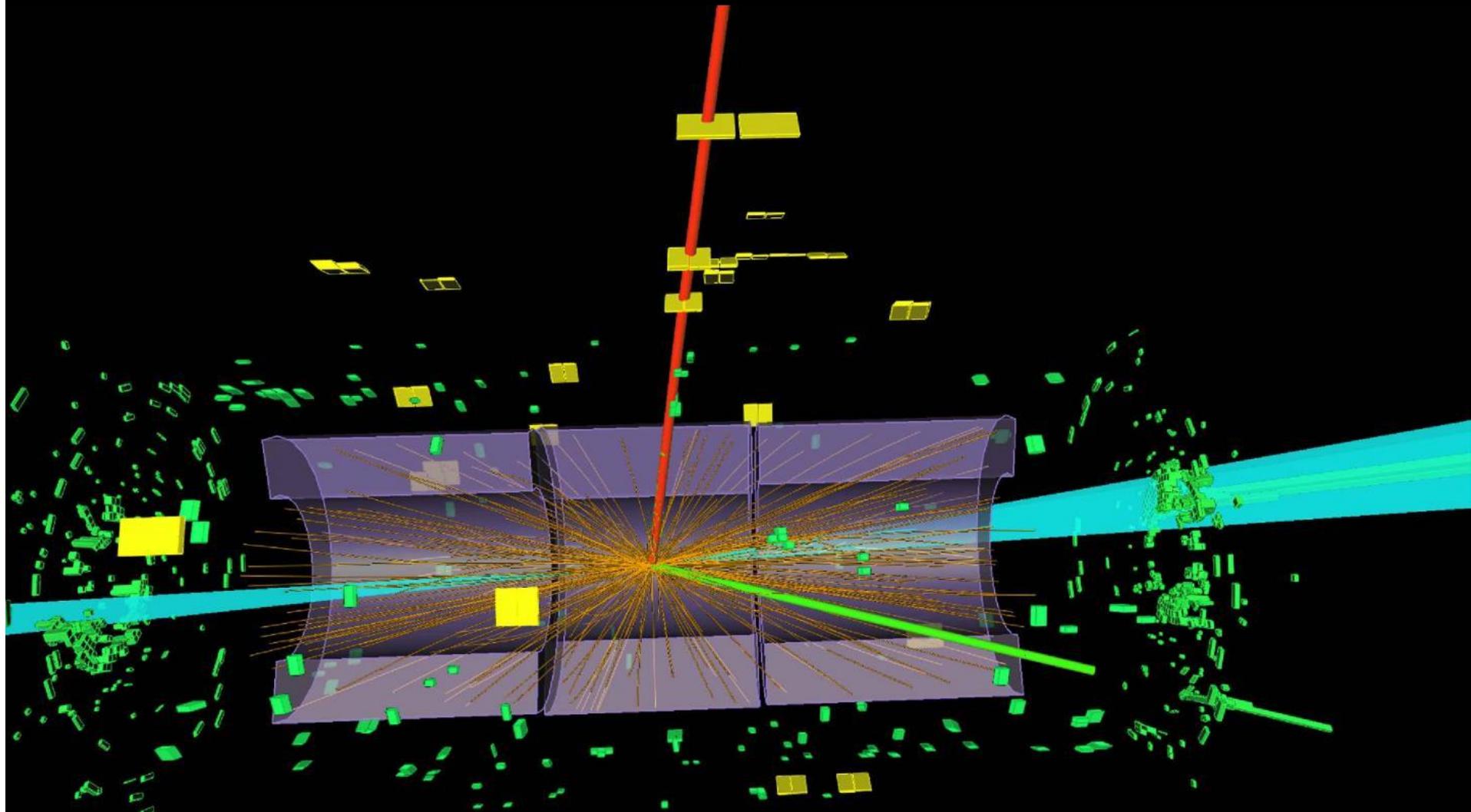
$$\text{jet jet } \tau(\mu\ldots) \tau(\text{hadrons}\ldots)$$

$t(\text{hadrons}\ldots)$   
from TILECAL

$p_T(\tau_{\text{had}}) = 43 \text{ GeV}$   
 $p_T(\mu) = 52 \text{ GeV}$   
 $E_T^{\text{miss}} = 53 \text{ GeV}$   
 $m_{jj} = 390 \text{ GeV}$   
MMC  $m_{\tau\tau} = 123 \text{ GeV}$

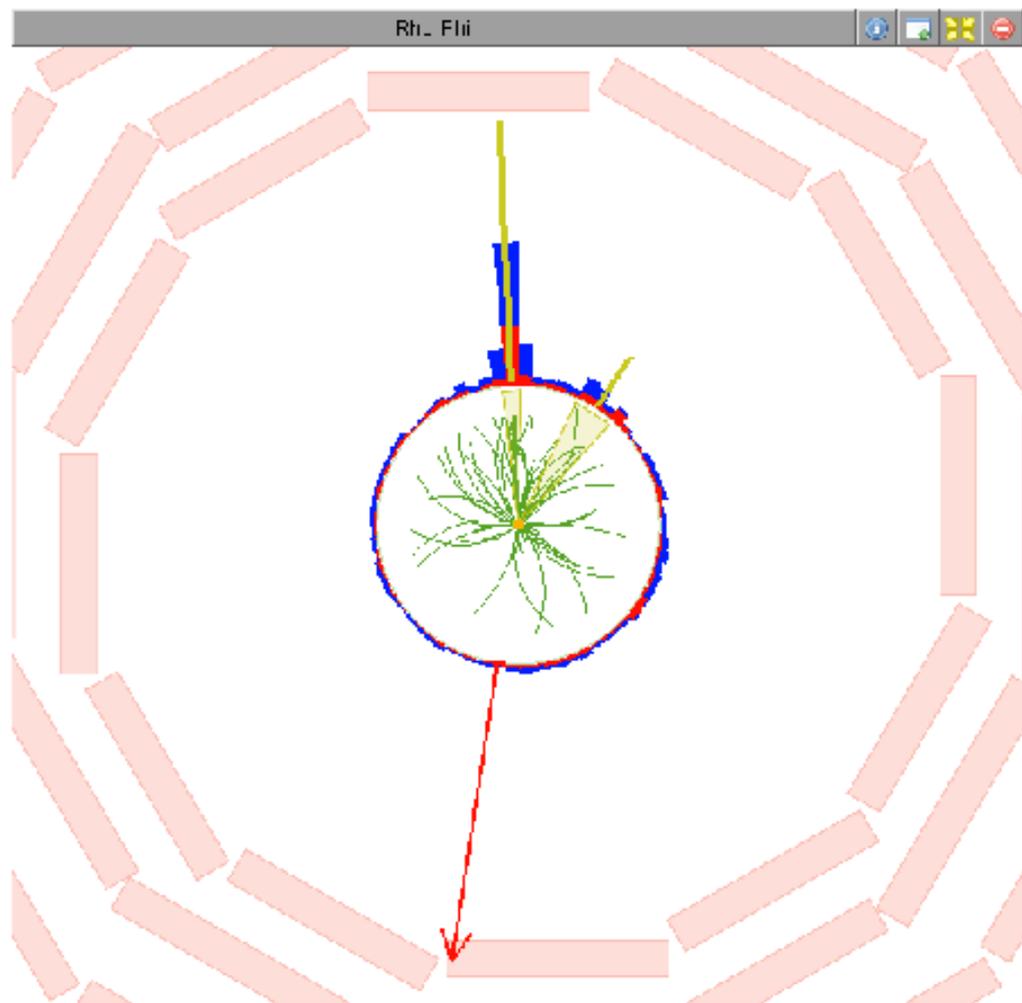
# ATLAS

candidato  $H(\tau\tau)$  in elettrone,  $\mu$  ed energia mancante



## $Z(\nu\bar{\nu})H(b\bar{b})$ candidate

PD: /MET/Run2011B  
Run: 177183  
Lumi: 183  
Event: 305295270



- $M(jj) = 120.0$  GeV
- $p_T(jj) = 248.4$  GeV
- Jets:
  - $p_T = 209.5$  GeV,  
CSV = 0.889
  - $p_T = 46.2$  GeV,  
CSV = 0.957
- MET:
  - 243.2 GeV

# Ora il Modello Standard è completo ! Ma allora abbiamo capito tutto ?

**Il Modello Standard è una teoria di grande successo,  
ma molti interrogativi sono ancora senza risposta:**

- \* Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso le masse enormemente elevate?*
- \* Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*
- \* Esistono principi di unificazione tra le varie interazioni fondamentali e che ruolo gioca la gravità ?*
- \* I quark e i leptoni sono veramente le particelle fondamentali o posseggono anch'essi una struttura interna?*
- \* Perché il mondo è fatto di materia (che fine ha fatto l'antimateria)?*

**Forse LHC potrà dare una risposta anche ad alcune di queste domande quando funzionerà alla sua massima energia di progetto di 14 TeV**

# Problema con lo Higgs del Modello Standard



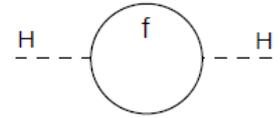
**Meccanismo di Higgs**

$$(m_H)^2 = (m_{H,0})^2 + (\Delta m_H)^2$$

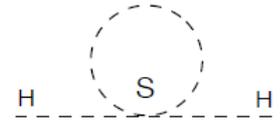
$$= 125 \text{ GeV}$$

$$\propto \sum_f -g_f \Lambda_{UV}$$

$\Lambda_{UV}$  può essere grande quanto  $\Lambda_{\text{planck}}$



Soluzione: per ogni fermione  $f$  introdurre un corrispondente scalare  $s$  che cancelli tutti i vari termini di  $\Delta m_H$



$$(m_e)^2 = (m_{e,0})^2 + \Delta E_{\text{Coulomb}}$$

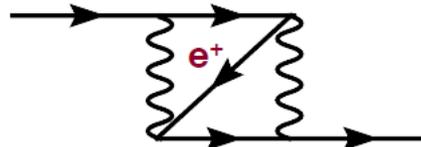
$$= 0.5 \text{ MeV}$$

$$\Delta E_{\text{Coulomb}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{e^2}{r_e}$$

$$r_e < 10^{-17} \text{ cm} \rightarrow \Delta E > 10 \text{ GeV}$$

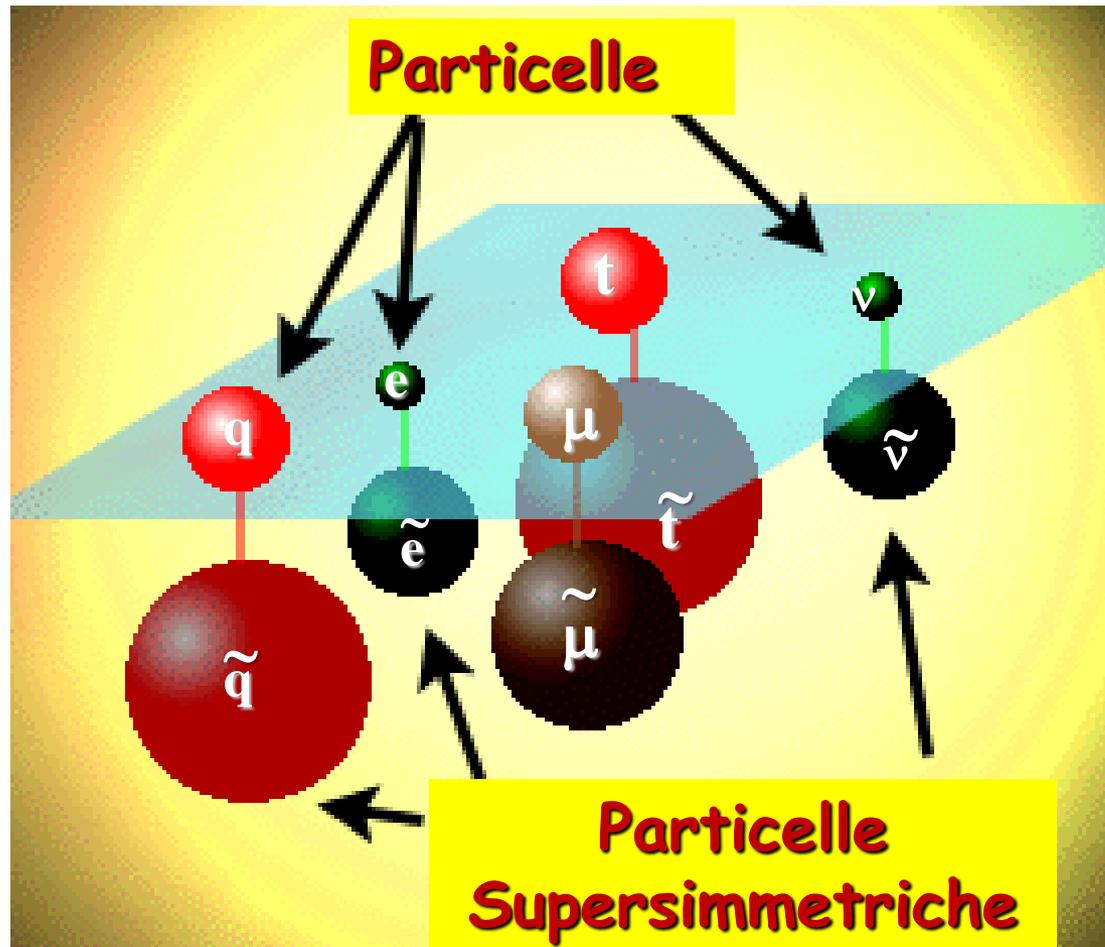
La massa del bosone di Higgs tende a divergere a causa delle fluttuazioni delle particelle virtuali nel vuoto quantistico ( $\Delta E \times \Delta t \approx \hbar$ ) che interagiscono con esso.

Soluzione: per ogni fermione  $f$  introdurre un antifermione che cancelli tutti i vari termini di  $\Delta E$



Prima della scoperta della antimateria l'elettromagnetismo aveva lo stesso problema.

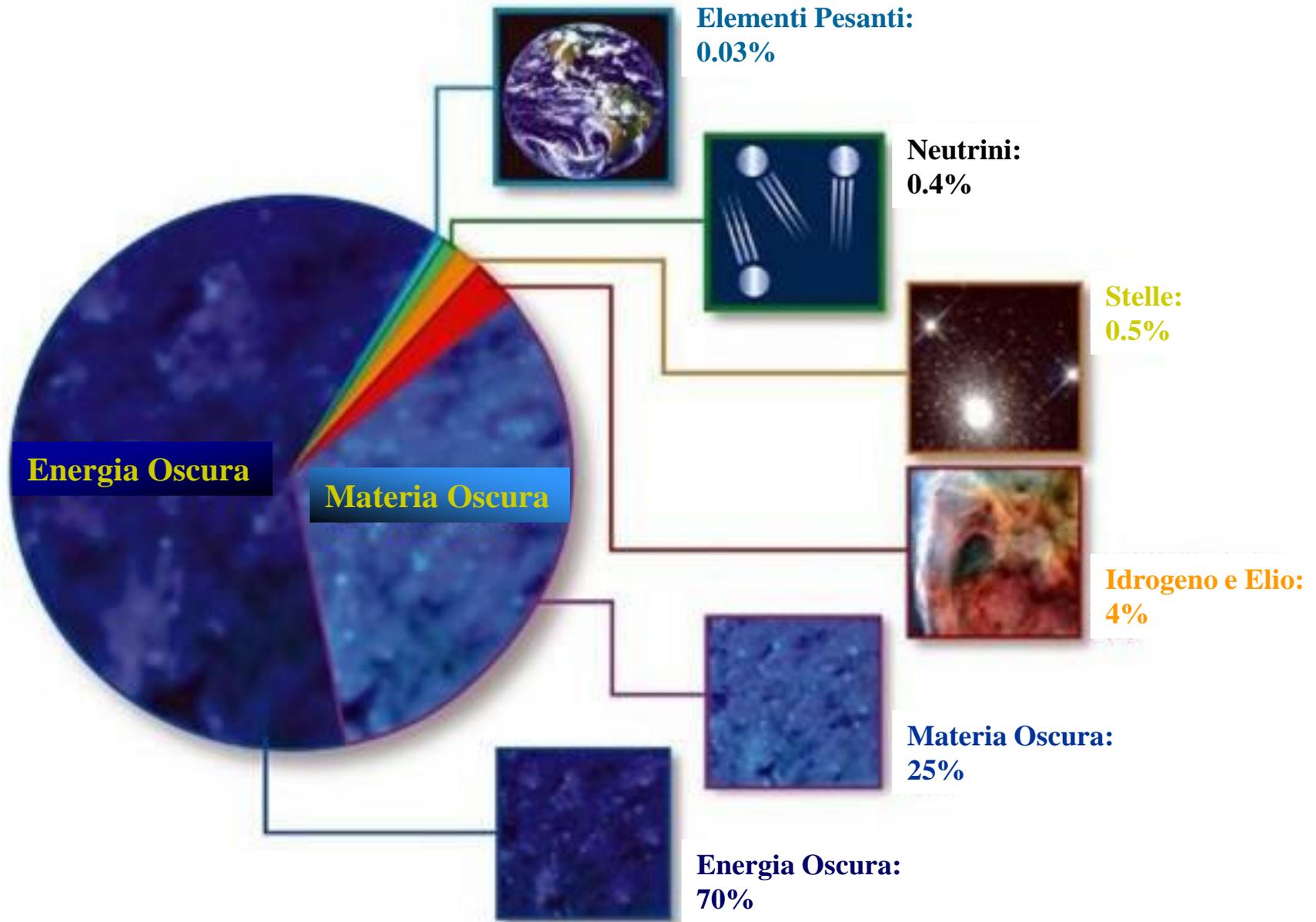
L'inconsistenza del modello potrebbe essere risolta se esistesse un mondo di particelle supersimmetriche corrispondente al mondo delle particelle standard.



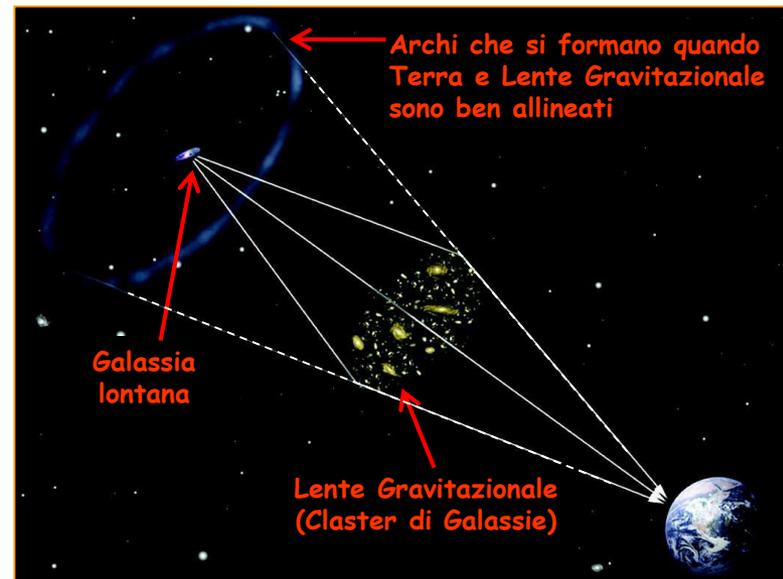
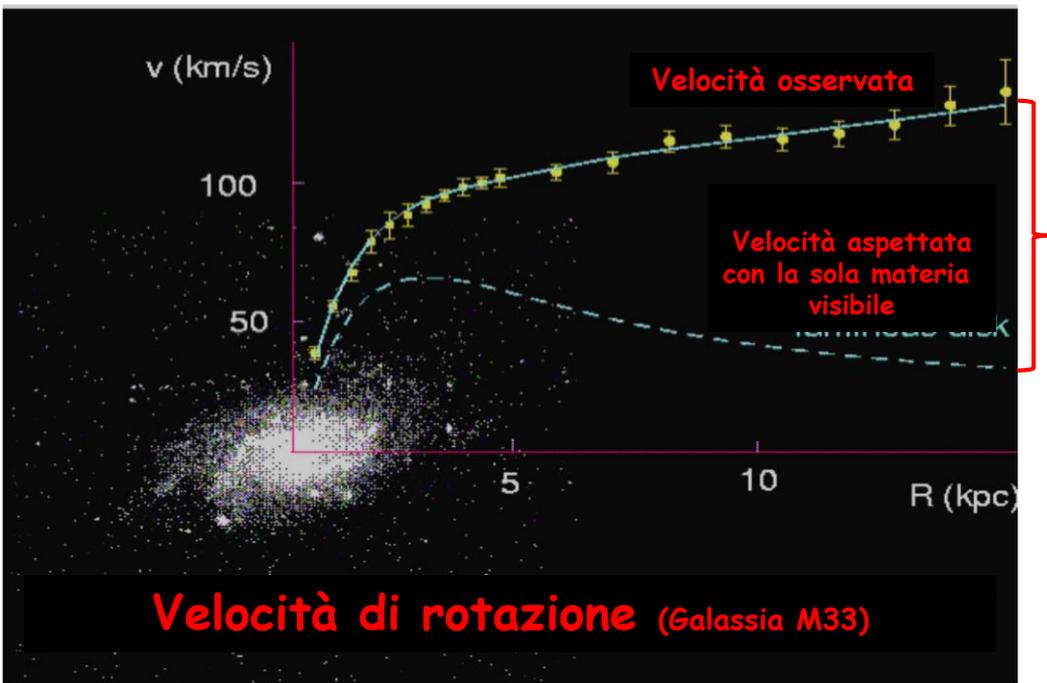
$$m_{\tilde{p}} \gg m_p$$

# Di cosa e' fatto il nostro Universo

*(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)*

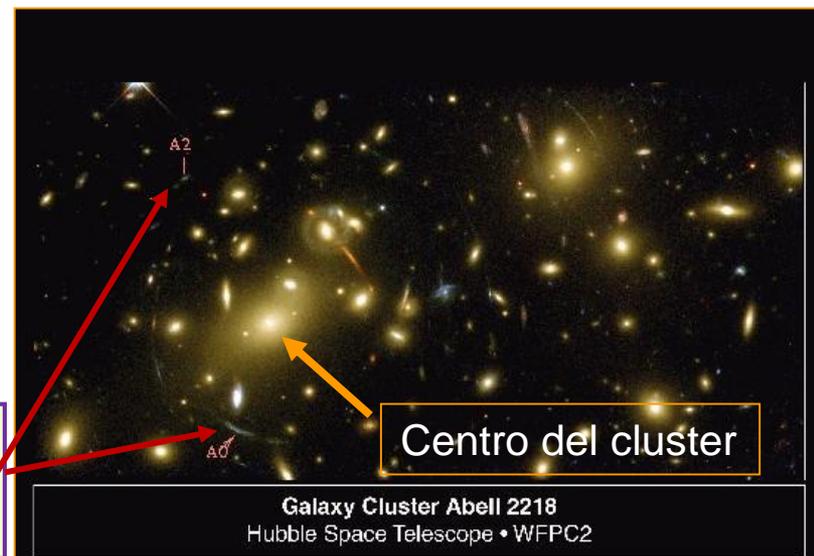


# Manifestazioni della Materia Oscura



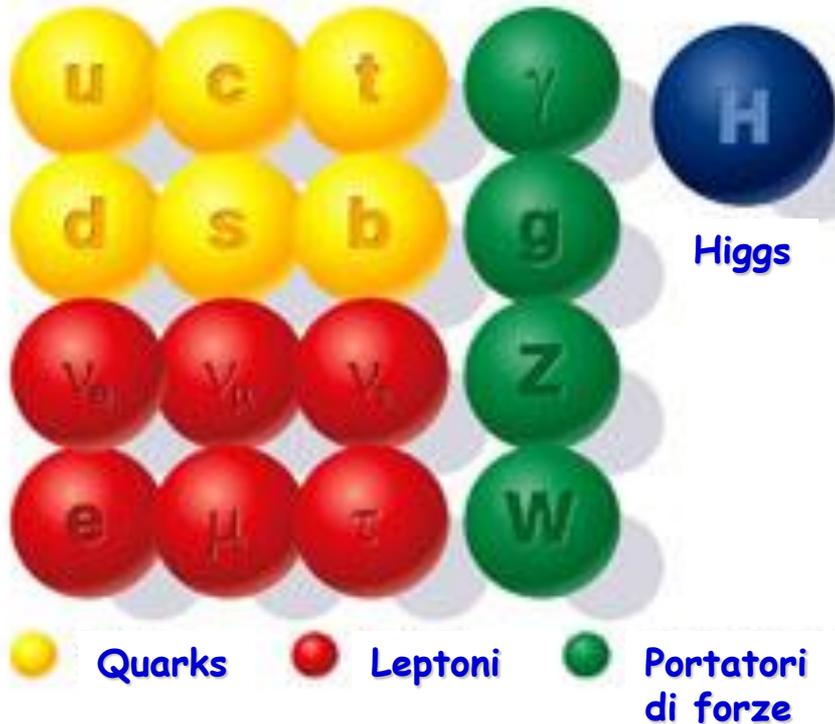
La Materia Oscura sembra essere costituita da particelle (di grande massa?) che interagiscono debolmente

Lente gravitazionale: le immagini multiple di una stessa galassia (per es. A0 e A2) vengono identificate confrontando gli spettri di luce dei diversi archi.

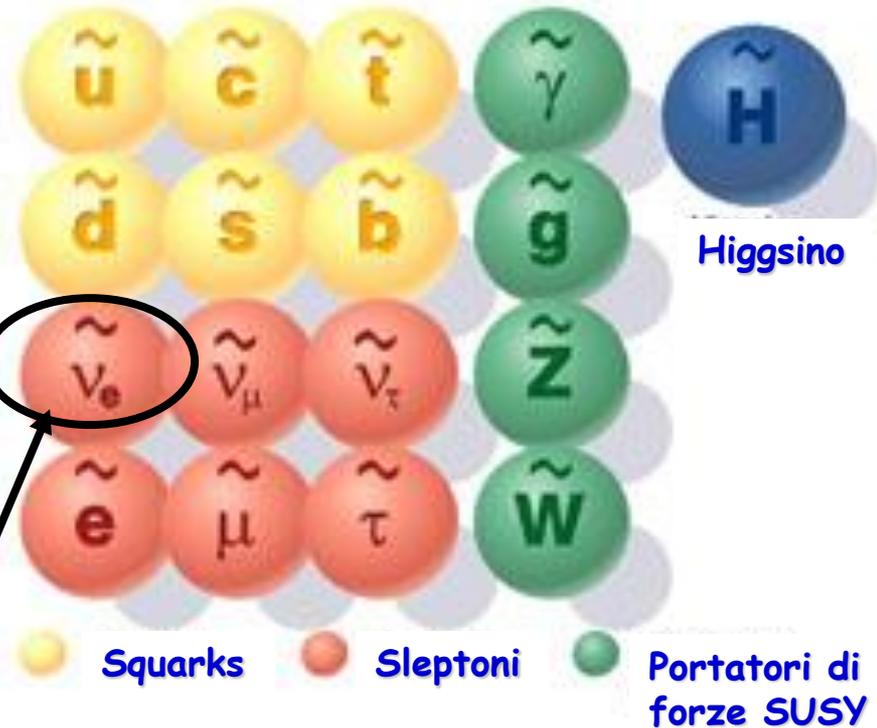


La **Materia Oscura** e' dovuta all'esistenza di **Particelle Supersimmetriche** ?  
Tali particelle potrebbero non essere state scoperte fino ad oggi perché hanno masse molto più grandi delle masse delle particelle standard.

### Particelle Standard



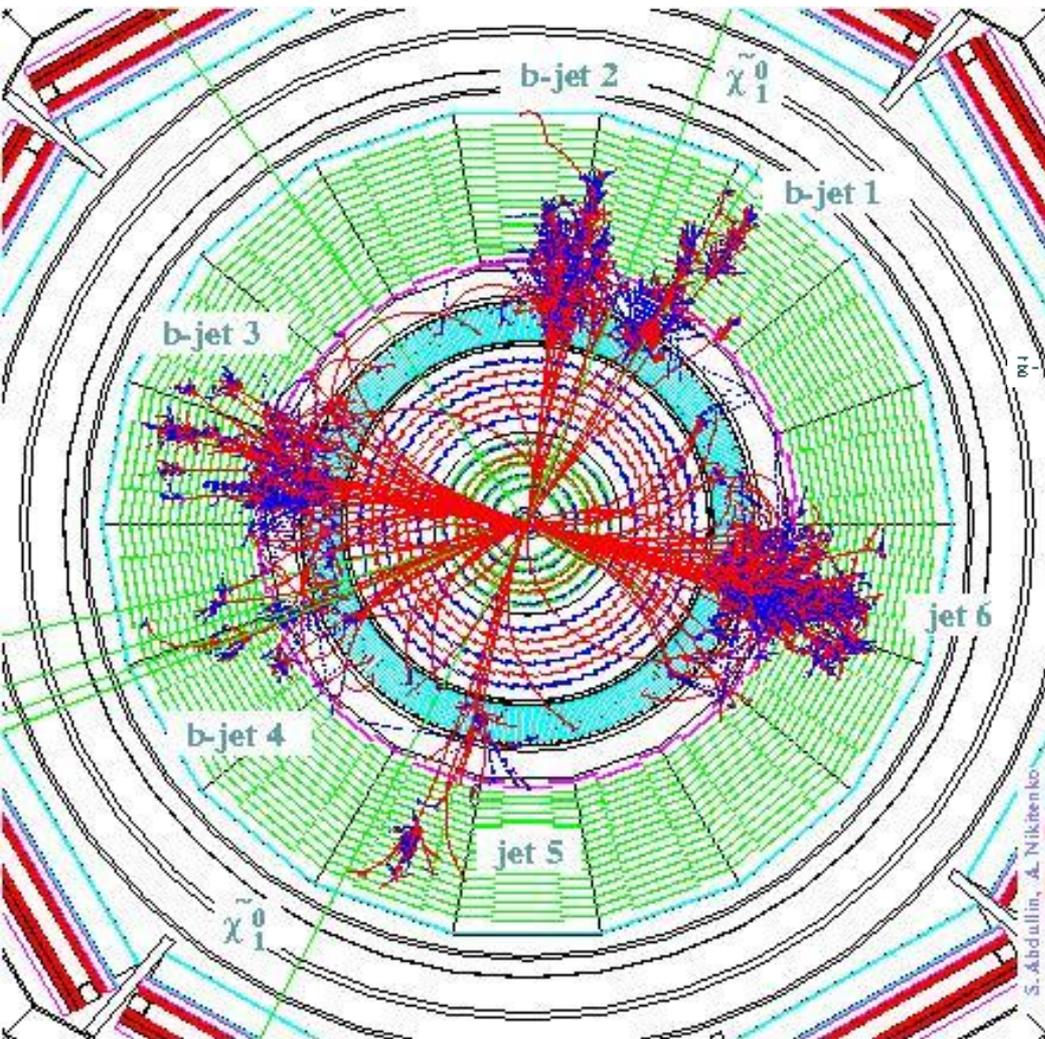
### Particelle Supersimmetriche (SUSY)



Possibile candidato come particella che  
forma la **Materia Oscura**.  
LHC potrebbe avere l'energia per produrla

# Evento di SUSY in CMS : $pp \rightarrow \tilde{u}_L + \tilde{g}$

mSUGRA:  $m_0=1000$  GeV;  $m_{1/2}=500$  GeV;  $A_0=0$ ;  $\tan\beta=35$ ;  $\mu>0$



$$\tilde{g} \rightarrow \tilde{t}_1 + \bar{t}$$

- $\hookrightarrow W^- + \bar{b}$  (jet 4,  $E_t=113$  GeV)
- $\hookrightarrow s$  (jet 5,  $E_t=79$  GeV) +  $\bar{c}$
- $\hookrightarrow \tilde{\chi}_2^+ + b$  (jet 3,  $E_t=536$  GeV)
- $\hookrightarrow \tilde{\chi}_1^+ + Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$
- $\hookrightarrow \tilde{\chi}_1^0 + W^+ \rightarrow \nu \tau^+$
- $\hookrightarrow e^+ \nu$

---


$$\tilde{u}_L \rightarrow \tilde{\chi}_2^0 + u$$

- (jet 6,  $E_t=1200$  GeV)
- $\hookrightarrow \tilde{\chi}_1^0 + h \rightarrow b \bar{b}$  (jet 1,  $E_t=206$  GeV; jet 2,  $E_t=320$  GeV)

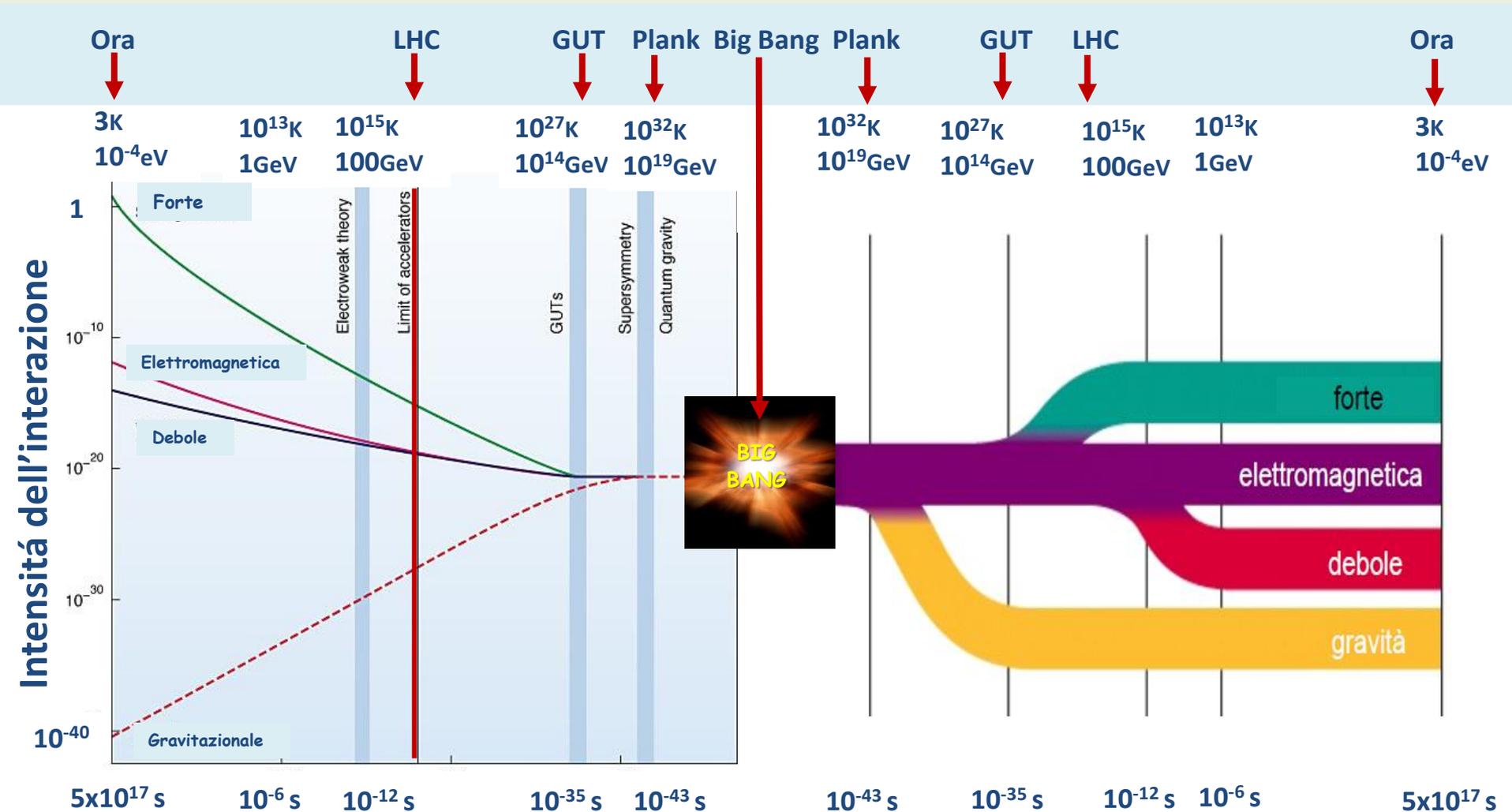
$$m(\tilde{g})=1266 \text{ GeV} ; m(\tilde{t}_1)=1026 \text{ GeV}$$

$$m(\tilde{u}_L)=1450 \text{ GeV} ; m(\tilde{\chi}_2^0)=410 \text{ GeV} ;$$

$$m(\tilde{\chi}_1^0)=214 \text{ GeV} ; m(h)=119 \text{ GeV}$$

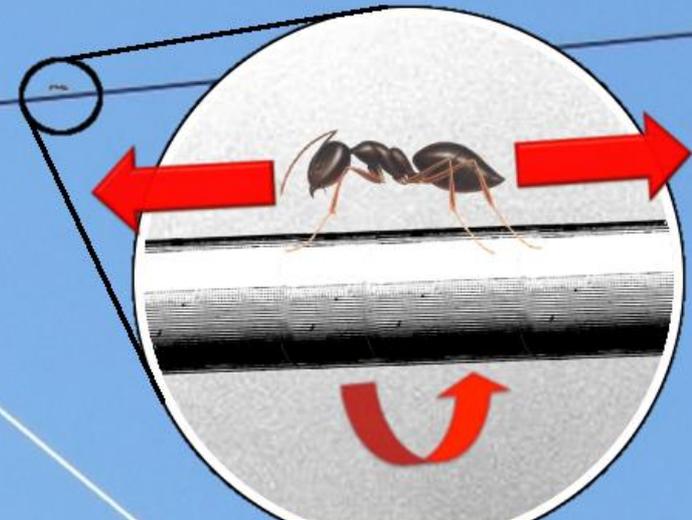
# L'unificazione delle Forze

- ❖ perché la Gravità è così debole?
- ❖ ai primordi dell'Universo esisteva un'unica interazione?

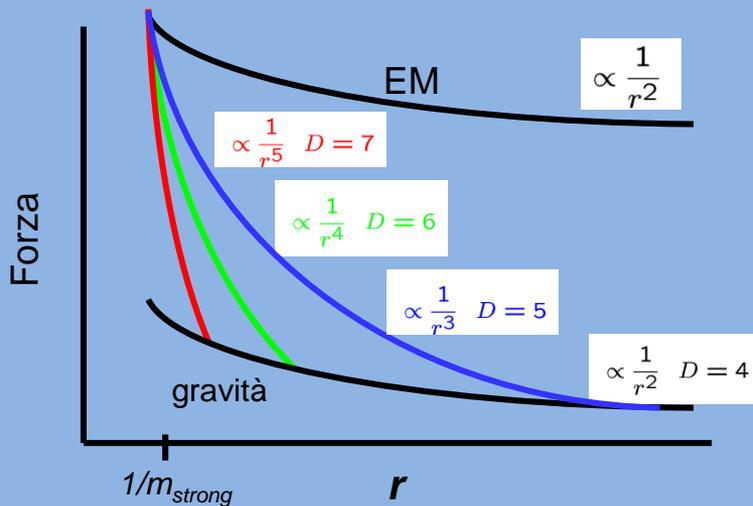


# Dimensioni nascoste

La Gravità non è debole ! appare tale se la osserviamo nel nostro mondo a 4 dimensioni. Se esistessero dimensioni nascoste accessibili solo alla gravità questa diventerebbe forte come le altre interazioni

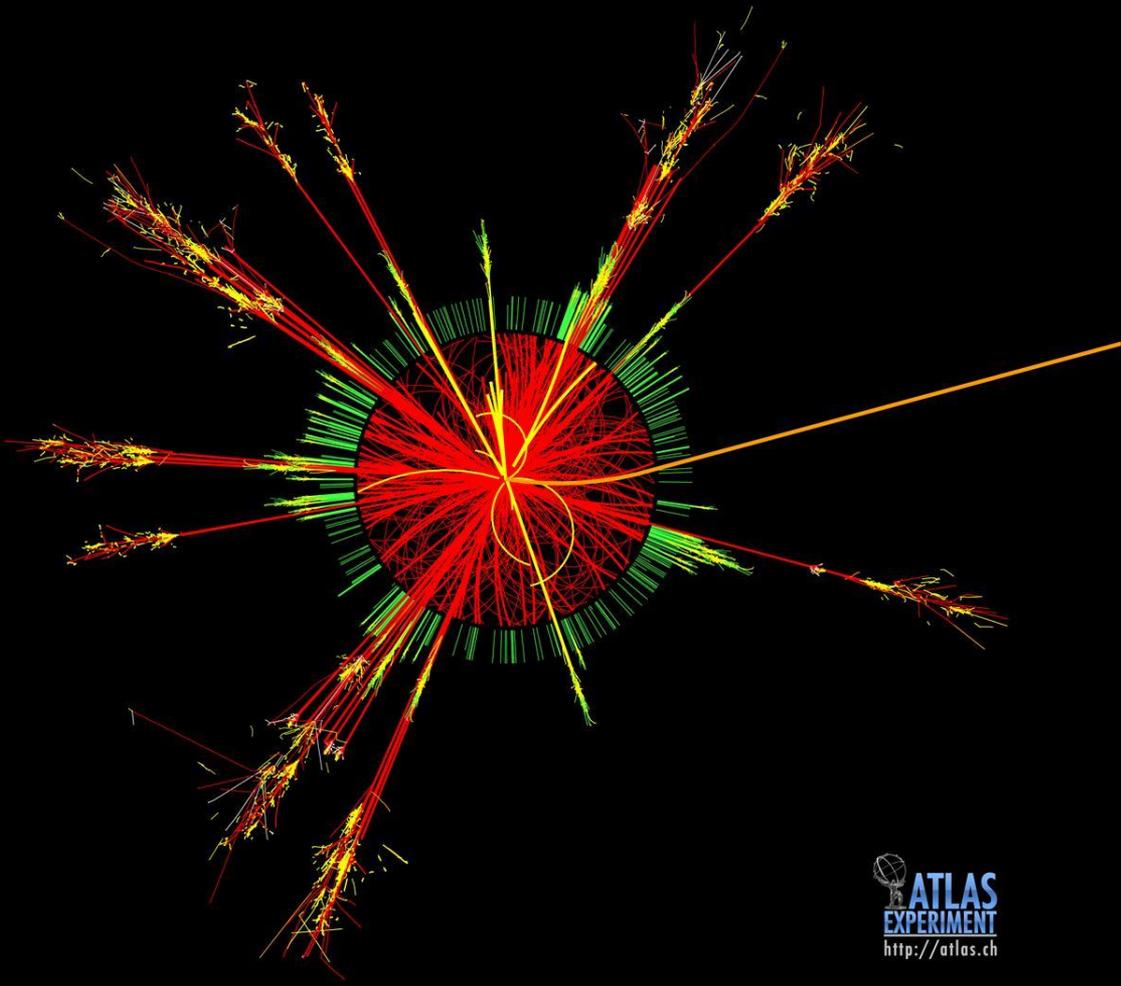
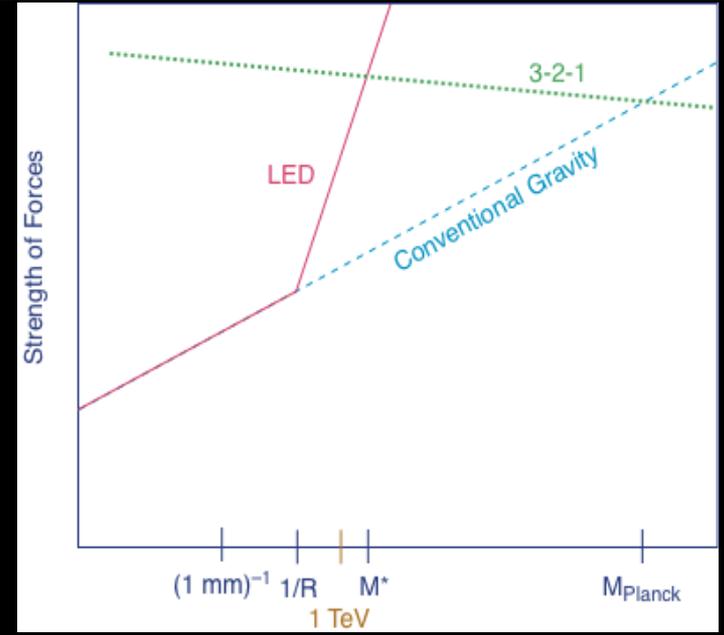
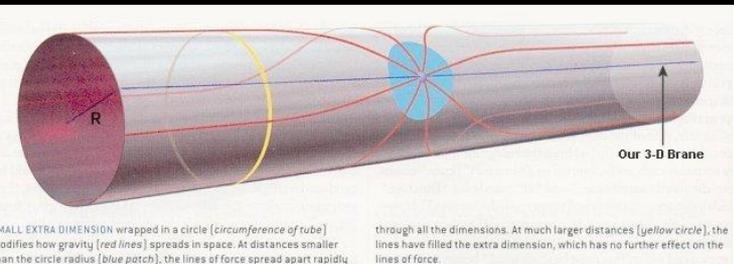


Gravità in n dimensioni nascoste



$$r \ll L, F_{gravità} \sim 1/r^{2+n} \quad r \gg L, F_{gravità} \sim 1/r^2$$

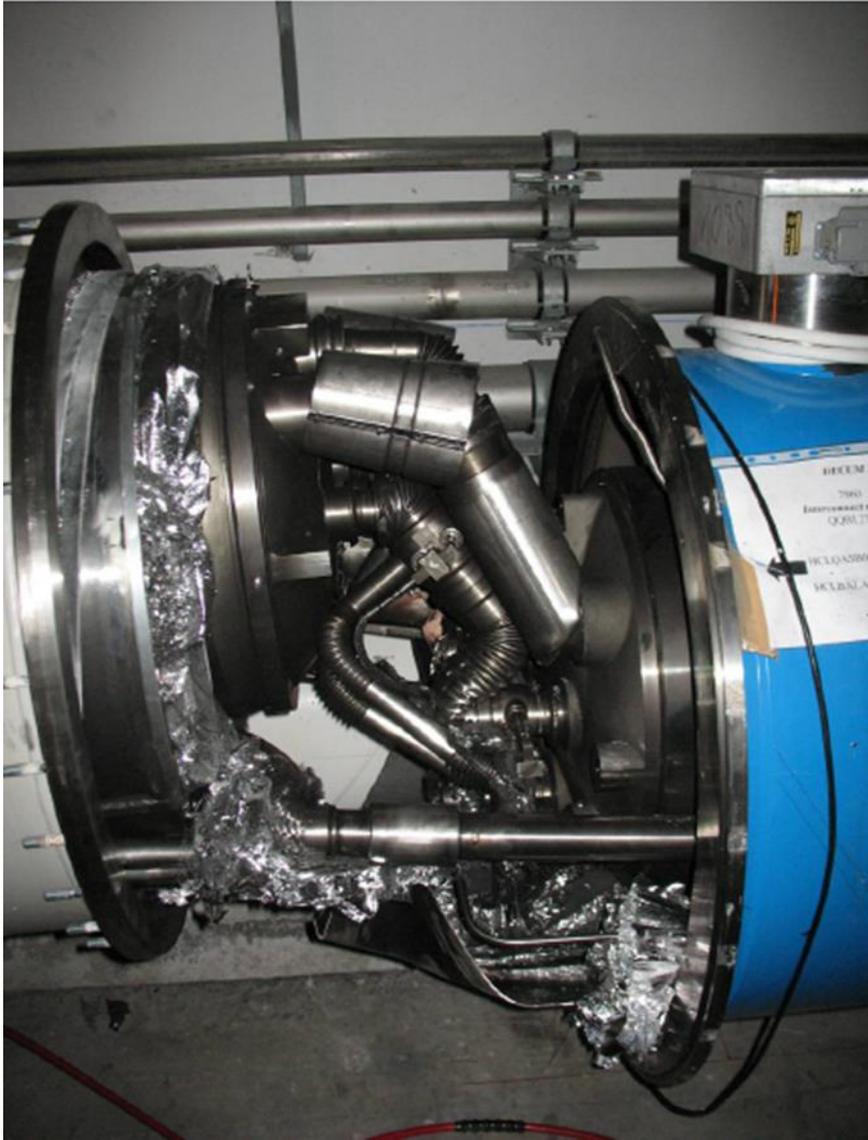
Le dimensioni nascoste non sono accessibili alla nostra esperienza perché racchiuse in spazi con raggio di curvatura molto piccolo. Tali dimensioni potrebbero essere accessibili alle energie di LHC e sprigionare tutta la forza della gravità creando dei piccoli "Buchi Neri". Tali eventi potrebbero essere rivelati dagli apparati sperimentali come eventi del tipo simulato in figura



ATLAS  
EXPERIMENT  
<http://atlas.ch>

Simulazione di un evento di "Black Hole" a LHC

# LHC fermo dal 2013 al 2015



19 settembre 2008



Dal 2013 al 2015 tutte le 1700 giunzioni sono state fatte in modo più affidabile



# The main 2013-14 LHC consolidations

1695 Openings and final reclosures of the interconnections

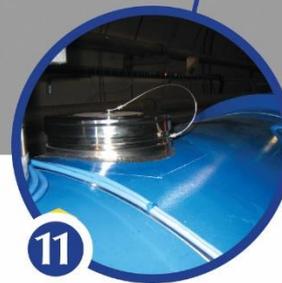
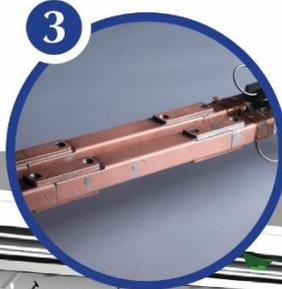
Complete reconstruction of 3000 of these splices

Consolidation of the 10170 13kA splices, installing 27 000 shunts

Installation of 5000 consolidated electrical insulation systems

300 000 electrical resistance measurements

10170 orbital welding of stainless steel lines



18 000 electrical Quality Assurance tests

10170 leak tightness tests

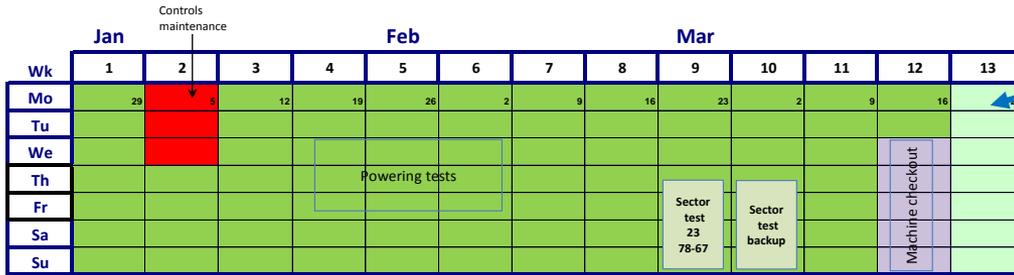
3 quadrupole magnets to be replaced

15 dipole magnets to be replaced

Installation of 612 pressure relief devices to bring the total to 1344

Consolidation of the 13 kA circuits in the 16 main electrical feed-boxes

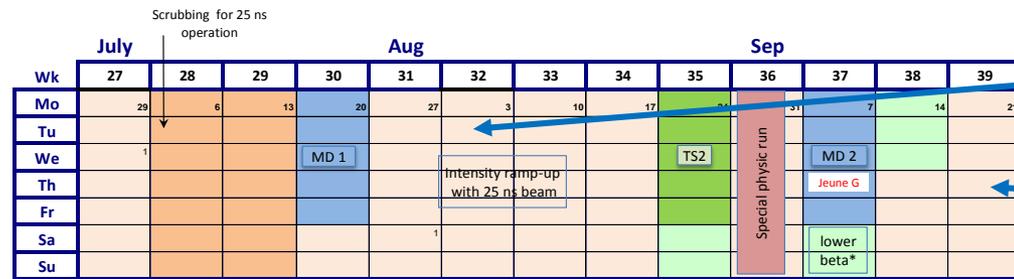
# Programma di LHC per il 2015



23 marzo, fasci in LHC a 13 TeV

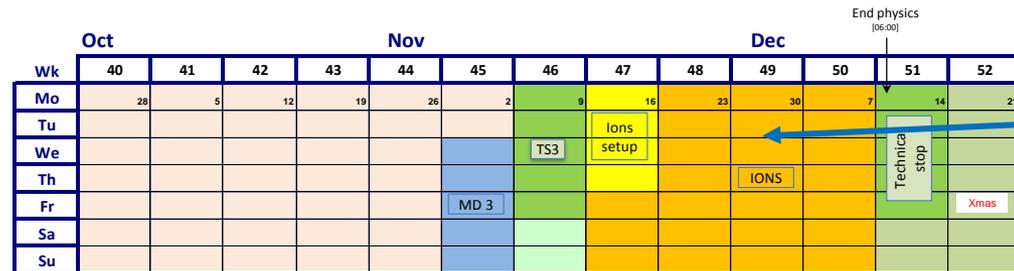


Incroci a 50 ns,  $\beta^* 80$  cm



Incroci a 25 ns,  $\beta^* 80$  cm

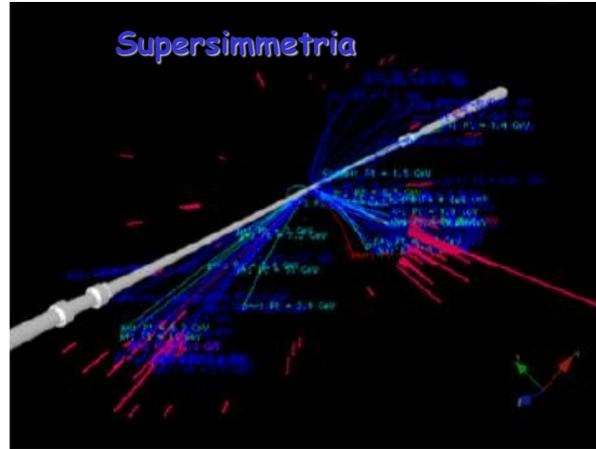
Incroci a 25 ns,  $\beta^* 40$  cm



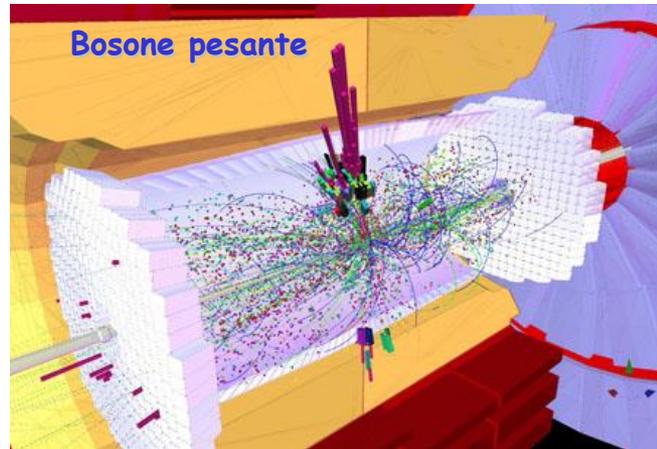
Ioni pesanti (Pb-Pb)

# Con LHC a 13 TeV si spera di scoprire nuovi fenomeni fisici oltre il Modello Standard

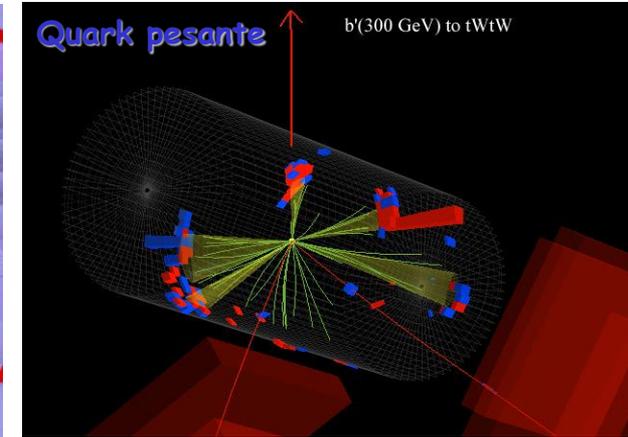
Supersimmetria



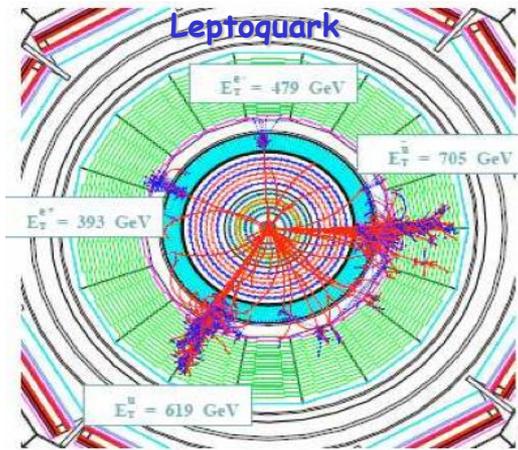
Bosone pesante



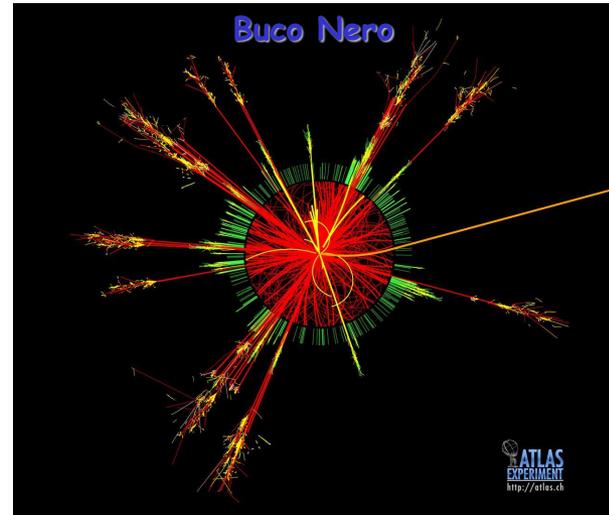
Quark pesante



Leptoquark

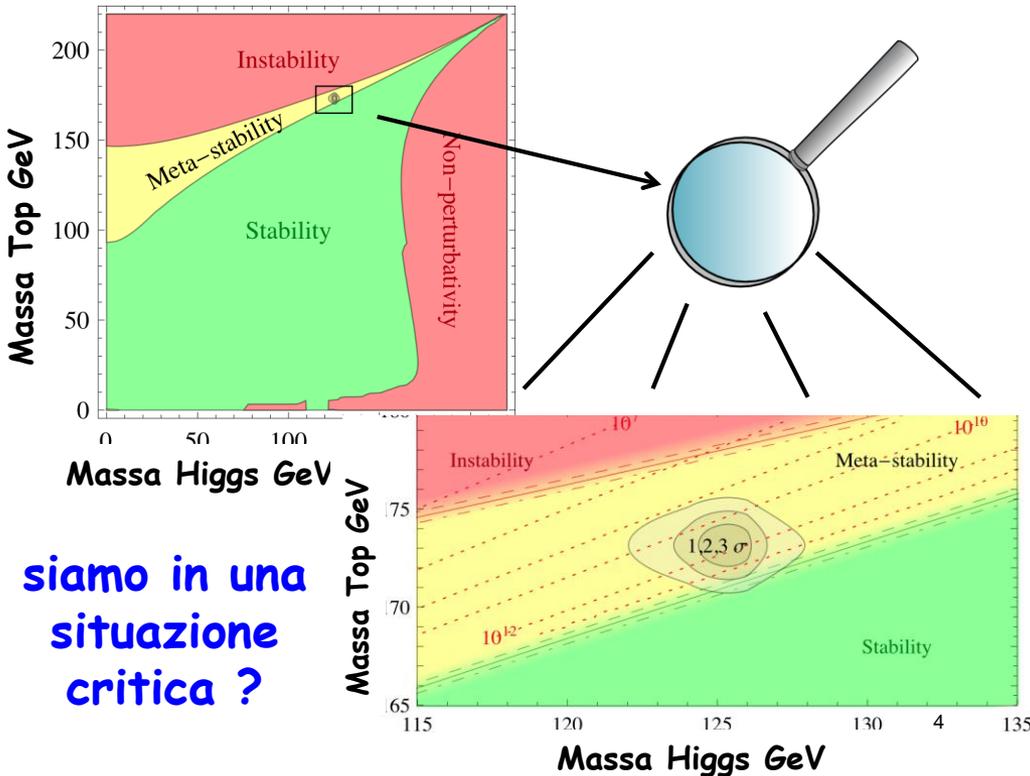
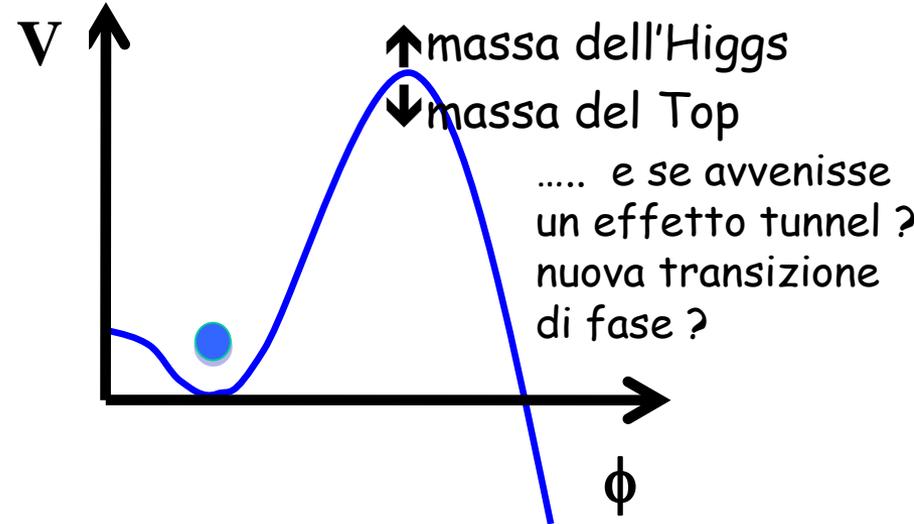
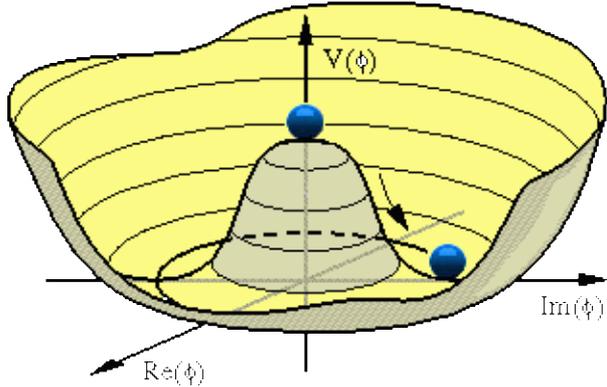


Buco Nero



- \* I quark e i leptoni posseggono una struttura interna ?
- \* Esiste una quarta famiglia di quark e di leptoni ?
- \* Esistono i leptoquarks ?
- \* Esiste una quinta forza ?
- \* Esistono dimensioni nascoste ?
- \* Esiste ..... ? ? ? ?

# $M_H \approx 125 \text{ GeV}$ : quanto è stabile il Vuoto?

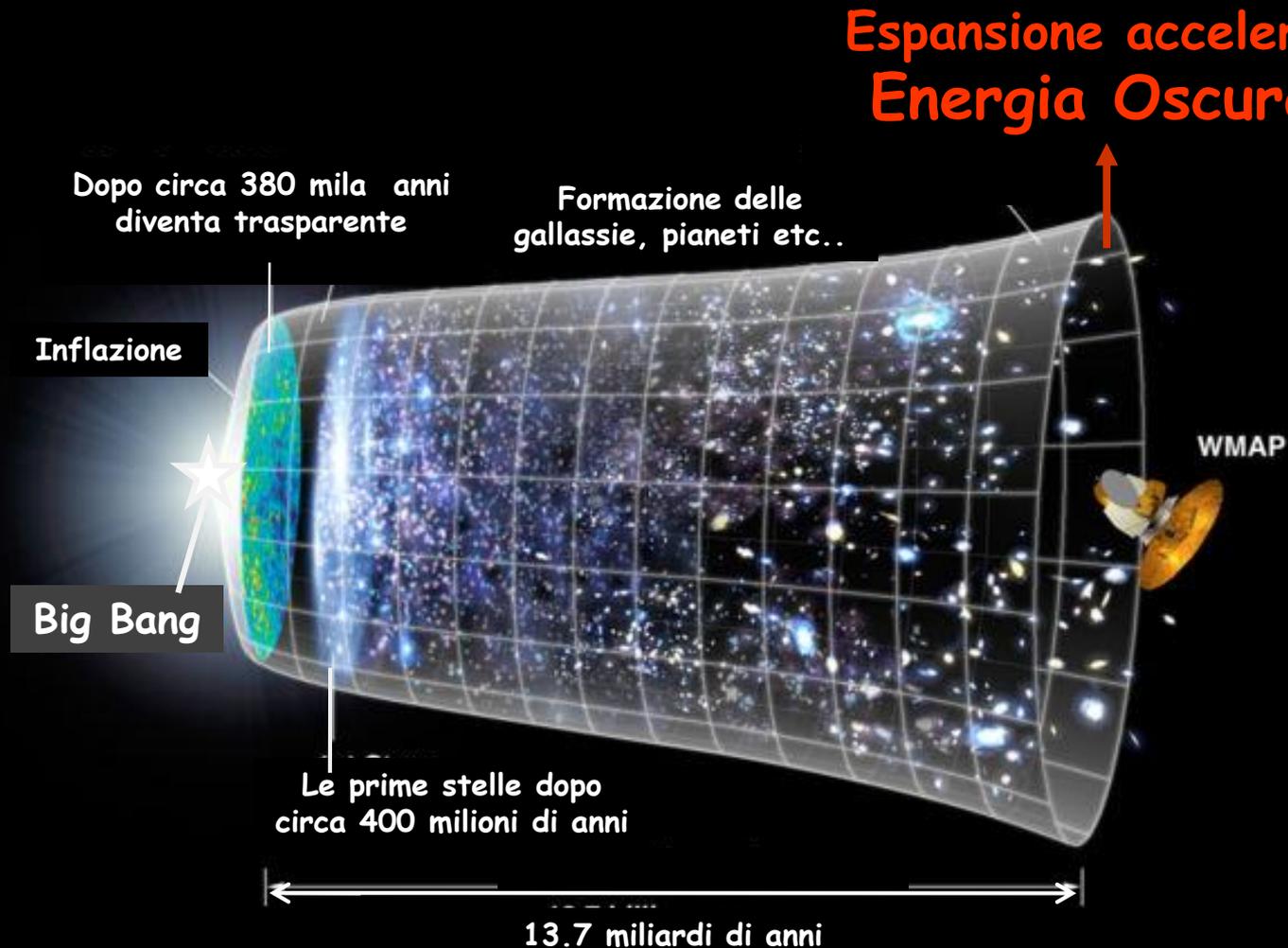


**siamo in una situazione critica ?**



Per  $m_h \approx 125 \text{ GeV}$  e  $m_{\text{top}} \approx 173$  (Tevatron 2012) il vuoto del Modello Standard è instabile, ma su tempi più lunghi dell'età dell'Universo.

# L'espansione dell'Universo dal Big Bang ad Oggi



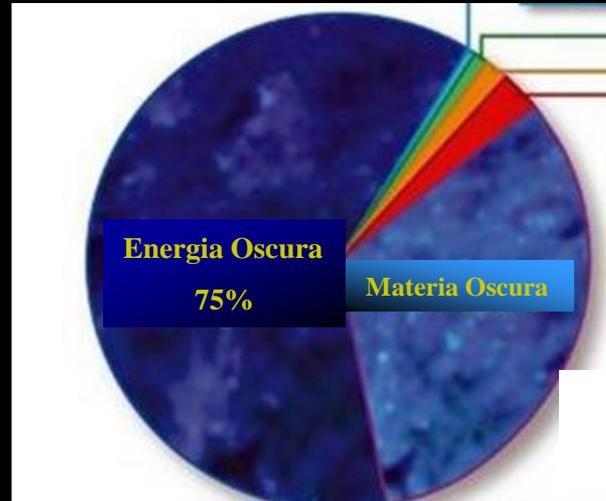
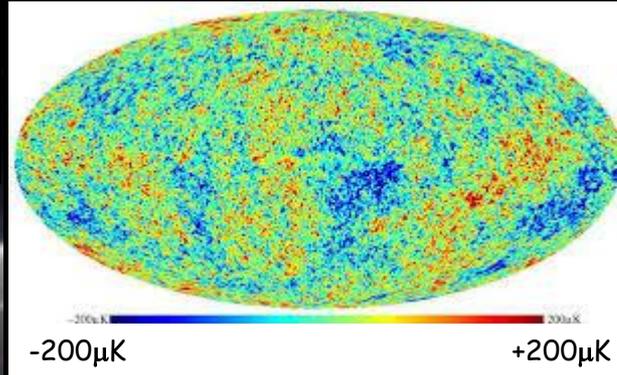
Si ritiene che l'Universo sia iniziato con una singolarità chiamata Big Bang, un evento iniziale che dette origine al tutto: allo spazio, al tempo e all'energia (materia e radiazione). Il modello  $\lambda$ -CDM descrive l'evoluzione dell'Universo da uno stato primordiale denso, caldo e uniforme a quello presente lungo una fascia di tempo di  $13.72 \pm 0.12$  miliardi di anni.

# Fenomeni come l' Inflazione e l' Energia Oscura sono fenomeni dovuti a campi scalari simili al campo di Higgs??

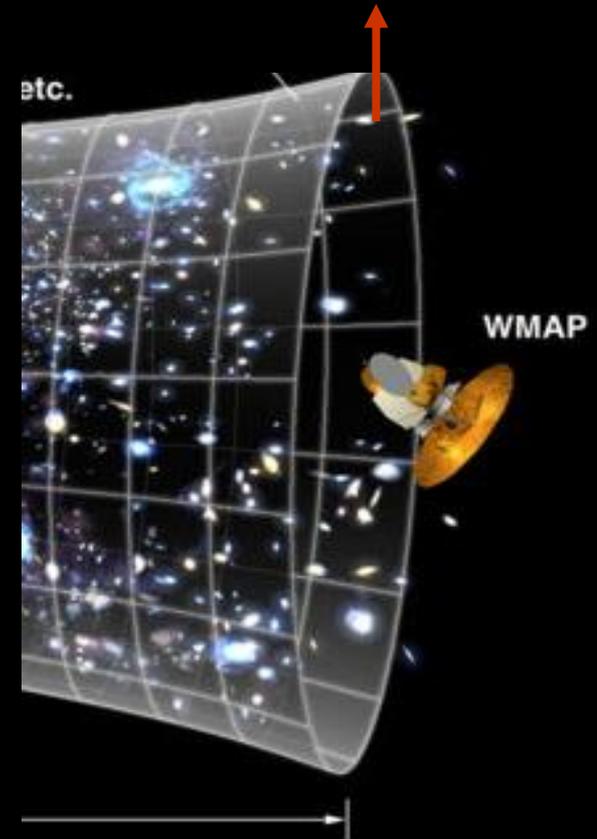
Dopo 380 mila anni diventa trasparente

Inflazione

Big Bang



Espansione accelerata  
Energia Oscura !



Durante l'inflazione lo spazio si è espanso di  $\sim e^{60}$  in  $10^{-38}$  sec.

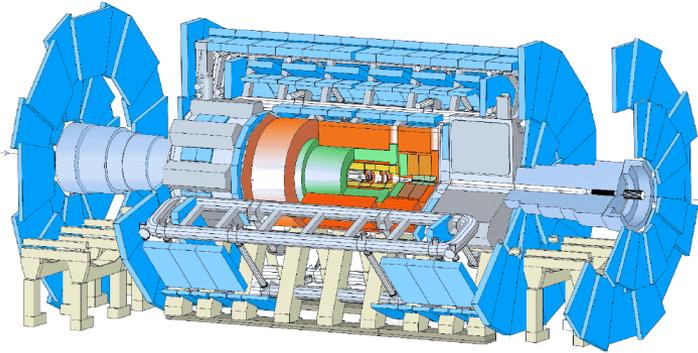
# Conclusioni

- ✓ L'esistenza del Bosone di Higgs è la conseguenza sperimentalmente osservabile del meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole (meccanismo di Higgs) ed è la prova della bontà del Modello Standard.
- ✓ La sua scoperta è stata pertanto un passo fondamentale per la comprensione delle leggi che regolano il nostro mondo.
- ✓ Ma certo la storia non finisce qui ! Il 95% dell'Energia di cui è costituito il nostro Universo ci è completamente oscura e molte altre domande aspettano una risposta anche per il solo 5% dell'Energia di cui sono costituite le stelle e i pianeti.
- ✓ Nei prossimi giorni LHC riprenderà a funzionare a 13 TeV. C'è pertanto grande aspettativa che a questa più alta energia si potranno fare nuove e inaspettate scoperte di fisica utilizzando ancora i poderosi rivelatori che la Sezione di Pisa ha contribuito in modo sostanziale a costruire e a rendere operativi.

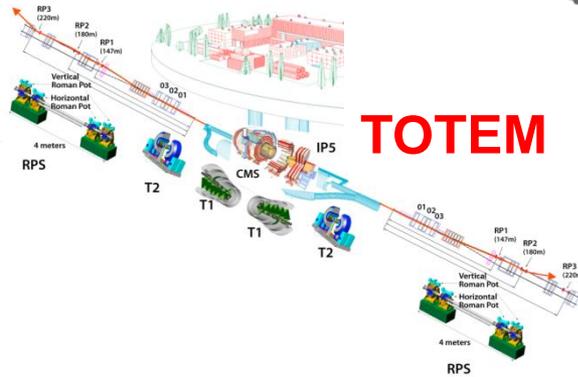
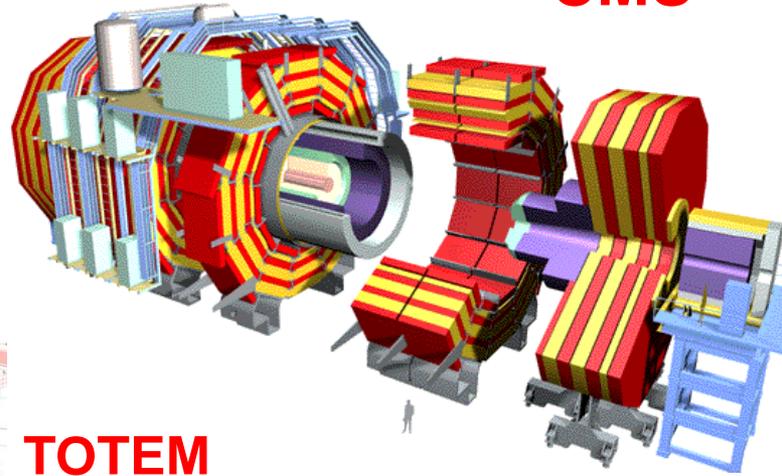
**Altre Slides**

# I Rivelatori di LHC

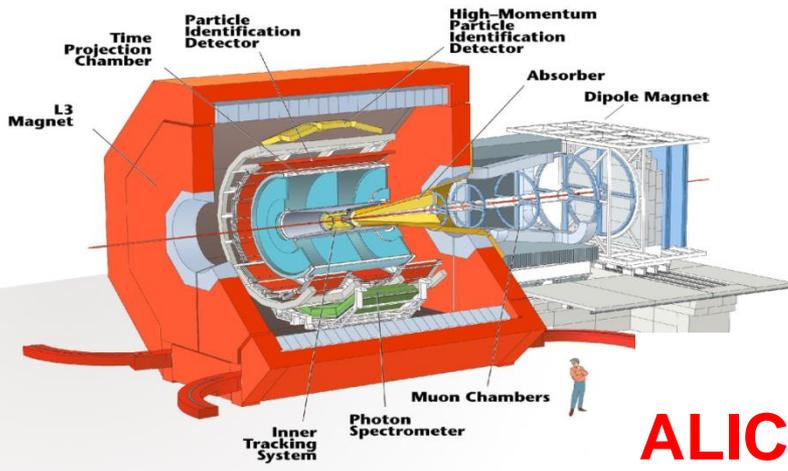
**ATLAS**



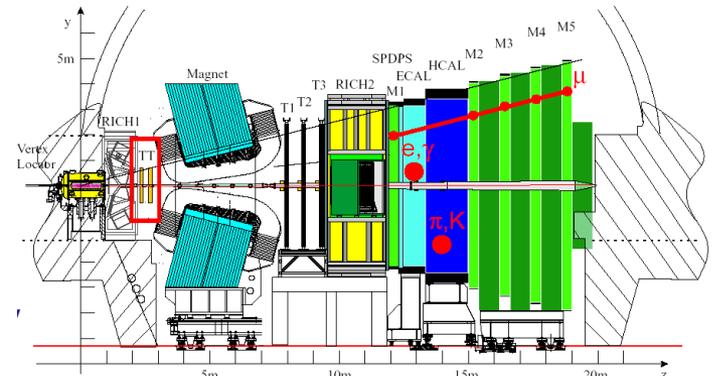
**CMS**



**TOTEM**

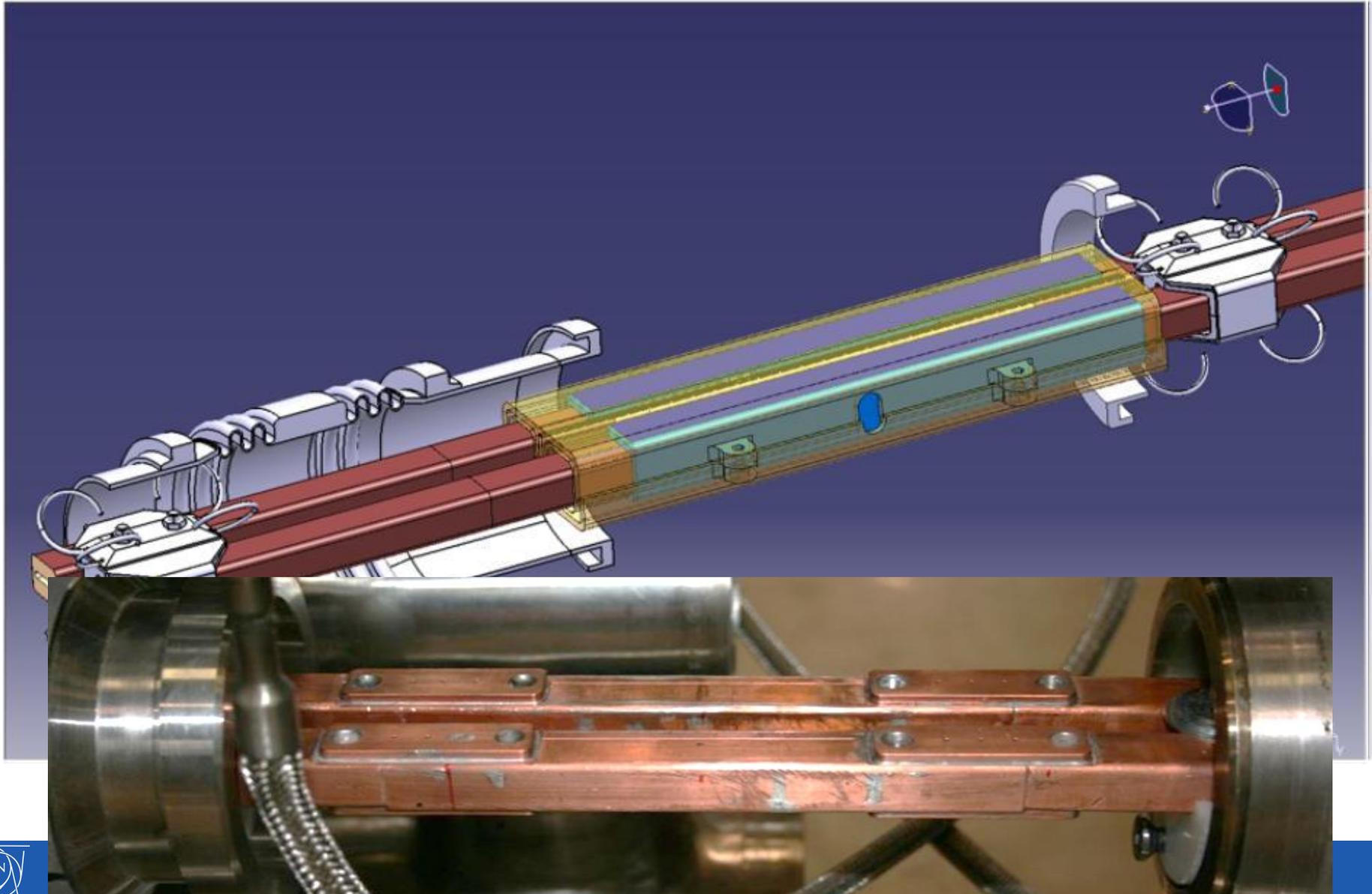


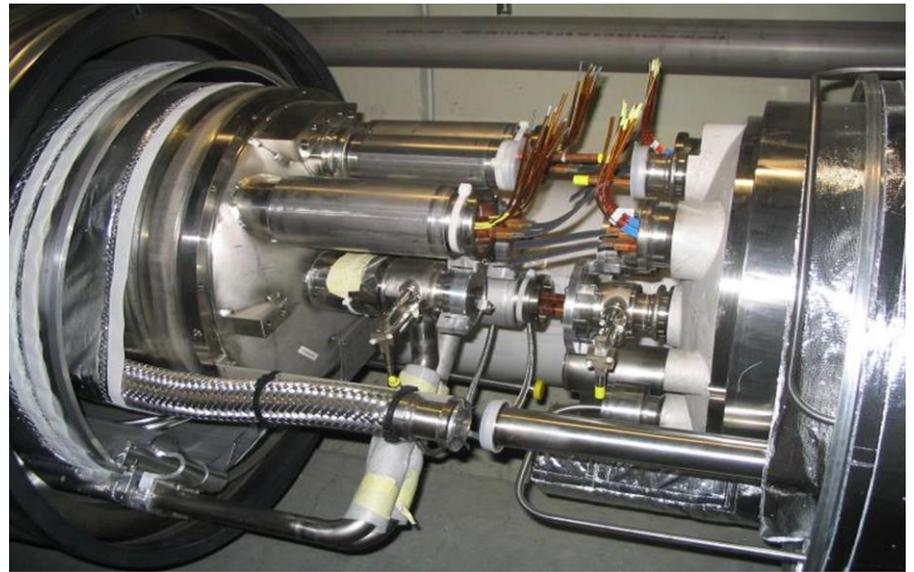
**ALICE**



**LHCb**

# Splice consolidation

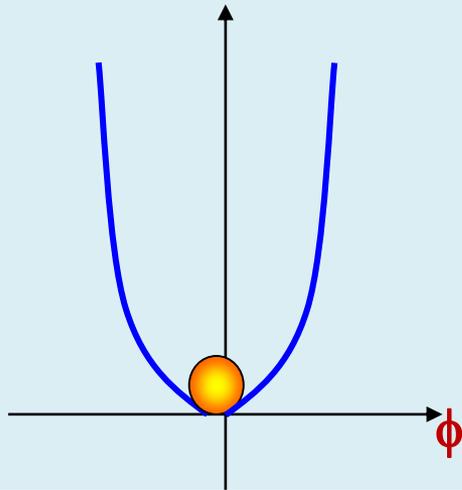




# Rottura spontanea della simmetria

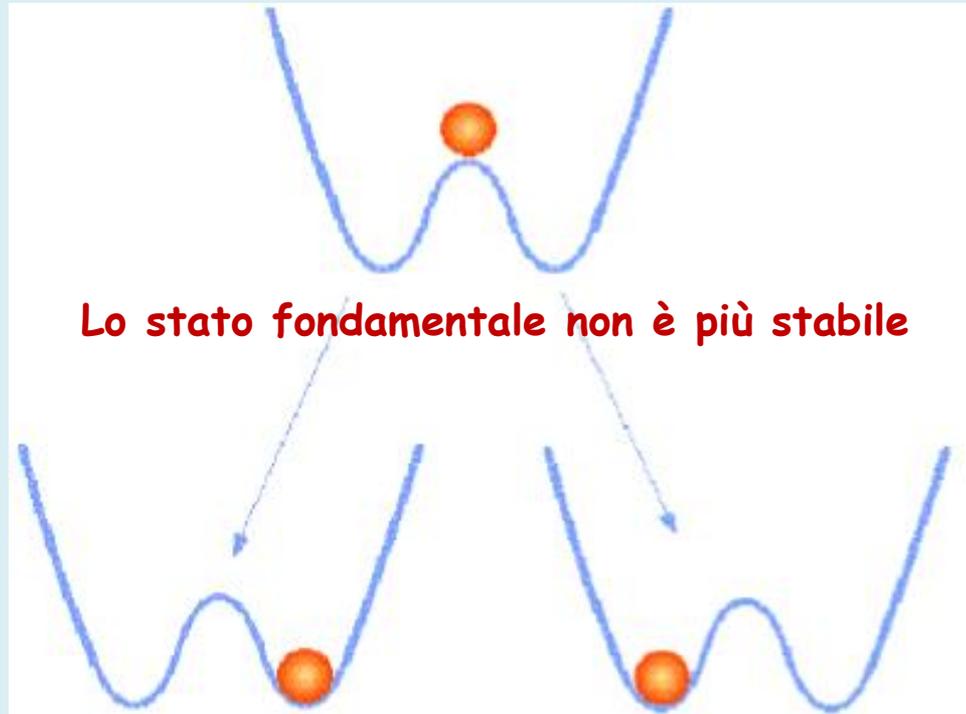
## Vediamola in due dimensioni

$$V(\phi) = +\mu|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$$



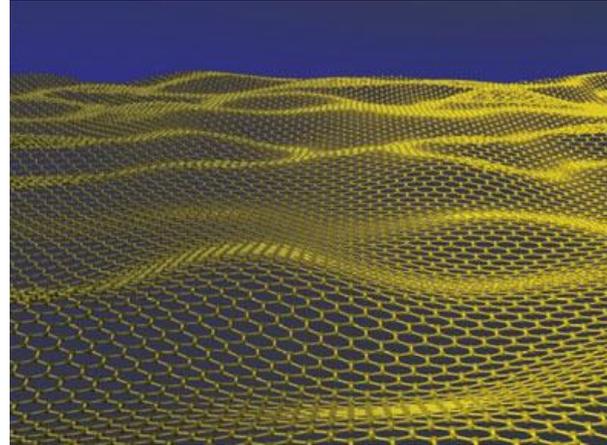
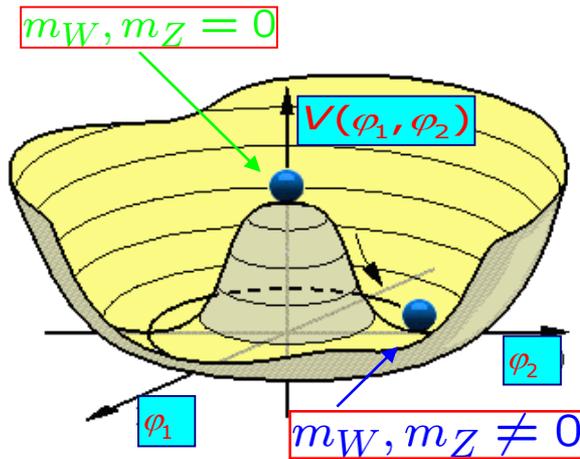
Simmetria dello stato fondamentale

$$V(\phi) = -\mu|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$$



Per andare in uno stato stabile, deve scegliere o destra o sinistra. La simmetria si rompe in modo "spontaneo"! Lo stato stabile non è più simmetrico

10<sup>-10</sup> secondi dopo il Big Bang l'Universo raffreddandosi subisce una transizione di fase e il vuoto si porta ad uno stato energetico più basso (rottura spontanea della simmetria) riempiendo lo spazio con il campo di Higgs.



$$\mathcal{L} = \frac{1}{2} (\partial_\mu \varphi) (\partial^\mu \varphi) - \frac{1}{2} \mu^2 \varphi^2 - \frac{1}{4} \lambda \varphi^4$$

La Lagrangiana (da cui si ricavano le equazioni del sistema) mantiene la simmetria di gauge, ma la scelta di un qualsiasi stato fondamentale rompe la simmetria.

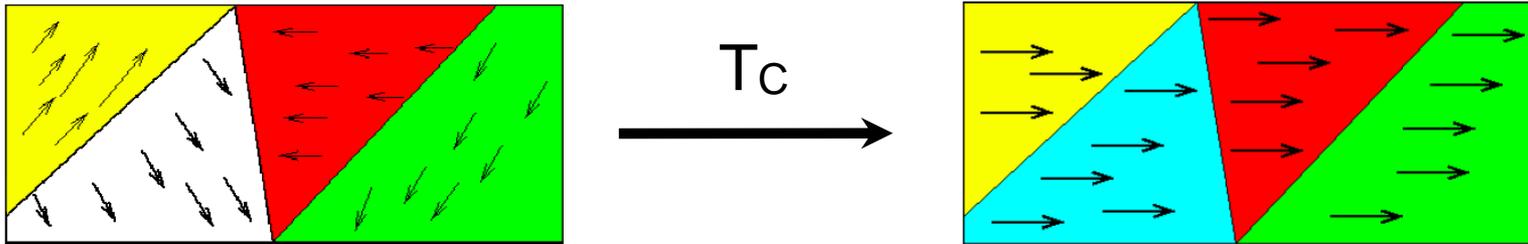
I Bosoni  $W^\pm$  e  $Z$  e le particelle di materia interagendo con questo campo non possono più muoversi alla velocità della luce perché hanno acquistato una massa.

Se questo campo che permea tutto l'Universo esiste davvero e non è solo una mera speculazione teorica allora deve esistere anche la particella che media questa interazione...il Bosone di Higgs.

# Rottura spontanea della simmetria

Fenomeno ben noto anche in fisica classica:

- La rottura della simmetria si realizza in natura quando tra molte possibili soluzioni equipotenziali solo una si realizza.
- Per esempio raffreddando un ferromagnete sotto la temperatura di Curie:

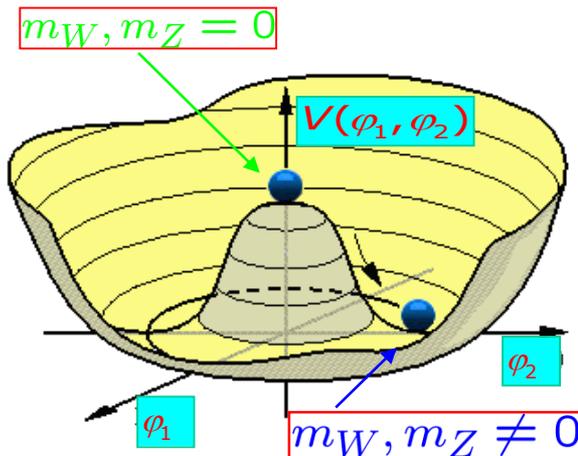


tra tutte le possibili direzioni la magnetizzazione si orienta in una particolare direzione rompendo la simmetria.

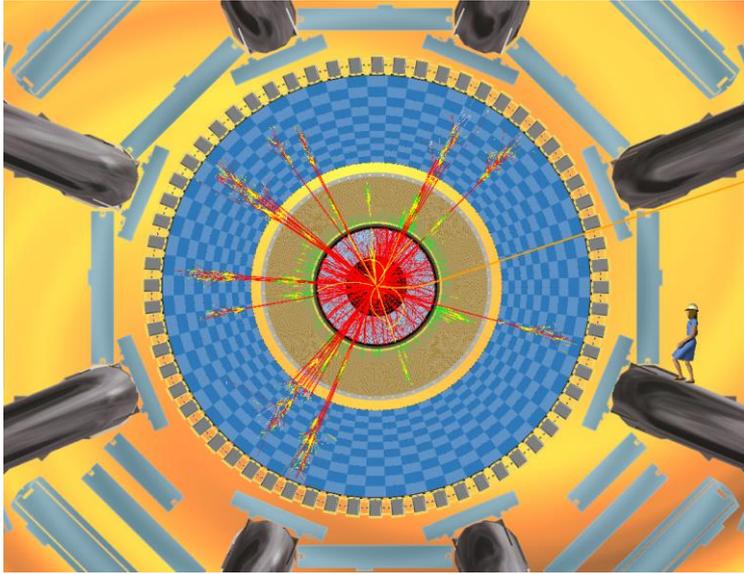
Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble (1964)

Viene introdotto il campo  $\Phi$  (un doppietto scalare complesso detto il campo di Higgs) il cui potenziale  $V(\Phi) = \lambda|\Phi|^4 + \mu^2|\Phi|^2$ ;  $\mu^2 < 0$   $\lambda > 0$  ha la forma di un cappello messicano.

Lo stato ad energia minima (il vuoto) rompe la simmetria pur mantenendo l'invarianza locale di gauge (rinormalizzabilità della teoria). Delle 4 componenti di  $\Phi$  tre formano le componenti longitudinali di  $W^\pm$  e  $Z$  (che diventano massive) e una viene presa da una particella scalare (il bosone di Higgs). Accoppiando i campi fermionici a  $\Phi$  anche i fermioni acquistano una massa proporzionale all'accoppiamento.



# Black Holes a LHC

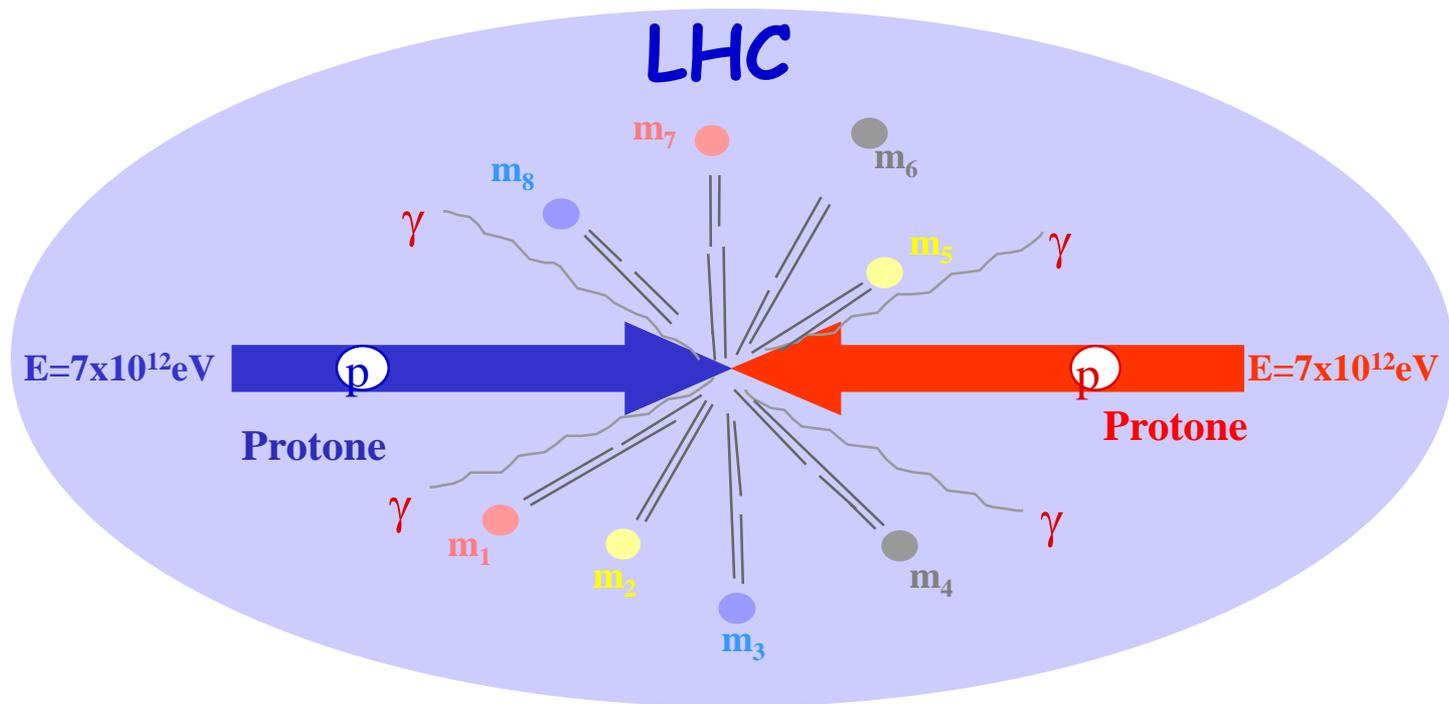


I black holes che potrebbero essere prodotti a LHC sono di massa piccolissima e decadrebbero immediatamente in particelle normali ben misurabili dai nostri rivelatori



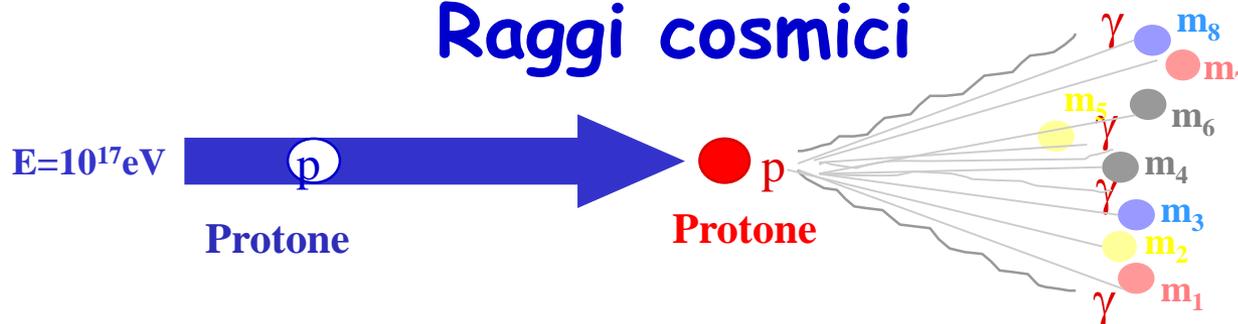
I black holes a LHC non sono niente di simile ai black holes super-massivi (~100.000 volte la massa del sole) che si trovano sparsi nell'Universo

La paura che a LHC possa venir creato un piccolo ma vorace Buco Nero in cui la Terra venga inesorabilmente inghiottita è totalmente priva di senso !



$E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$

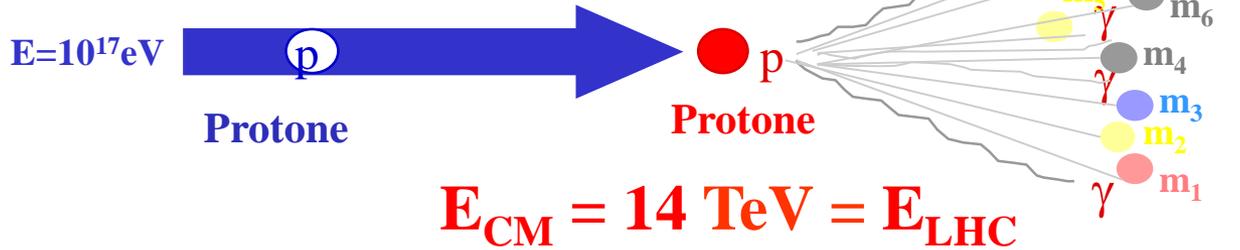
**Raggi cosmici**



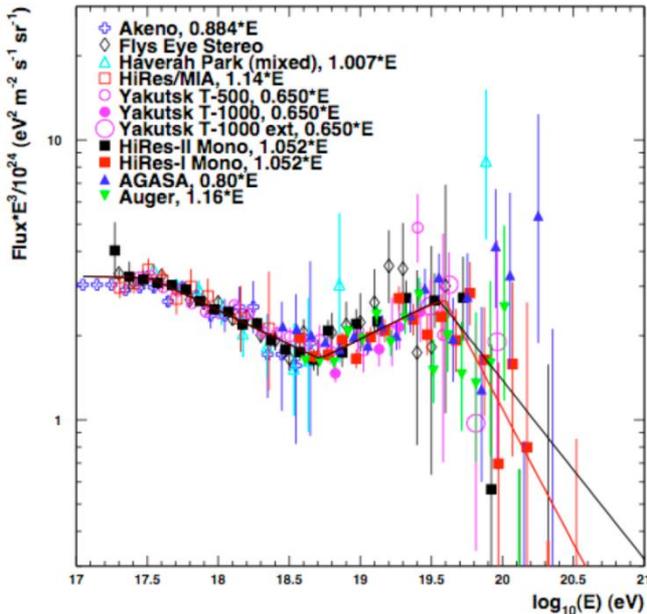
**Nelle due collisioni vengono prodotti gli stessi tipi di eventi**

# Comitato LSAG

(LHC Safety Assessment Group)



Flusso misurato sulla Terra di raggi cosmici con  $E \geq 10^{17} \text{ eV} = 5 \times 10^{-14} \text{ sec}^{-1} \text{ cm}^{-2}$



1. Superficie della Terra è circa  $5 \times 10^{18} \text{ cm}^2$   
 2. La Terra esiste da 4.5 miliardi di anni quindi più di  $3 \times 10^{22}$  raggi cosmici con  $E \geq 10^{17} \text{ eV}$  hanno colpito la Terra e quindi **sono già stati fatti più di centomila esperimenti come LHC**

Superficie del Sole = diecimila volte la superficie della Terra, quindi **sul Sole sono già stati fatti circa un milione di esperimenti come LHC**

La nostra galassia ha più di  $10^{11}$  stelle  
 Nell'Universo ci sono più di  $10^{11}$  galassie, quindi **sulle stelle esistenti sono già stati fatti circa  $10^{31}$  esperimenti come LHC e ne vengono completati ben  $3 \times 10^{13}$  ogni secondo!!**

**e la Terra, il Sole e le Stelle continuano ad esistere da miliardi di anni !**  
**LHC non produrrà eventi pericolosi né per l'umanità né per la terra...**

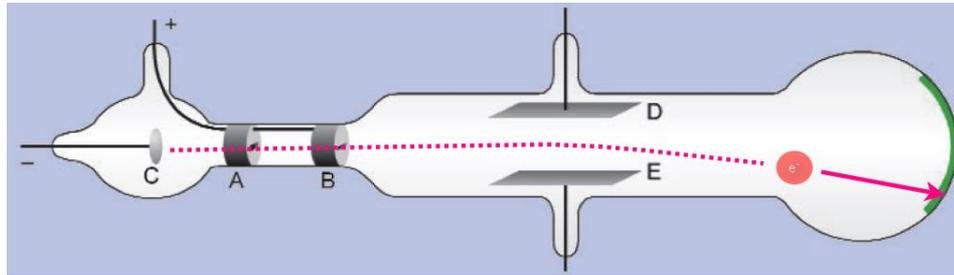
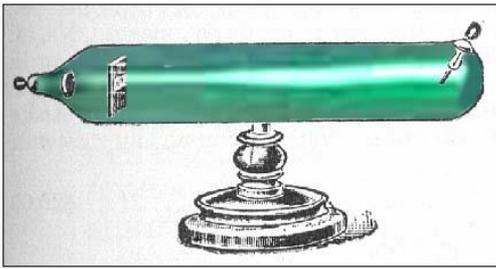
# L'atomo

## 1896: Scoperta della radioattività, H. Becquerel, P. Curie, M. Curie

Radiazione  $\alpha$  (nucleo di Elio: 2 protoni + 2 neutroni), radiazione  $\beta$  (elettrone), radiazione  $\gamma$  (fotone)

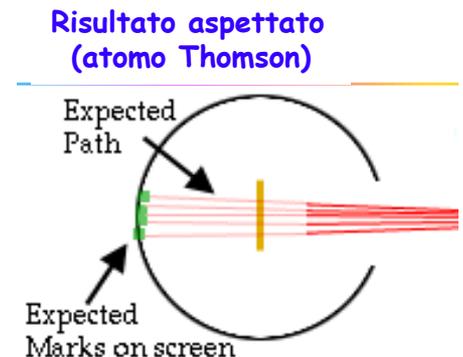
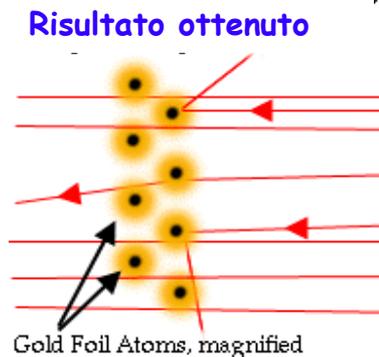
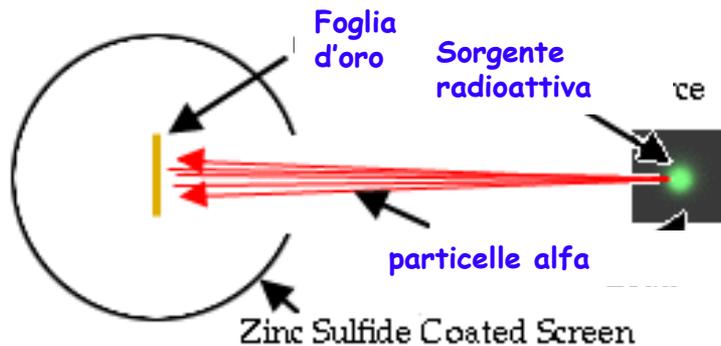
## 1897: Scoperta dell'elettrone, J.J. Thomson

Misurandone la deflessione in un campo elettrico e magnetico, ne determina il rapporto fra carica elettrica e massa. (Tubo a raggi catodici (tubi di Crookes) precursore del nostro (vecchio) televisore)

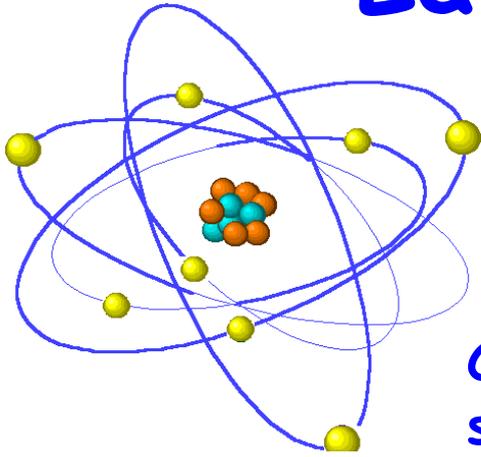


## 1911: Scoperta del nucleo, E. Rutherford

E. Rutherford, Geiger e Madsen dimostrano che l'atomo possiede una struttura e che la maggior parte della propria massa è concentrata in un piccolo nucleo centrale (dimensione del nucleo ( $10^{-15}$  m))



# La struttura dell'atomo



Dimensioni dell'atomo  $\sim 10^{-10}$  m

Dimensioni del nucleo  $\sim 10^{-15}$  m

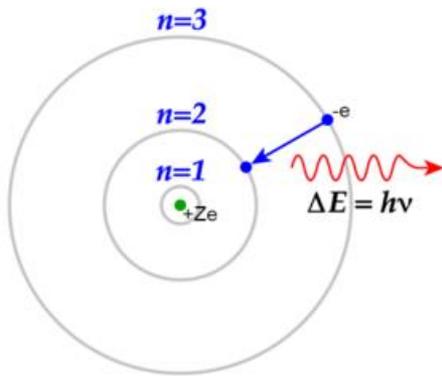
**Problema: l'atomo di Rutherford è instabile !**

Come fanno gli elettroni ad orbitare intorno al nucleo senza irraggiare e quindi a non collassare nel nucleo?

**Soluzione: meccanica quantistica**

L'atomo di Bohr (1913): le orbite sono quantizzate

L'idea fu confermata sperimentalmente riuscendo a spiegare lo spettro della lampada ad idrogeno. Le righe spettrali corrispondono ai salti energetici tra i possibili orbitali dell'atomo di idrogeno.



**Di cosa è fatto il nucleo ?**

- 1919: scoperta del protone - E. Rutherford (in realtà lo scopre W. Crokes)

Il nucleo deve avere tanti protoni quanti sono gli elettroni ( $m_p = 1836 \cdot m_e$ ). La massa dei protoni è circa la metà della massa dell'atomo. IPOTESI: particella simile al protone ma senza carica: il neutrone.

- 1932: scoperta del neutrone - J. Chadwick.

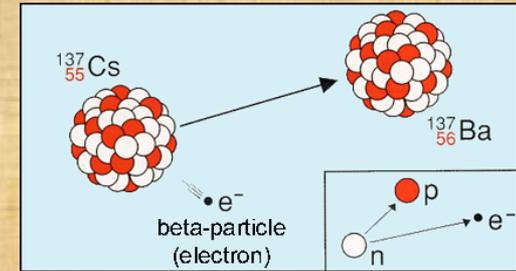
**Il nucleo è composto da protoni e neutroni**

(tenuti uniti nel nucleo da una nuova forza: la forza forte)

# .... poi ci sono i neutrini !

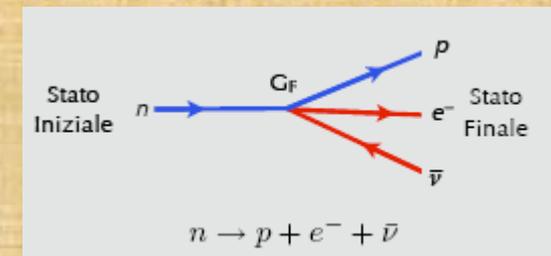
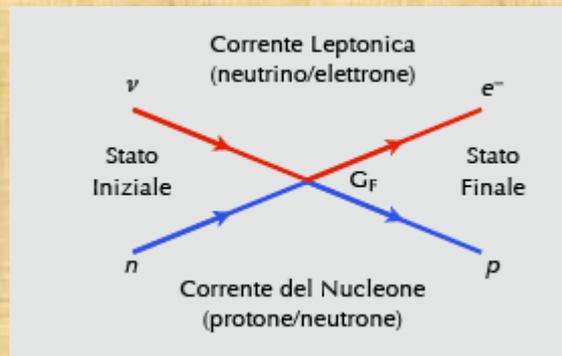
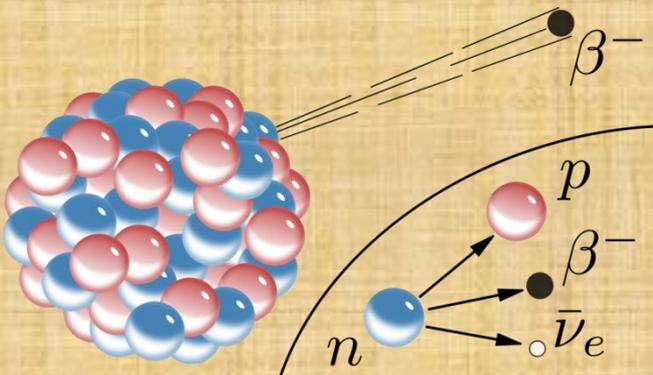
(il problema del decadimento  $\beta$ )

- ✓ 1911-1914: si studia la radioattività: un nucleo si trasforma in un altro emettendo un elettrone (radiazione  $\beta$ ):  ${}_Z^A N \rightarrow {}_{Z+1}^A N' + e^-$



ma c'è un problema: non si conserva l'energia, la quantità di moto e il momento angolare !! ??

- ✓ 1930: W.Pauli ipotizza che un'altra particella neutra, senza massa e invisibile venga emessa insieme all'elettrone:  ${}_Z^A N \rightarrow {}_{Z+1}^A N' + e^- + X$
- ✓ 1933: E.Fermi formula teoria del decadimento  $\beta$  e chiama la nuova particella neutrino. Il fenomeno elementare è il decadimento del neutrone. La forza responsabile del decadimento è dovuta ad una nuova forma di interazione: **la forza debole.**

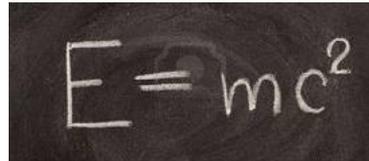


# Nel frattempo... molti sono i progressi teorici

## • La relatività di Einstein (1905)

postulati:

- ✓ Costanza della velocità della luce nel vuoto
- ✓ Equivalenza dei sistemi di riferimento inerziali
- Cambiando sistema di riferimento: contrazione degli intervalli spaziali e dilatazione dei intervalli temporali
- Equivalenza tra massa ed energia: possibilità di generare particelle con massa pur di avere energia sufficiente


$$E=mc^2$$

## • La formulazione completa della meccanica quantistica (1924-1927)

**1924** de Broglie propone che la materia abbia caratteristiche di onda

**1925** Pauli formula il principio di esclusione per elettroni atomici.

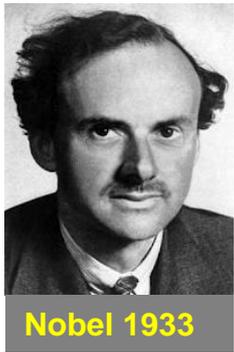
**1926** Schroedinger sviluppa la meccanica ondulatoria.

**1926** Born da' una interpretazione probabilistica della quanto-meccanica .

**1927** Heisenberg formula il principio di indeterminazione.

# Meccanica quantistica+relatività

- ✓ Meccanica quantistica → le particelle del mondo atomico seguono leggi diverse da quelle della fisica classica
- ✓ Relatività ristretta → le leggi della fisica classica non sono più valide per particelle in moto a velocità prossime a quella della luce



- Nel 1928 Dirac cerca di conciliare le due teorie per descrivere il moto degli elettroni liberi ad alta energia e scrive l'equazione:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

L'equazione descrive correttamente l'elettrone (includendo anche le proprietà magnetiche) tuttavia ... ci sono due soluzioni una per particelle (elettroni) di energia positiva ed una per particelle ad energia negativa (???)

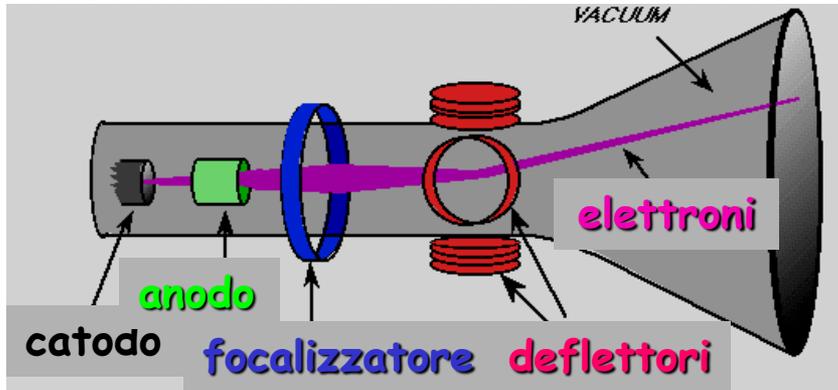
- ✓ Nel 1931 per questa seconda soluzione Dirac propone l'esistenza di una *nuova particella* con la stessa massa ma con carica opposta a quella dell'elettrone
- ✓ Nel 1932 C. Anderson scopre l'anti-elettrone il "positrone"

- l'antimateria esiste !



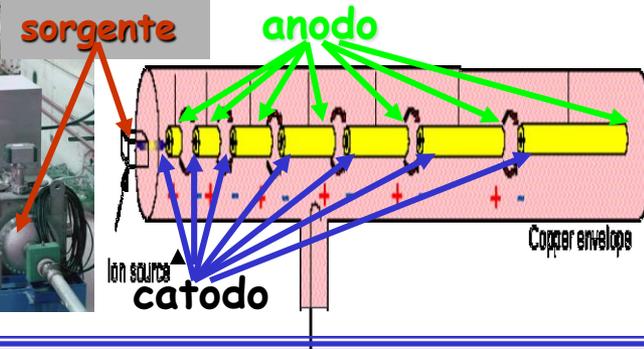
# Come si accelerano le particelle

l'acceleratore di casa: il televisore

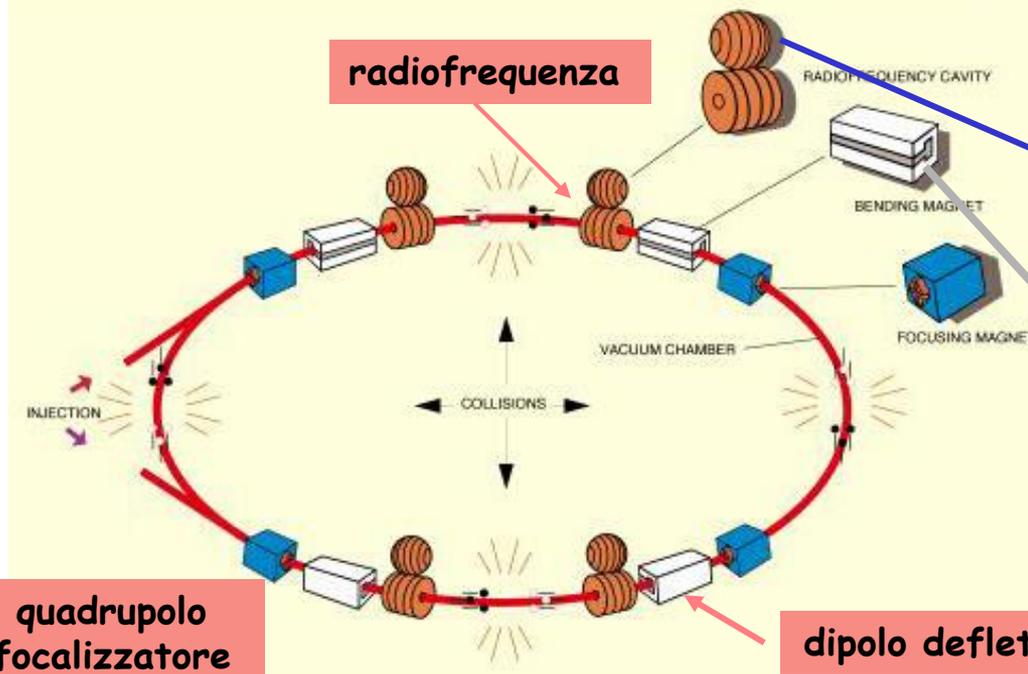


l'energia degli elettroni è ~ 20 KeV

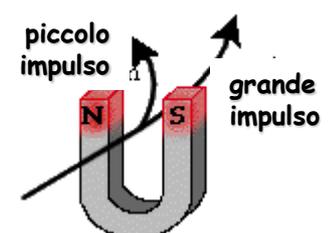
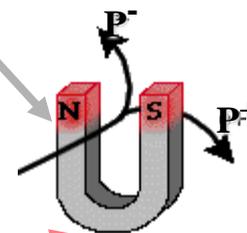
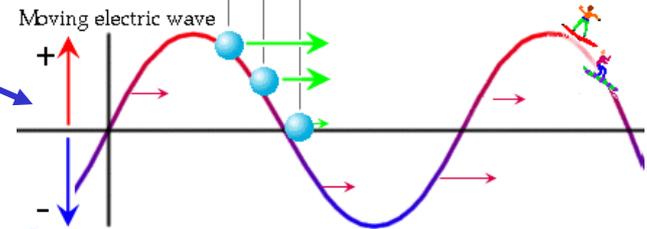
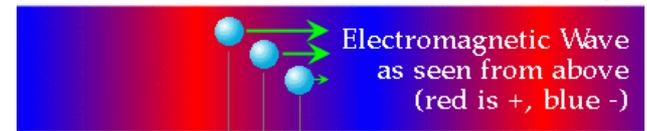
(FERMILAB-Chicago)  
acceleratore lineare  
energia 400 MeV



le 3 componenti principali di un acceleratore



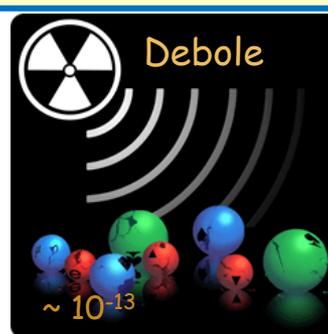
Electromagnetic wave is traveling, pushing particles along with it



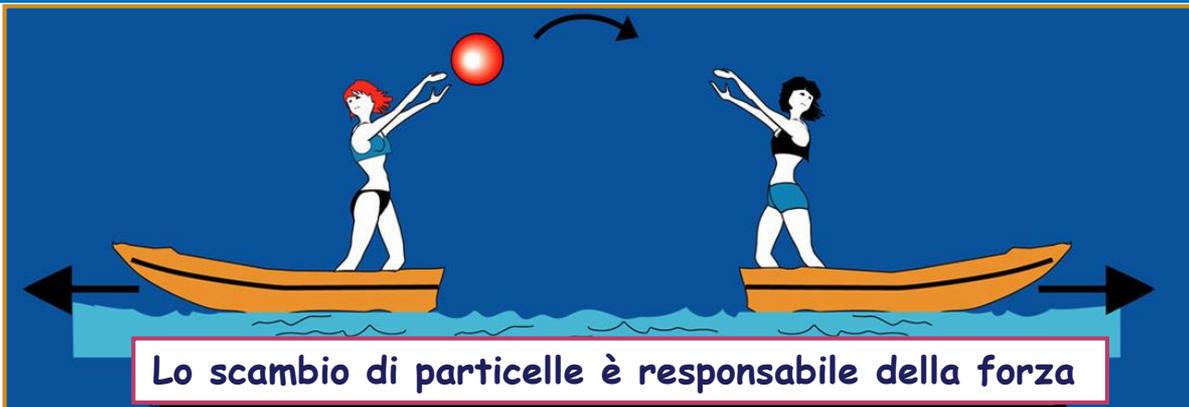


# Come interagiscono le particelle elementari?

Abbiamo capito che i costituenti elementari della materia sono i quarks e i leptoni. Ma questo non basta per capire come è fatto il mondo che ci circonda. Dobbiamo capire come interagiscono tra loro, come si combinano a formare la materia ordinaria e perché le particelle di seconda e terza generazione sono instabili e decadono rapidamente in particelle di prima generazione... dobbiamo insomma avere una teoria che descriva il loro comportamento. Dalle tre classi di decadimento abbiamo identificato tre diverse interazioni tra le particelle di diversa intensità (a cui si aggiunge la debolissima interazione gravitazionale che non considereremo in questo contesto)



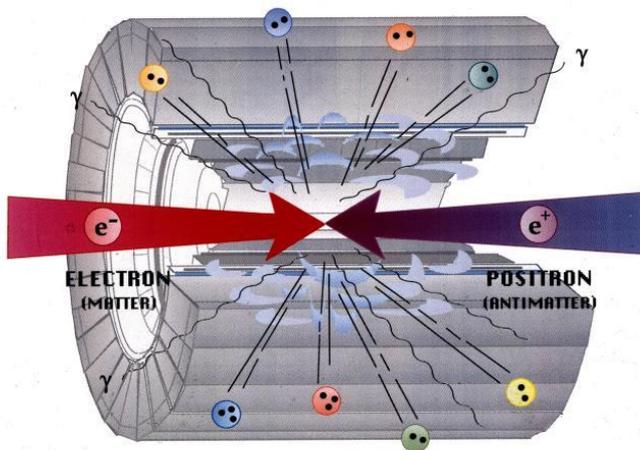
Pensiamo che tutte queste 4 diverse interazioni siano dovute allo "scambio" di altre particelle, chiamate "mediatrici" o "vettori" dell'interazione.



Sono le leggi che governano questi scambi quello che la nostra teoria deve spiegare.

# Verifica del Modello Standard

- ✓ Nel 1989 al CERN di Ginevra inizia a funzionare il LEP, il collisionatore elettrone-positrone più grande del mondo: si tratta di un grande acceleratore di 27 km di circonferenza con il quale gli elettroni e i positroni vengono accelerati fino a 50 GeV e poi fatti scontrare per studiarne l'interazione all'energia della massa ( $m_Z \approx 91$  GeV) dello  $Z^0$ .
- ✓ Contemporaneamente a SLAC in California iniziano a far funzionare l'acceleratore lineare per elettroni (SLC) anche con positroni ottenendo alle stesse energie del LEP collisioni con fasci di intensità minore ma in compenso polarizzati trasversalmente.
- ✓ Nella collisione elettrone-positrone, essendo uno scontro tra particelle elementari senza struttura interna, almeno per quanto ne sappiamo, lo stato iniziale dell'interazione è perfettamente definito e le previsioni teoriche del Modello Standard possono essere verificate con grande accuratezza.

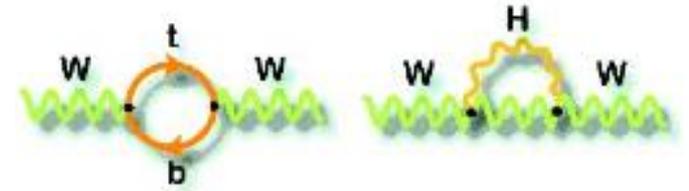


Dal 1989 al 1995 vengono prodotti e misurati milioni di  $Z^0$  permettendo di verificare le previsioni del Modello Standard al meglio del percento. La massa dello  $Z^0$  viene misurata con l'incredibile precisione dello 0.02% e inoltre viene verificato che il numero delle famiglie di neutrini è effettivamente tre:

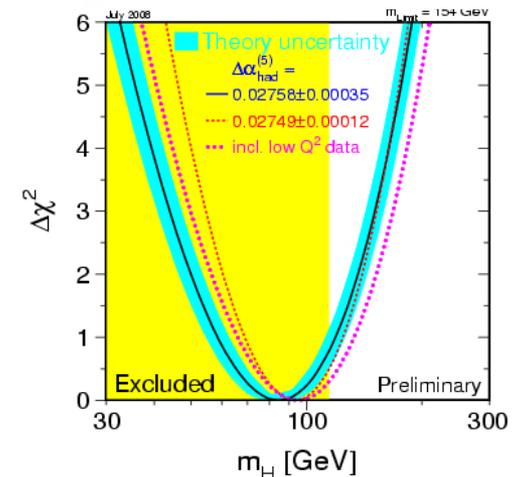
**Un vero trionfo del Modello Standard !**

# Il Modello Standard alla fine del secondo millennio

- ✓ Dal 1995 al 2000 l'energia del LEP viene aumentata fino a 208 GeV. Questo permette di verificare ulteriormente le predizioni del Modello Standard essendo diventato possibile a queste energie la produzione di coppie  $W^+W^-$ . E' ora anche possibile la ricerca del bosone di Higgs con la reazione  $e^+e^-$  in  $Z^0$ +Higgs fino al limite cinematico di una massa di  $\approx 117$  GeV.
- ✓ Con queste ulteriori misure di precisione si arriva perfino a prevedere con buona approssimazione la massa del quark top prima ancora che venga misurata sperimentalmente al Fermilab.
- ✓ Alcuni eventi misurati da uno dei 4 esperimenti fanno pensare di aver identificato il bosone di Higgs, ma la rilevanza statistica di questi eventi è troppo bassa e alla fine si conclude solo che se il bosone di Higgs esiste ha una massa maggiore di 114 GeV.



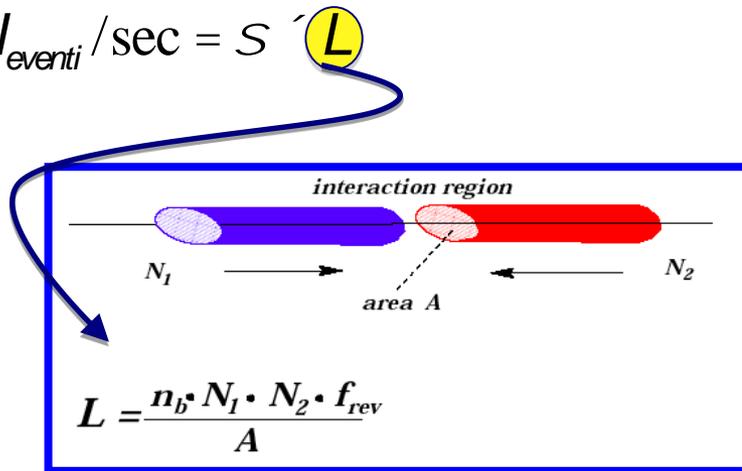
- ✓ Tuttavia le misure di precisione della massa del quark top e del W indicano che se il bosone di Higgs esiste non può essere molto più pesante di 114 GeV. Calcolando infatti le correzioni alla massa del top e del W (dette correzioni radiative) secondo diagrammi come quelli qui a lato è possibile valutare la massa del bosone di Higgs e stimare che con alta probabilità dovrebbe avere un valore inferiore a 186 GeV.



# Luminosità ( $L$ ), sezione d'urto ( $\sigma$ ) e frequenza di eventi

La frequenza di un particolare tipo di evento è data dalla probabilità che tra due protoni avvenga quel particolare tipo di interazione (sezione d'urto  $\sigma$ ) per il numero di protoni che si riesce a far scontrare ogni secondo (luminosità  $L$ ).

$$N_{\text{eventi}} / \text{sec} = S \cdot L$$



$N_1$  ed  $N_2$  numero di protoni nei pacchetti ( $\geq 10^{11}$ )  
 $A$  area della sezione del pacchetto ( $16 \times 16 \mu\text{m}^2$ )  
 $n_b$  numero di pacchetti circolanti in LHC (2808)  
 $f_{\text{rev}}$  frequenza di rivoluzione dei pacchetti (11245 Hz)

Se  $M_H = 125 \text{ GeV}$

$$\sigma_H \sim 15 \text{ pb} = 15 \times 10^{-36} \text{ cm}^2$$

$$L \approx 1 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$$

➤  $N_{\text{higgs}} \approx 0.15$  al secondo

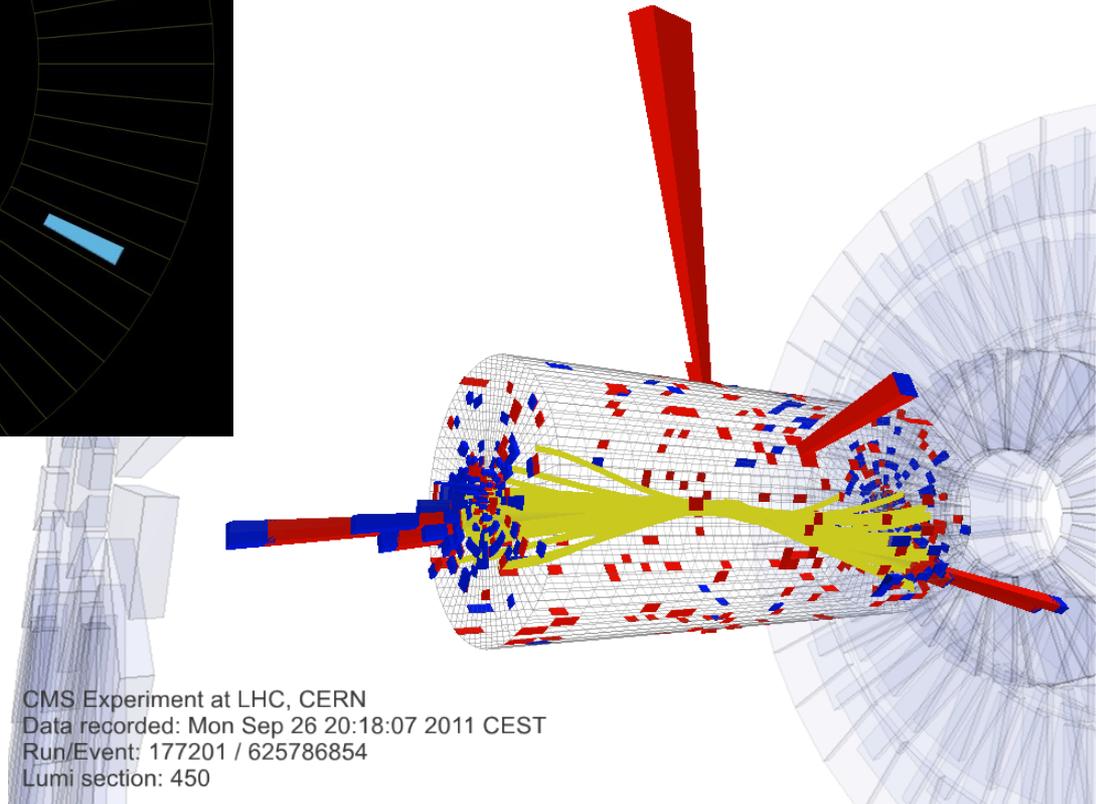
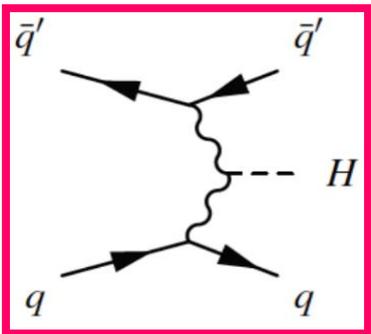
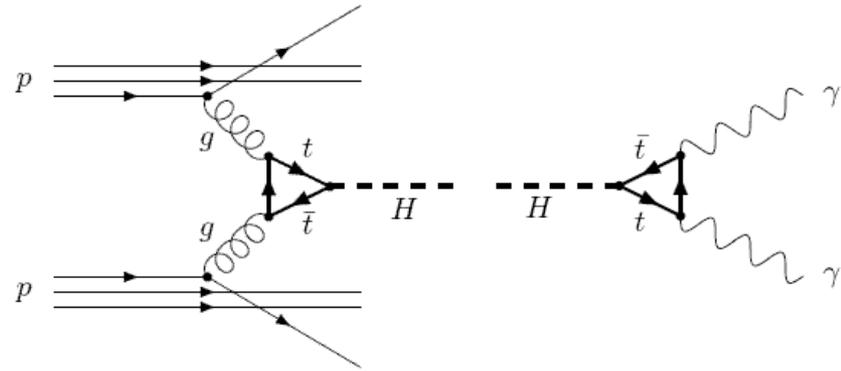
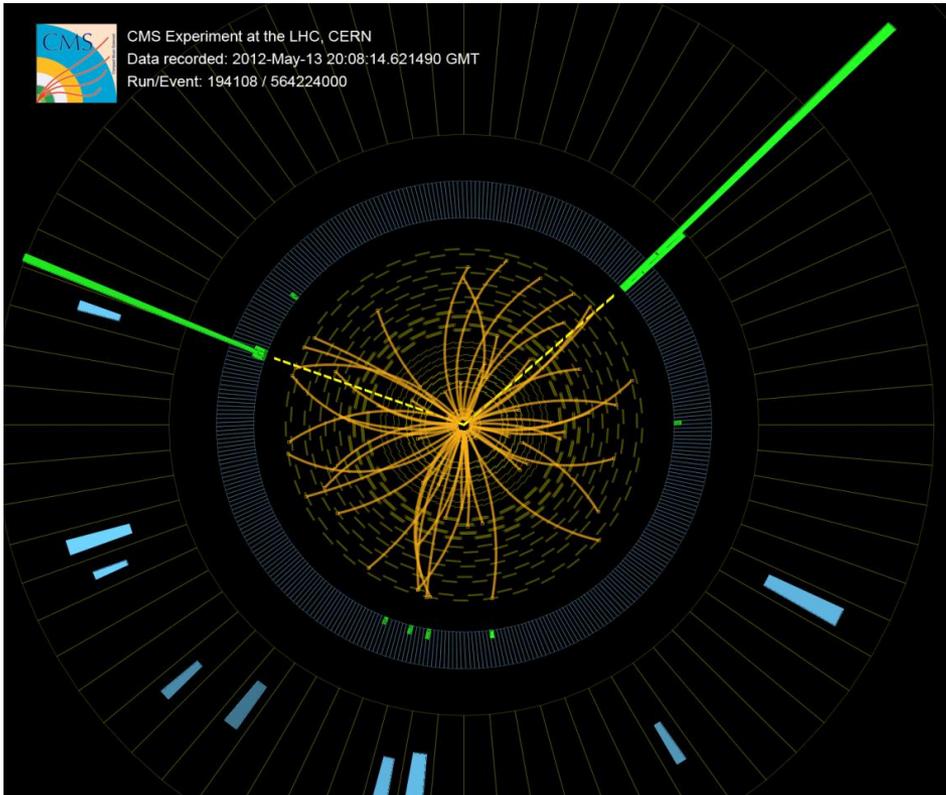
$N_{\text{higgs}} \approx 540$  all'ora

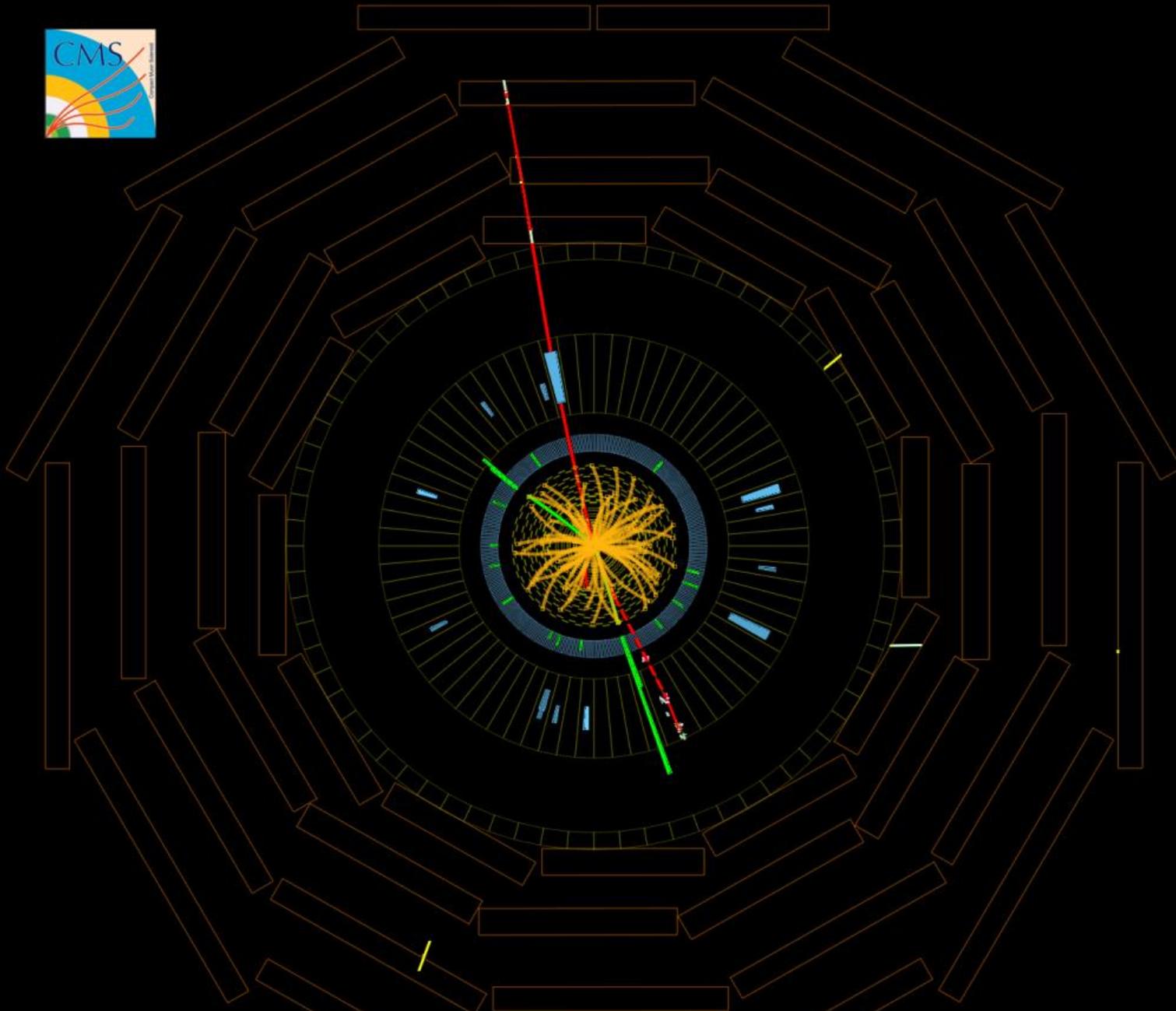
(se si scontrassero due soli protoni al secondo produrrei un solo Bosone di Higgs ogni  $\sim 3 \times 10^{21}$  anni ( $\sim 200$  miliardi di volte l'età dell'Universo !)

Luminosità integrata su tutta la presa dati fino al 4 luglio 2012:

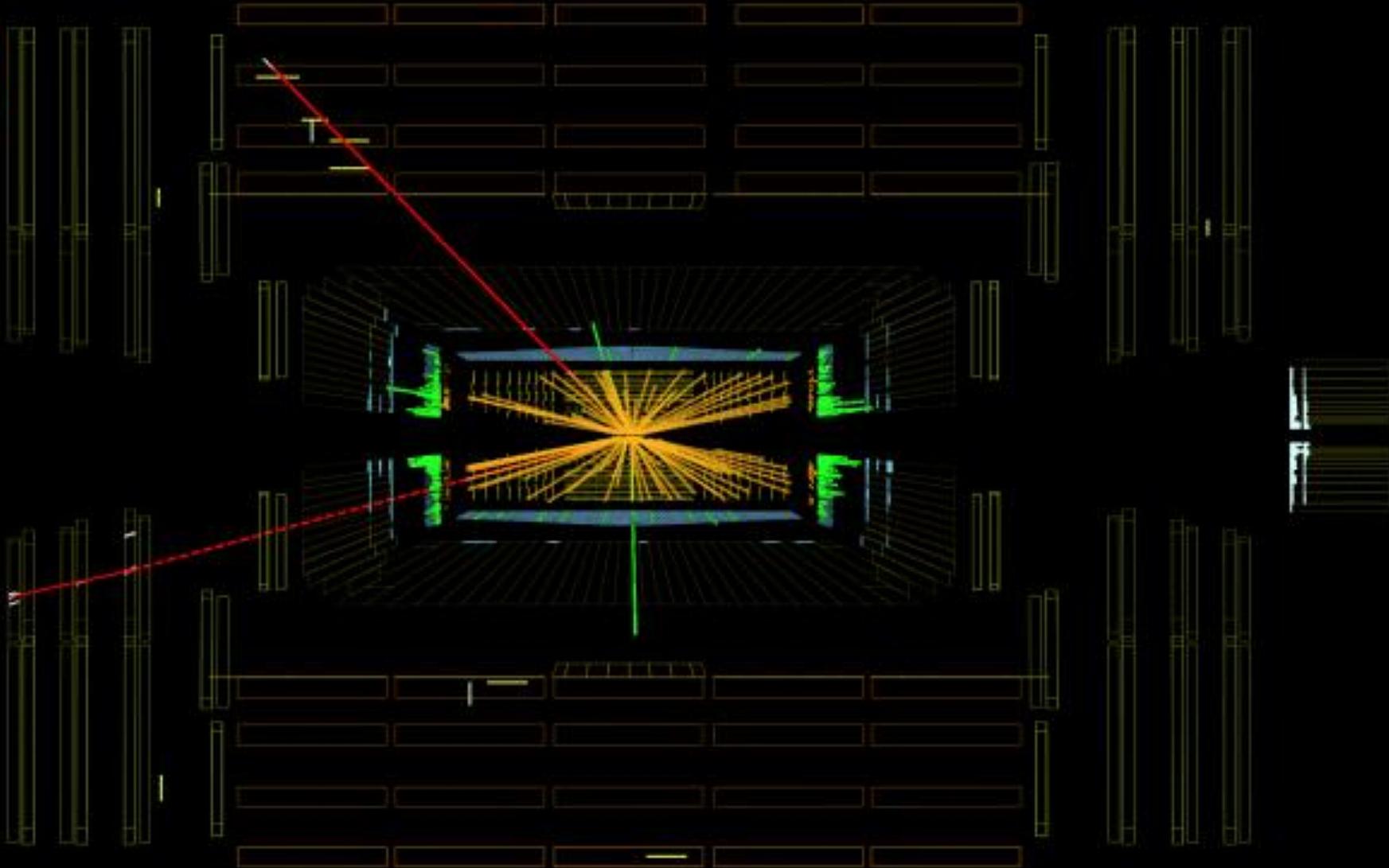
$\int L dt \approx 10 \text{ fb}^{-1}$  ➤  $\approx 150.000$  Higgs prodotti ( $15 \text{ pb} \times 10000 \text{ pb}^{-1}$ )  
 ma se sono così tanti sarà facile vederli !

# Ricerca $H \rightarrow \gamma\gamma$





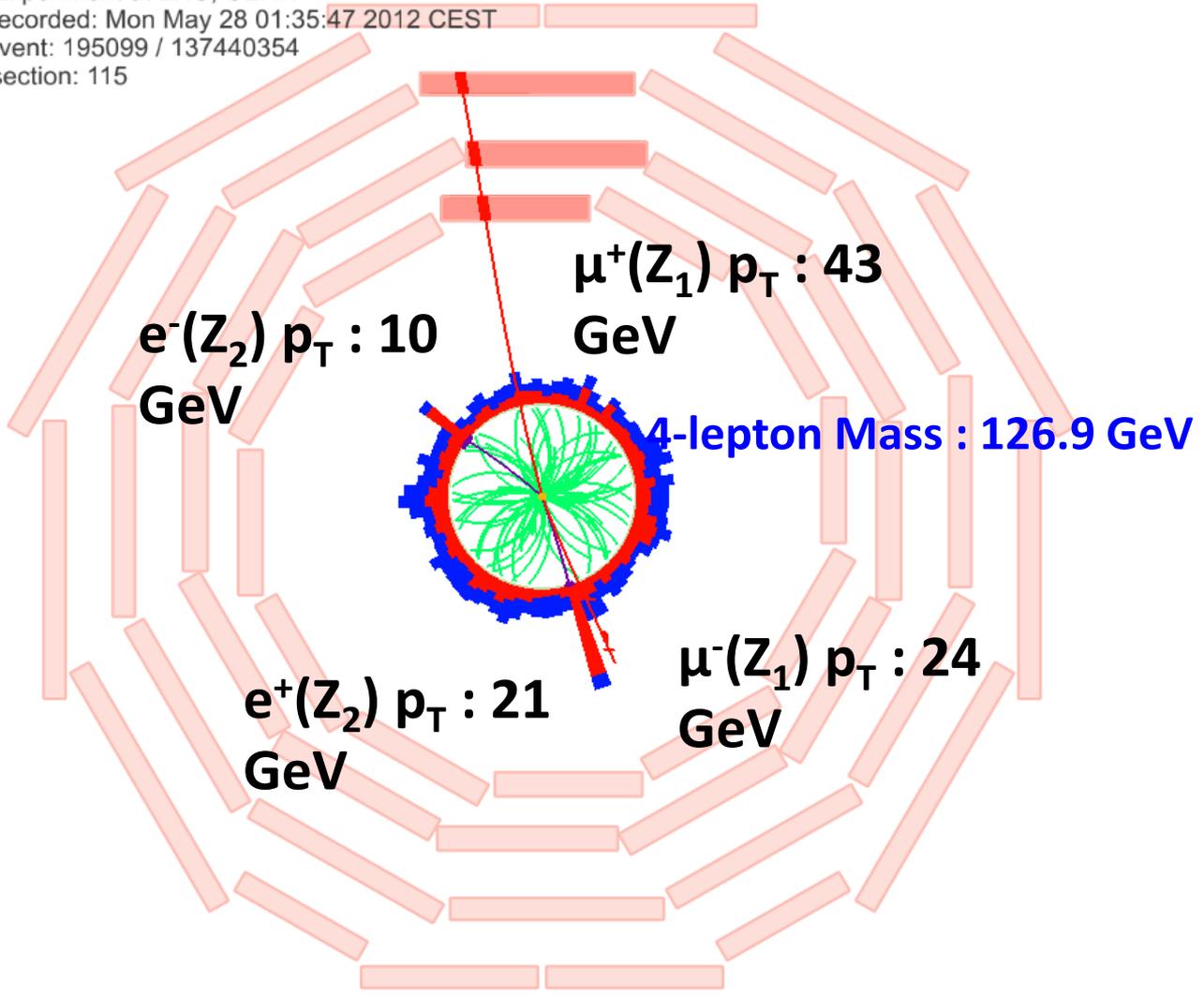
candidate ZZ event with two electrons and two muons



candidate  $ZZ$  event with two electrons and two muons



CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST  
Run/Event: 195099 / 137440354  
Lumi section: 115





CMS Experiment at LHC, CERN  
Data recorded: Mon May 28 01:35:47 2012 CEST  
Run/Event: 195099 / 137440354  
Lumi section: 115

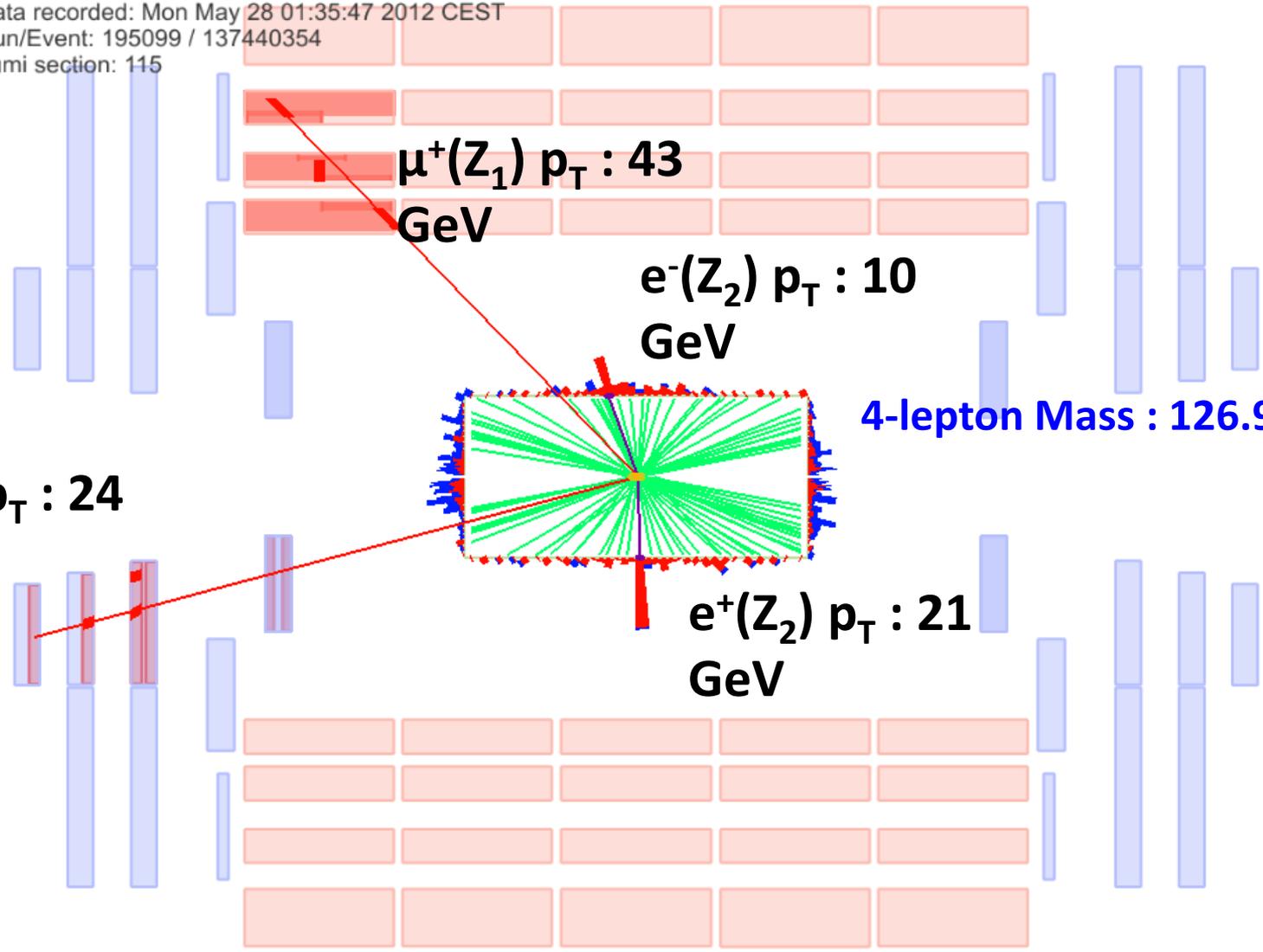
$\mu^-(Z_1) p_T : 24$   
GeV

$\mu^+(Z_1) p_T : 43$   
GeV

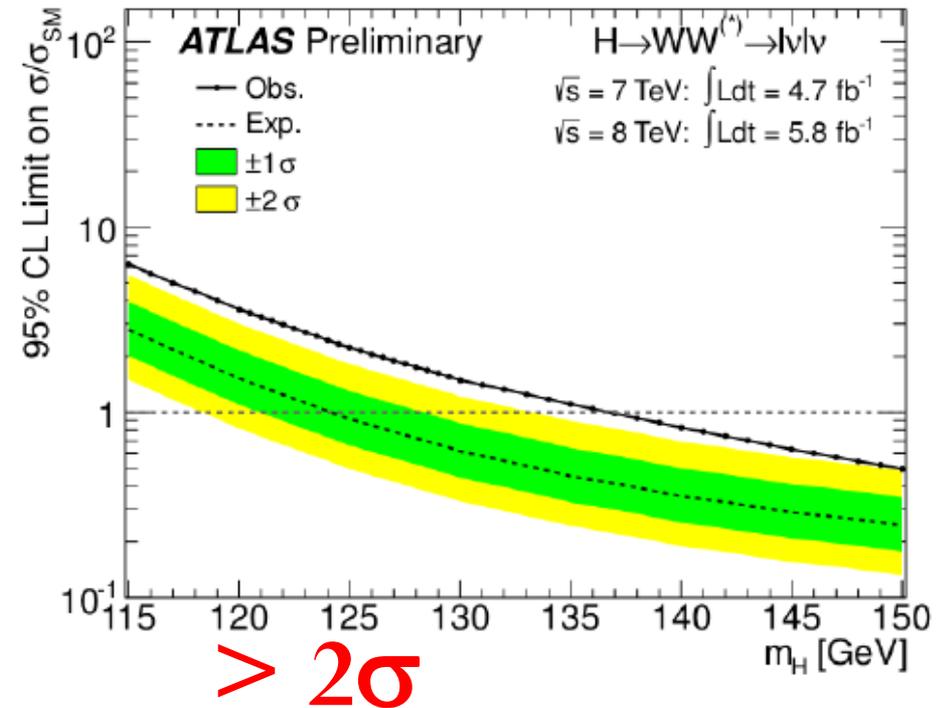
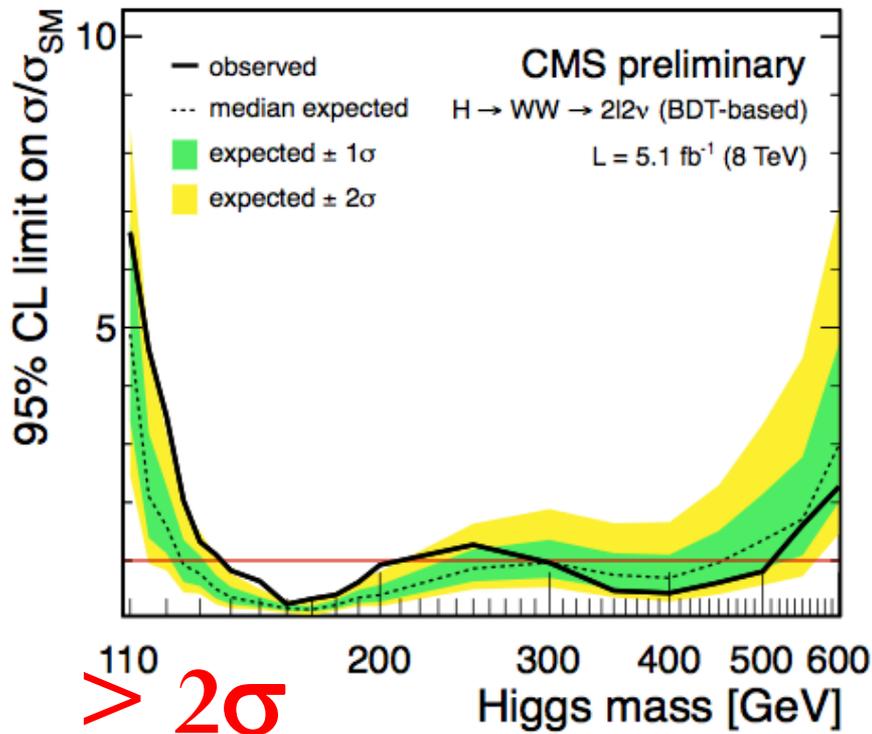
$e^-(Z_2) p_T : 10$   
GeV

$e^+(Z_2) p_T : 21$   
GeV

4-lepton Mass : 126.9 GeV



# Ricerca di $H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$

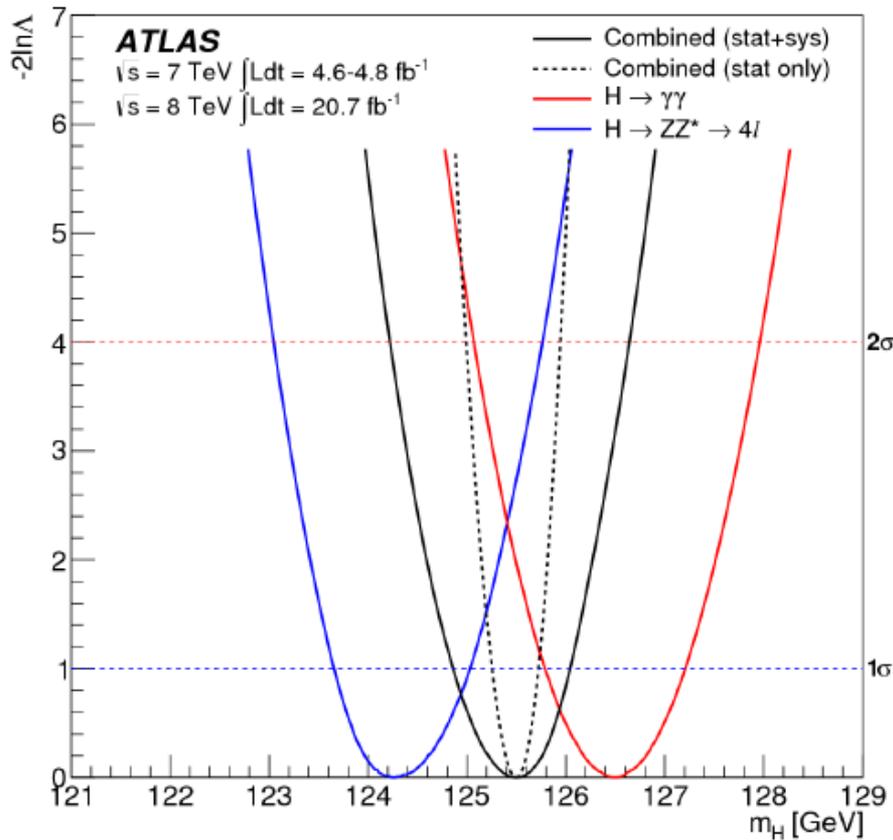


Un eccesso di eventi rispetto a quelli previsti dal fondo, anche se di soli "2 $\sigma$ " (e quindi statisticamente poco significativi), può contribuire a rafforzare il significato statistico dei segnali misurati in altri canali.

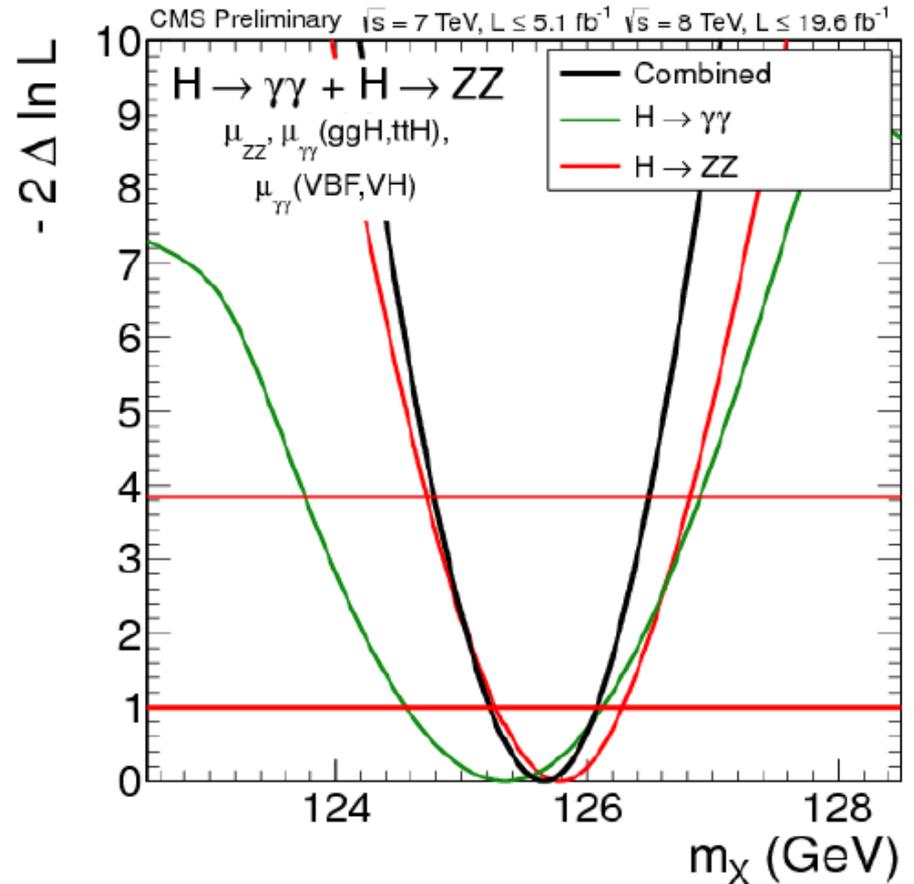
# Higgs Mass measurement

$m_H^{\gamma\gamma} = 126.8 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.7_{\text{sys}} \text{ GeV}$   
 $m_H^{4l} = 124.3^{+0.6}_{-0.5 \text{ stat}} \pm 0.5^{+0.5}_{-0.3 \text{ sys}} \text{ GeV}$

$m_H^{\gamma\gamma} = 125.4 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.6_{\text{sys}} \text{ GeV}$   
 $m_H^{4l} = 125.8 \pm 0.5_{\text{stat}} \pm 0.2_{\text{sys}} \text{ GeV}$



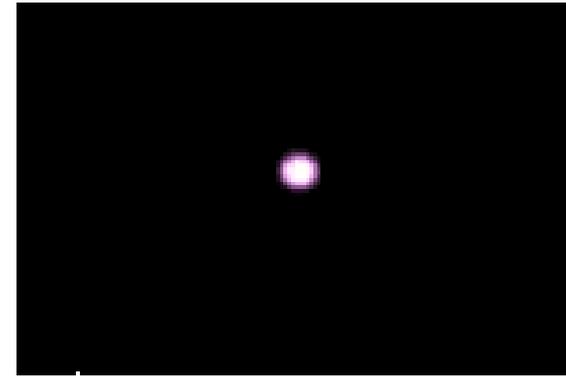
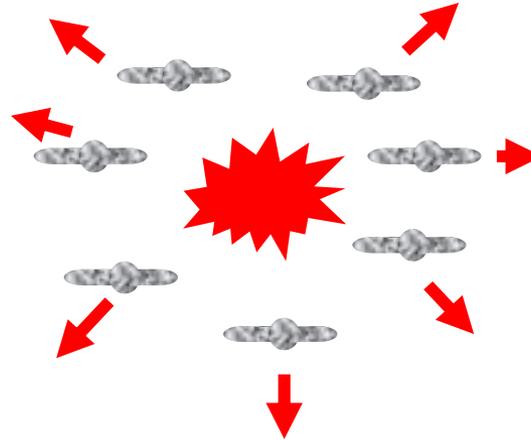
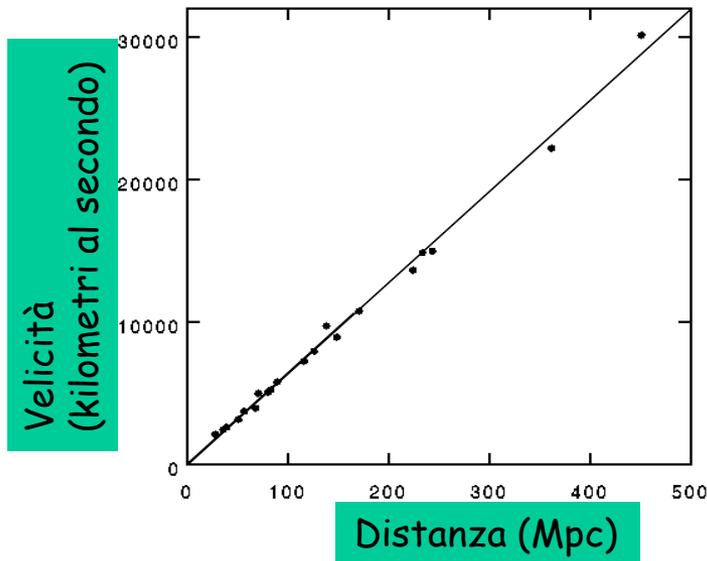
$m_H = 125.5 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.5^{+0.5}_{-0.6 \text{ sys}} \text{ GeV}$



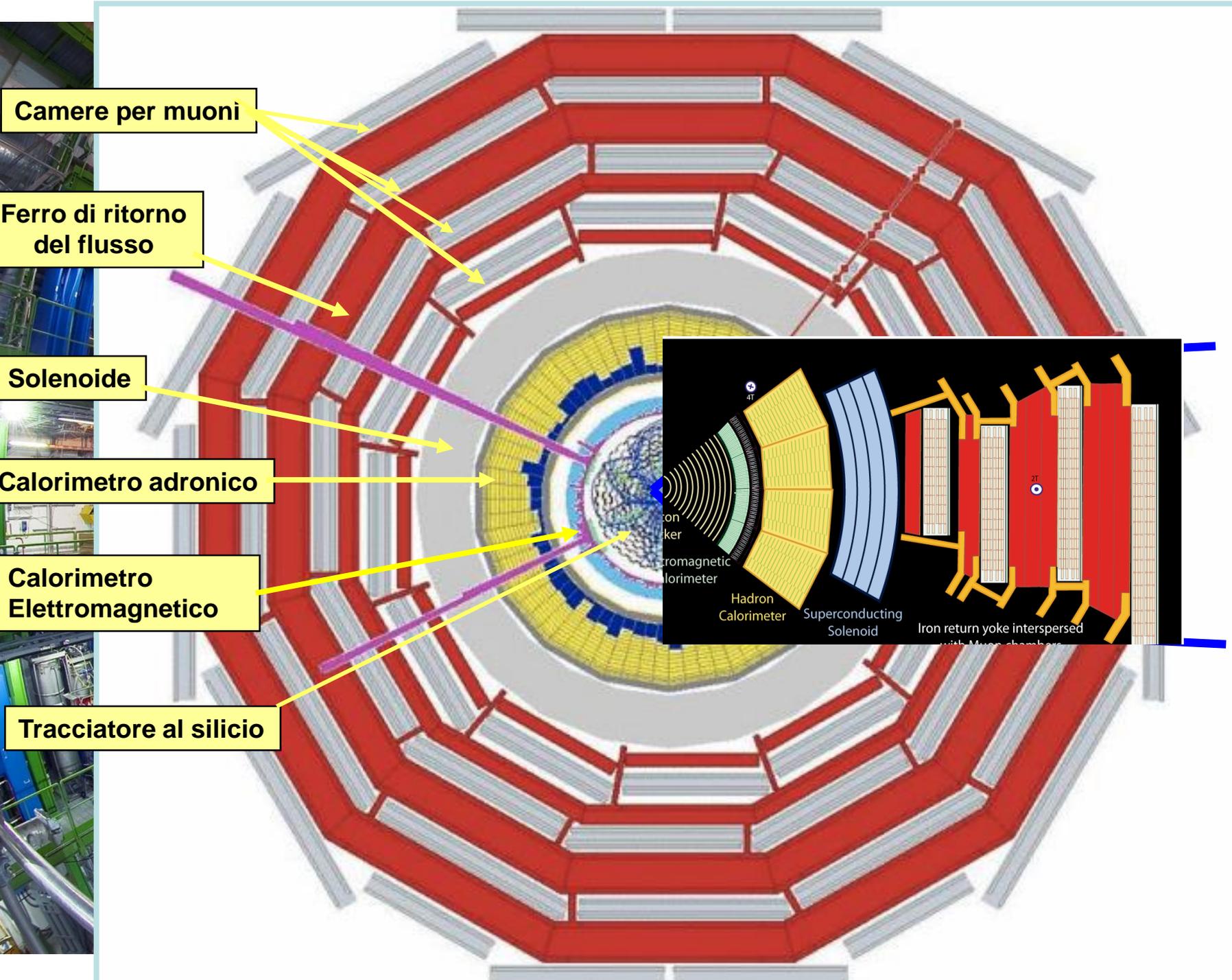
$m_H = 125.7 \pm 0.3_{\text{stat}} \pm 0.3_{\text{sys}} \text{ GeV}$

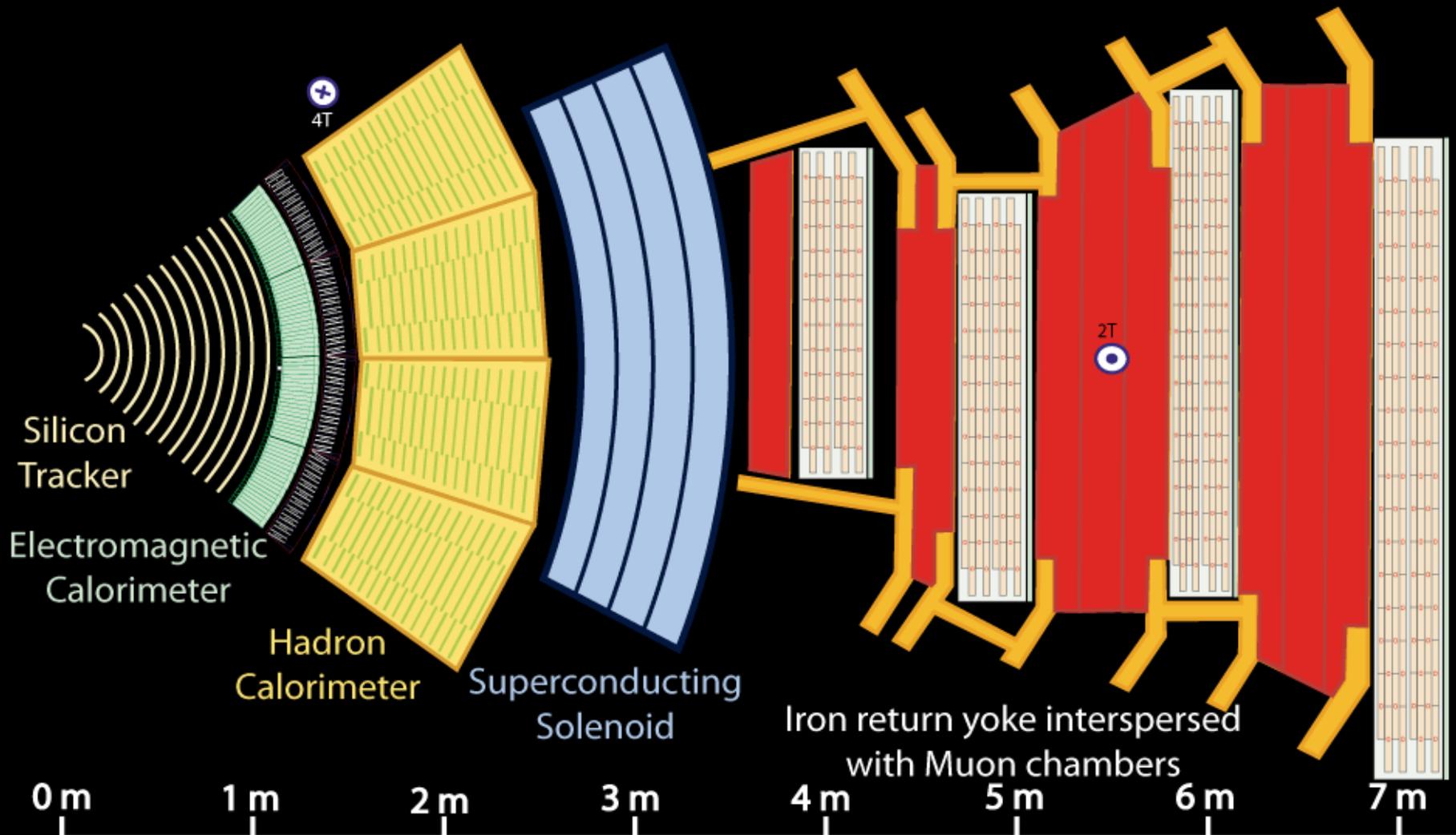
# L'Universo è in espansione:

Hubble (1929): les galassie si allontanano con una velocità tanto maggiore quanto maggiore è la loro distanza ( $H_0=74.2\pm 3.6$  Km/sec · Mpc).



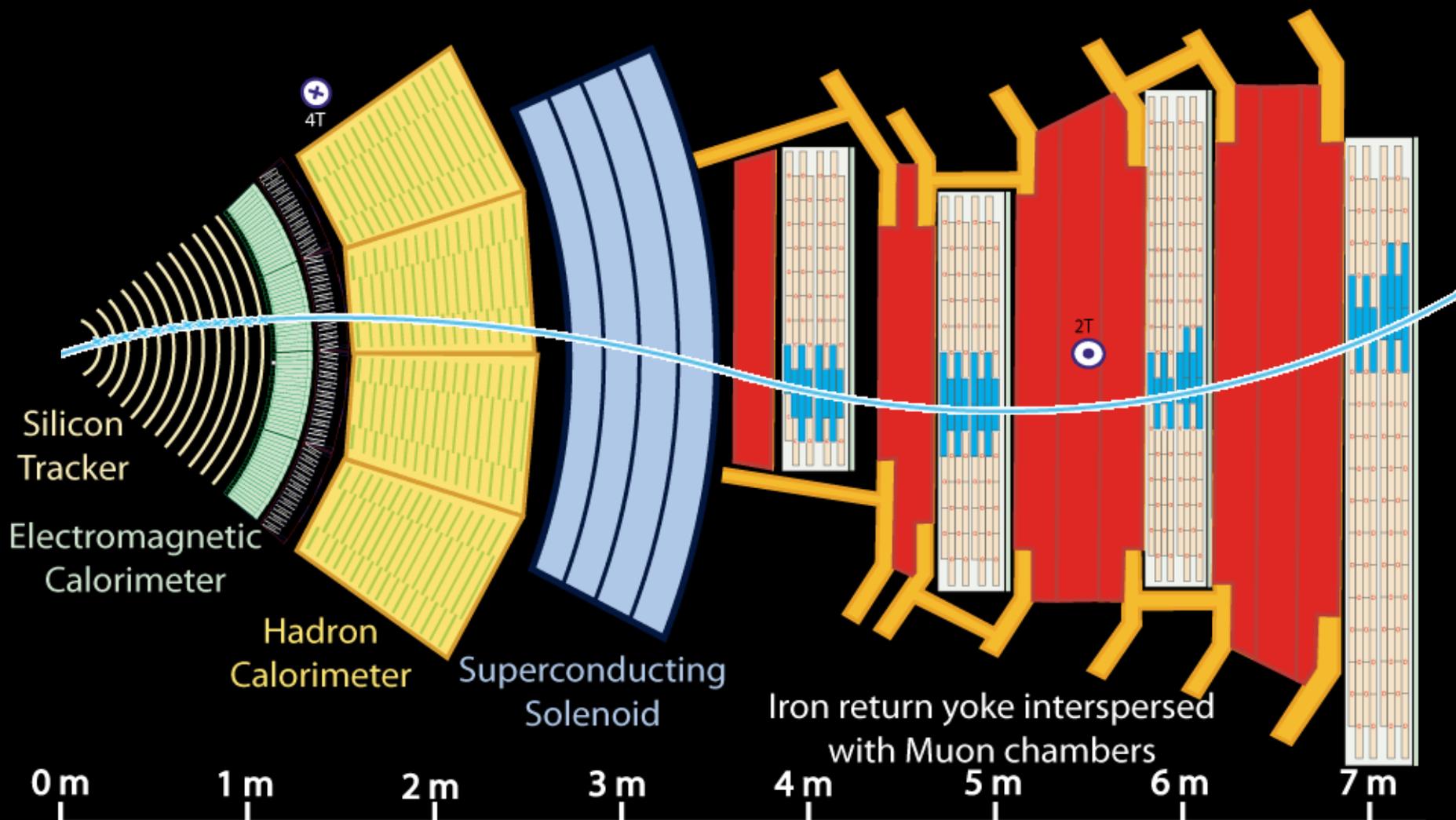
L'Universo si espande come fosse il risultato di una gigantesca esplosione: il **Big Bang**.  
Espandendosi la densità di energia diminuisce, cioè **l'Universo si raffredda**.  
La velocità di espansione cresce nel tempo ( $H_t$ ), cioè **l'espansione è accelerata!**





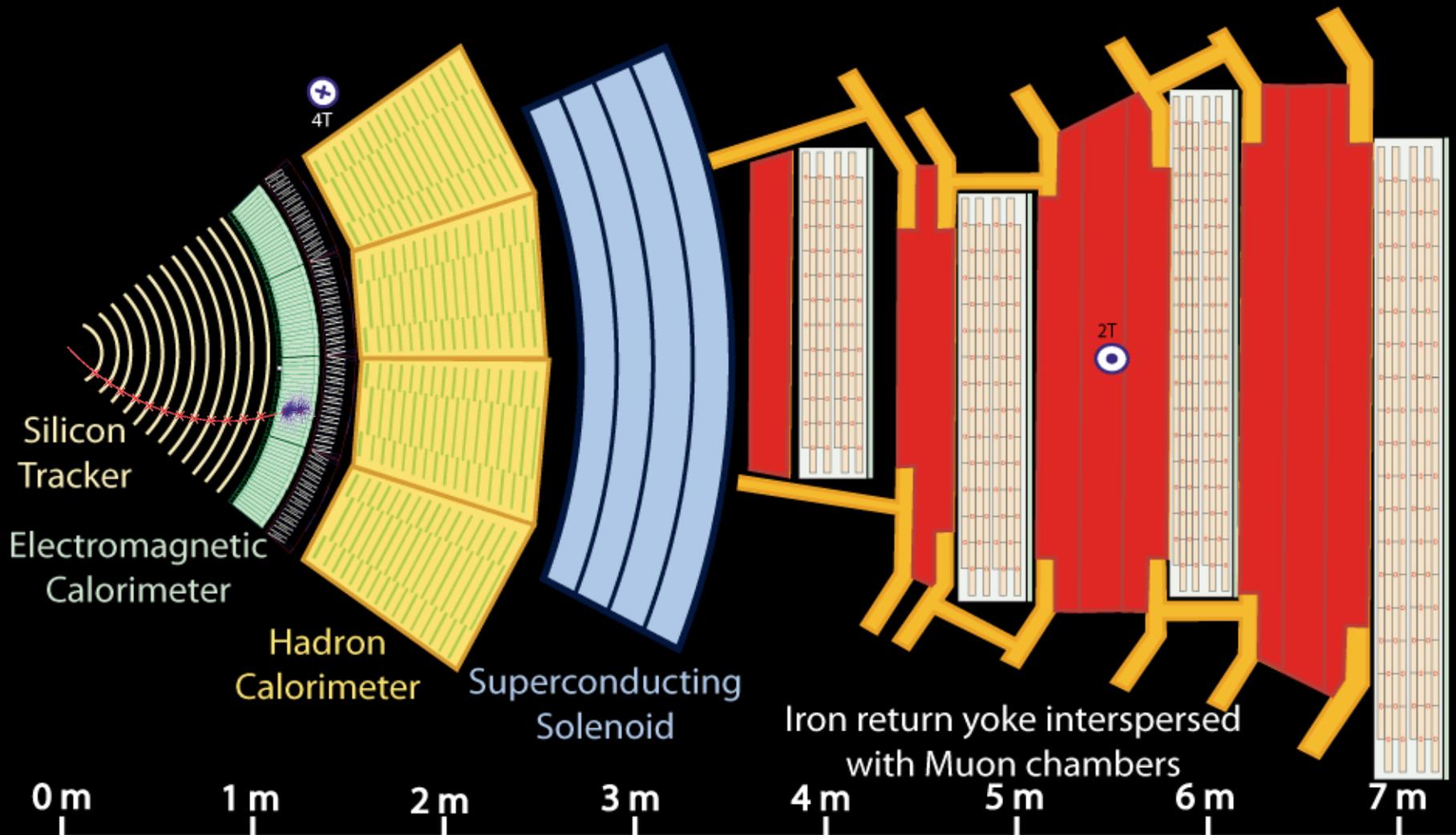
Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

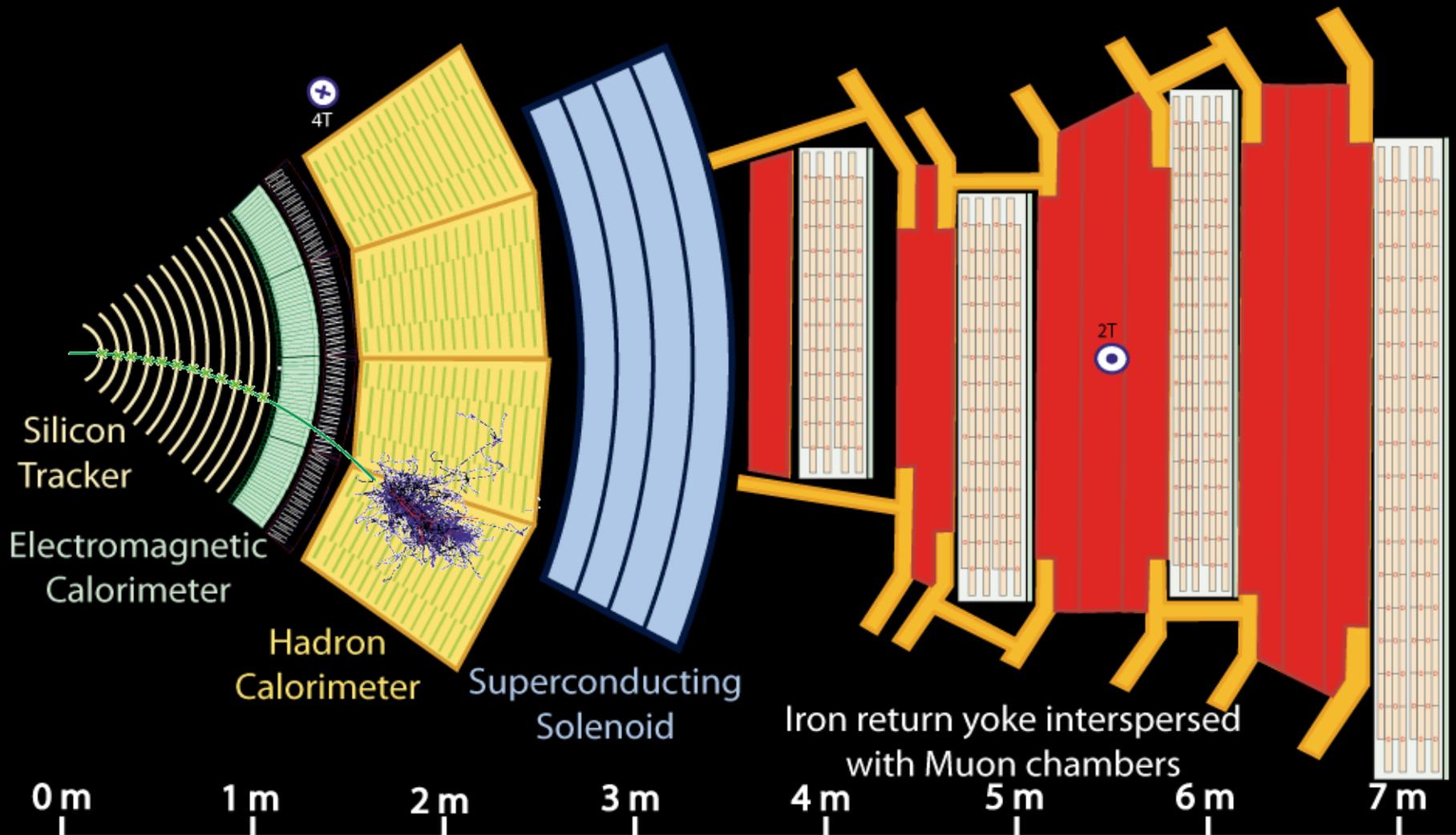
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

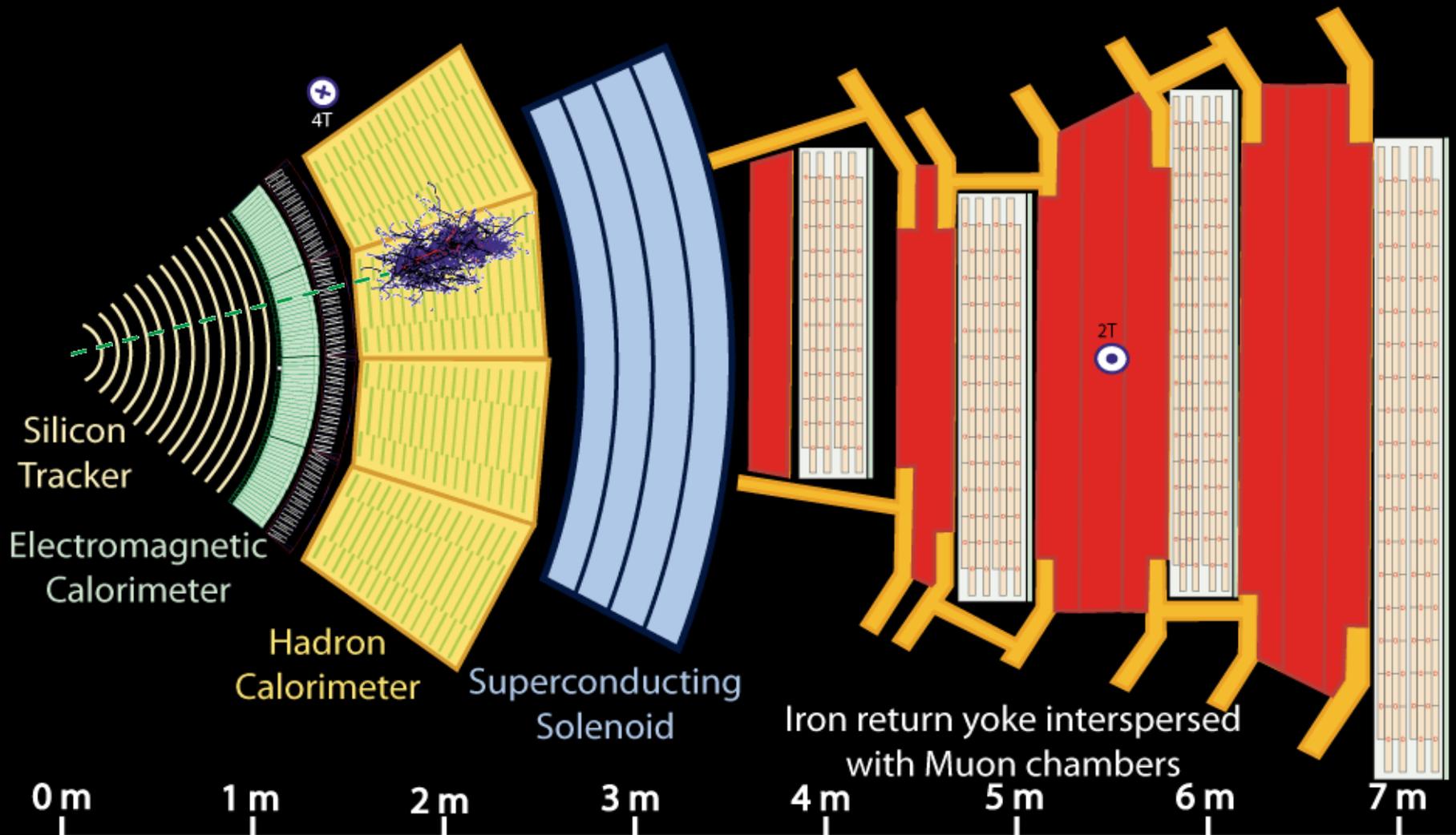
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon



Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon



Key:

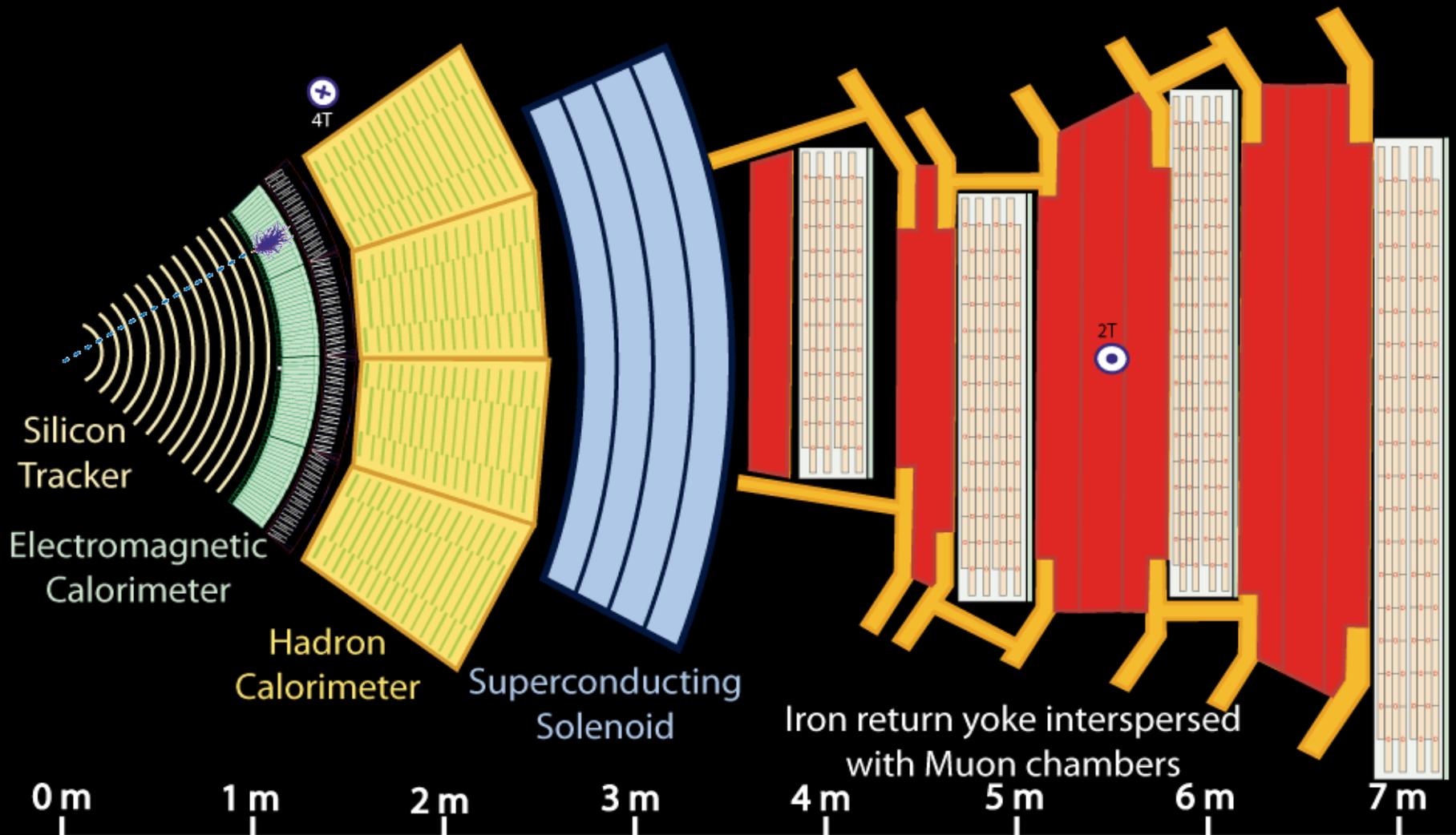
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)

- - - Photon

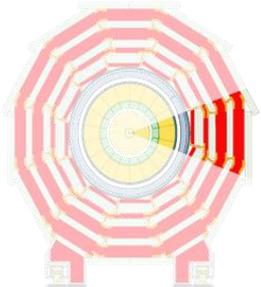


Key:

- Muon
- Electron
- Charged Hadron (e.g. Pion)
- - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
- - - Photon

# Sezione trasversale di CMS

- Muone
- Elettrone
- Adrone carico ( es: protone, pione,..)
- ..... Adrone neutro (es: neutrone)
- ..... Fotone



Transverse slice through CMS

4T

Tracciatore al silicio

Calorimetro elettromagnetico

Calorimetro adronico

Solenioide superconduttore

Ferro  
Camere per muoni

2T



# Unità di misura

## ● Energia



## ● Multipli di 1 eV *keV, MeV, GeV, TeV*

(  $10^3$ ,  $10^6$ ,  $10^9$ ,  $10^{12}$  )

mille      milione      miliardo      mille-miliardi

## ● Energia di una particella

■ Relatività  $E = mc^2$ ;  $m = \gamma * m_0$

$$\gamma = 1/\sqrt{1 - \beta^2}; \quad \beta = v/c$$

■ Elettrone  $m_0 = 9.11 * 10^{-31} \text{ kg}$ ;  $0.51 \text{ MeV}$

■ Protone  $m_0 = 1.67 * 10^{-27} \text{ kg}$ ;  $0.94 \text{ GeV}$

# Ordini di grandezza

1 eV è una piccola energia .  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$



$$m_{\text{bee}} = 2\text{g} = 3.6 \cdot 10^{32} \text{ eV}/c^2$$

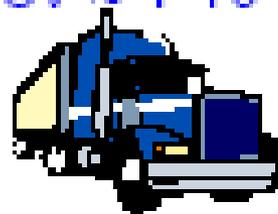
$$v_{\text{bee}} = 1\text{m/s} \rightarrow E_{\text{bee}} = 10^{-3} \text{ J} = 6.25 \cdot 10^{15} \text{ eV}$$

$$E_{\text{LHC}} = 14 \cdot 10^{12} \text{ eV}$$

In LHC il singolo protone avrà un'energia mille volte inferiore alla energia cinetica della nostra ape; ma protoni con questa energia ce ne saranno ben  $10^{14}$ , quindi l'energia immagazzinata nei fasci di LHC sarà:

$$10^{14} \text{ protons} * 14 \cdot 10^{12} \text{ eV} \approx 1 \cdot 10^8 \text{ J}$$

this corresponds to a



$$m_{\text{truck}} = 100 \text{ T}$$

$$v_{\text{truck}} = 120 \text{ km/h}$$

# Energia dei protoni in LHC

In LHC si vogliono accelerare protoni fino a 7 TeV

Immaginiamo di voler usare batterie di macchina a 12 V e di accelerare il nostro protone facendolo passare da un capo all'altro delle batterie. Ad ogni passaggio il protone guadagna una energia di

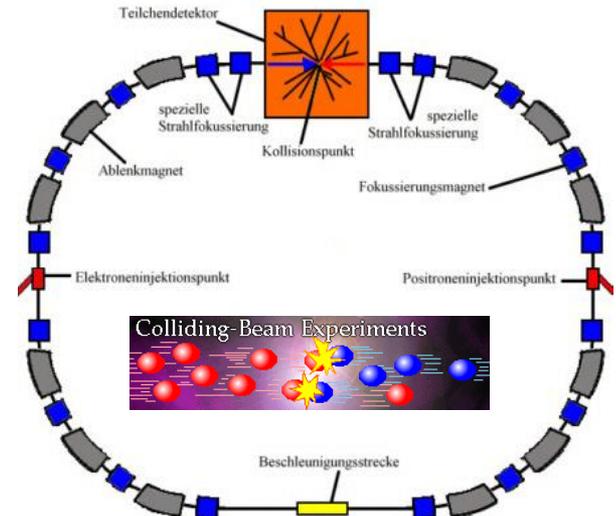
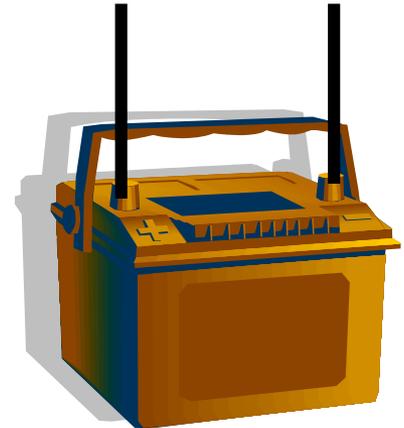
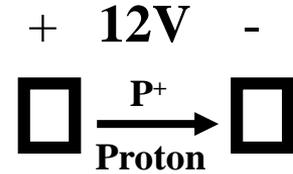
$$E = q \cdot \Delta V = 1 \cdot 12 = 12 \text{ eV}$$

Abbiamo visto che

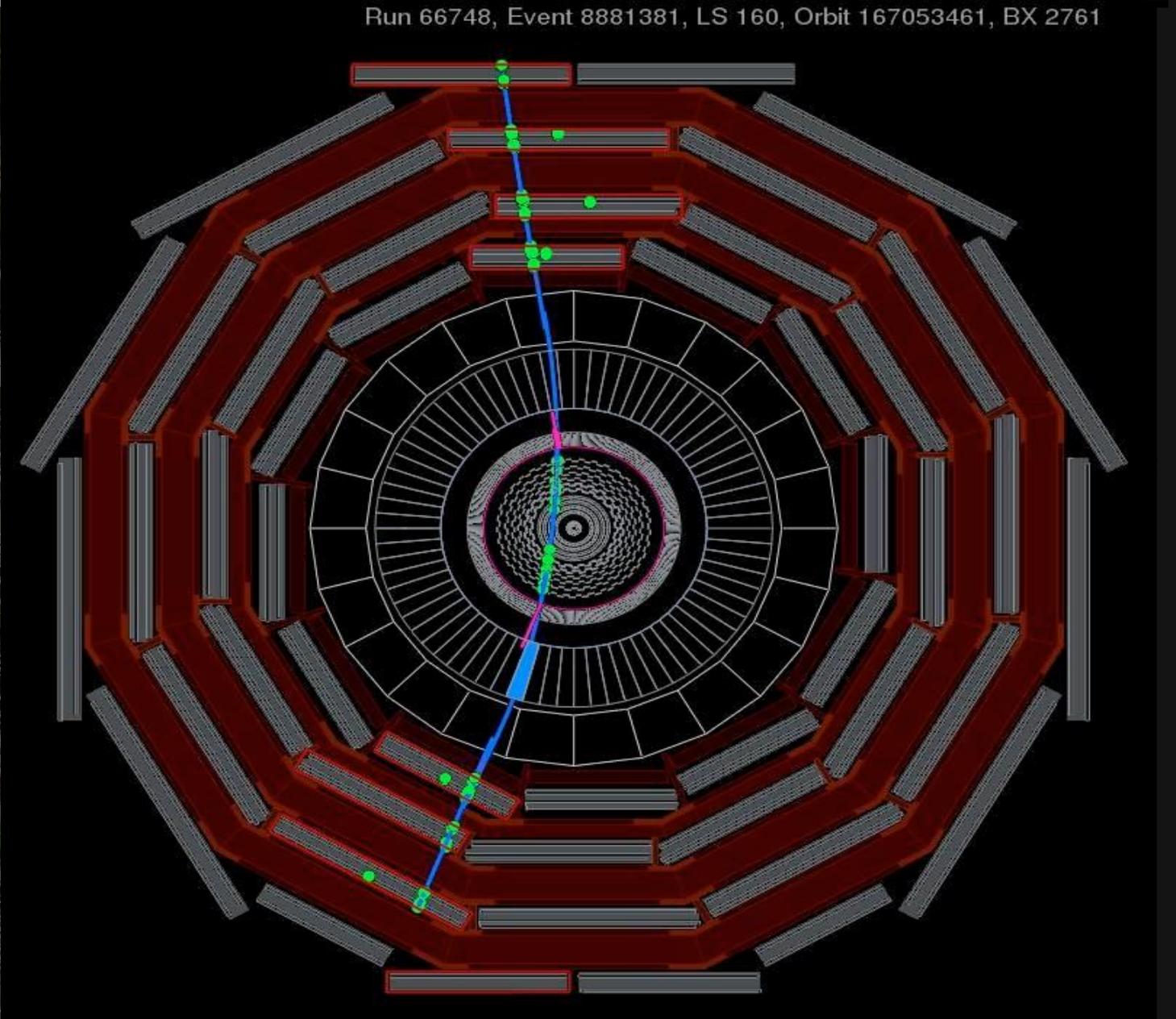
1 TeV =  $10^{12}$  eV = mille miliardi di electron volts

Per accelerare i protoni di LHC ci vorrebbero quindi ben 583 miliardi di batterie una dietro l'altra....

Naturalmente non è così che si accelerano protoni (o elettroni) a queste energie, ma si utilizzano grandi macchine acceleratrici

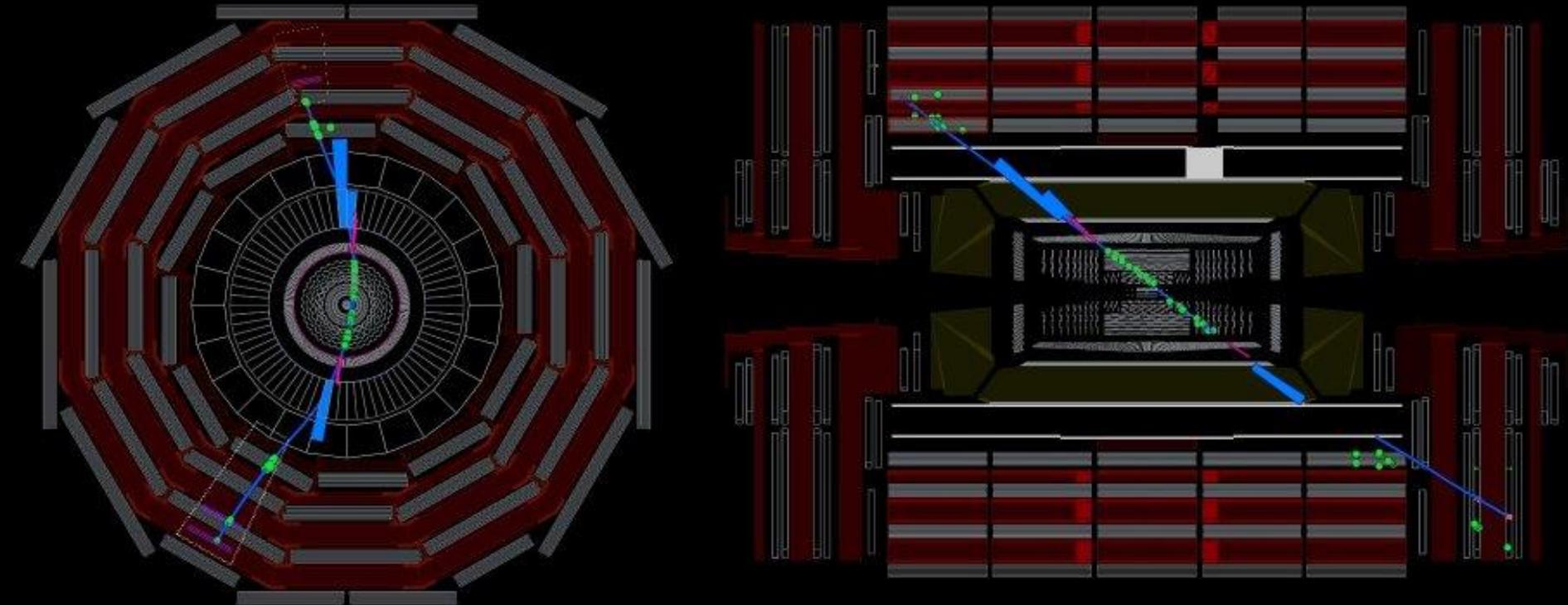


**Macchina fotografica digitale di 12500 tonnellate con migliaia di milioni di pixels fotografa il passaggio di un raggio cosmico ( $\mu^\pm$ )**



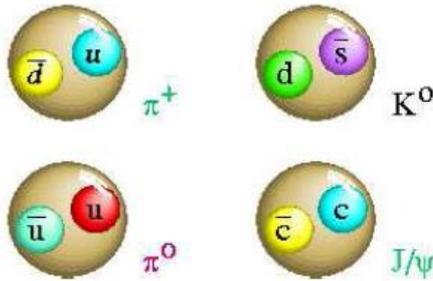
# Raggio cosmico ( $\mu^+$ ) come ricostruito da CMS nelle due viste trasversale e longitudinale

Run 66748, Event 8900172, LS 160, Orbit 167345832, BX 2011

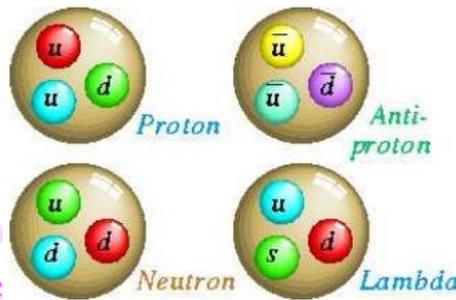


# Lo zoo delle particelle

## Mesoni ( $q_1 q_2^{bar}$ )



## Barioni ( $q_1 q_2 q_3$ )



## Leptoni

0	$\nu_e$ 1/2 <2.2 eV	$\nu_\mu$ 1/2 <0.17 MeV	$\nu_\tau$ 1/2 <15.5 MeV	Leptons
q=-1	e $s=1/2$ me=0.511 MeV	$\mu$ 1/2 105.7 MeV	$\tau$ 1/2 1.77 GeV	

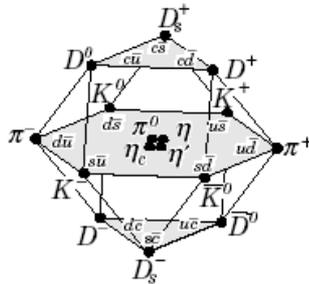
SU(4):  $u, d, s, c$

(L=0)

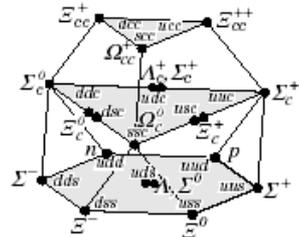
SU(4):  $u, d, s, c$

(L=0)

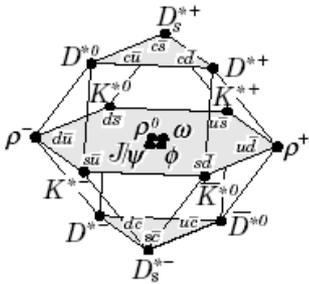
J=0



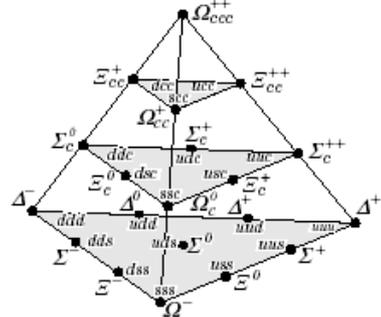
J=1/2



J=1

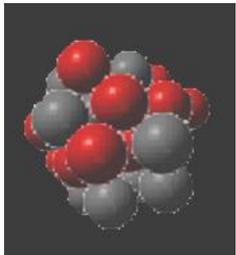


J=3/2



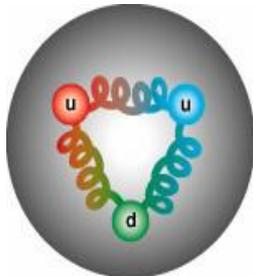
Si conoscono più di 200 particelle, la stragrande maggioranza sono instabili e decadono in tempi brevissimi, altre vivono abbastanza a lungo da poter essere rivelate direttamente.

# Le interazioni fondamentali tra particelle



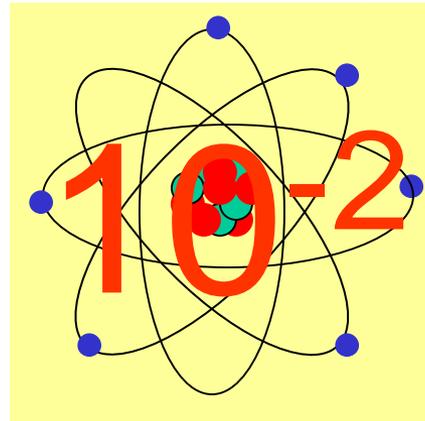
nucleo

1



protone

**Forza forte**  
**g** (Gluone)



atomo

**Forza elettromagnetica**  
 **$\gamma$**  (Fotone)



**Forza gravitazionale**  
(Gravitone)

Radioattività Beta

nucleo

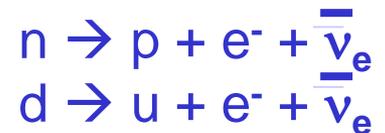


**10<sup>-5</sup>**

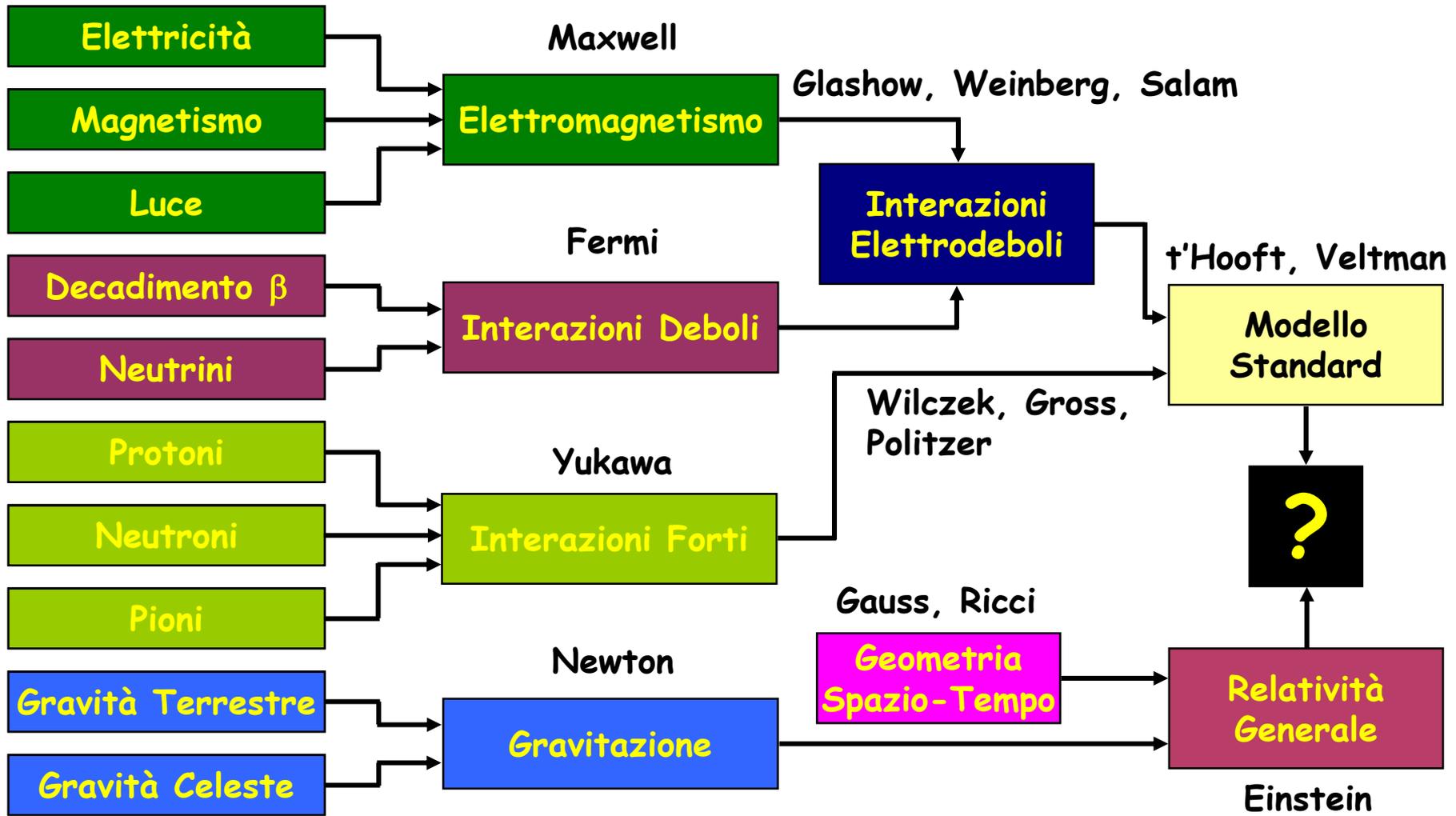
elettrone

$\bar{\nu}_e$

**Forza debole**  
**Z, W<sup>±</sup>**  
(Bosoni)



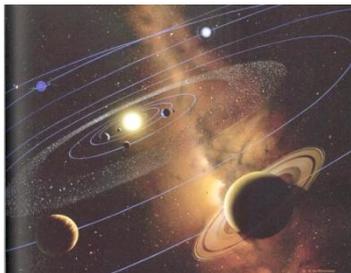
# L'Unificazione delle Forze



# La Gravità

- La forza gravitazionale è la forza che ci è più familiare e con la quale il nostro corpo interagisce continuamente, stando seduti camminando, correndo, andando in macchina insomma in ogni aspetto della nostra vita....  
....ma è anche di gran lunga la più debole tra le interazioni che conosciamo.

- Gli effetti dell'interazione gravitazionale, essendo così deboli rispetto alle altre interazioni, sono del tutto trascurabili nei processi tra singole particelle. A livello macroscopico produce effetti molto grandi perché gli effetti dovuti alla massa di ogni particella si sommano e non c'è cancellazione come avviene tra cariche opposte per le cariche elettriche negli atomi.



Newton

Gravitazione

Gauss, Ricci

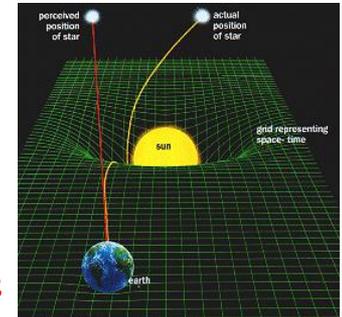
Geometria Spazio-Tempo

Einstein

Relatività Generale

- Non è stata ancora trovata una descrizione soddisfacente a livello quantistico della interazione gravitazionale.

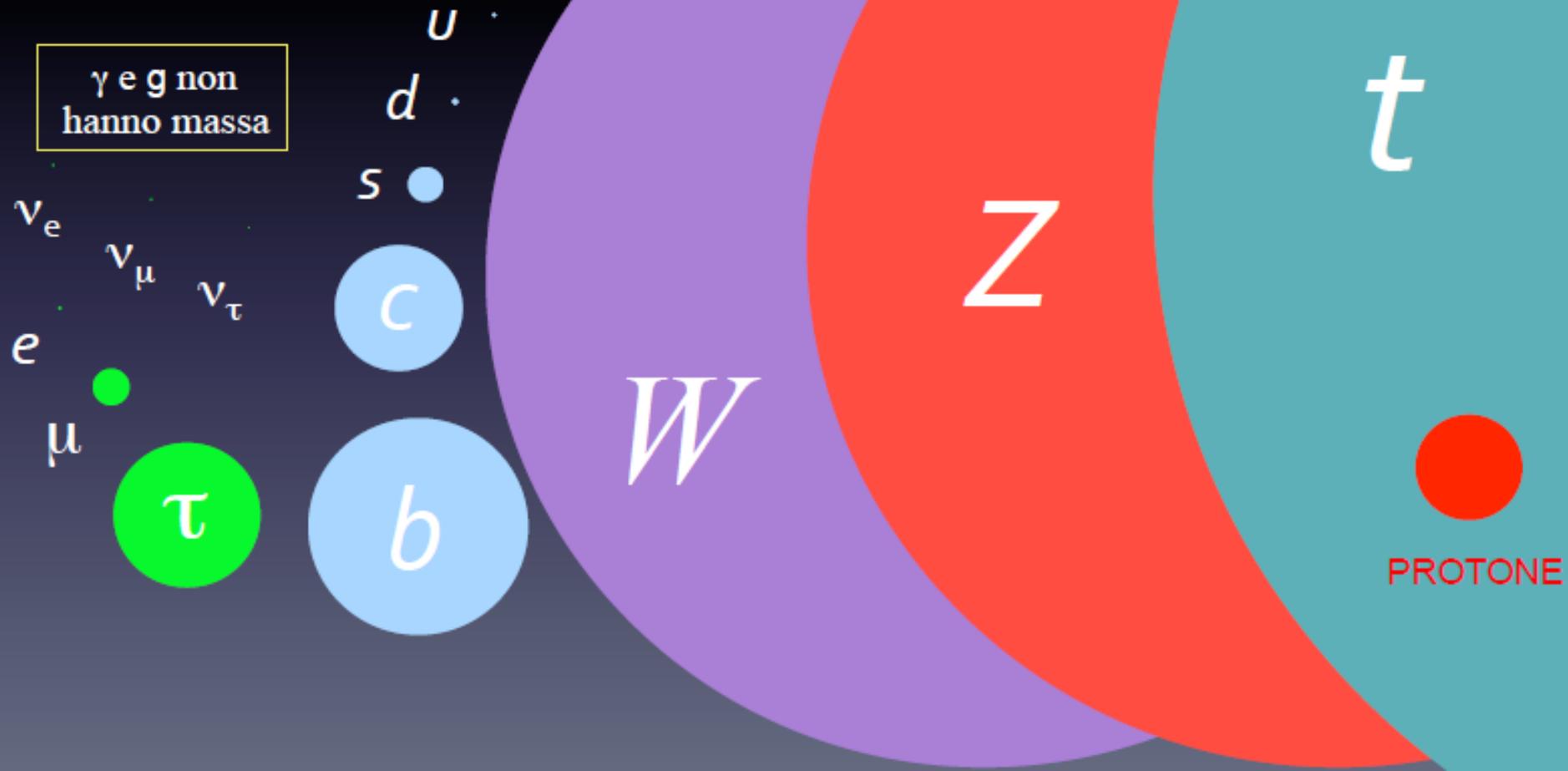
**Nelle interazioni tra particelle è trascurabile**



# Il problema della massa

Non c'è una spiegazione della massa delle particelle.

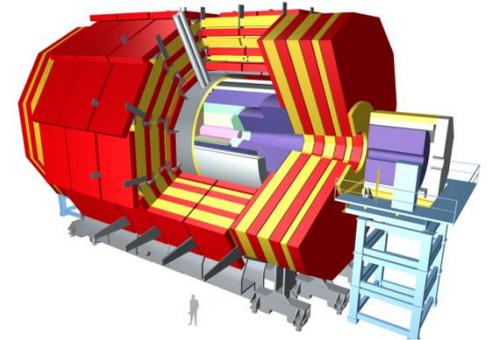
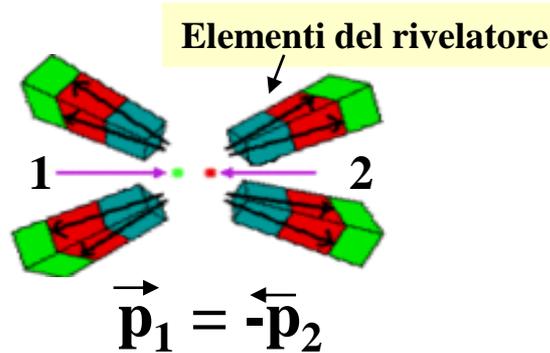
Eppure le particelle hanno una massa, che è enormemente diversa fra loro!



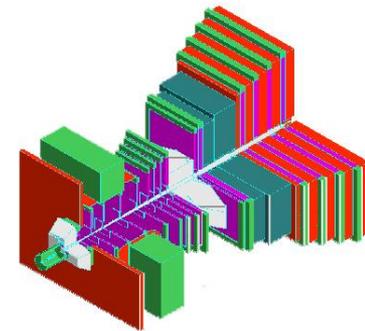
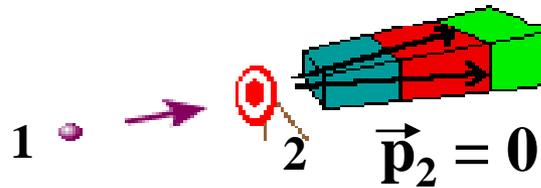
# Rivelare le particelle



$$E_{\text{CM}} = 2E_{\text{beam}}$$



$$E_{\text{CM}} = \sqrt{2E_{\text{beam}}m_{\text{target}}}$$

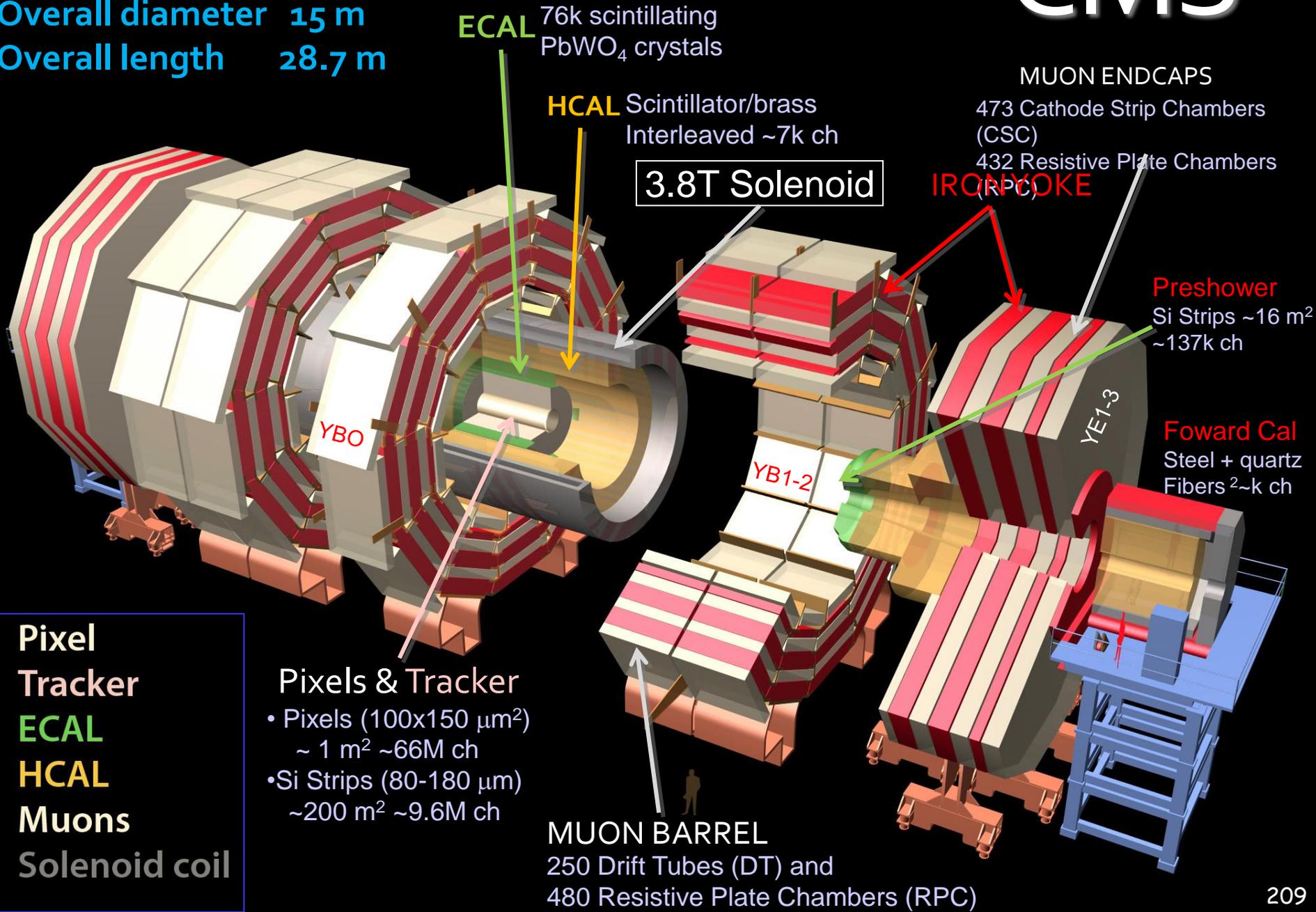


Goal : misurare tutte le particelle prodotte nello scontro

⇒ Circondare il punto di interazione con rivelatori di particelle

# CMS

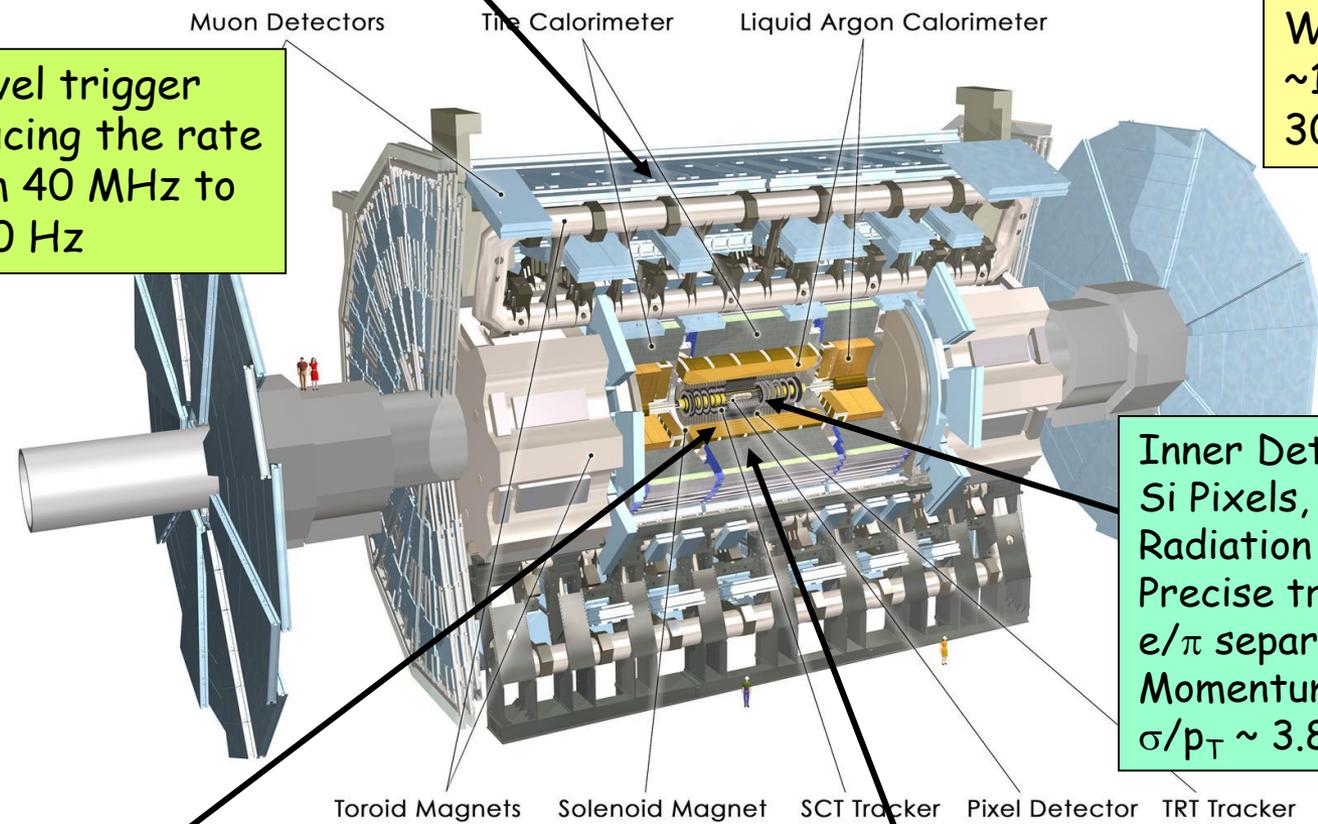
Total weight 14000 t  
Overall diameter 15 m  
Overall length 28.7 m



Muon Spectrometer ( $|\eta| < 2.7$ ): air-core toroids with gas-based muon chambers  
 Muon trigger and measurement with momentum resolution  $< 10\%$  up to  $E_\mu \sim 1$  TeV

Length :  $\sim 46$  m  
 Radius :  $\sim 12$  m  
 Weight :  $\sim 7000$  tons  
 $\sim 10^8$  electronic channels  
 3000 km of cables

3-level trigger  
 reducing the rate  
 from 40 MHz to  
 $\sim 200$  Hz



Inner Detector ( $|\eta| < 2.5, B=2T$ ):  
 Si Pixels, Si strips, Transition  
 Radiation detector (straws)  
 Precise tracking and vertexing,  
 $e/\pi$  separation  
 Momentum resolution:  
 $\sigma/p_T \sim 3.8 \times 10^{-4} p_T (\text{GeV}) \oplus 0.015$

EM calorimeter: Pb-LAr Accordion  
 $e/\gamma$  trigger, identification and measurement  
 E-resolution:  $\sigma/E \sim 10\%/\sqrt{E}$

HAD calorimetry ( $|\eta| < 5$ ): segmentation, hermeticity  
 Fe/scintillator Tiles (central), Cu/W-LAr (fwd)  
 Trigger and measurement of jets and missing  $E_T$   
 E-resolution:  $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$