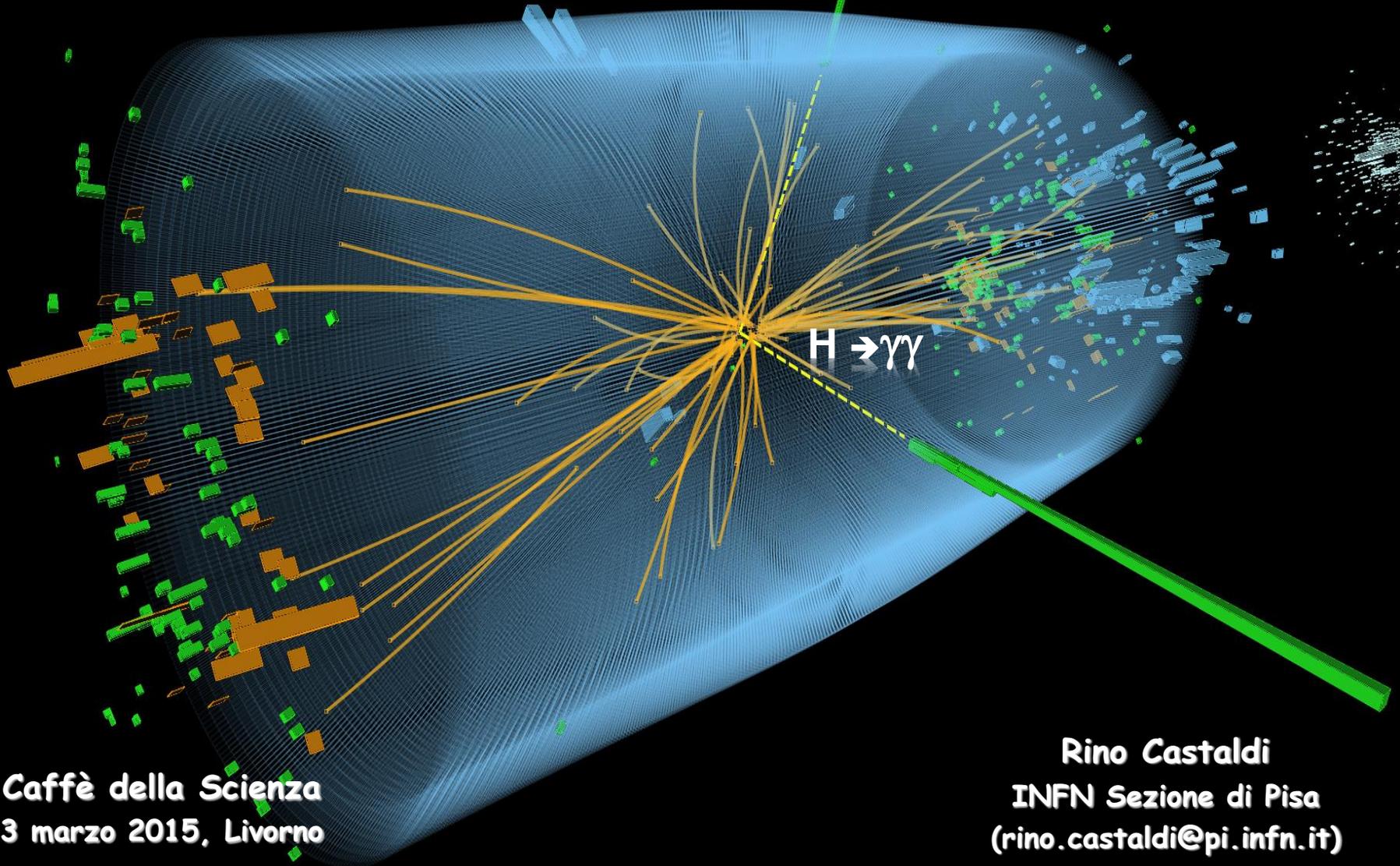


Dalla scoperta dei neutroni lenti alla scoperta del Bosone di Higgs

(La lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico)



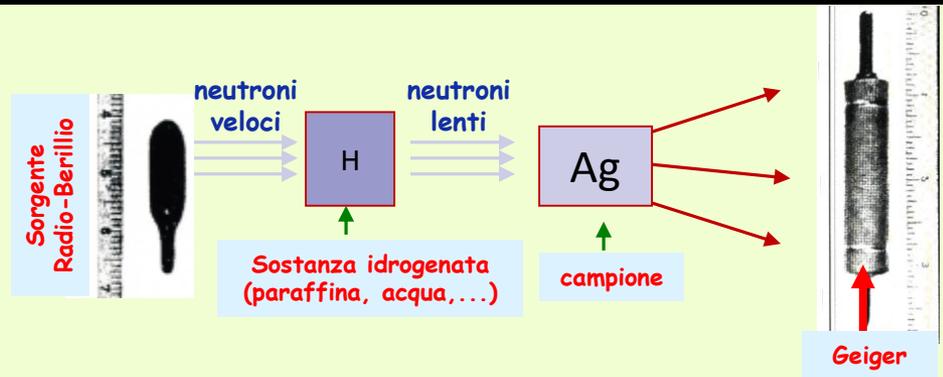
Caffè della Scienza
3 marzo 2015, Livorno

Rino Castaldi
INFN Sezione di Pisa
(rino.castaldi@pi.infn.it)

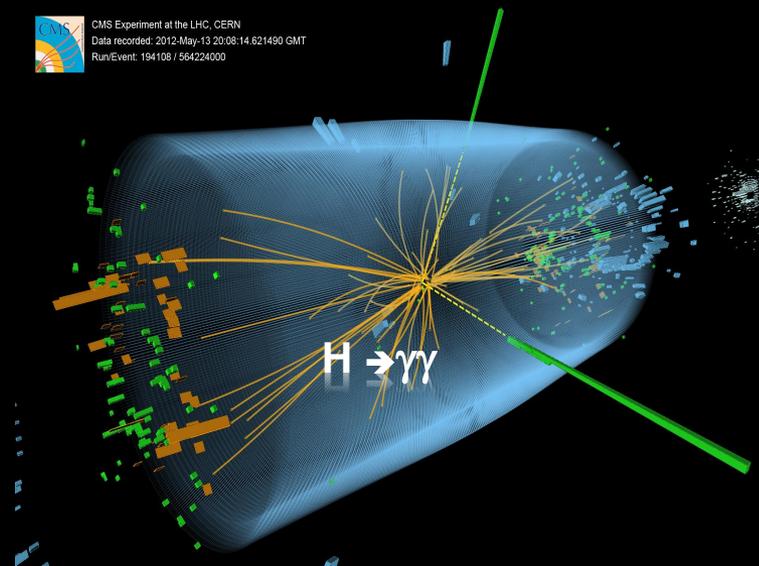
Un viaggio di 80 anni nel mondo subatomico per conoscere la struttura della materia e le leggi che la governano.



D'Agostino,
Segré,
Amaldi,
Rasetti,
Fermi,
Pontecorvo



CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 584224000



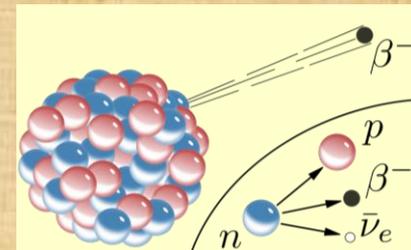
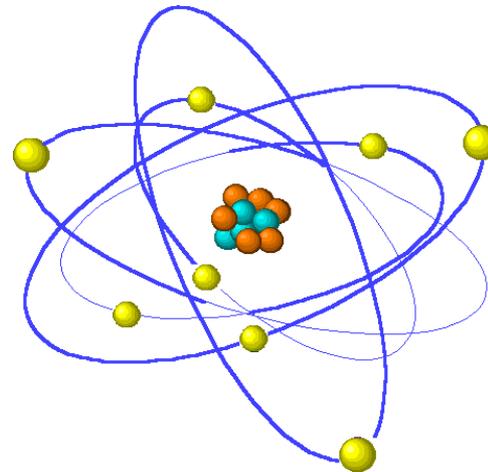
1934: Quali sono le conoscenze che il gruppo di via Panisperna ha del mondo sub-atomico?

Da poco, nel 1932, è stato scoperto il neutrone (J.Chadwick).
Nell'ottobre del 1933 Fermi partecipa al settimo Congresso Solvay. Sono presenti tutti i più importanti fisici sperimentali e teorici del momento.
Due mesi dopo Fermi formula la sua teoria del decadimento β
Il modello del nucleo composto da protoni e neutroni viene ben stabilito.



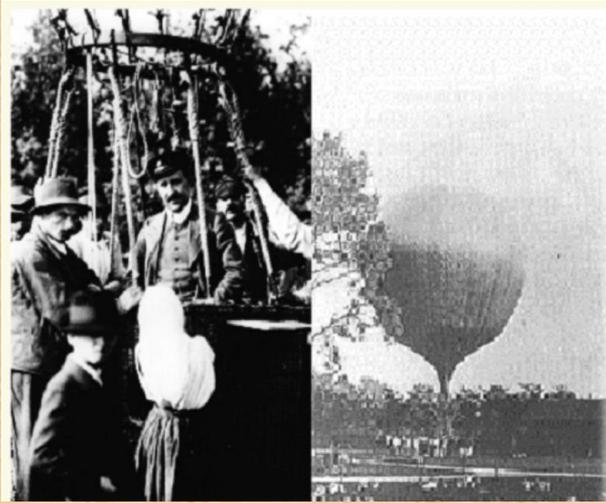
<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Solvay1933Large.jpg>

Nel 1934 si sa quindi che la materia è costituita da protoni e neutroni a formare il nucleo, da elettroni che orbitano intorno al nucleo a formare gli atomi e poi ci sono neutrini.



Oltre la materia ordinaria...

scoperta con i Raggi Cosmici

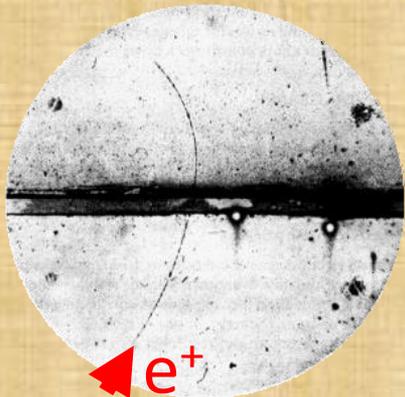


Victor Hess nel 1912 scopre con esperimenti ad alta quota i raggi cosmici

I raggi cosmici primari producono sciame di particelle nell'atmosfera



Sulla superficie della Terra :~ 1/sec/dm²

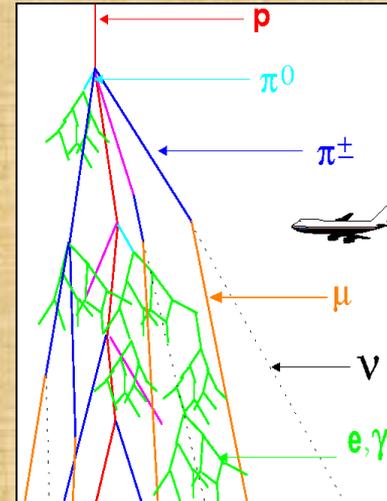


1932- Anderson scopre il positrone



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

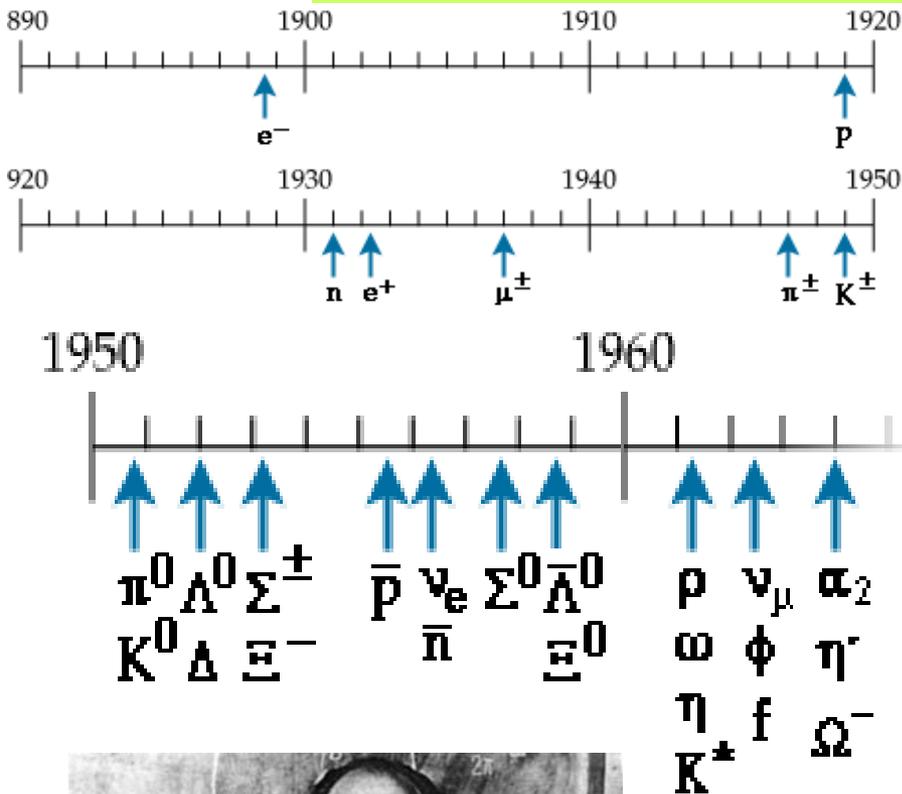
1937-Anderson & Neddermeyer scoprono il mesotrone (muone)



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 Δ (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)

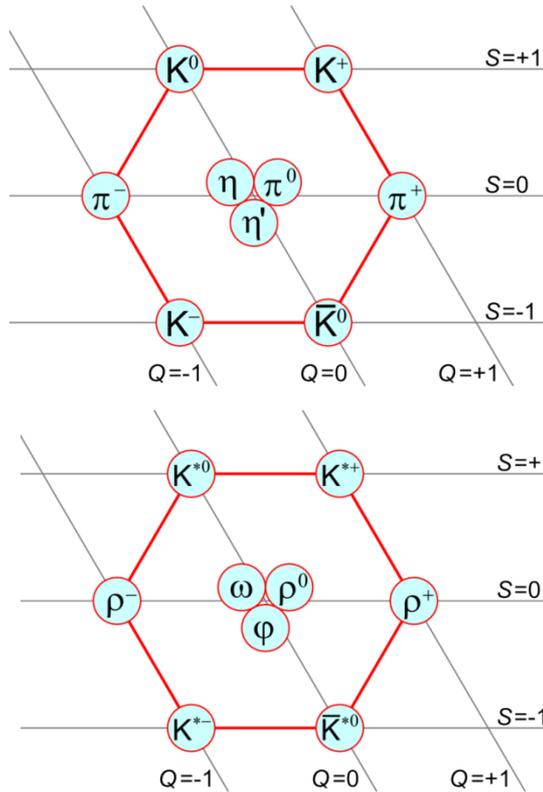
Nel 1964 per mettere ordine nello zoo delle particelle fino ad allora scoperte, Gell-Mann (e Zweig) intuisce l'esistenza di una struttura di simmetria (SU(3)), ipotizzando l'esistenza di tre particelle che chiamò quark.

- 1964, scoperta dello Ω^-

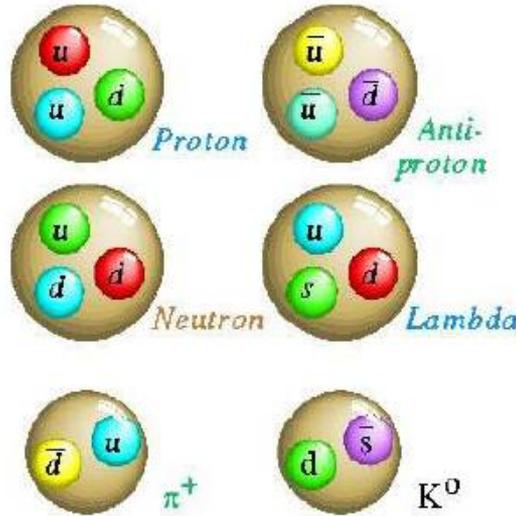
L'ipotesi dei quark

("The 8-fold way")

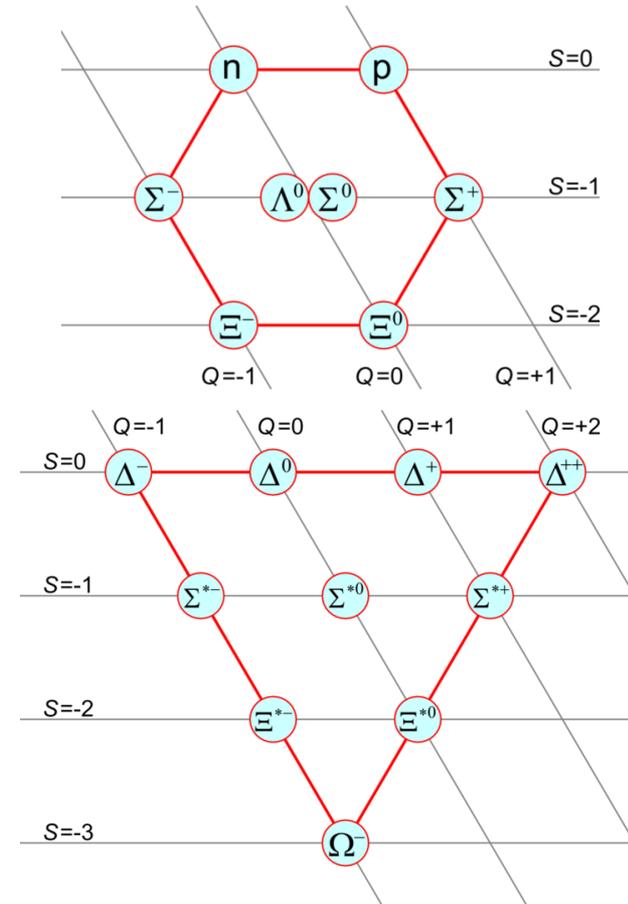
Mesoni ($q_1 q_2^{\text{bar}}$)



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 (Ω^-), rimane per molti un artificio matematico fino al 1974.

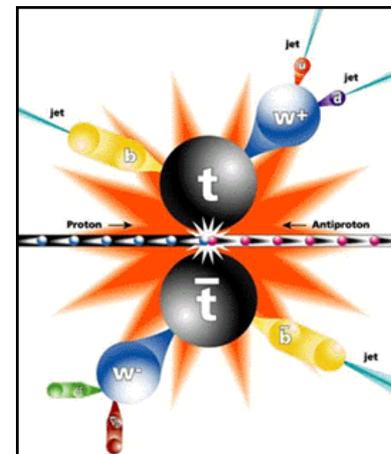
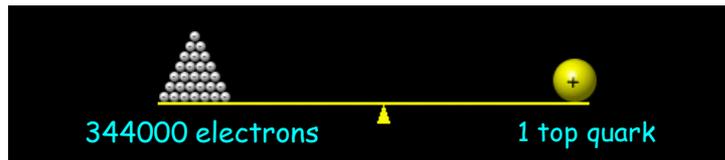
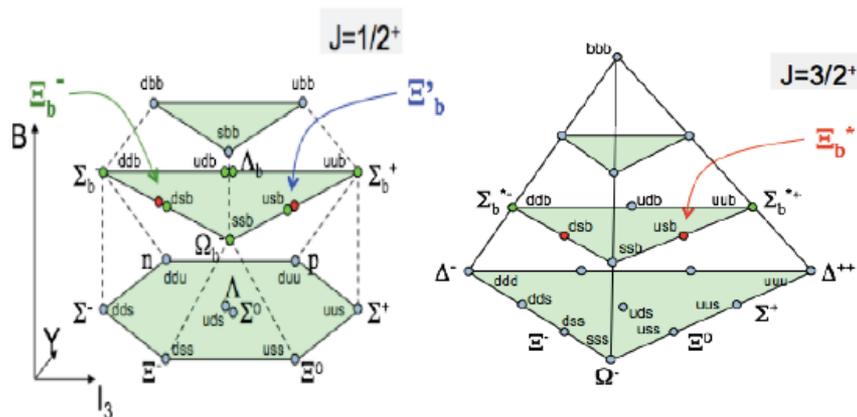
NO! i quark sono sei

La scoperta della J/ψ nel 1974 viene interpretata come uno stato legato charm-anticharm e toglie ogni dubbio sull'esistenza dei quark. Il modello a quark prende forma e per spiegare la violazione di CP nei mesoni K si prevede l'esistenza di altri due quark il Bottom e il Top.

1977: viene scoperta la particella Y da Lederman e collaboratori al FermiLab con massa 8.5 GeV che decade in due μ e che viene interpretata come lo stato legato bottom-antibottom. Negli anni successivi vengono identificati i mesoni e i barioni che contengono il quark B.

1995: finalmente anche il Top viene scoperto. La coppia top-antitop viene prodotta molto raramente in miliardi di collisioni protone antiprotone a 1.8 TeV al Tevatron di Fermilab. Il Top ha una massa molto alta (≈ 178 GeV) e decade istantaneamente in un quark bottom ed in un bosone W e risulta pertanto molto difficile da identificare.

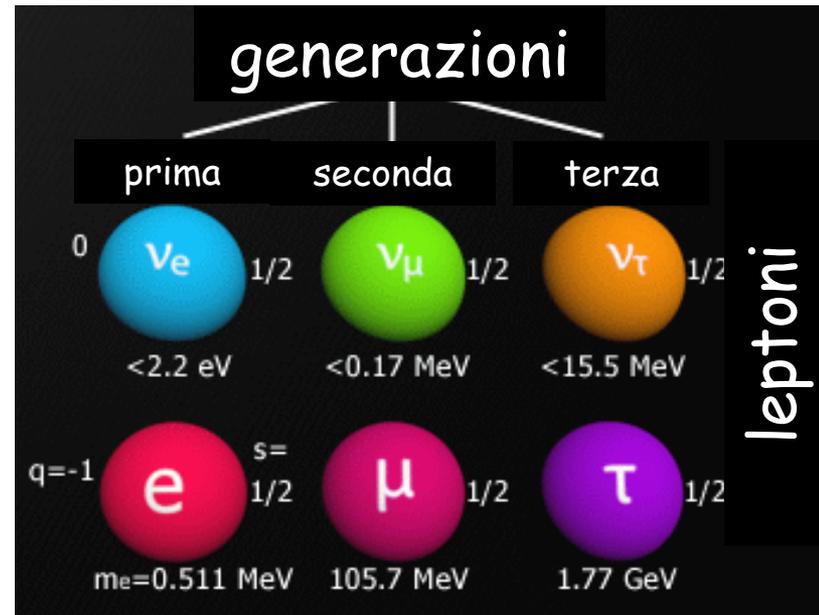
SU4 20-plets

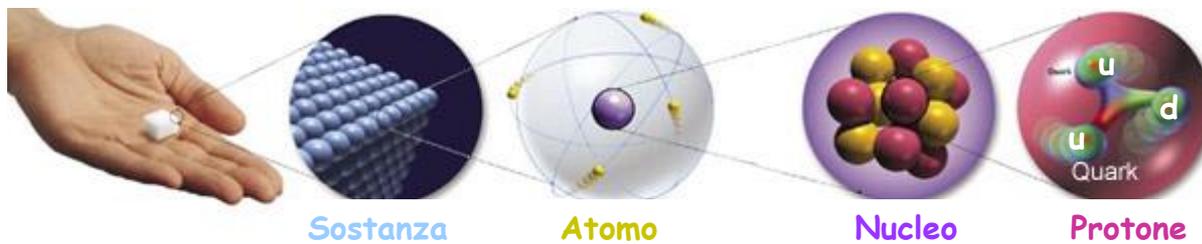


Anche i Leptoni sono sei !

(tre carichi e tre neutri)

- 1897: J.J. Thomson scopre l'elettrone, il primo leptone carico ($\lambda\epsilon\pi\tau\omicron\varsigma$: minuto. Un elettrone è circa 2000 volte più leggero del protone)
- 1930: W.Pauli ipotizza l'esistenza del neutrino elettronico per spiegare il decadimento β , scoperto sperimentalmente nel 1956.
- 1937: scoperta del muone nei raggi cosmici (C. Anderson & S. Neddermeyer)
- 1962: Si verifica sperimentalmente (Lederman, Schwartz, Steinberger) che ci sono due diversi tipi di neutrino (elettronico e muonico). Per ogni leptone carico c'è un leptone neutro (chiamato neutrino) di massa molto piccola.
- 1975: viene scoperto a SLAC il terzo leptone carico il τ . Il μ ed il τ sono repliche dell'elettrone ($m_e=0.511\text{MeV}$) con massa più grande ($m_\mu=106\text{MeV}$ e $m_\tau=1777\text{MeV}$)
- Per ragioni di simmetria si prevede l'esistenza del terzo neutrino, il neutrino τ , scoperto a FNAL nel 2000.





Riassumendo:

i costituenti fondamentali della materia sono i fermioni

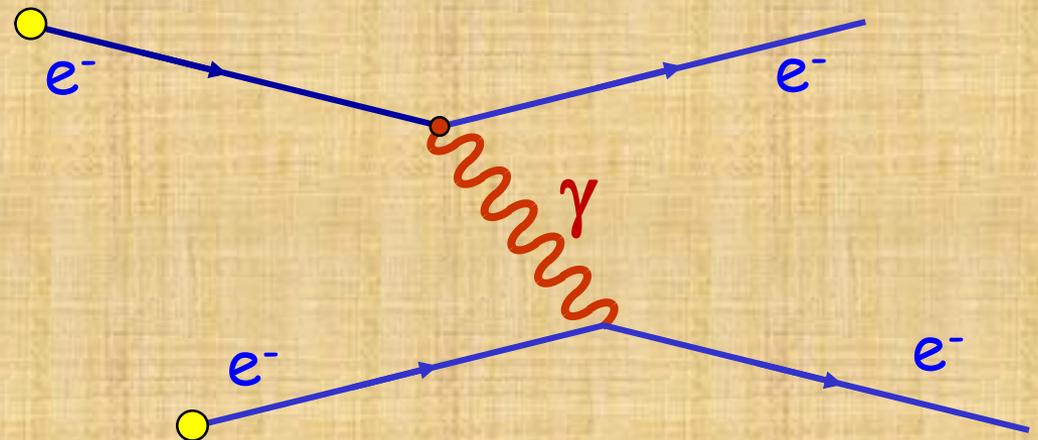
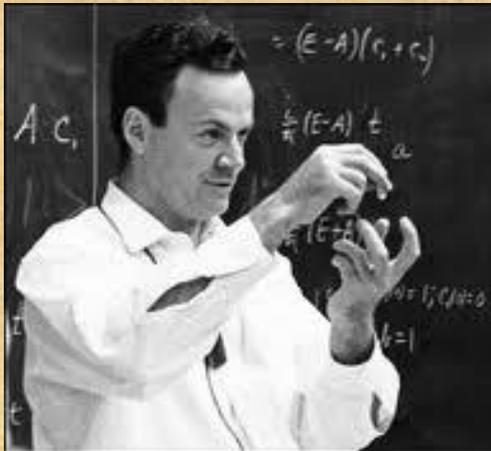
		Quarks		Leptoni	
Le generazioni di materia	I	up	down	e - neutrino	e electron
	II	charm	strange	μ - neutrino	μ muon
	III	top	bottom	τ - neutrino	τ tau

- 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) 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:

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

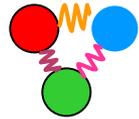
La probabilità non cambia moltiplicando la funzione d'onda per un "fattore di fase" (invarianza di gauge)

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

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

La Forza Forte: la QCD

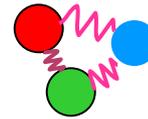
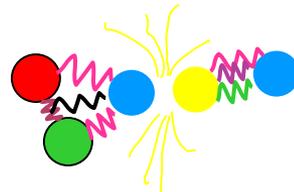
La forza forte fra i quarks decresce con il diminuire della loro distanza e all'interno degli adroni si comportano come se fossero liberi (*libertà asintotica*). Quando si cerca di allontanare i quarks tra loro la forza aumenta e obbliga i quarks a restare *confinati* all'interno degli adroni. Questo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

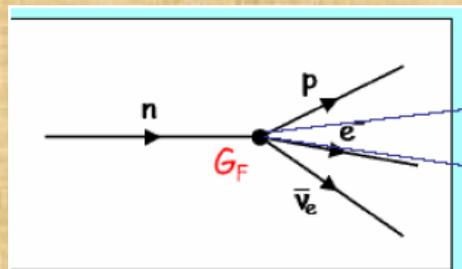
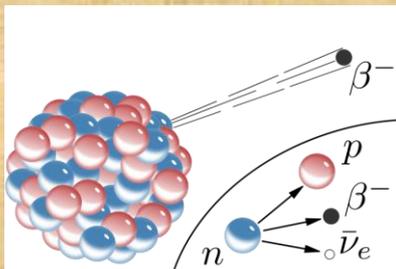


Gross, Wilczek and Politzer, nel 1974 capirono che una **teoria di gauge** era l'unica teoria di campo compatibile con una forza che godesse contemporaneamente della **libertà asintotica** e del **confinamento**:

Nasceva così la QCD !

La Forza Elettrodebole (debole+elettromagnetica)

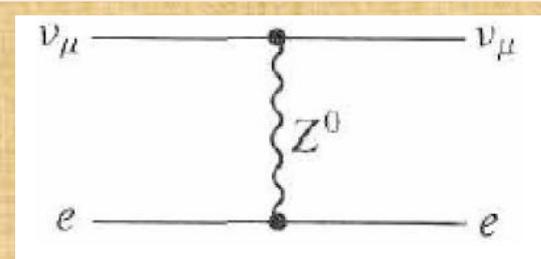
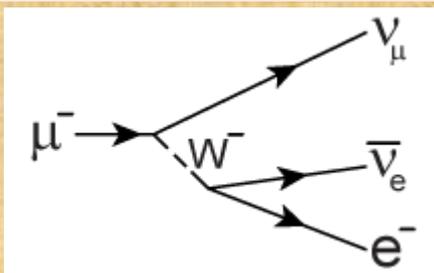
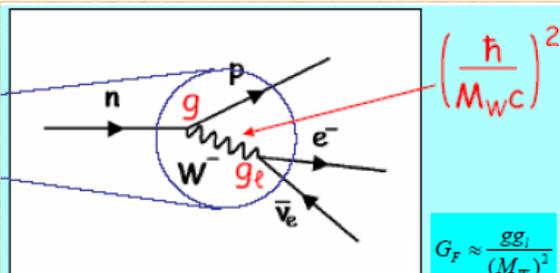
Agli inizi degli anni 60 la teoria di Fermi era ancora considerato il modello migliore per spiegare la fenomenologia delle interazioni deboli, ma non era completamente soddisfacente e ad alte energie violava l'unitarietà.



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



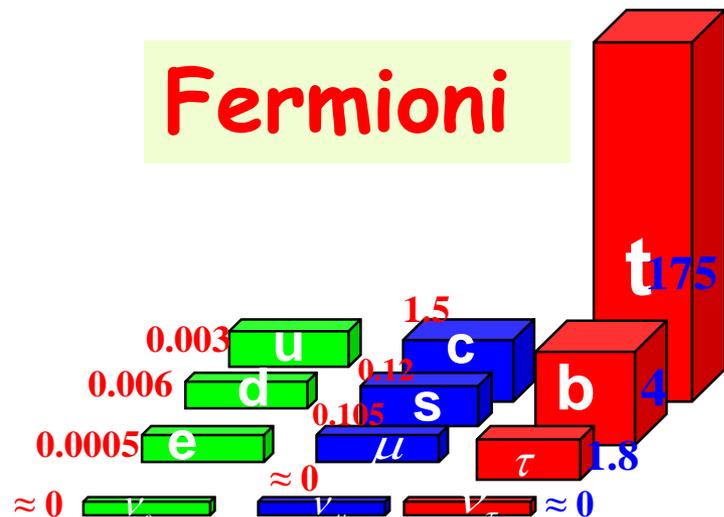
Il modello standard prende forma... ma ci sono difficoltà !

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



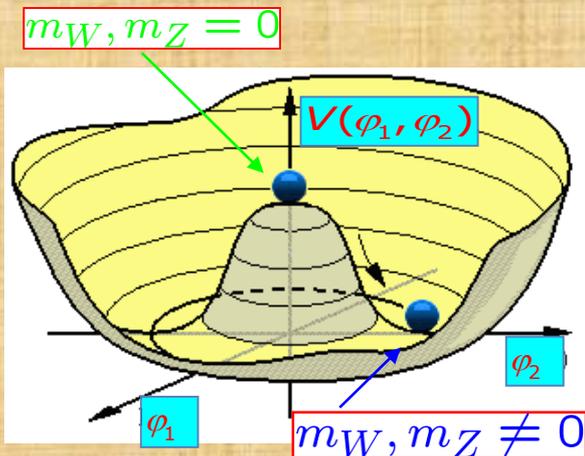
Bosoni



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:

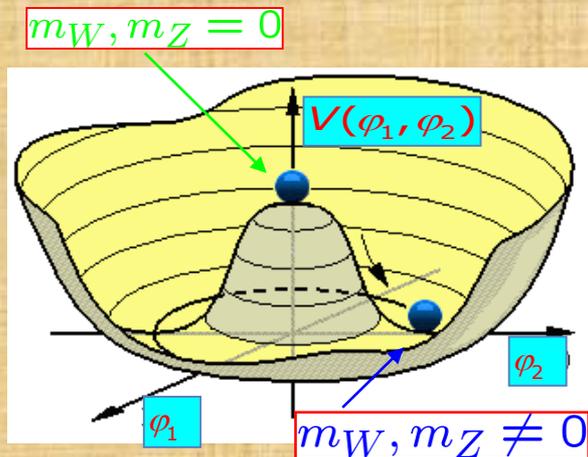
10^{-10} secondi dopo il Big Bang l'Universo raffreddandosi subisce una transizione di fase e il vuoto si porta ad uno stato energetico più basso (rottura spontanea della simmetria) riempiendo lo spazio con il campo di Higgs.

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

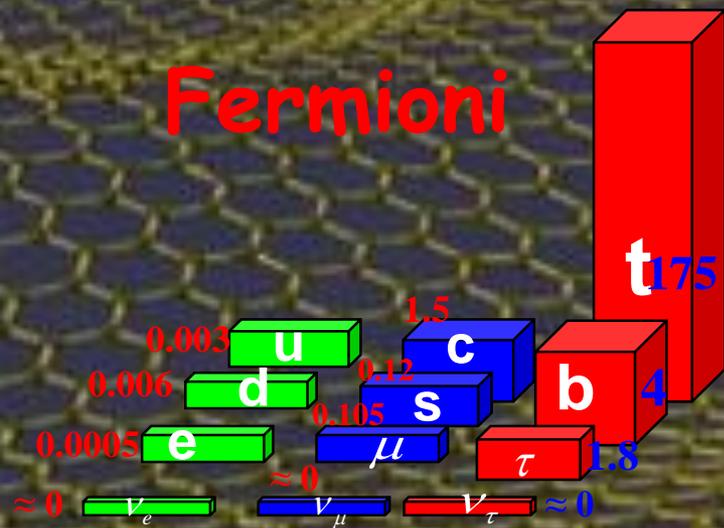
Ipotesi

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

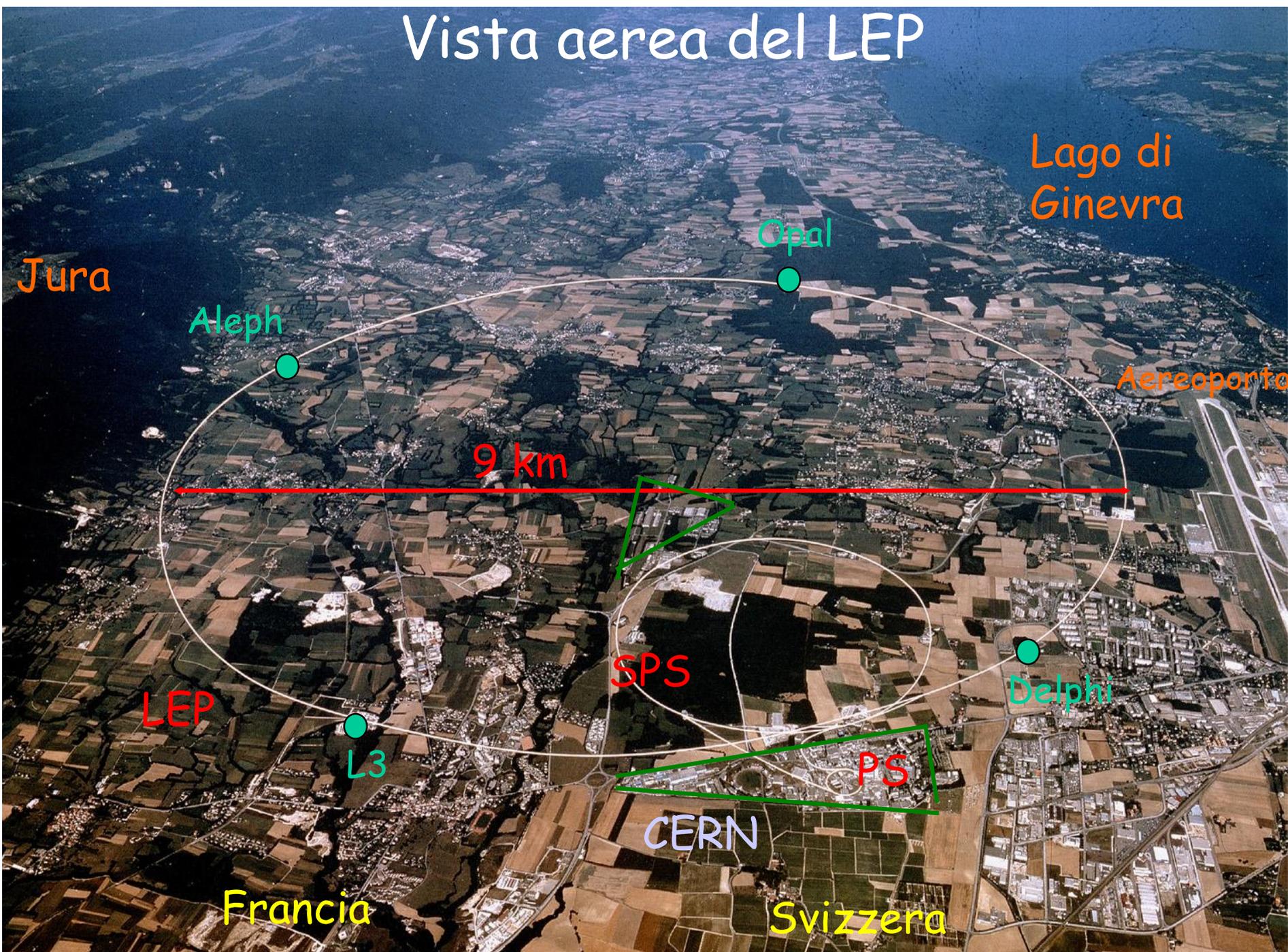
- ✓ 1967/68: l'unificazione dell'interazione elettromagnetica e debole prende la sua forma definitiva con l'integrazione nel modello del meccanismo di Higgs.
- ✓ 1973: La scoperta al CERN delle "correnti neutre" nelle interazioni neutrino-nucleone, spiegabili con lo scambio di uno Z^0 sancisce definitivamente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

Opal

Aleph

Aeroporto

9 km

SPS

Delphi

LEP

L3

PS

CERN

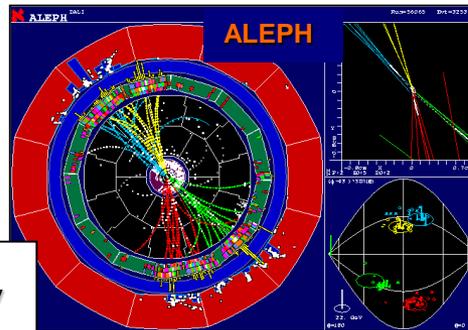
Francia

Svizzera

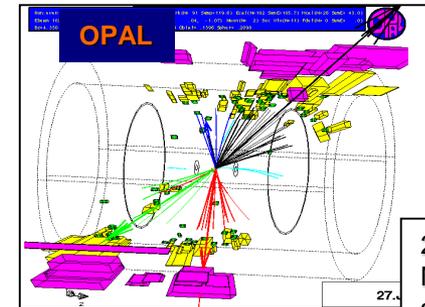
Ricerca dell'Higgs a LEP

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

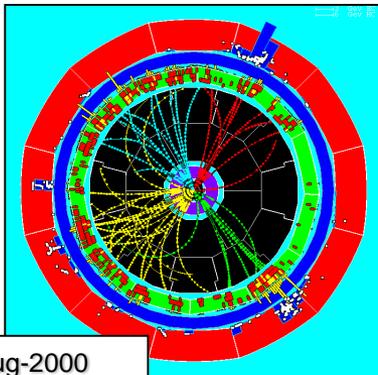
Sono stati visti alcuni eventi compatibili con una massa di un H intorno a 114 GeV: troppo pochi per poter affermare che si trattava del bosone di Higgs !



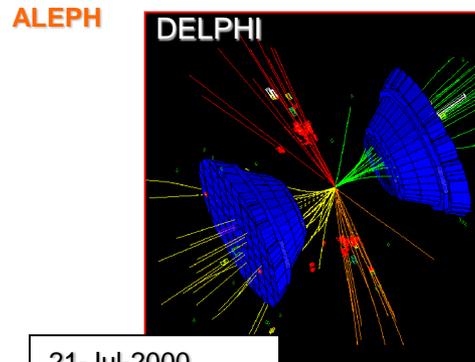
31-Jul-2000
Mass: 112 GeV
 $s/b_{115} = 2.0$



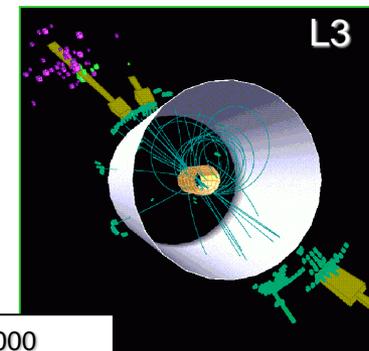
27-Jun-2000
Mass: 113 GeV
 $s/b_{115} = 0.52$



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

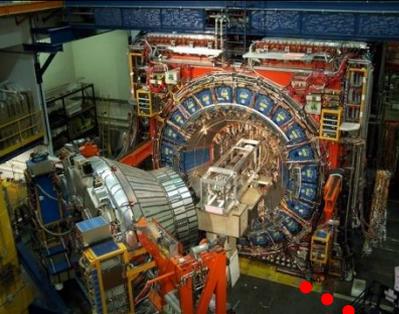


21-Jul-2000
Mass: 114 GeV
 $s/b_{115} = 0.4$

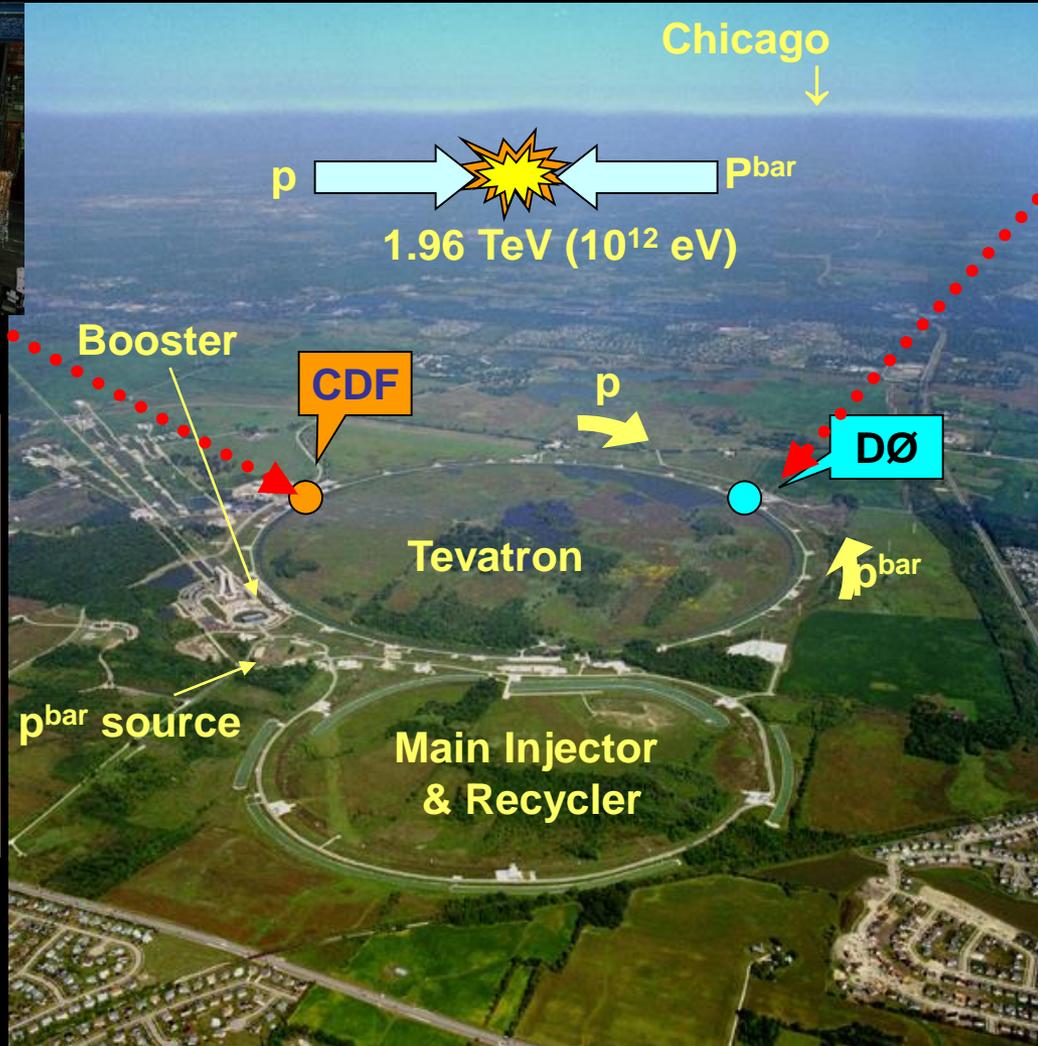


14-Oct-2000
Mass: 114 GeV
 $s/b_{115} = 2.0$

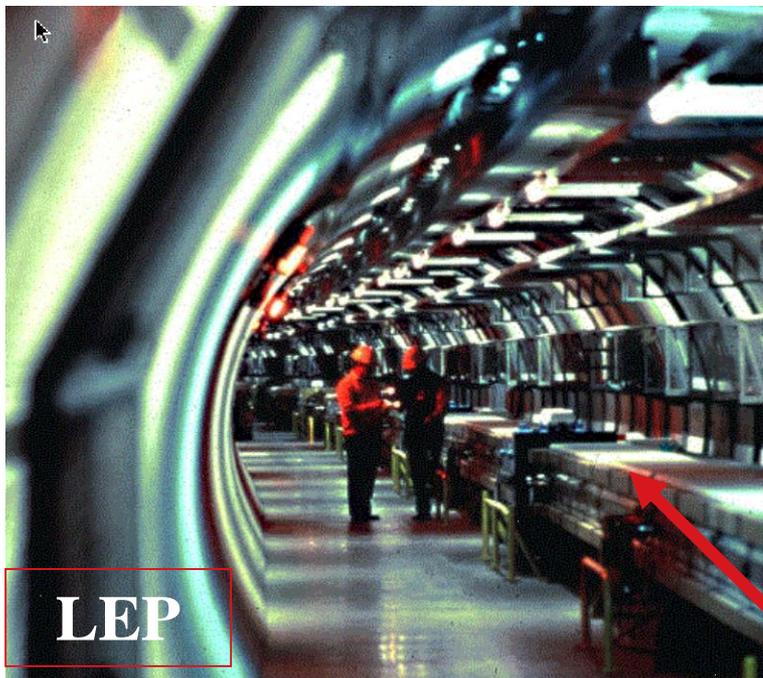
Ricerca dell'Higgs al TeVatron



Al TeVatron (p - p^{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



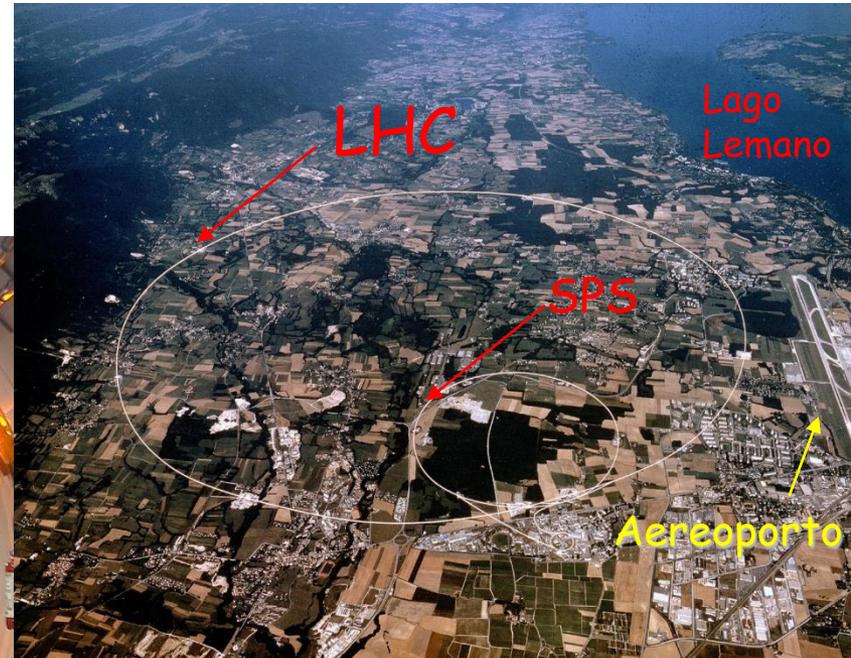
Nel 2000 i magneti di LEP vengono rimossi e inizia l'istallazione di LHC

SPS

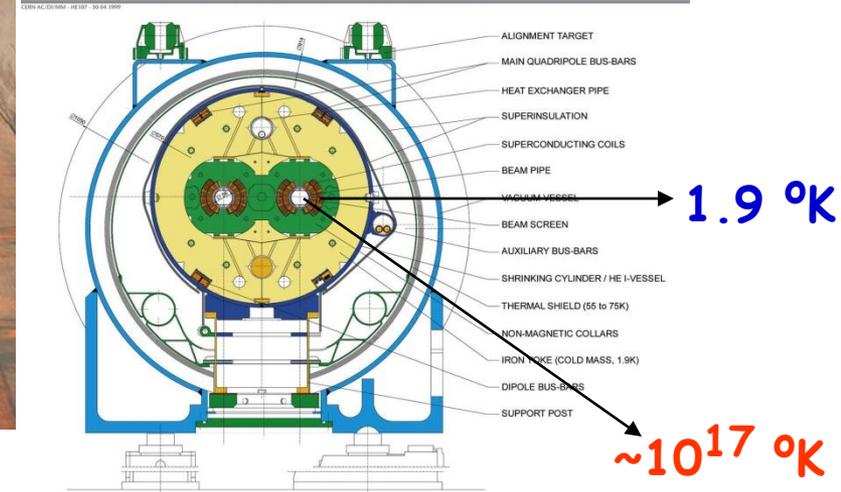
Il Large Hadron Collider del CERN



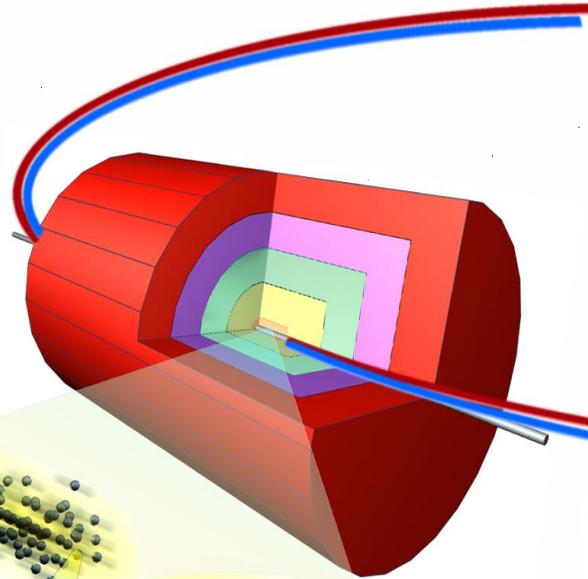
9300 Magneti superconduttori
1232 Dipoli (15m, 1.9 °K) 8.4 tesla 11700 A
448 Main Quads, 6618 Correttori.
Circonferenza 26.7 km



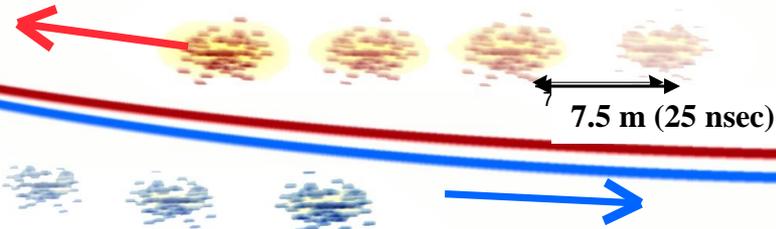
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



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)



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

≈ 600 milioni di collisioni al secondo tra protoni

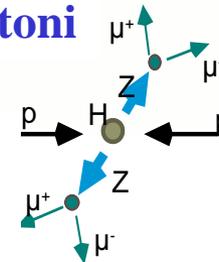
14 TeV

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

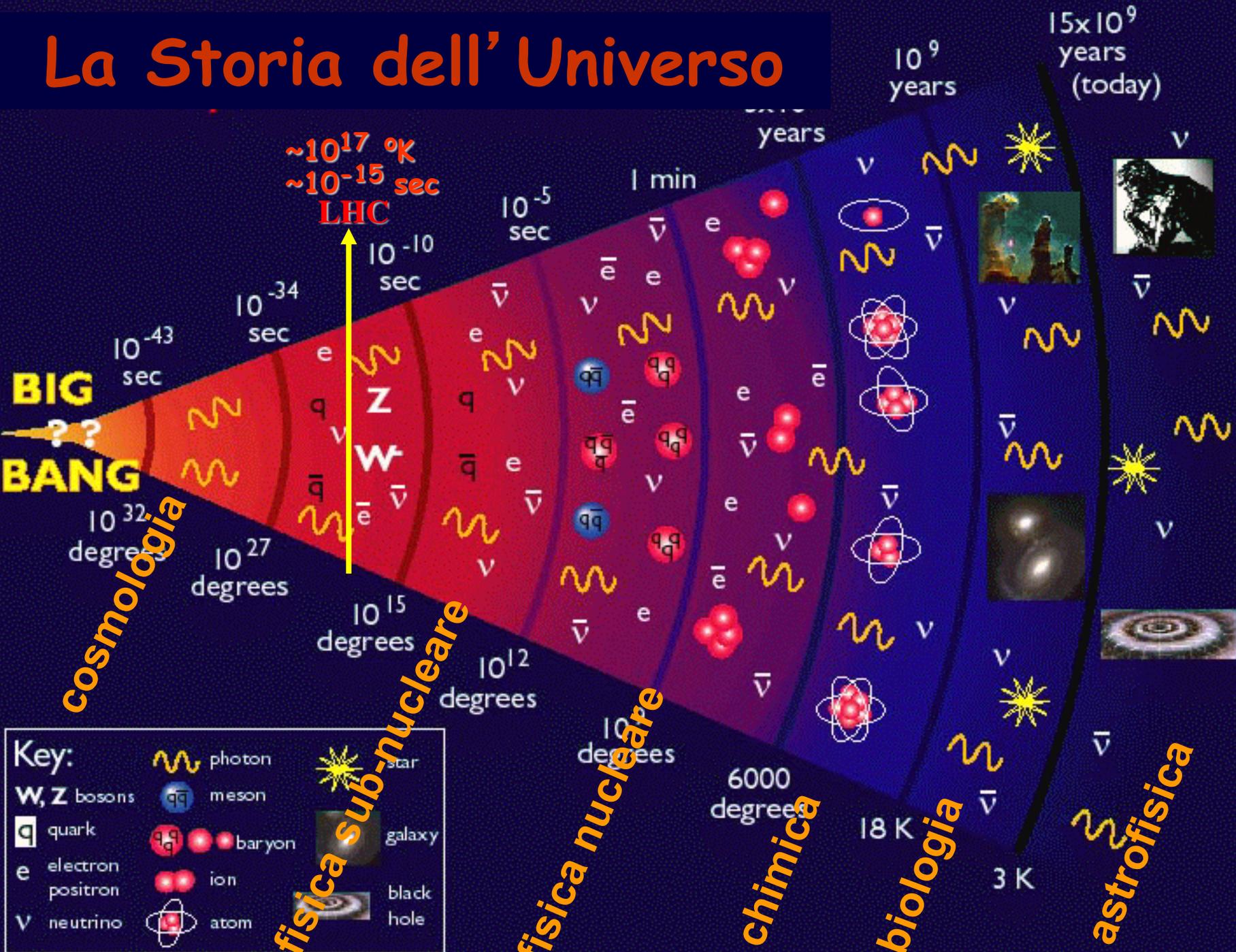
Collisione tra i “partoni” dei due protoni

“quasi” mini-Big Bang

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



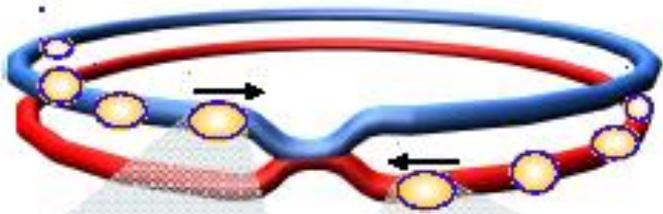
La Storia dell' Universo



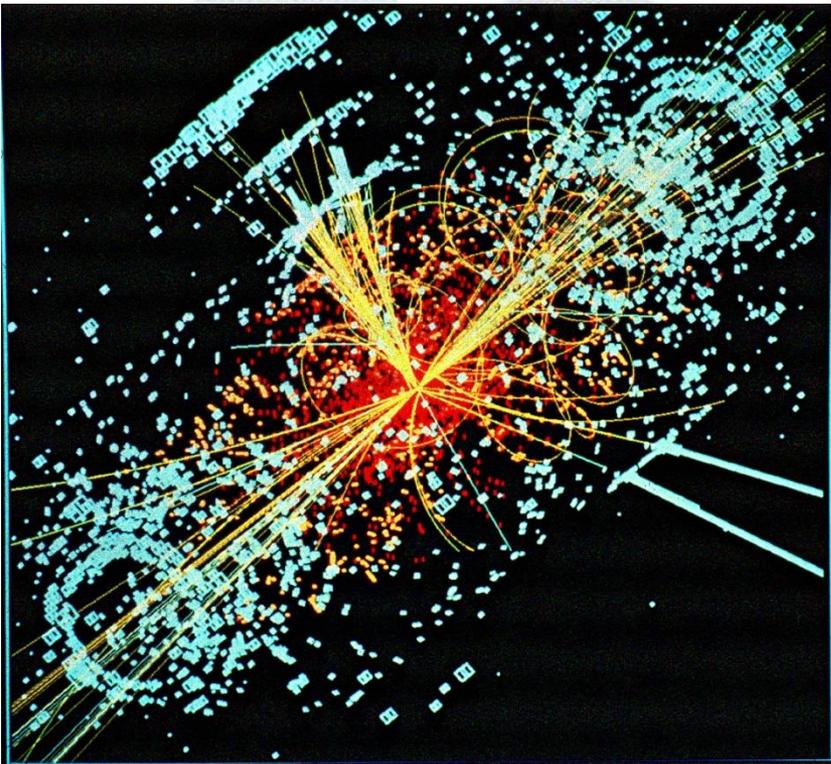
Key:

	photon		star
W, Z	bosons		meson
	quark		galaxy
e	electron		black hole
	positron		
v	neutrino		
	baryon		
	ion		
	atom		

Collisioni protone-protone a LHC



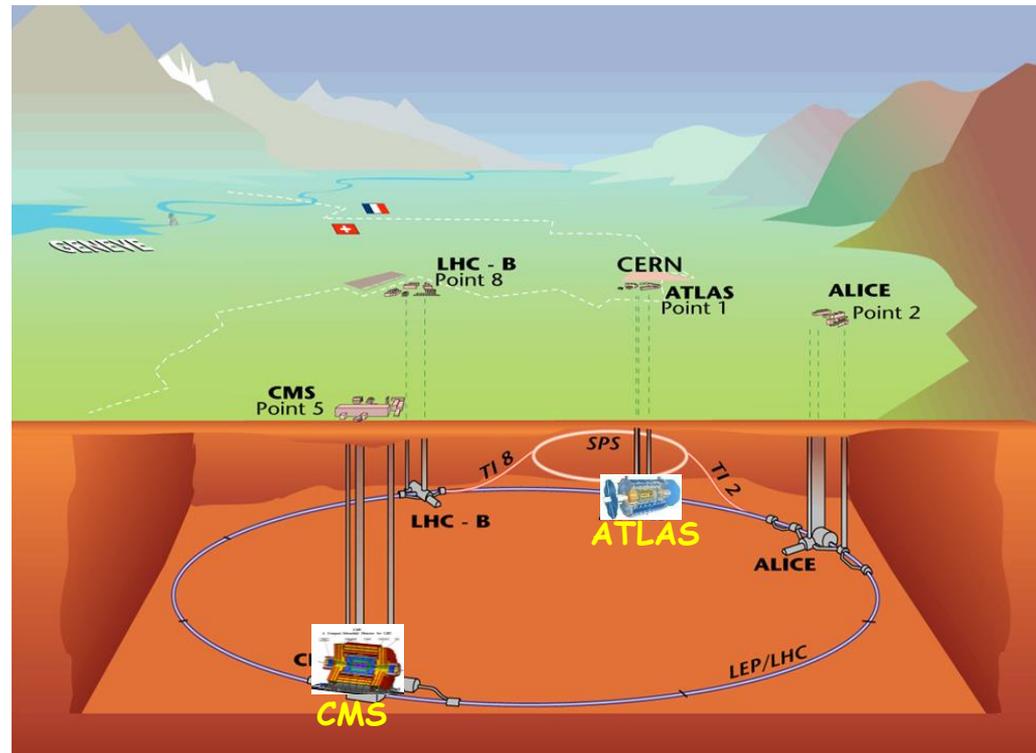
- ~600 milioni di eventi al secondo
- ~40 miliardi di particelle al secondo
- ~1000 particelle ogni 25 ns
- Selezione di 1 evento su diecimila miliardi



“quasi” mini-Big Bang

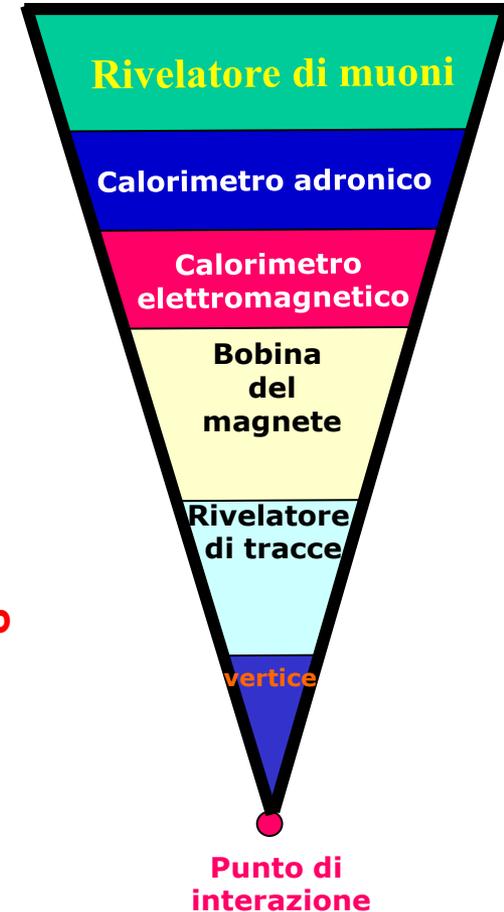
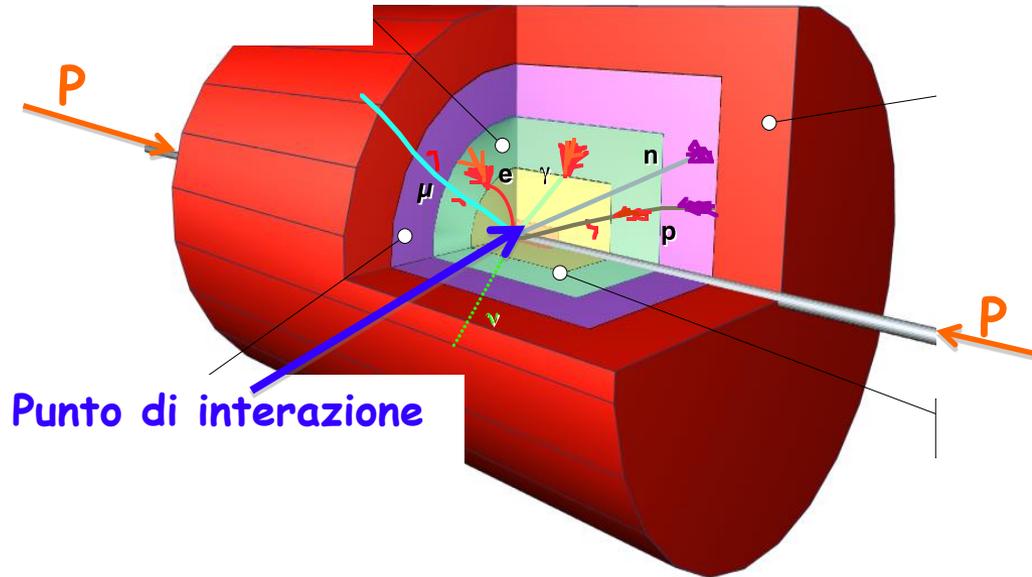
$\sim 10^{17}$ °K , $\sim 10^{-15}$ sec

⇒ 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(*) a lungo possono essere rivelate direttamente :

Cariche: e^- , e^+ , p (protoni), π^\pm (pioni), K^\pm (mesoni K), μ^\pm (muons)

Neutre: γ (fotoni), n (neutroni), K^0 (mesone K)

Energia mancante: ν (neutrini)

(*)

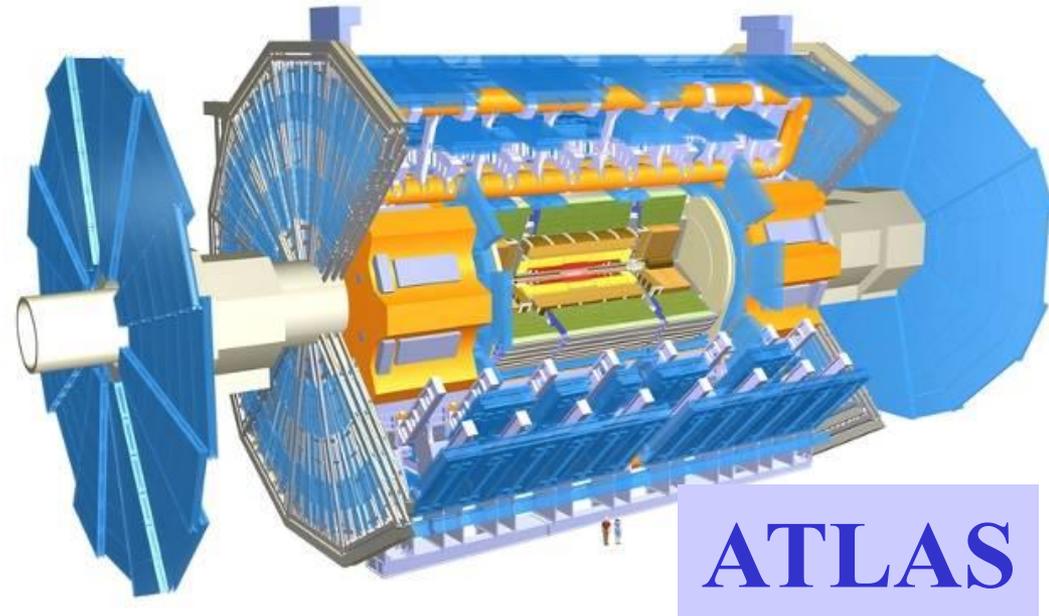
Pioni, $\tau=2.6 \times 10^{-8}$ sec, $E=20$ GeV, $\gamma = E/m = 20/0.140 = 142.86$, $\gamma\tau = 0.0037$ msec, distanza media percorsa = $c \gamma \tau = 1.1$ km

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!**

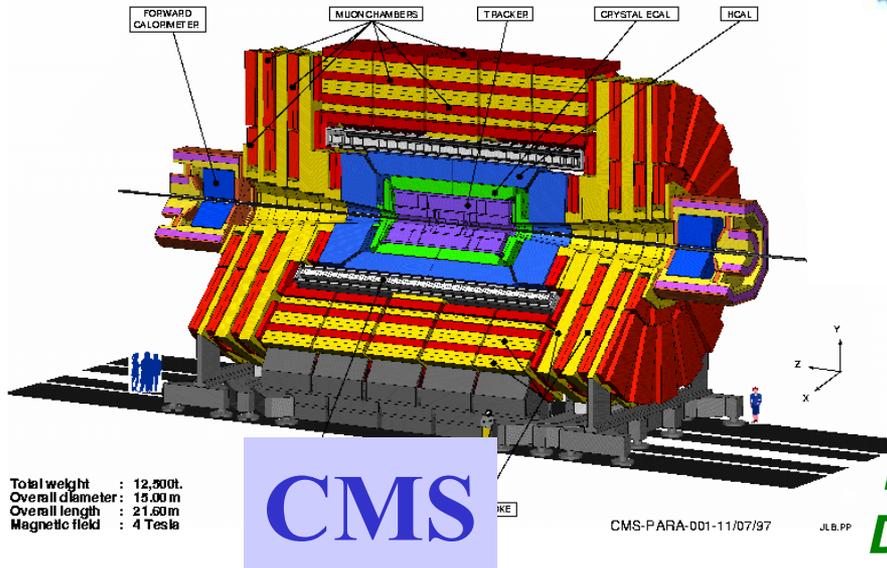
Quanto sono grandi ATLAS e CMS?



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

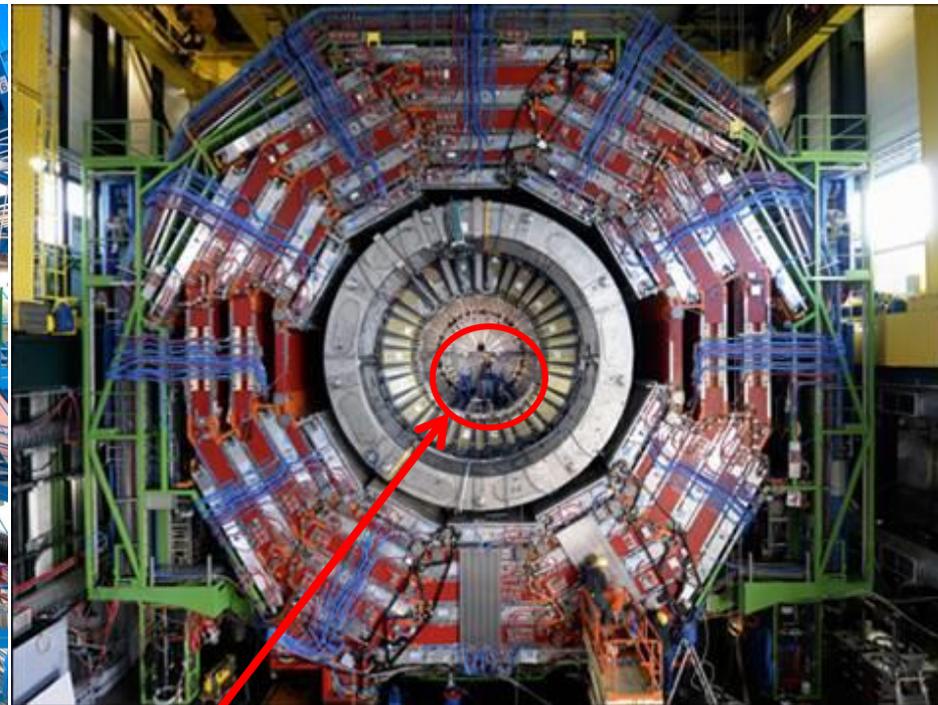
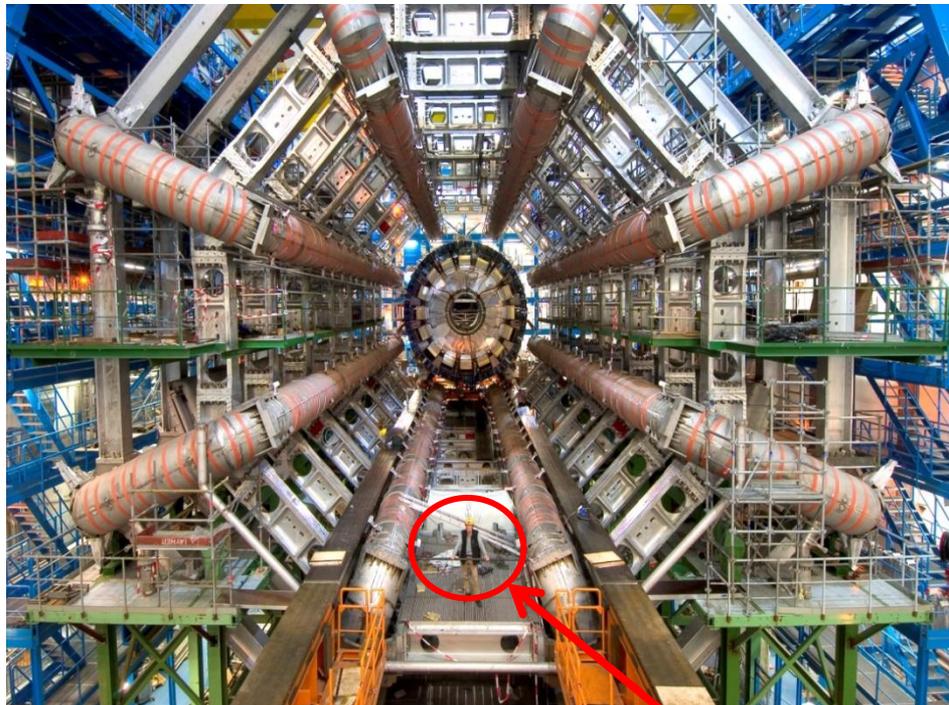
J.L.B.P.P

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

ATLAS e CMS

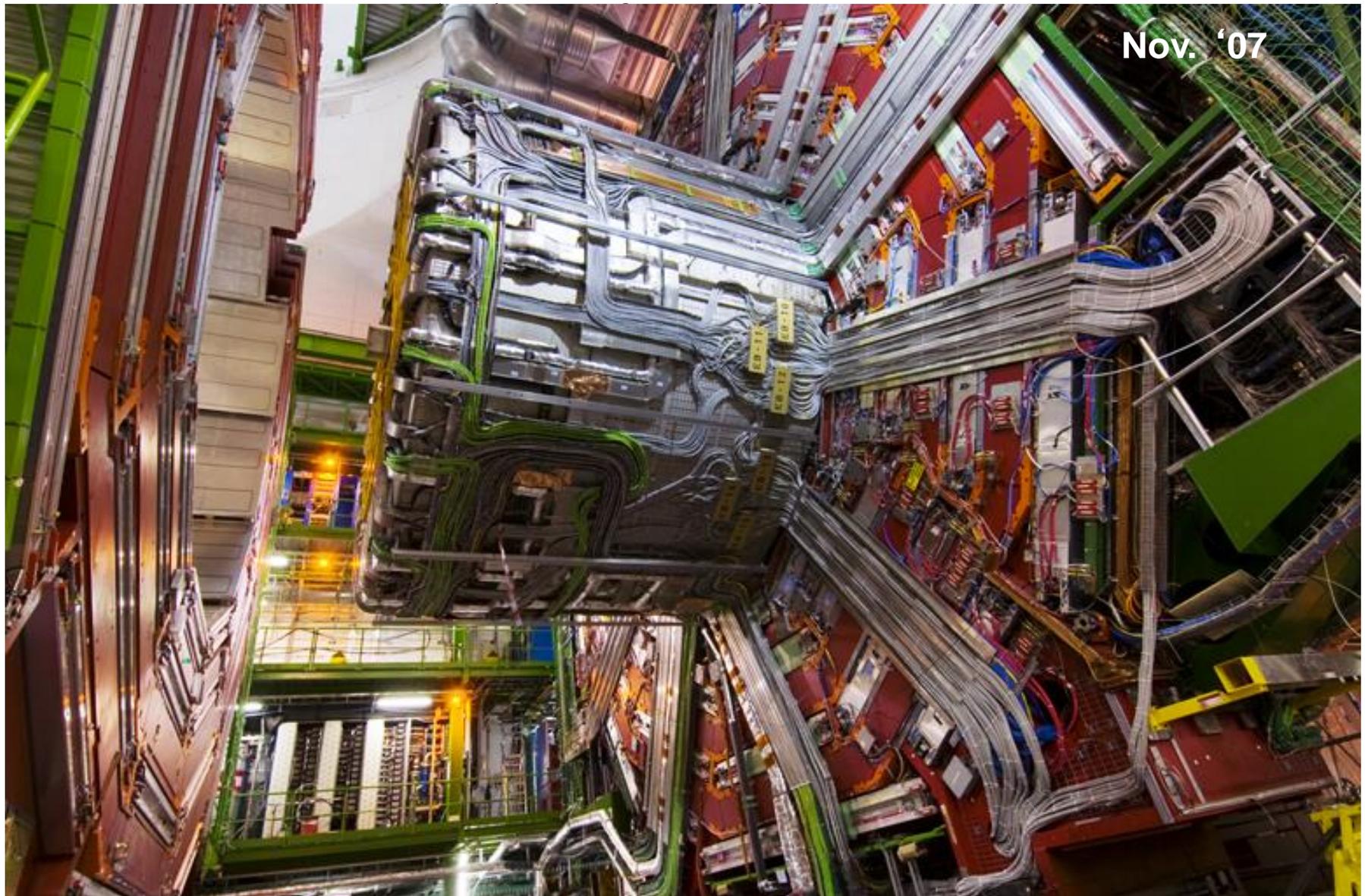
~ 3000 persone tra fisici, ingegneri e studenti lavorano in ciascun dei due esperimenti

Rivelatori giganteschi di particelle progettati per scoprire l'esistenza del Bosone di Higgs

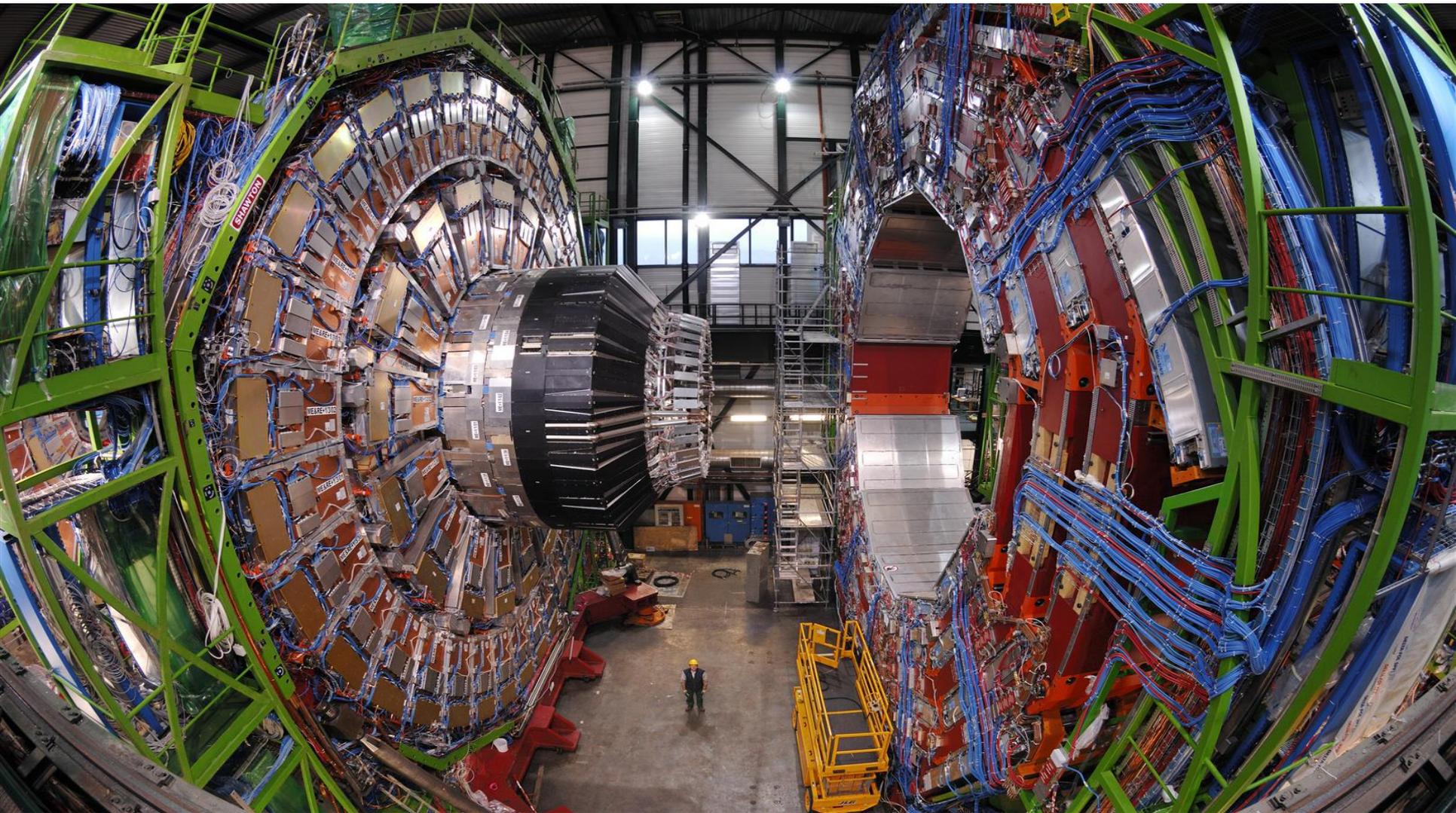


Persone

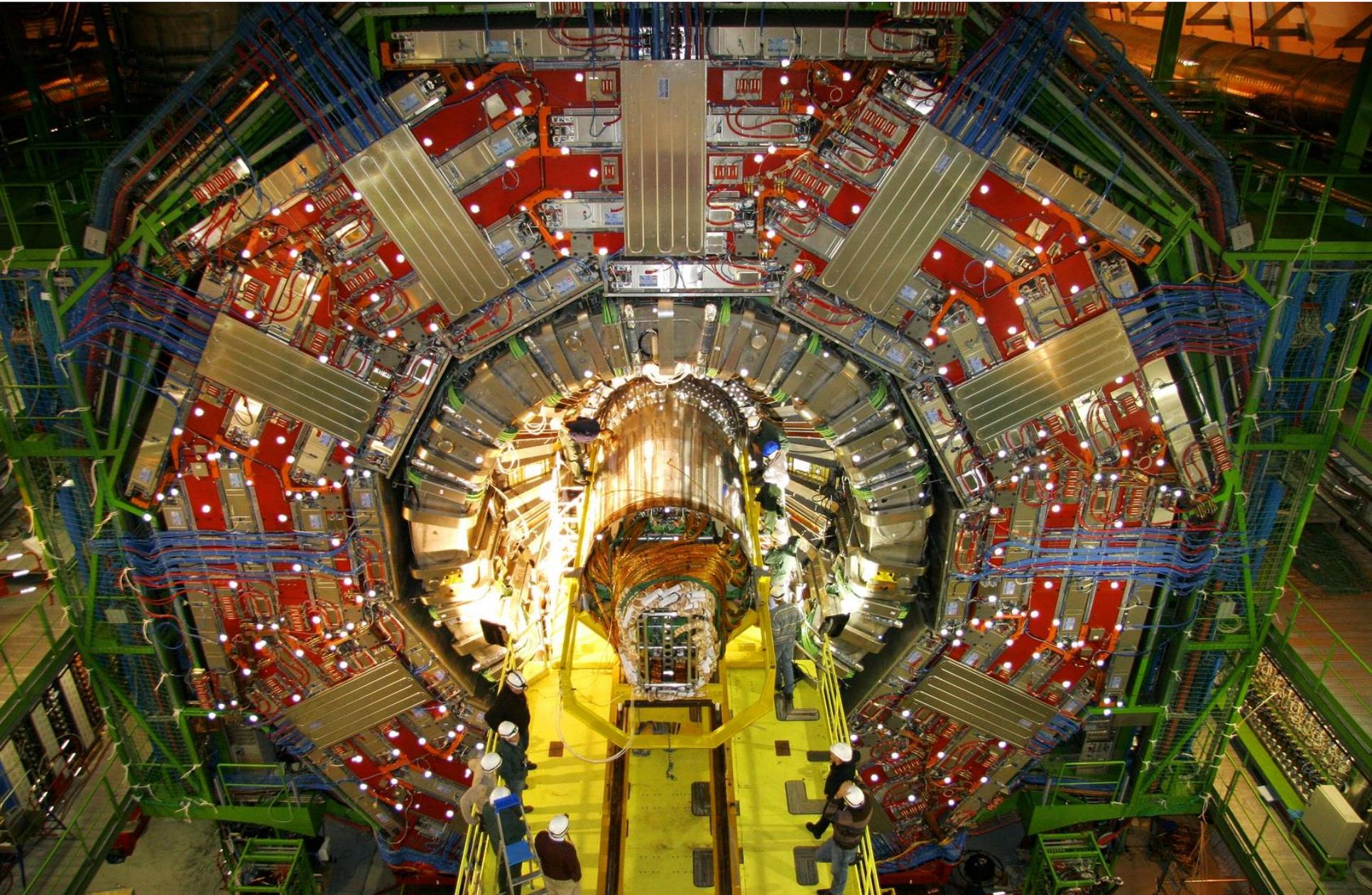
Il rivelatore CMS



Il rivelatore CMS



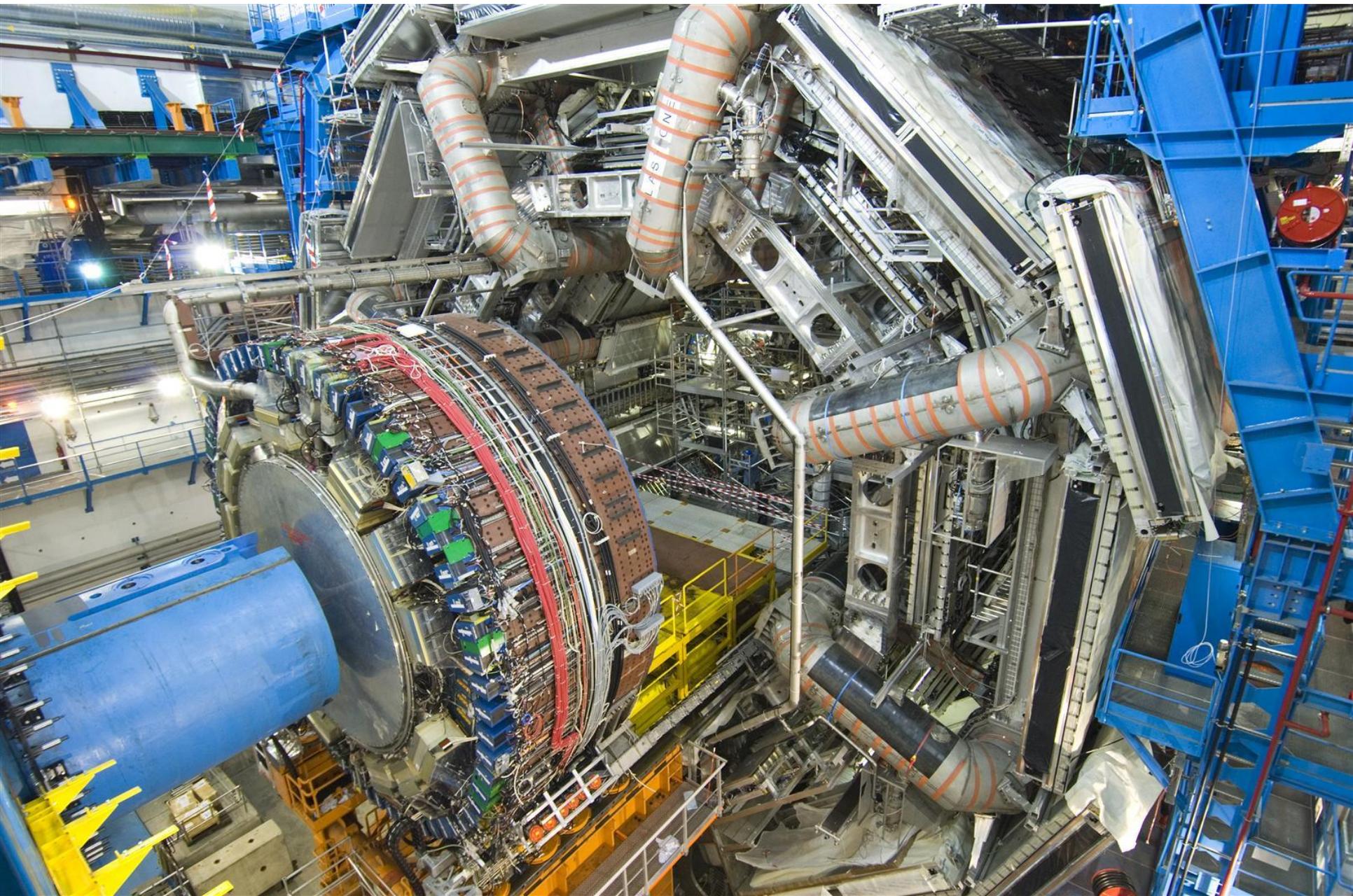
Il rivelatore CMS



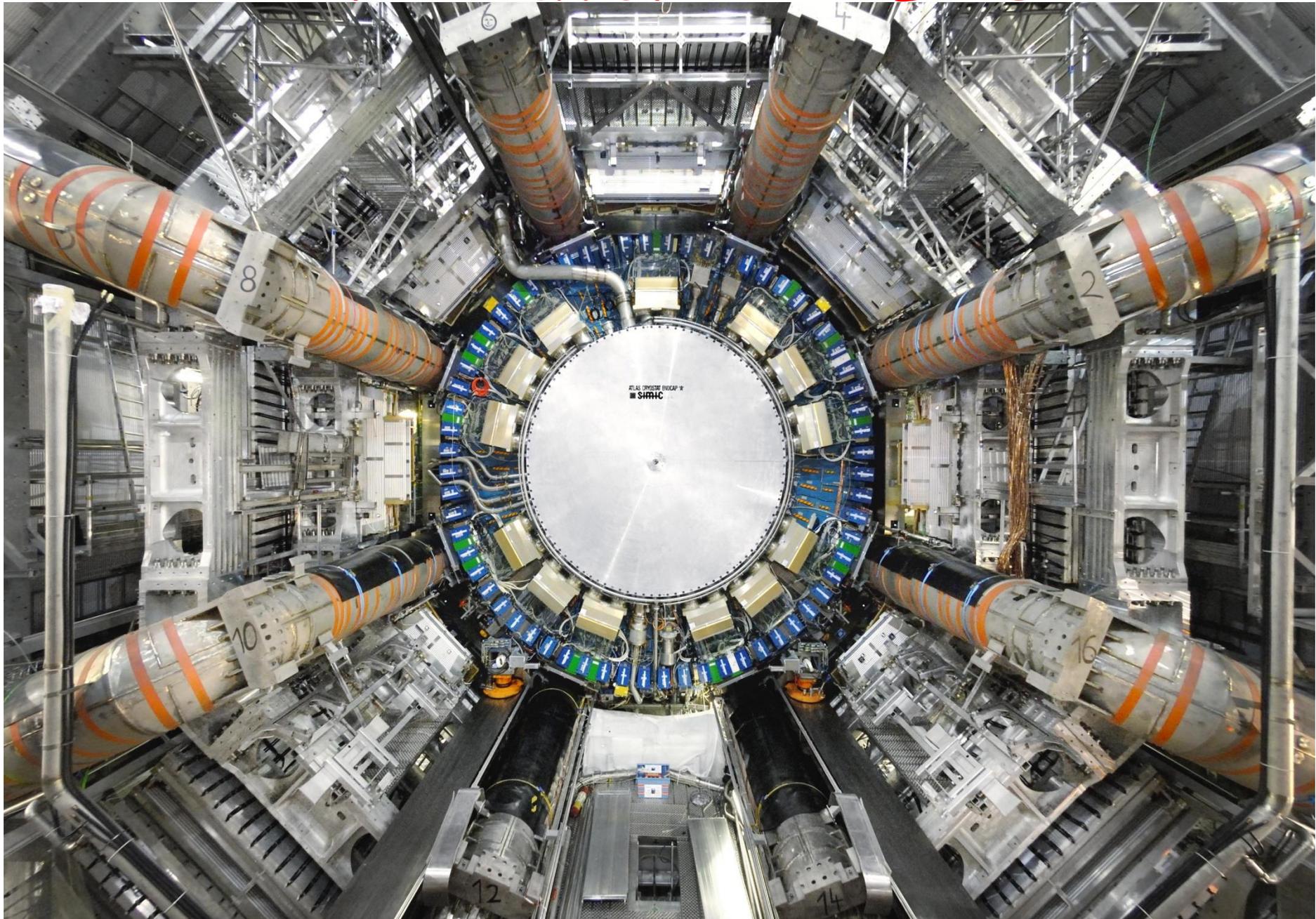
Una riunione della Collaborazione CMS



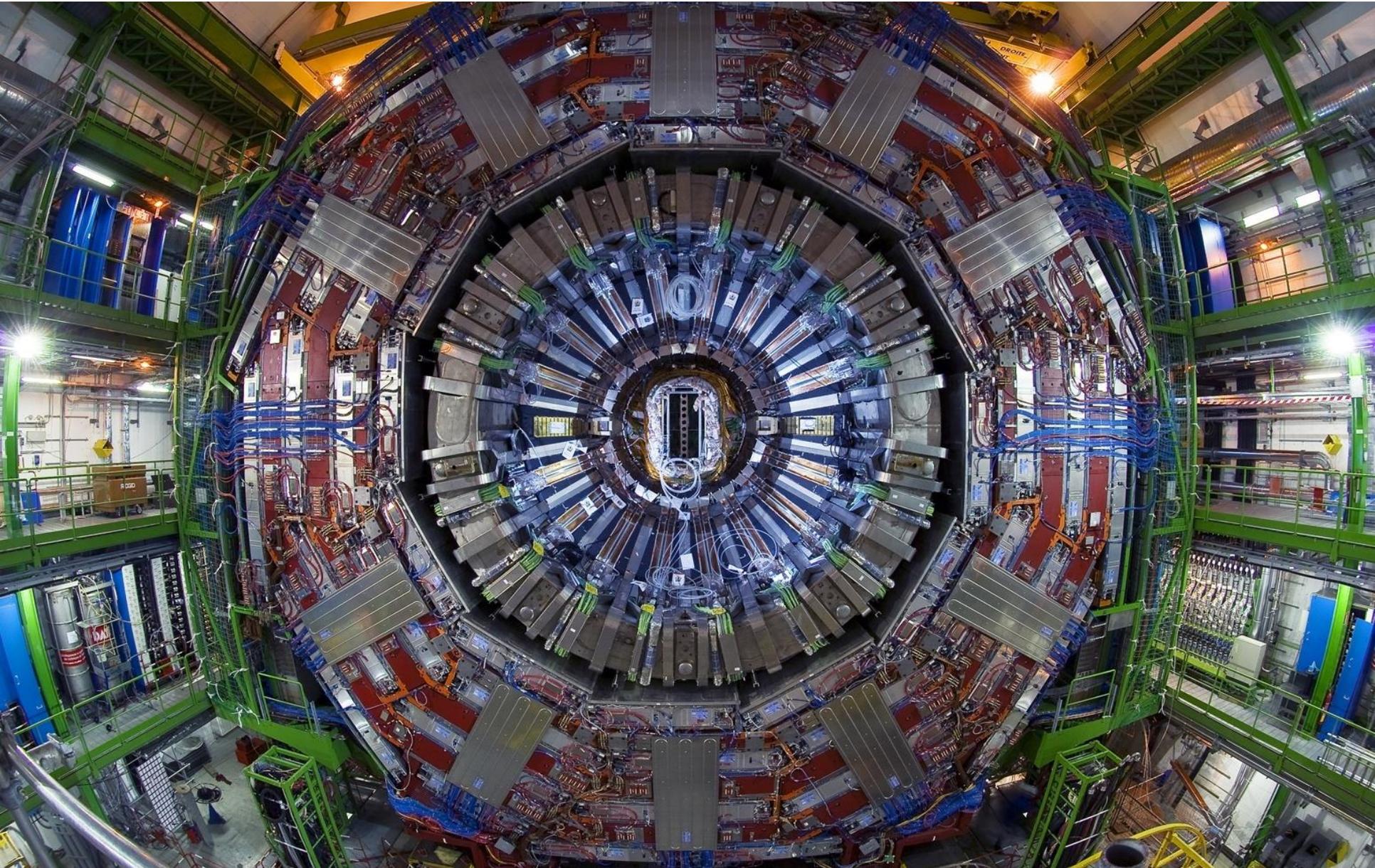
Il rivelatore ATLAS

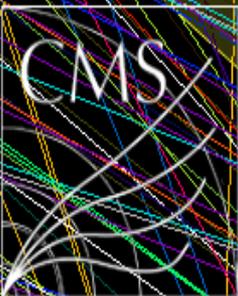


Il rivelatore ATLAS

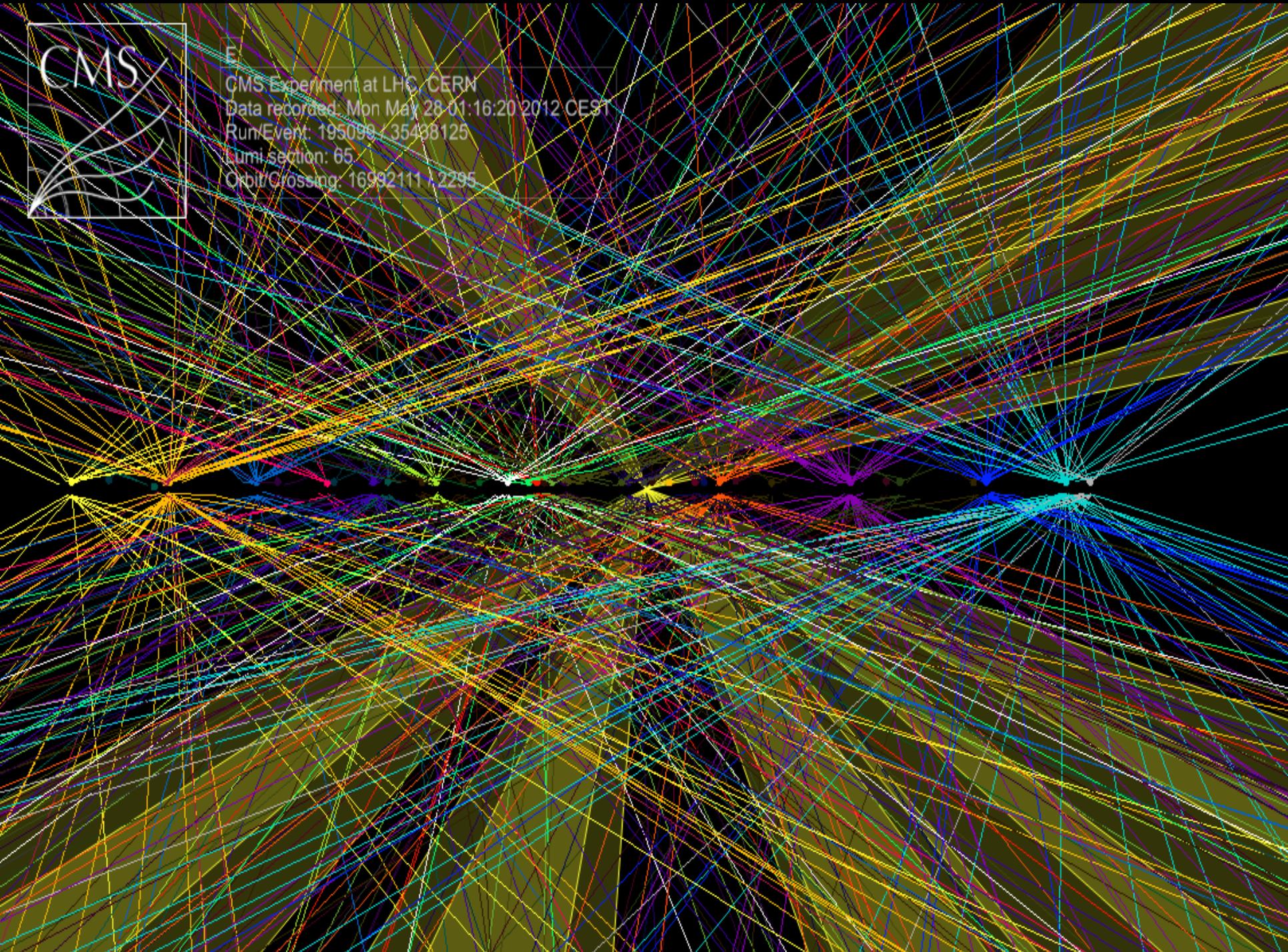


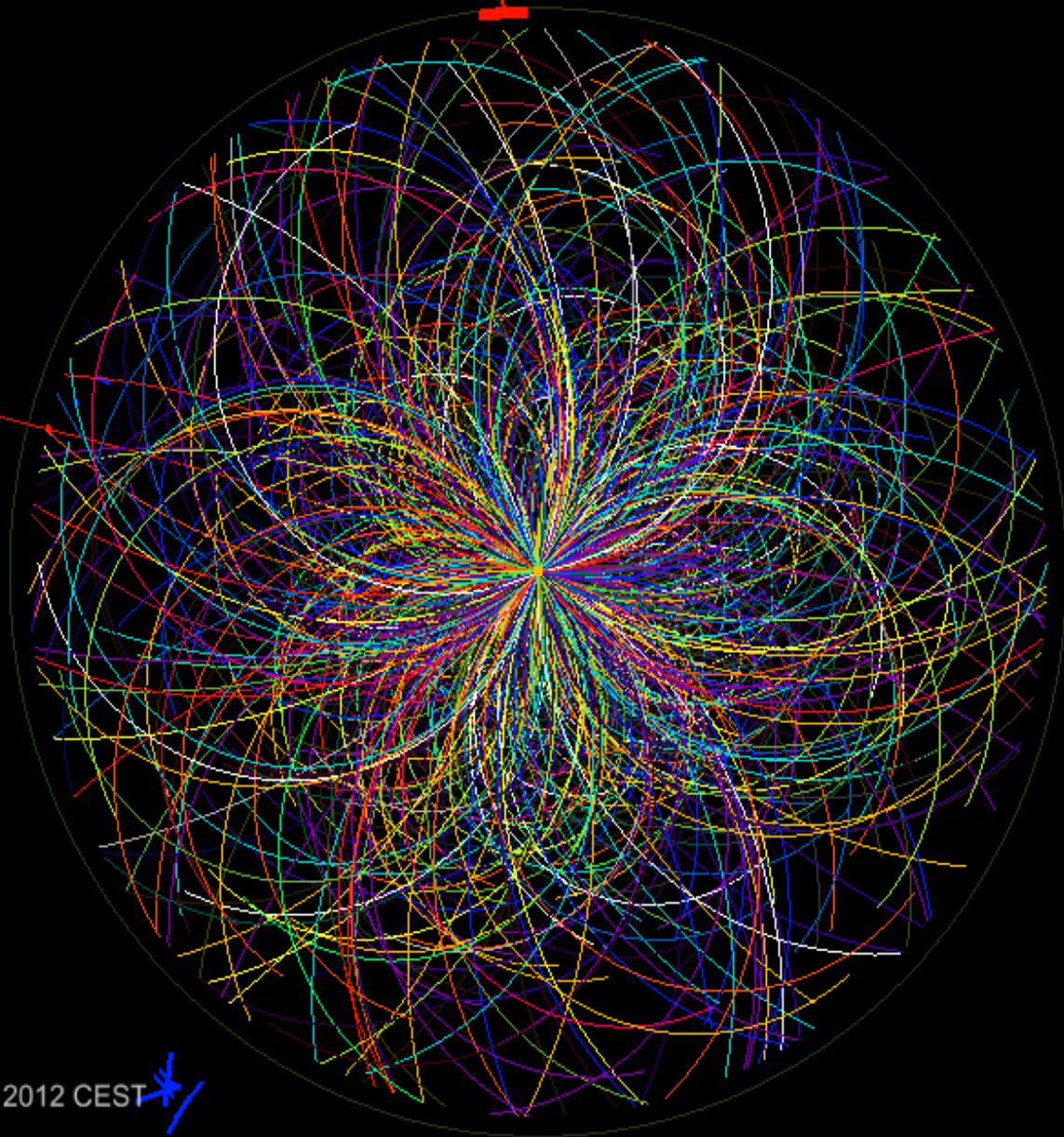
Macchina fotografica digitale di 12500 tonnellate con migliaia di milioni di pixels capace di scattare una foto tridimensionale delle collisioni protone-protone a 14 TeV di LHC 40 milioni di volte al secondo.





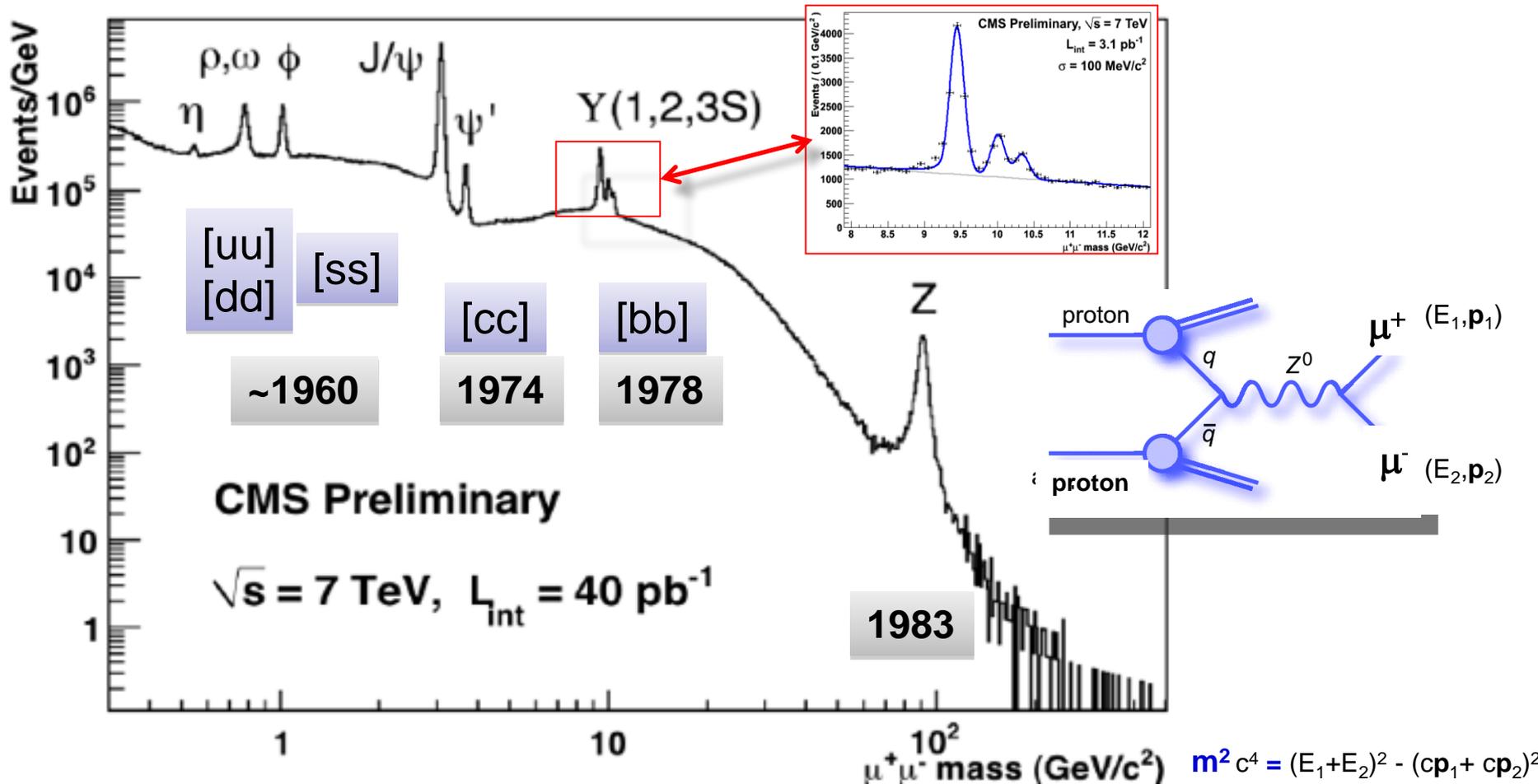
E
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 35438125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295





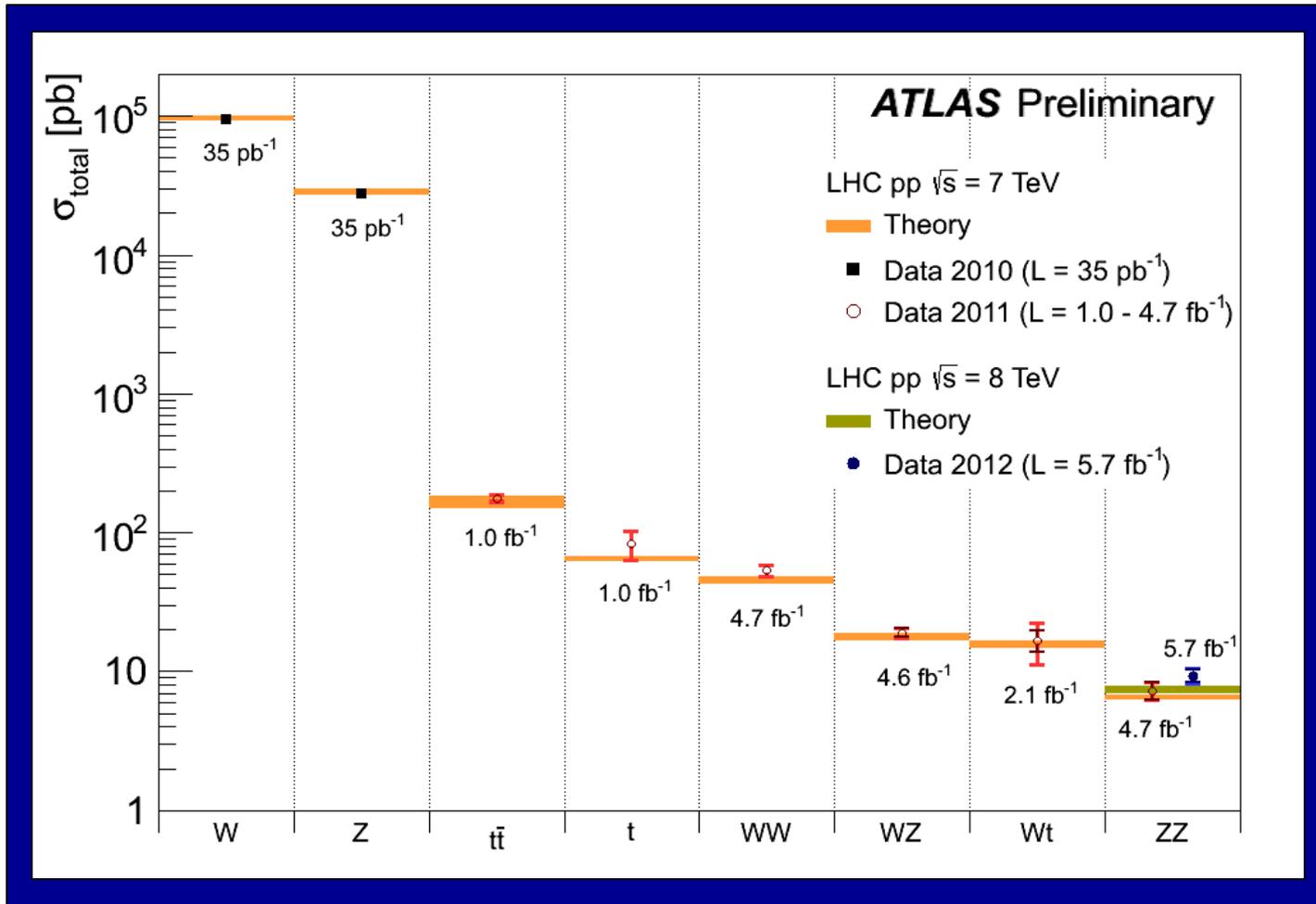
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST 
Run/Event: 195099 / 35438125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

La riscoperta del Modello Standard



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

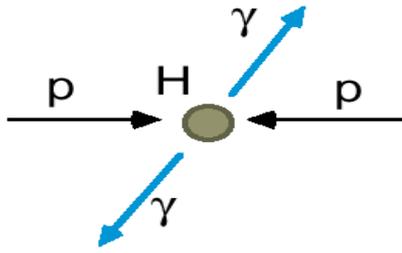
La verifica del Modello Standard



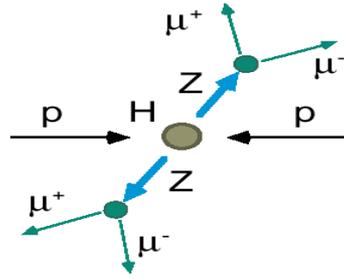
Dati raccolti (ATLAS) fino a metà del 2012
e confronto con le previsioni della teoria

Eventi di Higgs in CMS

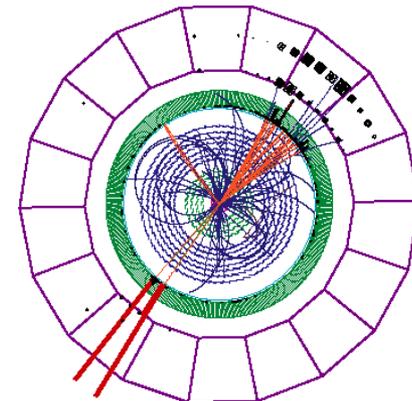
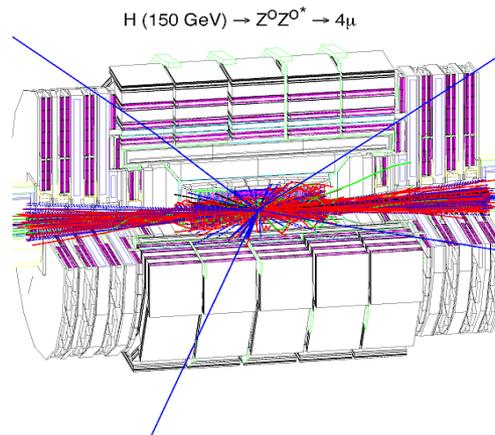
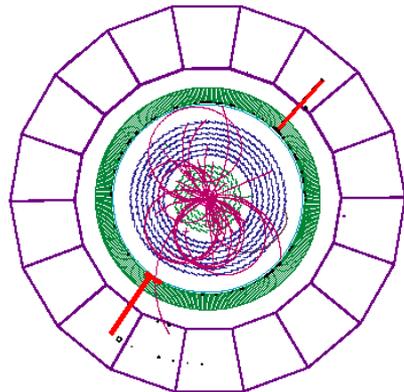
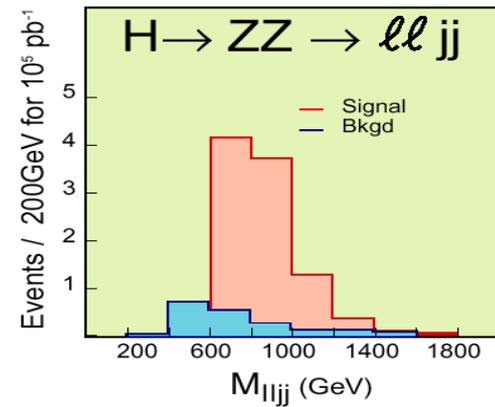
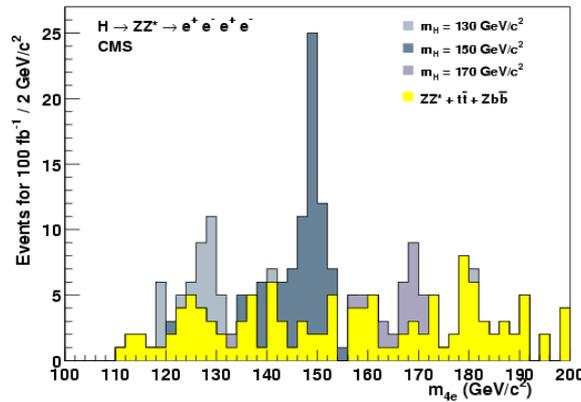
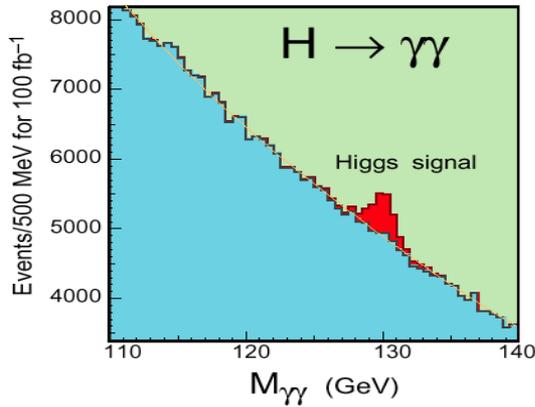
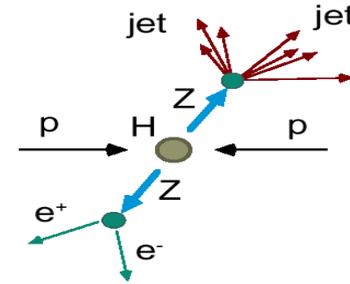
$M_H < 150 \text{ GeV}$



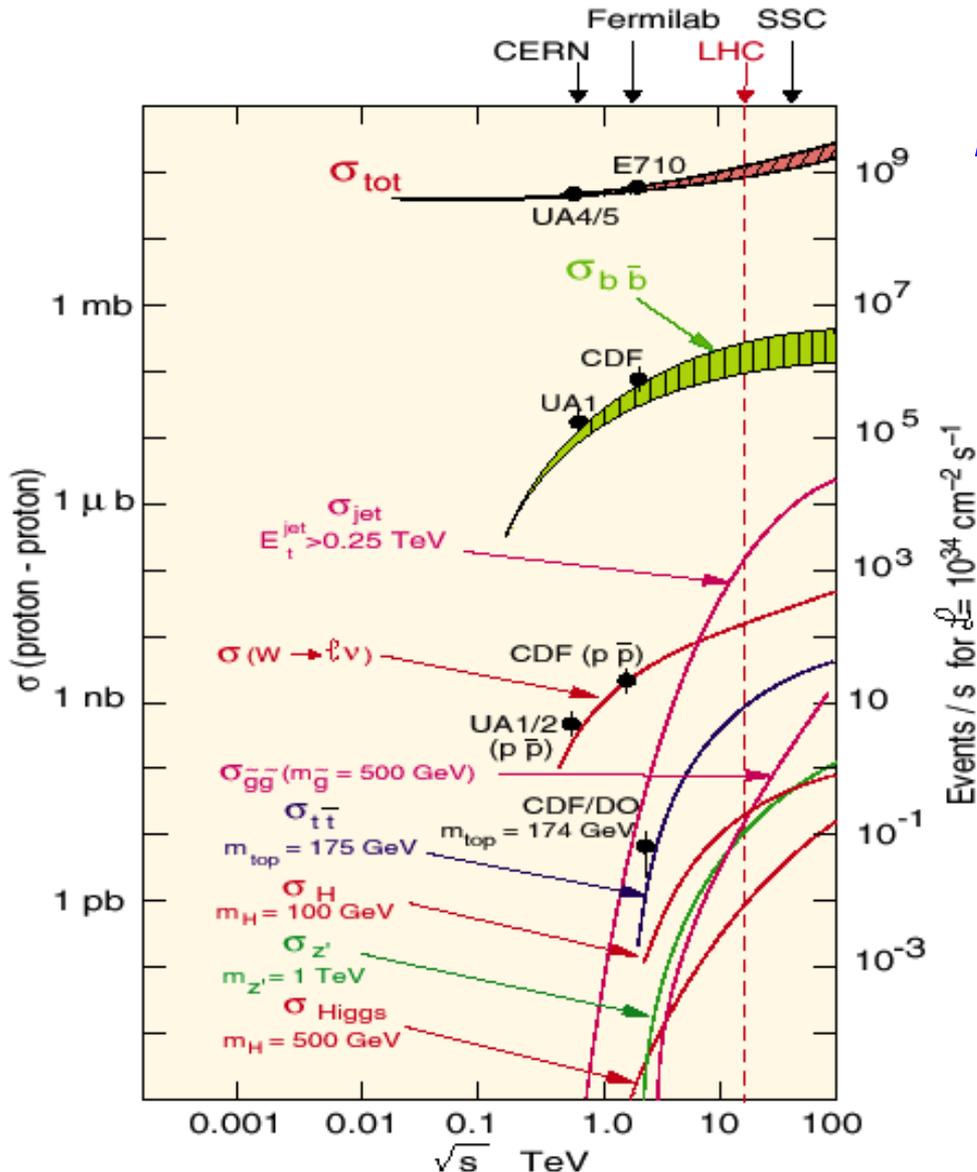
$130 < M_H < 500 \text{ GeV}$



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



Frequenza delle interazioni p-p a LHC



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

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

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

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

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

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

➤ Per ogni evento di Higgs
ci sono circa 7 miliardi
di eventi di altro tipo



Cercare un ago in un pagliaio ...

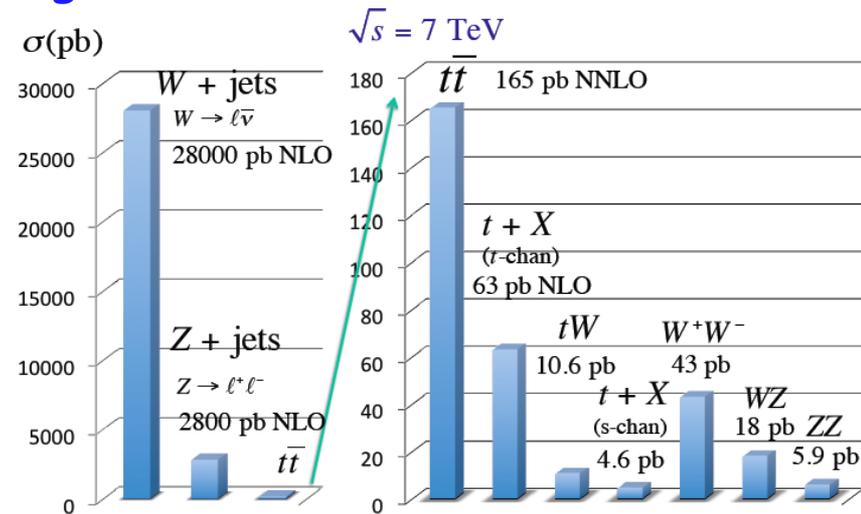


... non solo i pochi aghi prodotti sono nascosti tra tante pagliuzze (un ago su 7 miliardi di pagliuzze), ma ci sono anche molti eventi che producono stati finali molto simili a quelli in cui si ha il bosone di Higgs ... pagliuzze che assomigliano ad aghi !

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

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

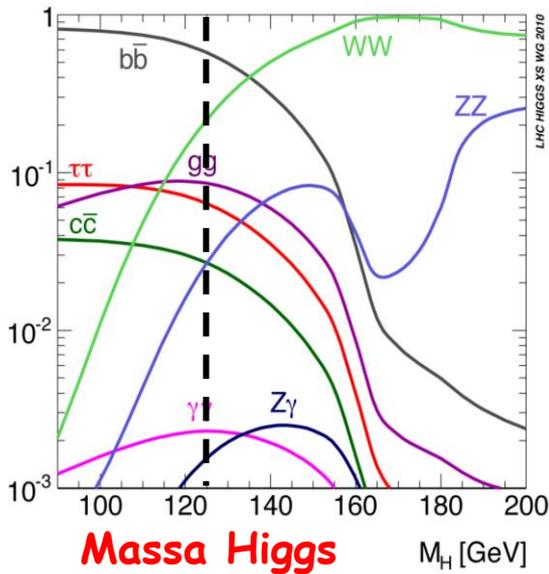
- È necessario scegliere i canali di decadimento con meno fondo dove cercare l'Higgs...



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: ~ 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: ~ 350 eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 200 eventi e 3000 di fondo nel bin della risoluzione di $\sim 2 \text{ GeV}$

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

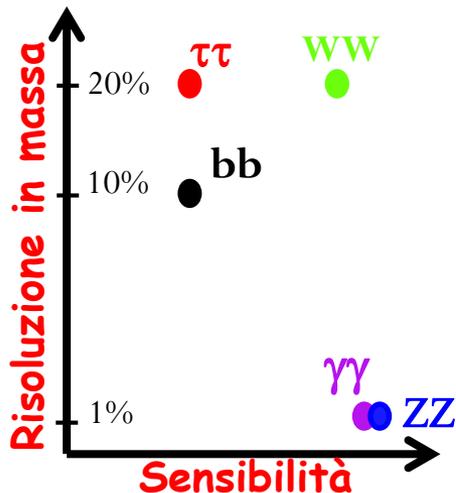
➤ $BR = 1.0 \cdot 10^{-2}$, canale con risoluzione in massa del 20% e molti eventi di fondo: ~ 1500 eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 60 eventi e 300 di fondo

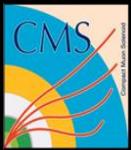
$H \rightarrow \tau\tau$:

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

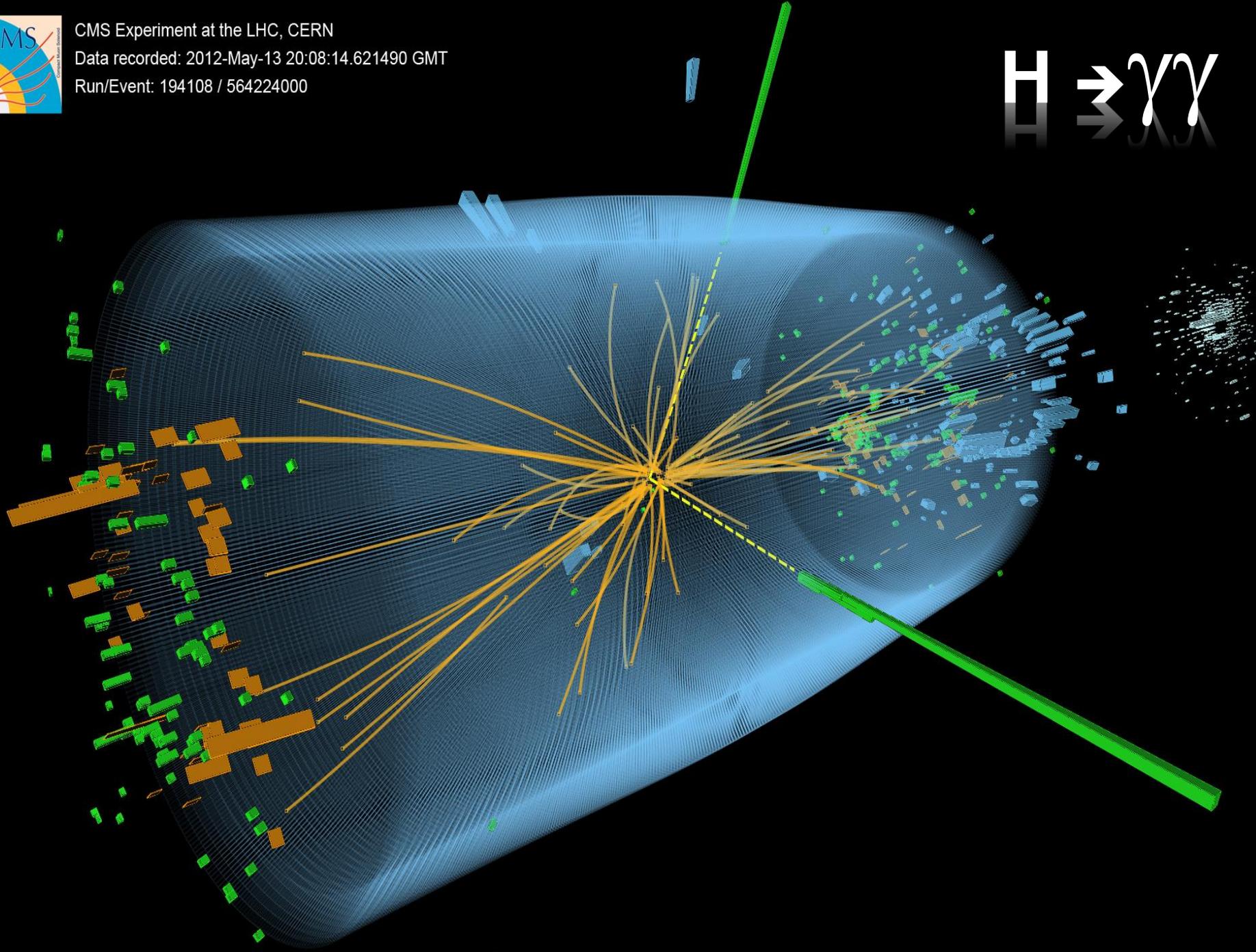
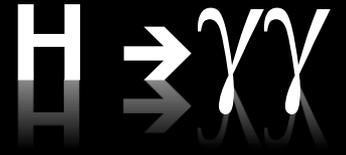
$H \rightarrow bb$:

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



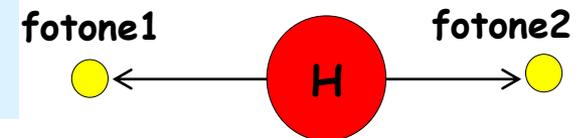
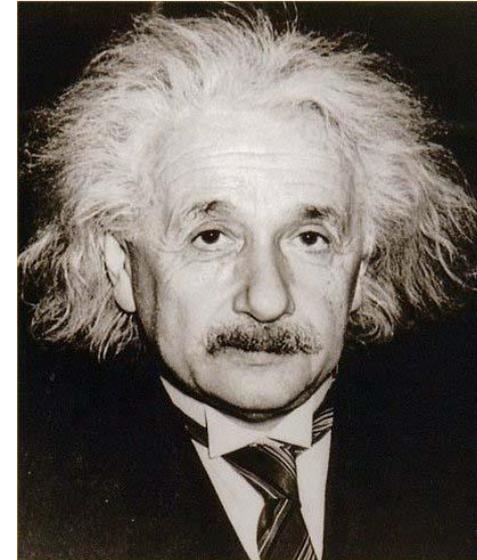


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Come si misura la massa ?

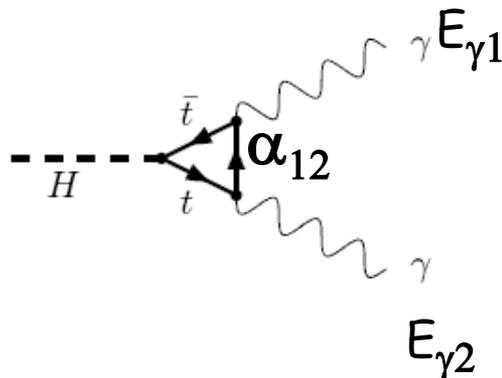
- Come si misura la massa di una particella che decade in un insieme di particelle? Misurando le energie e gli impulsi di tutte le particelle in cui decade.
- Caso semplice: per esempio un bosone di Higgs fermo che decade in due fotoni. grazie alla conservazione dell'energia sappiamo che la somma dell'energia 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.



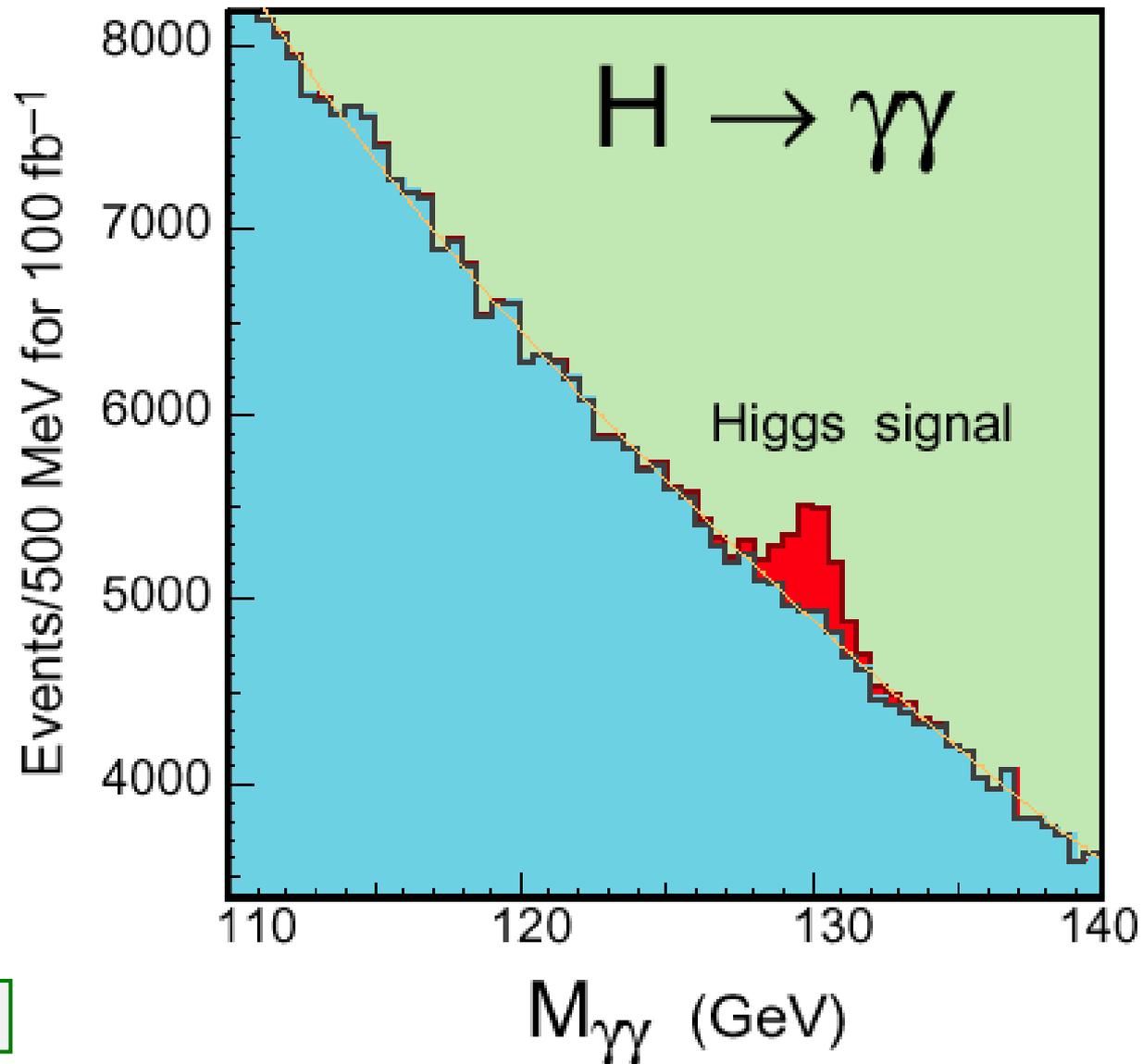
$$M_H c^2 = E_1 + E_2$$

Decadimento dell'Higgs in due fotoni

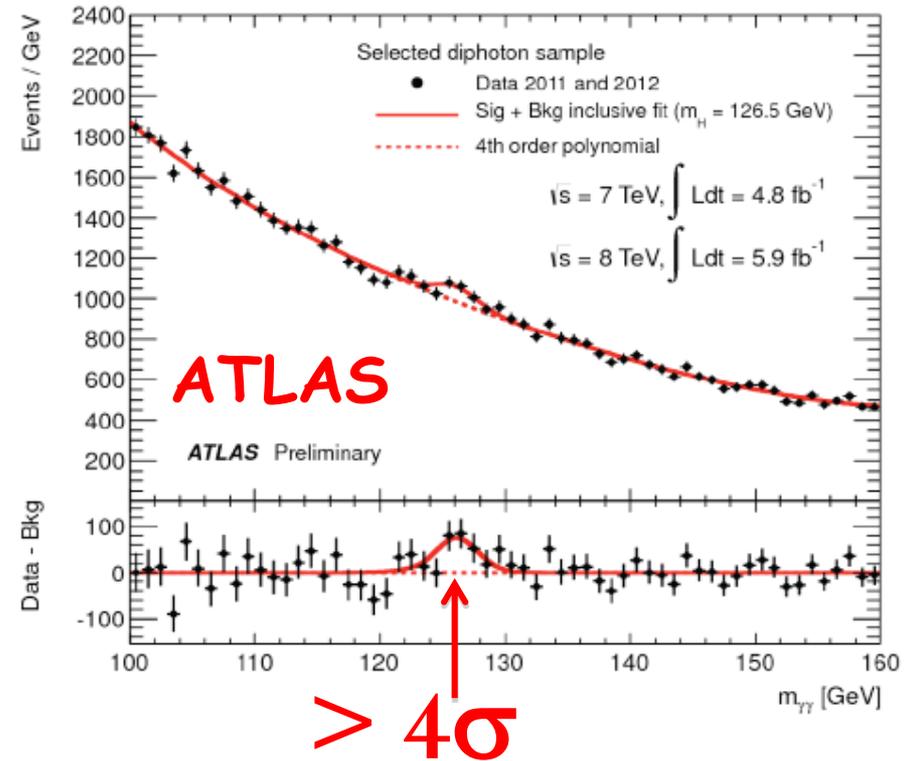
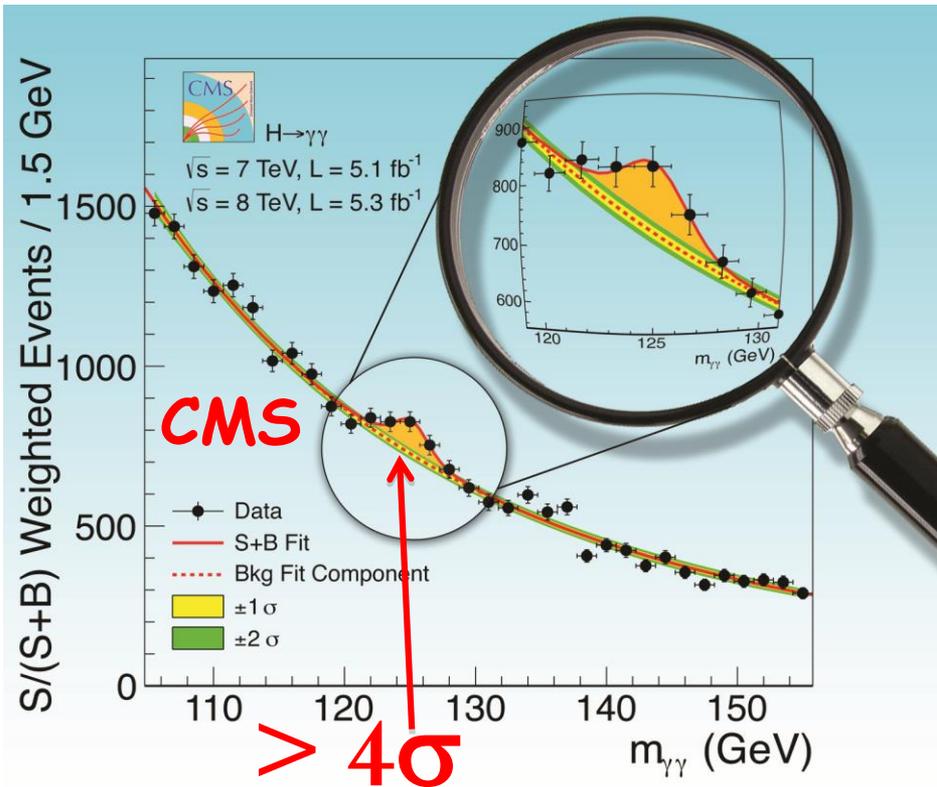
Segnale dell'Higgs di massa 130 GeV per una luminosità integrata di 100 fb^{-1} . Con questa luminosità ci si aspettano 2.000 eventi di Higgs su 30.000 eventi di fondo nell'intervallo di 2 GeV della risoluzione dell'apparato



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



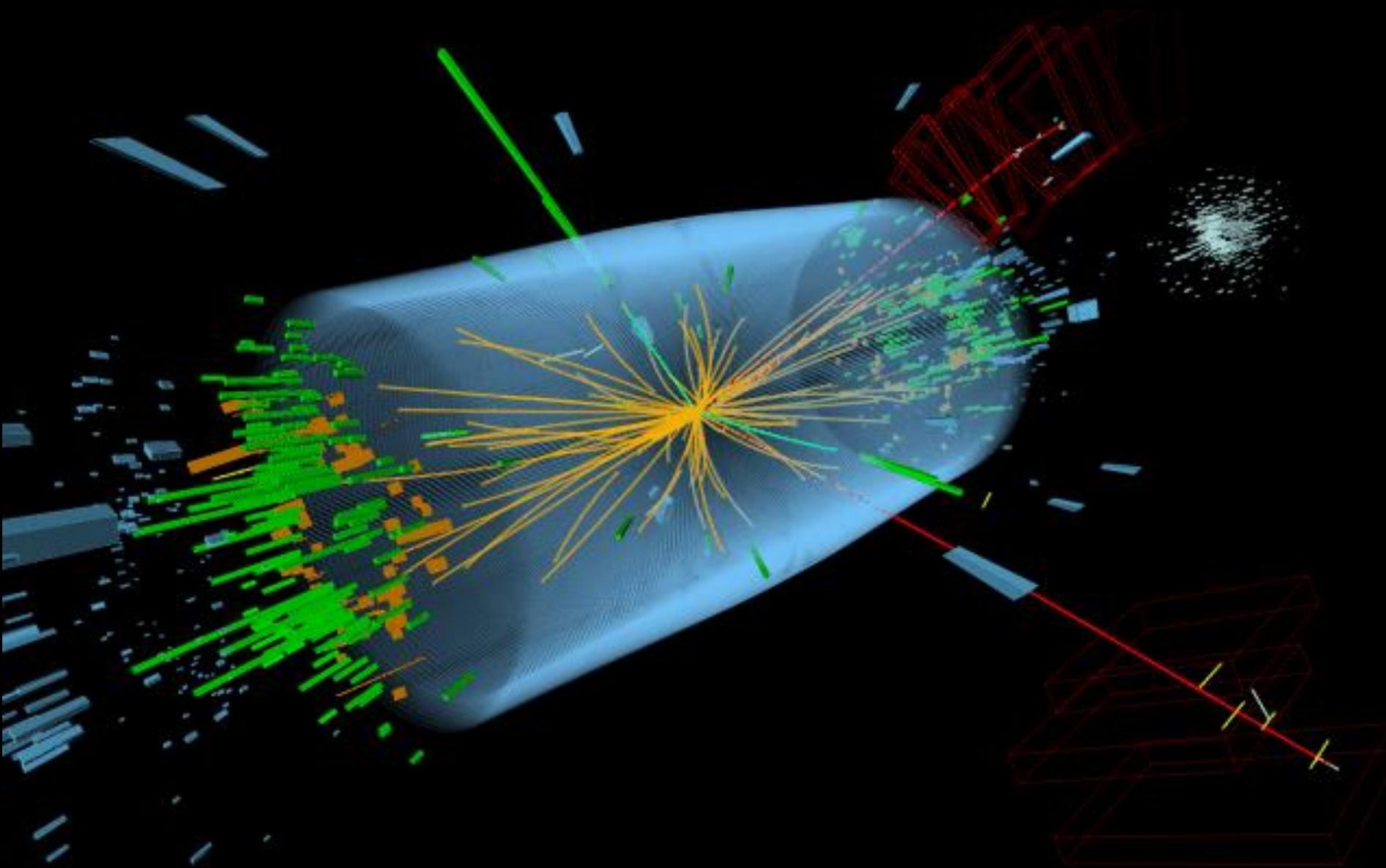
Ricerca di $H \rightarrow \gamma\gamma$



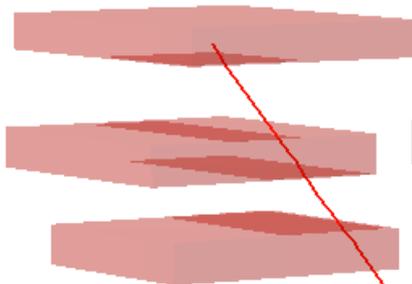
"4 σ " $\Rightarrow 3.15 \times 10^{-5}$ è la probabilità di assenza di segnale:

--> evidenza notevole di segnale

"4 σ " vuol dire che si ha una probabilità di 3.15×10^{-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.

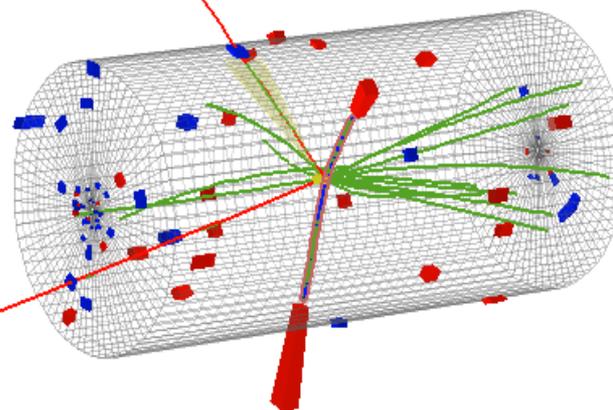


candidate ZZ event with two electrons and two muons



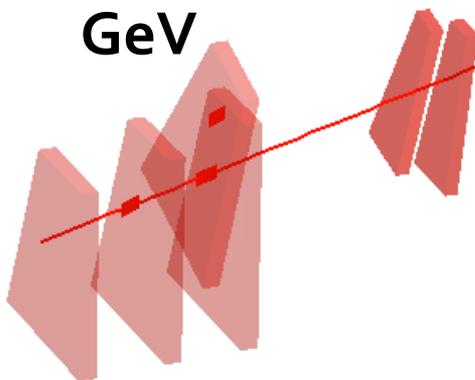
$\mu^+(Z_1) p_T : 43 \text{ GeV}$

$e^-(Z_2) p_T : 10 \text{ GeV}$



$e^+(Z_2) p_T : 21 \text{ GeV}$

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

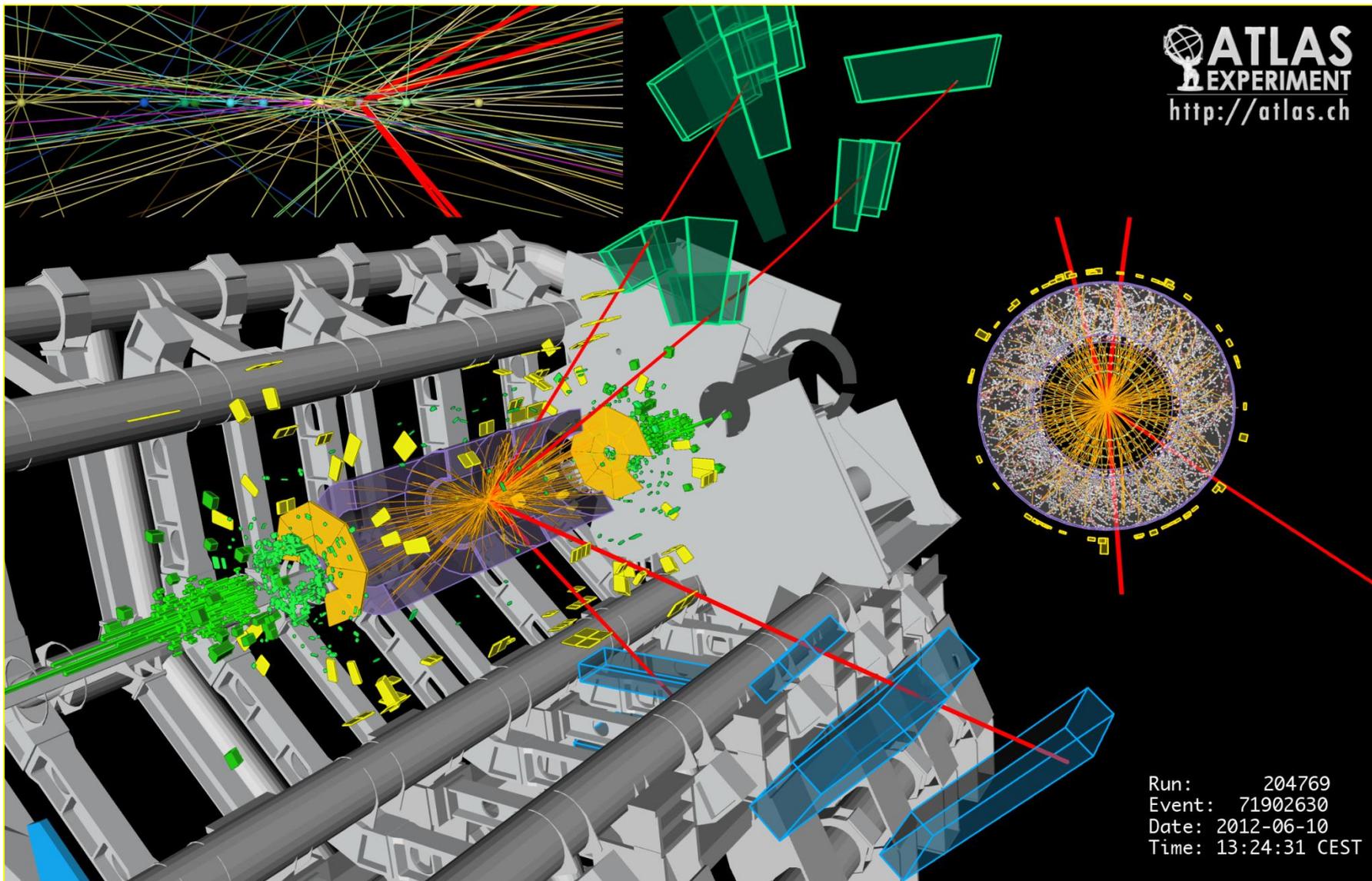


**Massa invariante dei
4-leptoni : 126.9 GeV**

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

4 μ 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

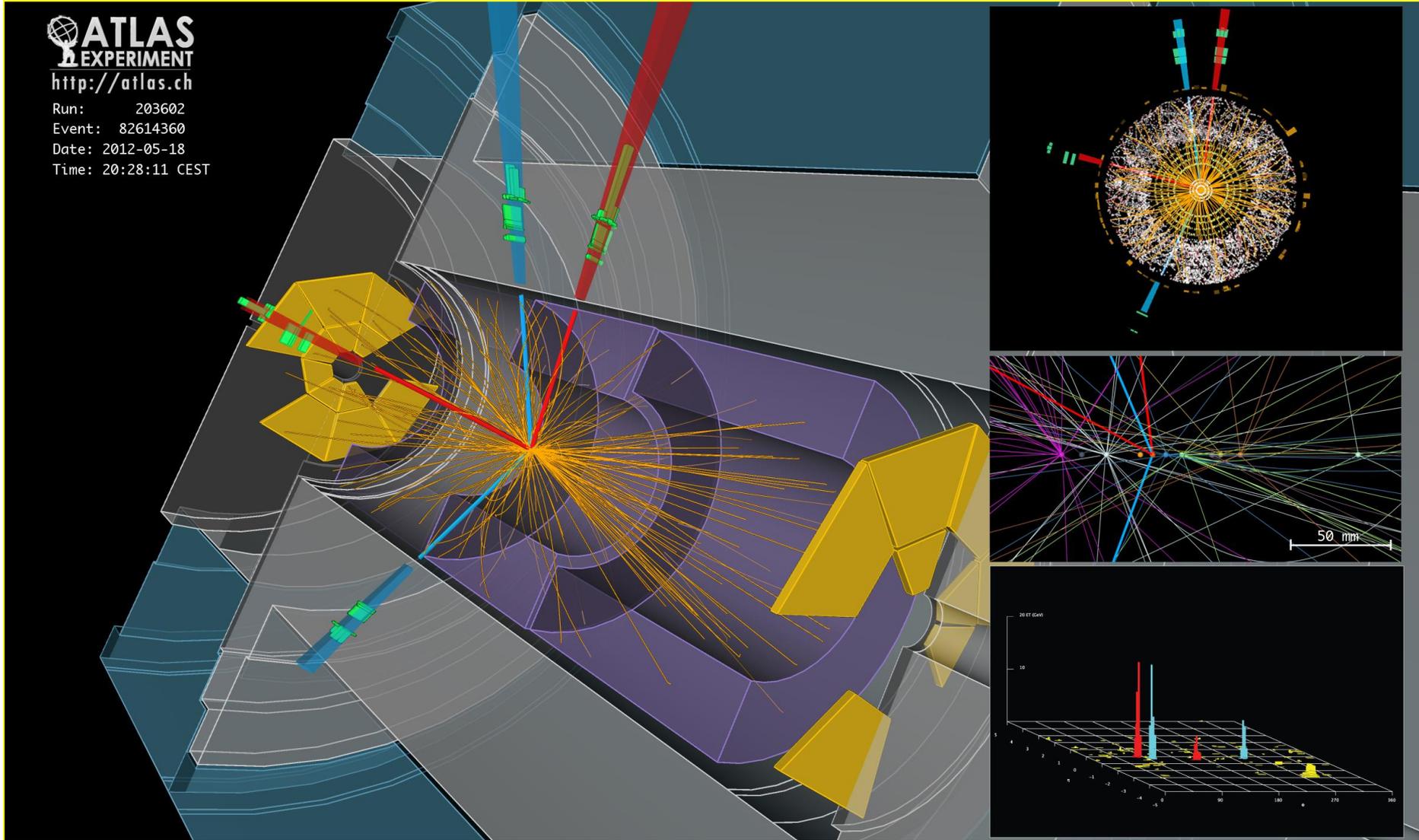


4e candidate with $m_{4e} = 124.6 \text{ GeV}$

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

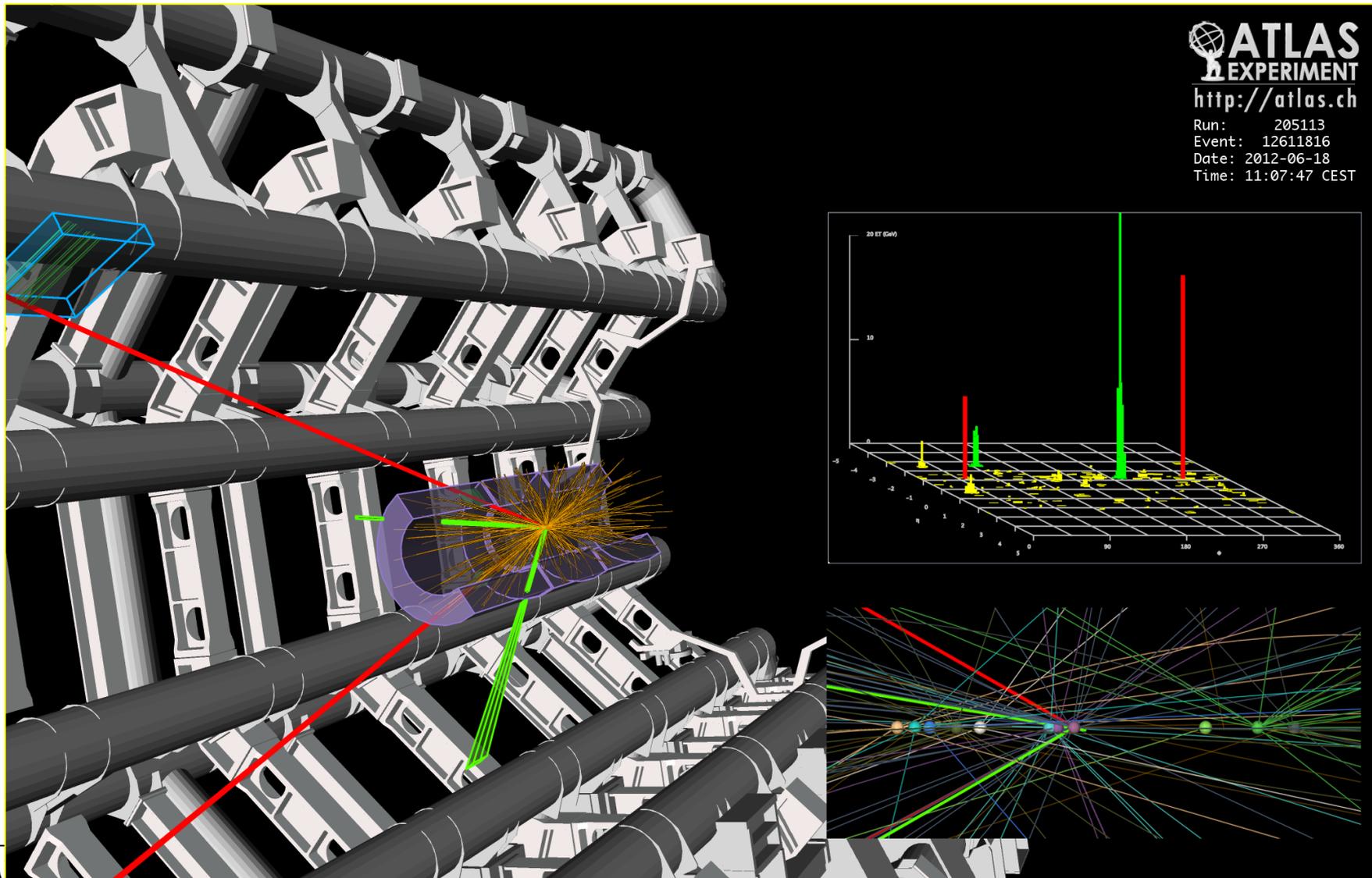
ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Run: 203602
Event: 82614360
Date: 2012-05-18
Time: 20:28:11 CEST

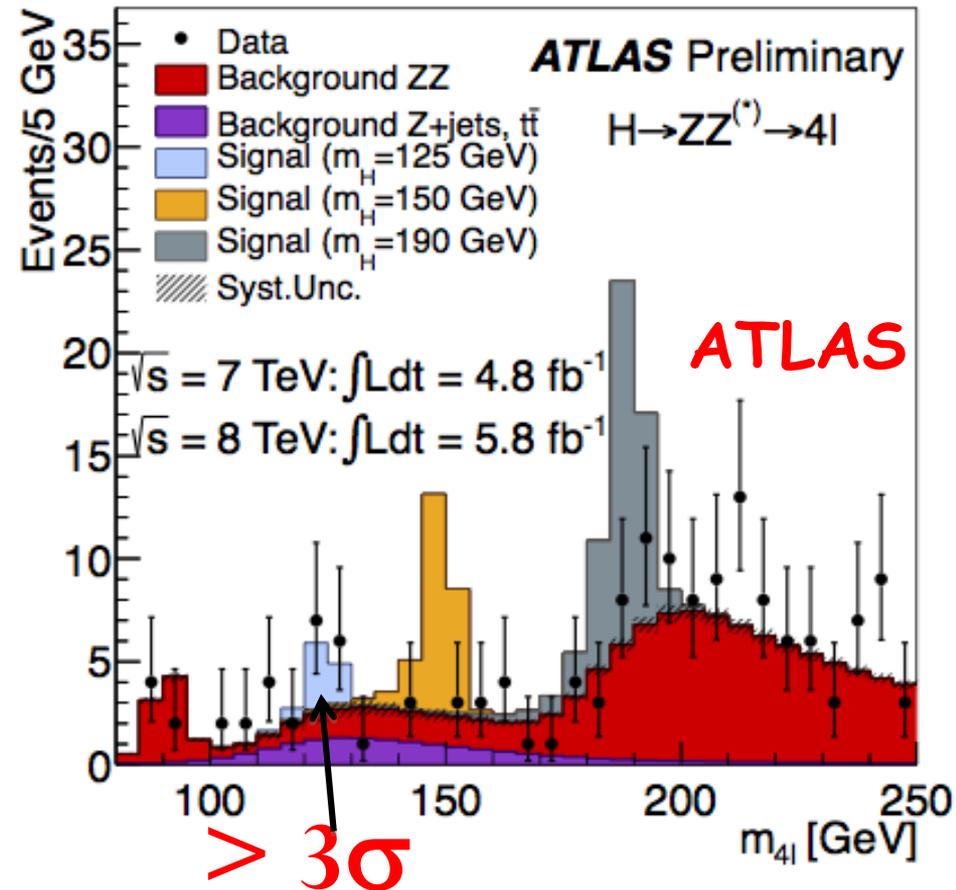
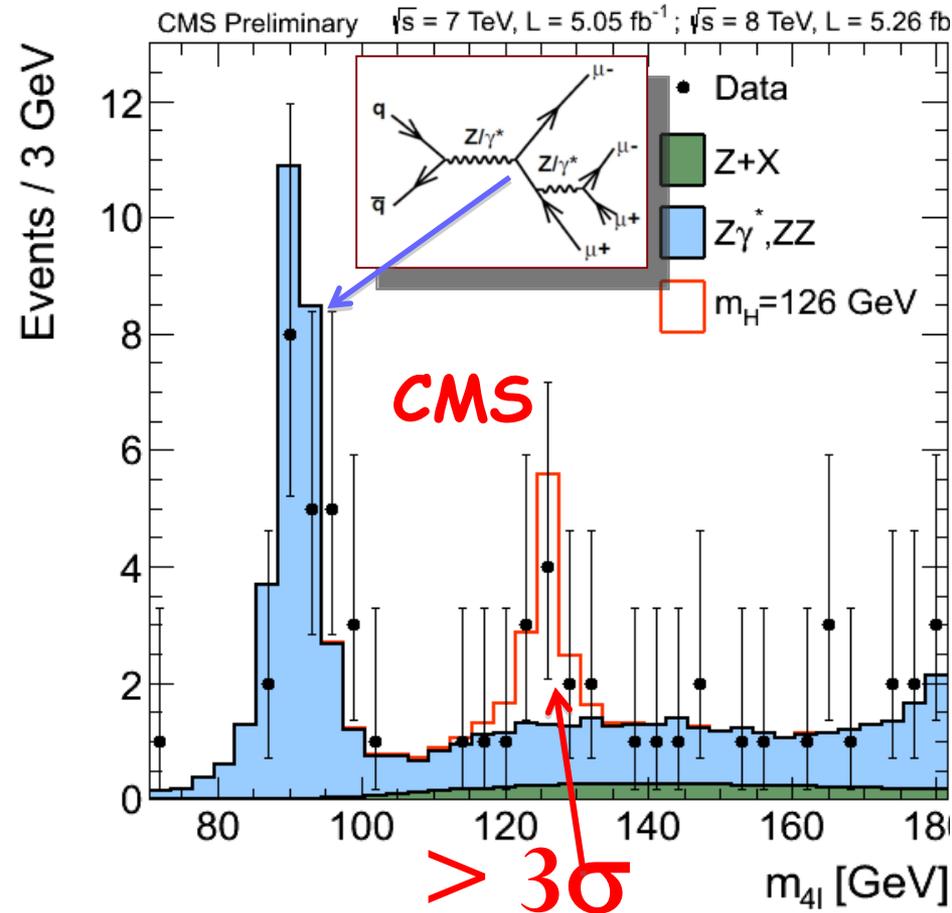


$2e2\mu$ candidate with $m_{2e2\mu} = 123.9 \text{ GeV}$

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



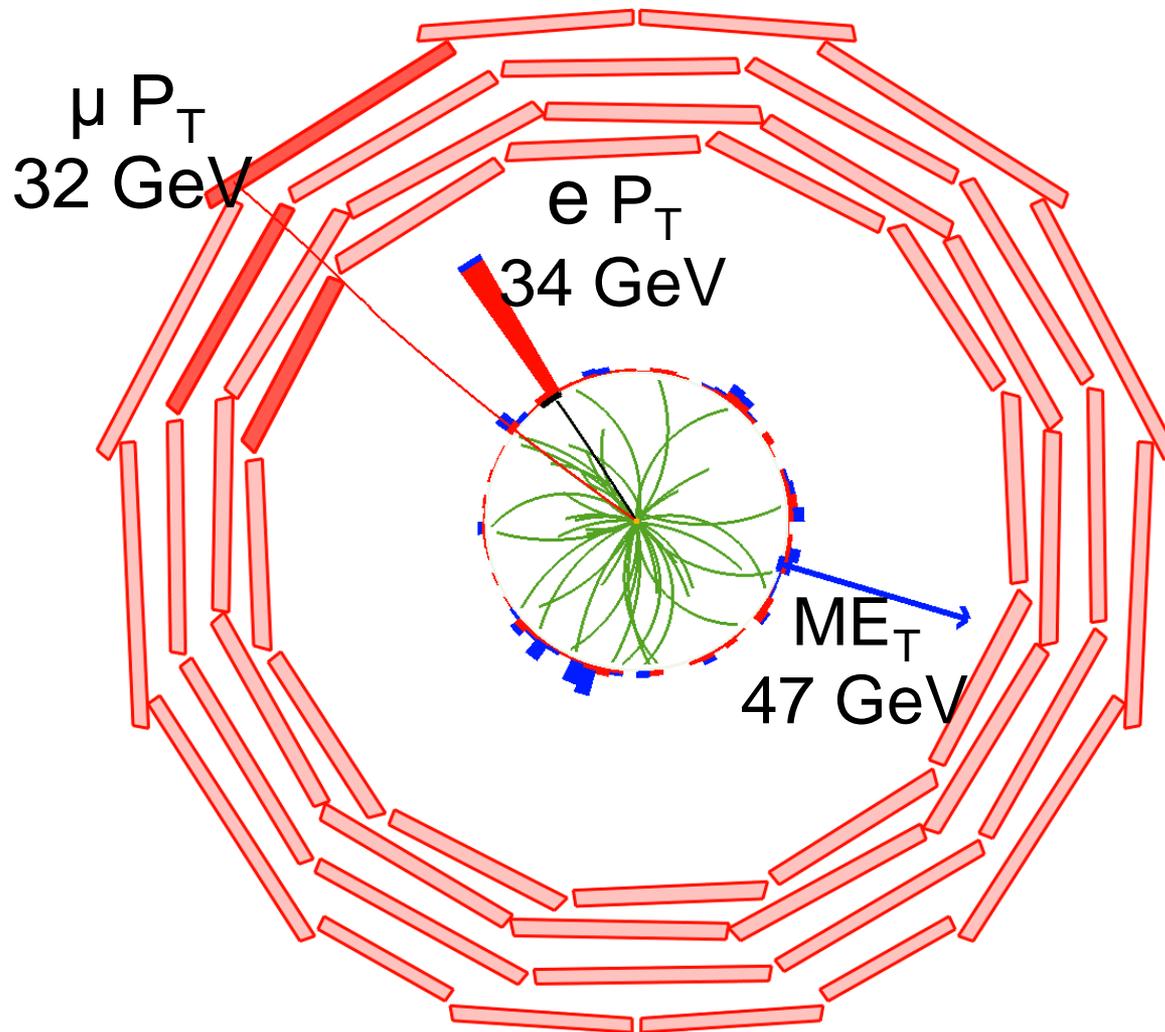
Ricerca di $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$



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

" 3σ " vuol dire che si ha una probabilità di 1.35×10^{-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.

Possibile evento di $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

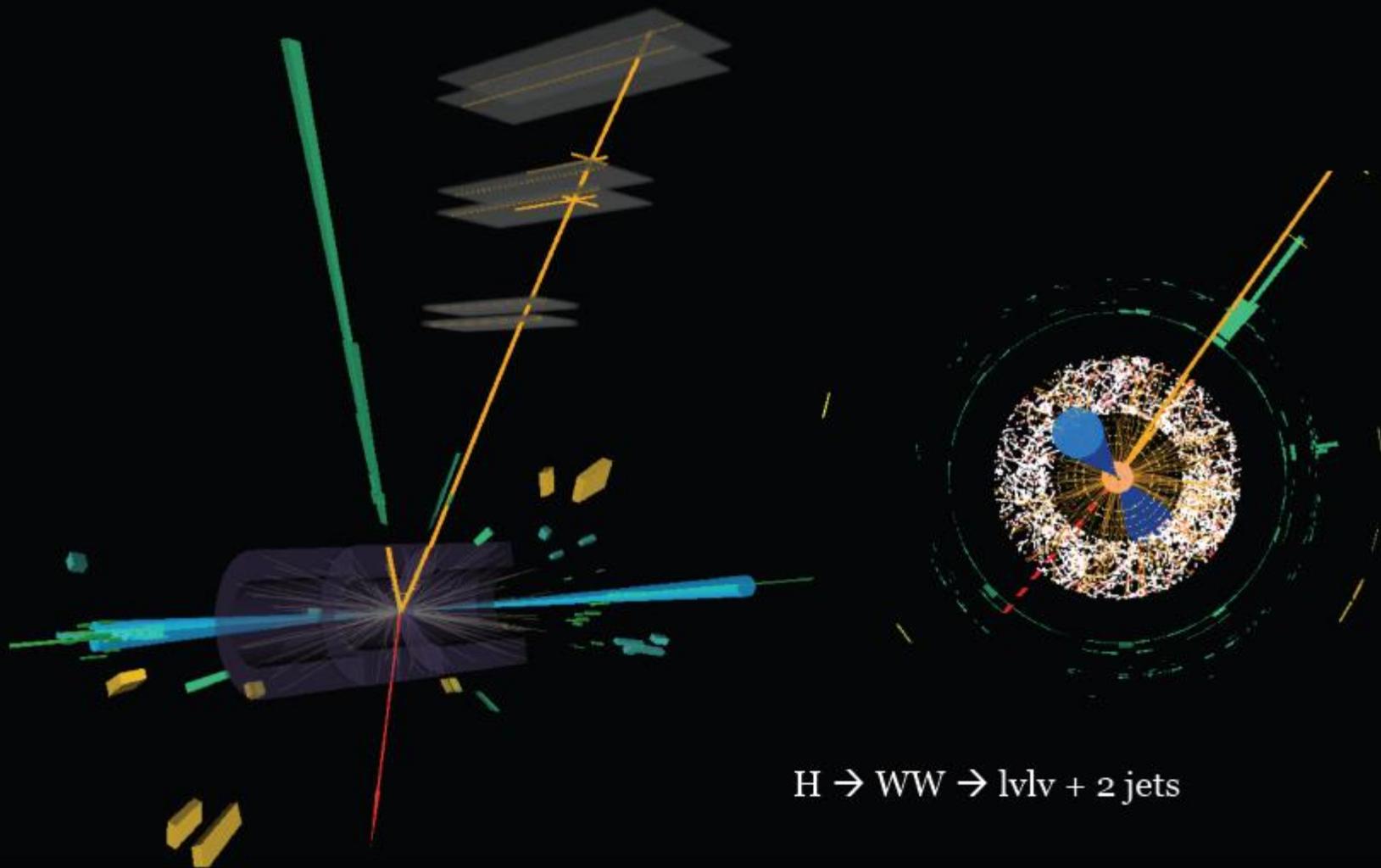


Eventi caratterizzati dalla presenza di:
2 leptoni (e/μ) di alto p_T
e grande E_T mancante

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 fb^{-1} ci si aspettano ~ 1500 eventi di Higgs. Dopo tutte le selezioni restano ~ 60 eventi di segnale e ~ 300 di fondo.

➤ $\geq 2\sigma$

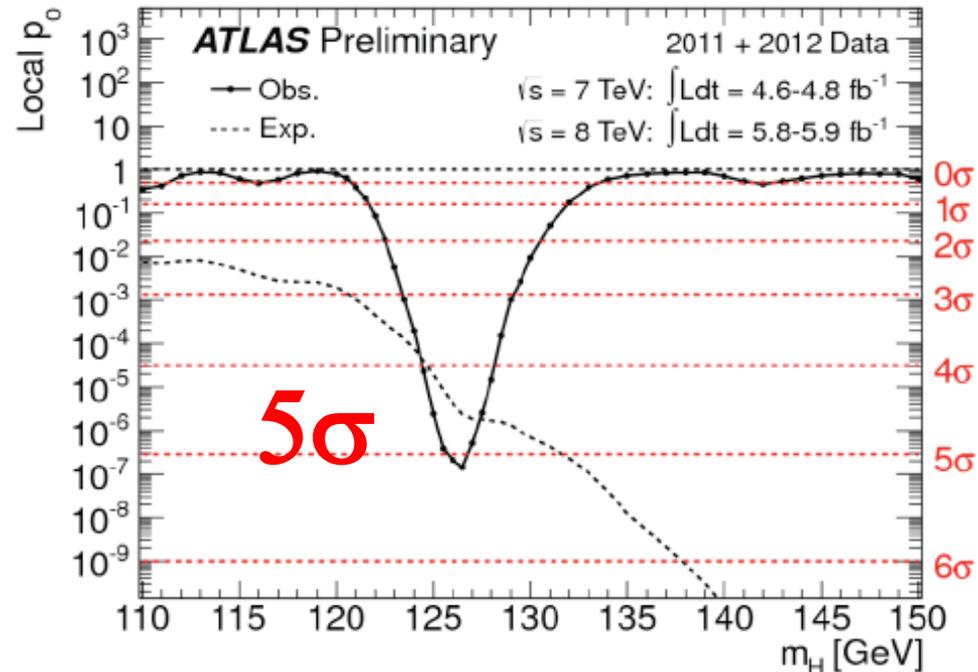
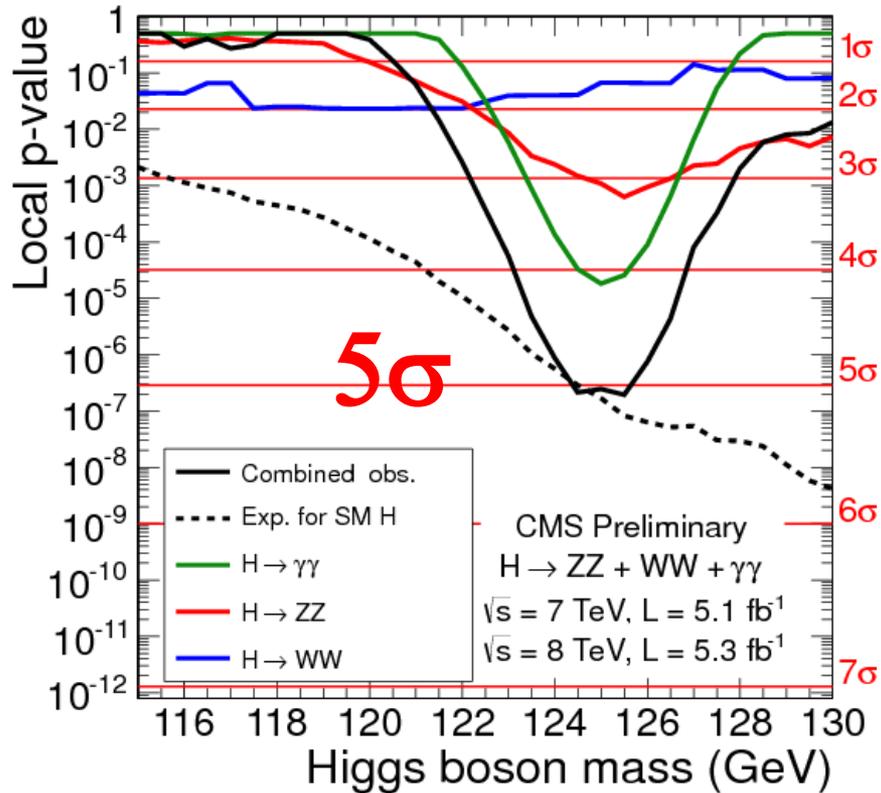
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



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

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

"5 σ " vuol dire che si ha una probabilità di 2.85×10^{-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 !!!

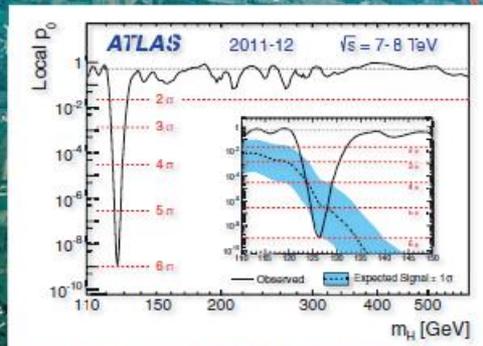
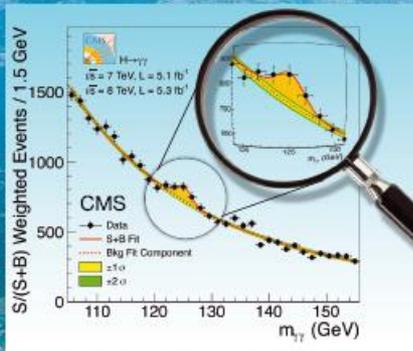
$$"5\sigma" \Rightarrow 2.85 \times 10^{-7}$$



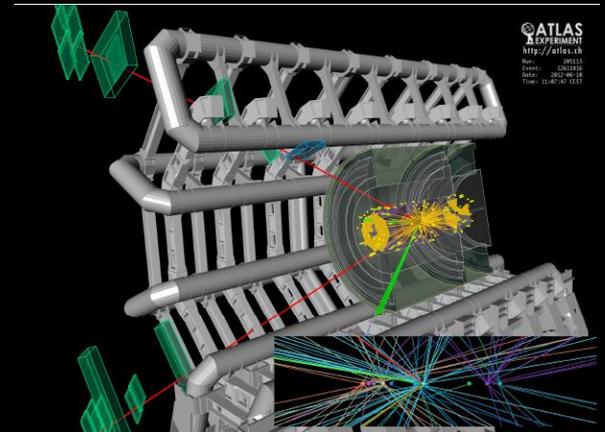
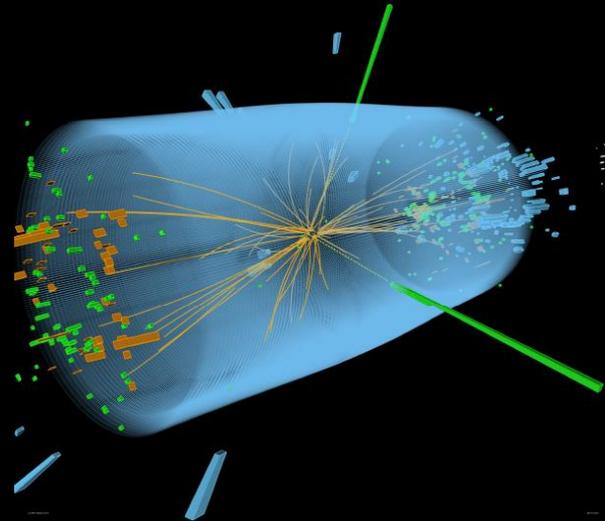
“scoperta”



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



www.elsevier.com/locate/physletb



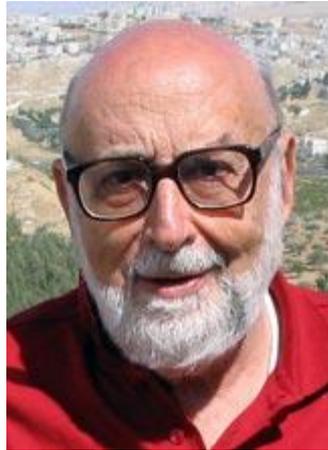
Congratulations to both
Atlas and CMS Collaborations
and to the builders of the LHC
on a magnificent achievement!

Peter Higgs

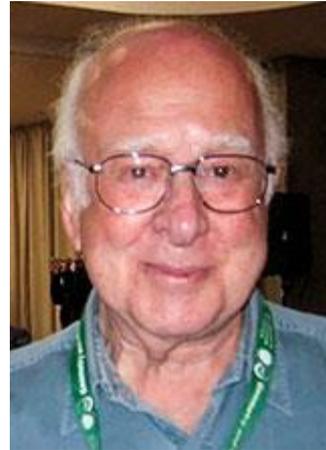
30 August 2012



Premio Nobel per la Fisica 2013



François Englert



Peter W. Higgs

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.

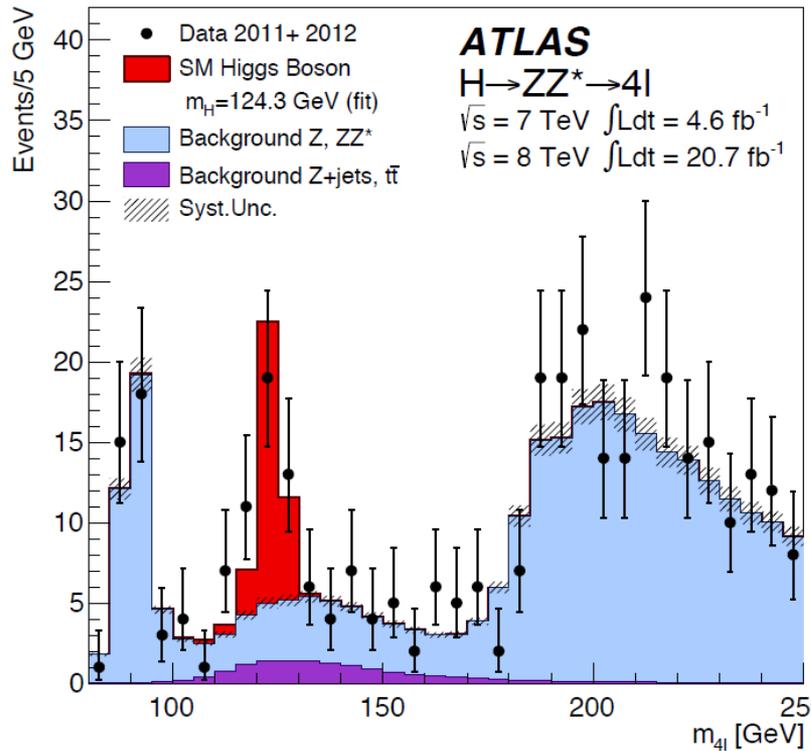


Robert Brout

H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 leptoni

Tutta la statistica

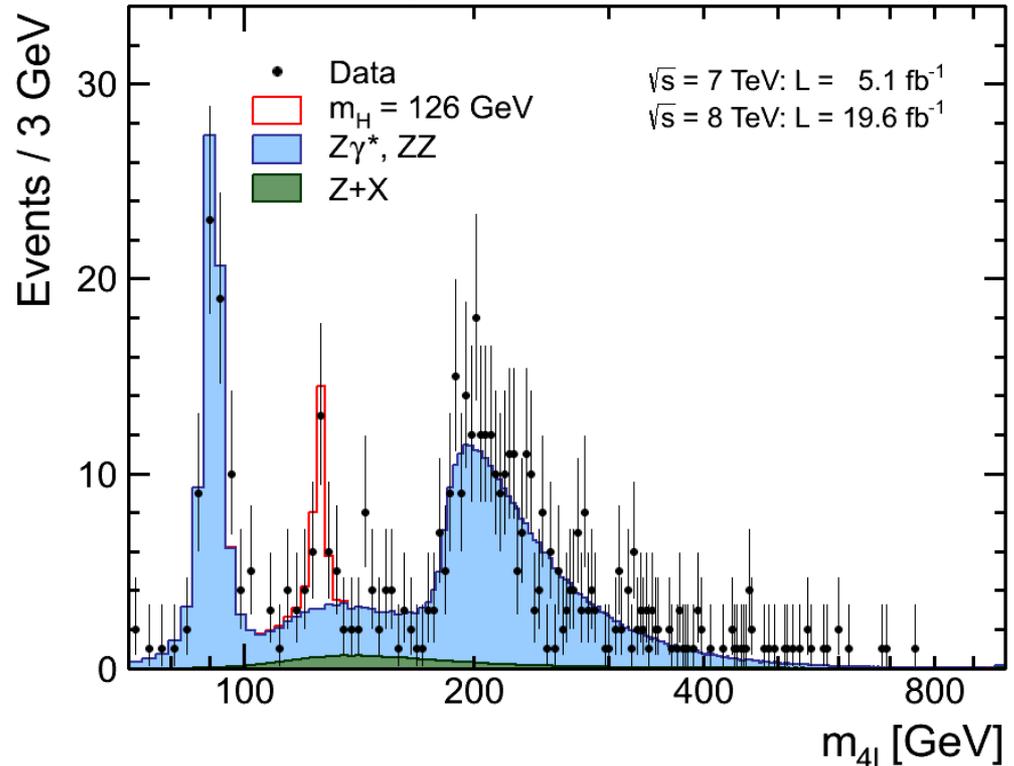
ATLAS



6.6 σ (4.4 σ asp.)

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

CMS



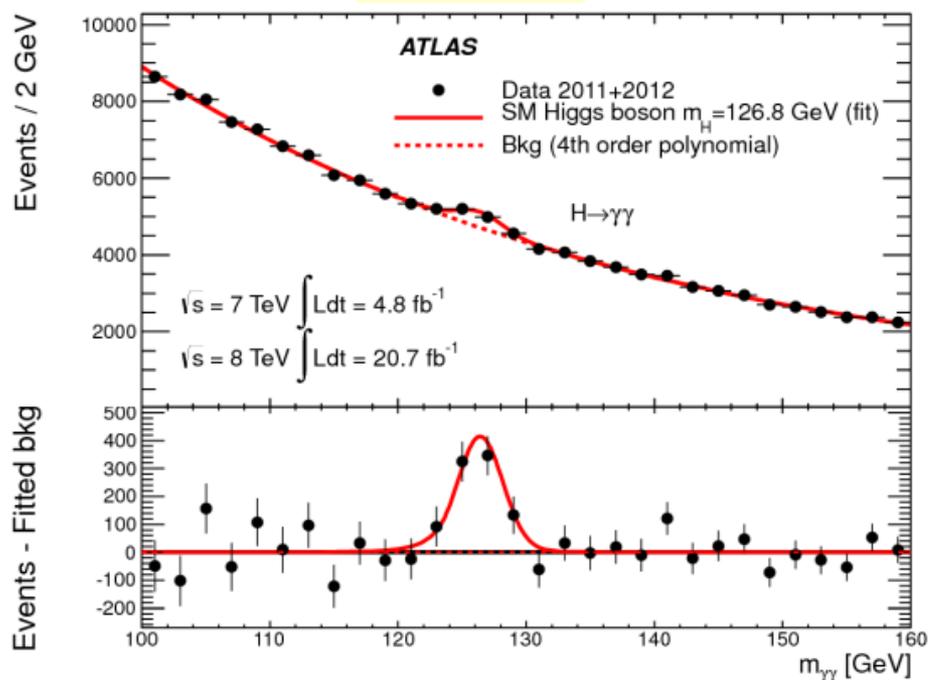
6.7 σ (7.1 σ asp.)

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

$H \rightarrow \gamma\gamma$

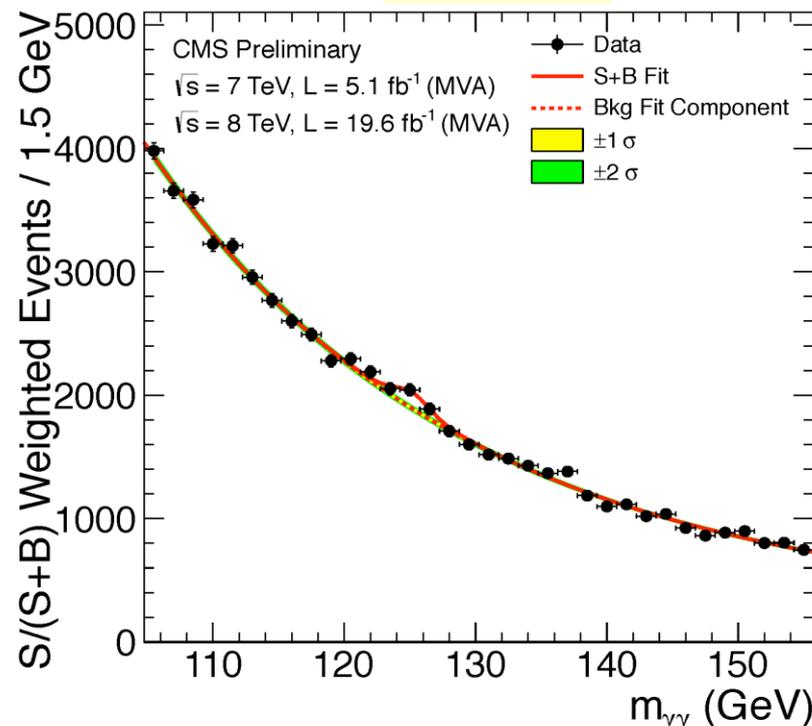
Tutta la statistica

ATLAS



7.6 σ (4.1 σ asp.)
 $m_H = 126.8 \pm 0.2(\text{stat}) \pm 0.7(\text{syst})$ GeV

CMS



3.2 σ (4.2 σ asp.)
 $m_H = 125.4 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst})$ 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



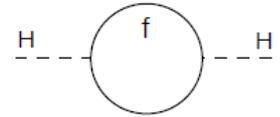
Meccanismo di Higgs

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

$$= 125 \text{ GeV}$$

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

Λ_{UV} può essere grande quanto Λ_{planck}



Soluzione: per ogni fermione f introdurre un corrispondente scalare s che cancelli tutti i vari termini di Δm_H



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

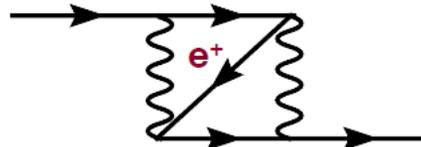
$$= 0.5 \text{ MeV}$$

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

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

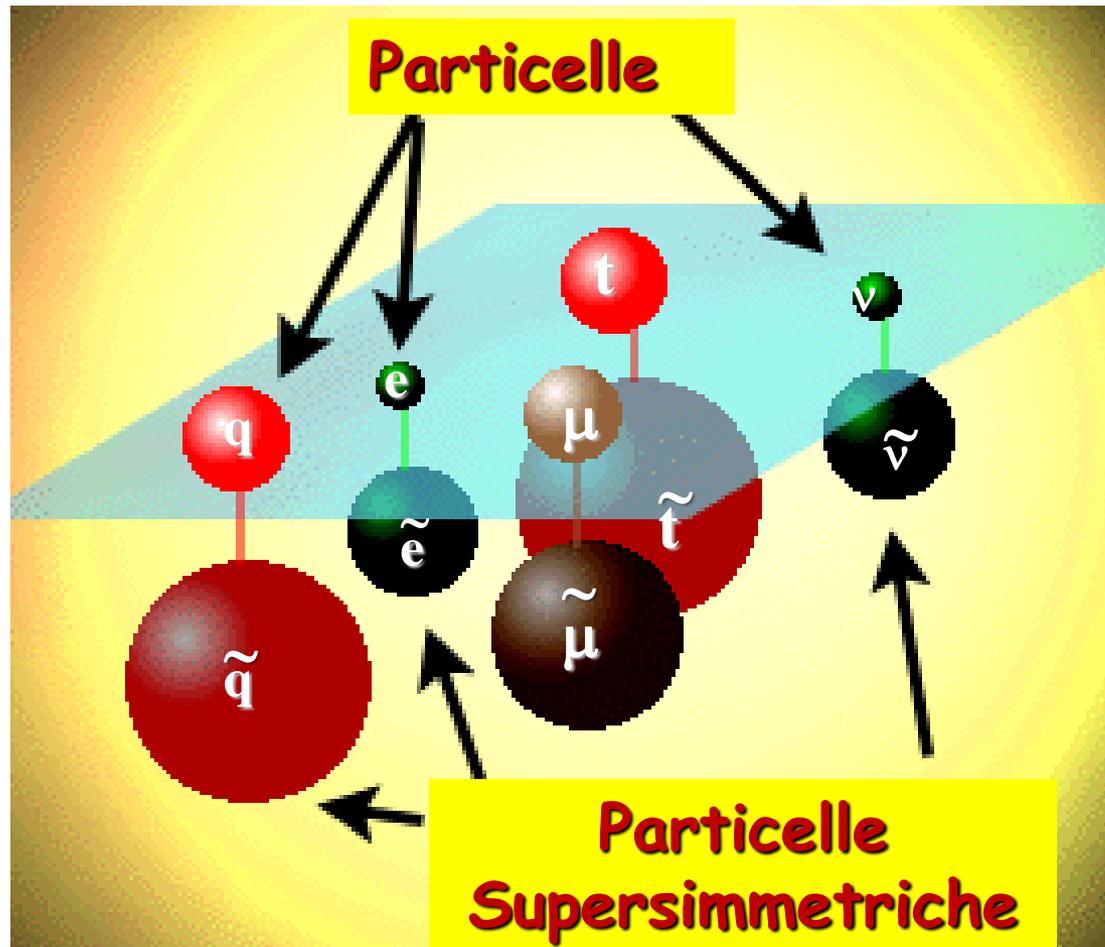
La massa del bosone di Higgs tende a divergere a causa delle fluttuazioni delle particelle virtuali nel vuoto quantistico ($\Delta E \times \Delta t \approx \hbar$) che interagiscono con esso.

Soluzione: per ogni fermione f introdurre un antifermione che cancelli tutti i vari termini di ΔE



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

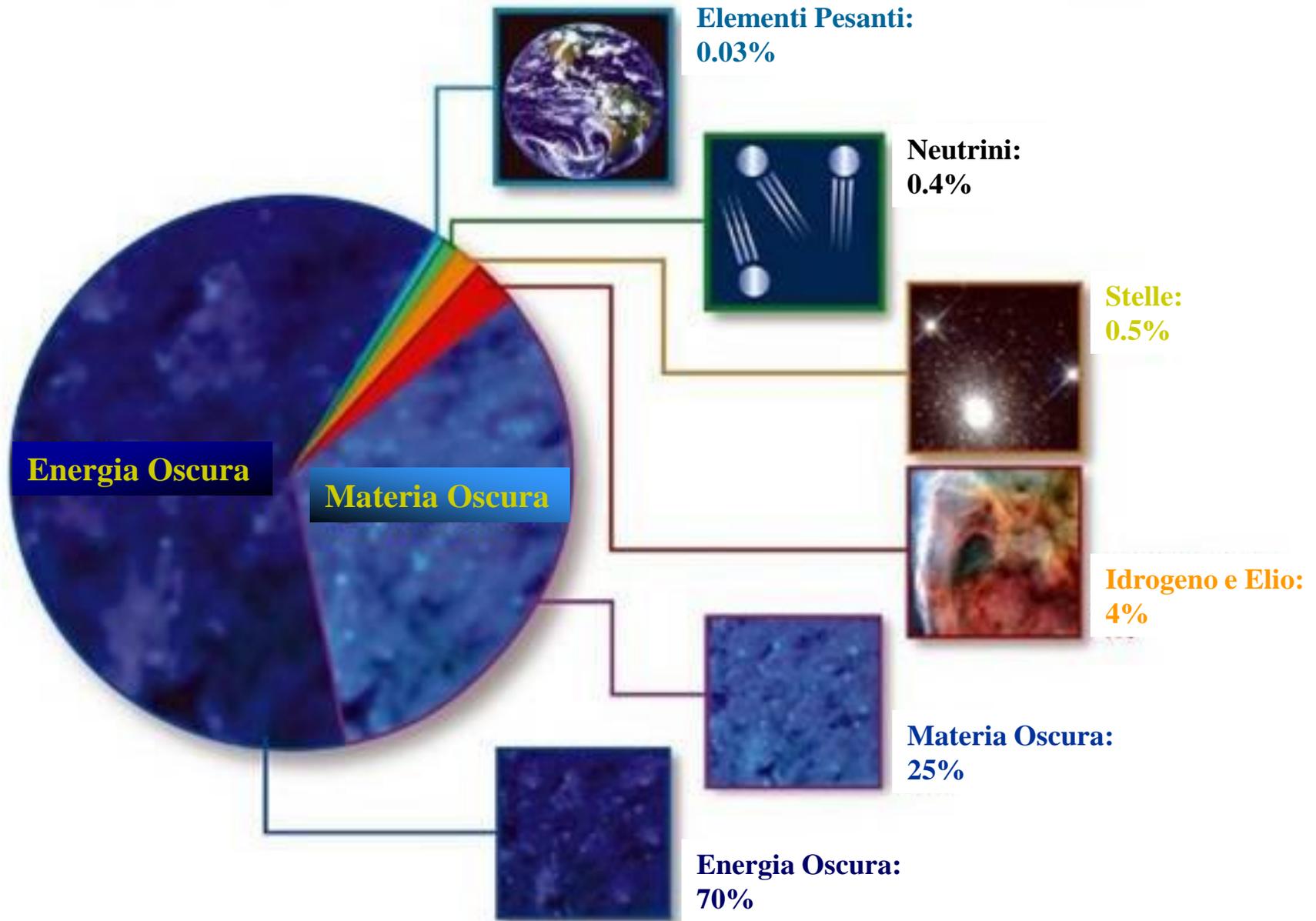
L'inconsistenza del modello potrebbe essere risolta se esistesse un mondo di particelle supersimmetriche corrispondente al mondo delle particelle standard.



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

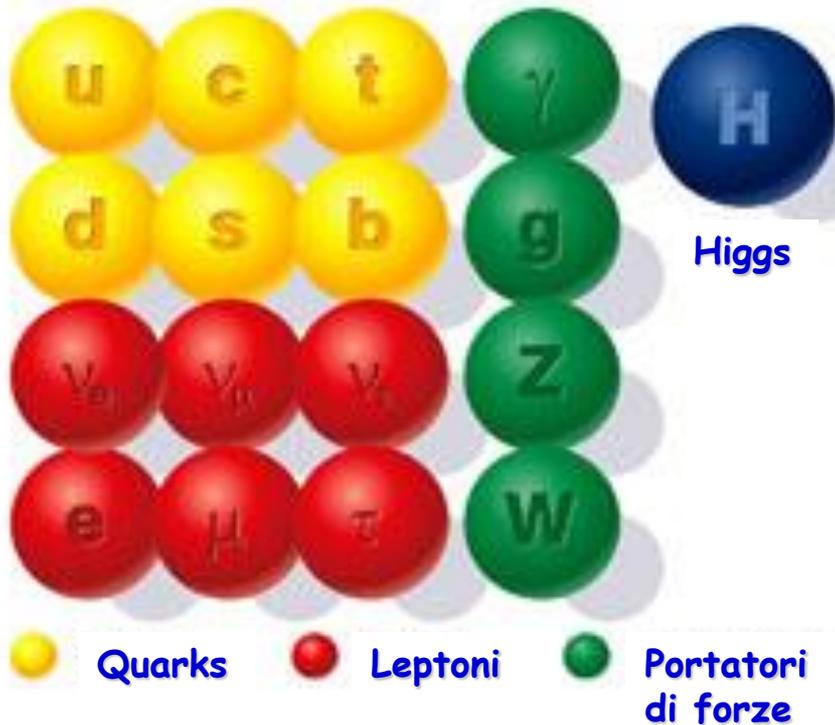
Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)

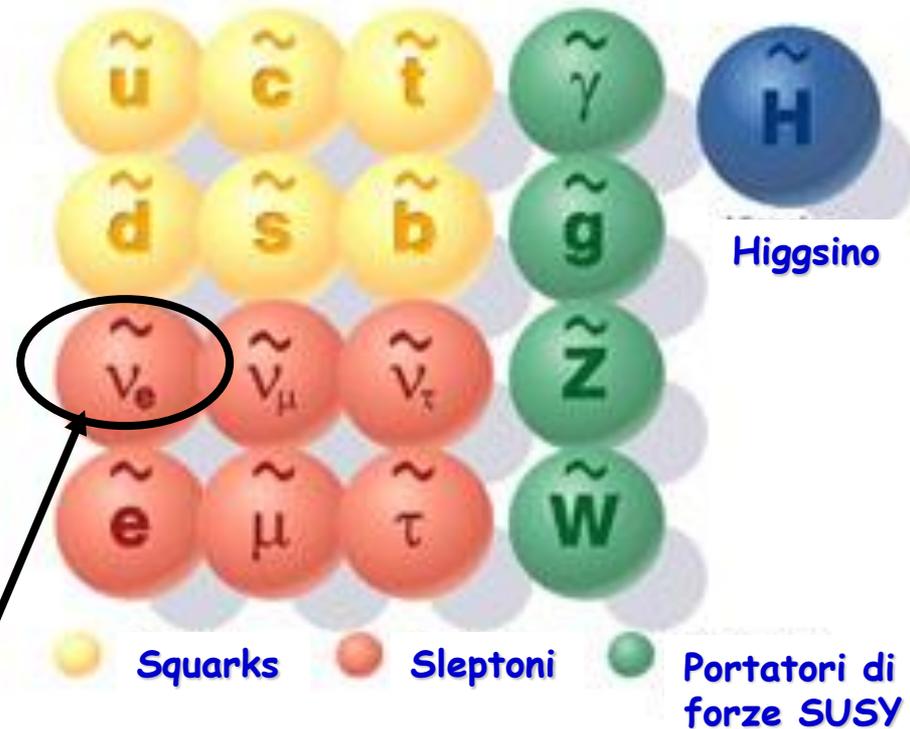


La **Materia Oscura** e' dovuta all'esistenza di **Particelle Supersimmetriche** ?
Tali particelle potrebbero non essere state scoperte fino ad oggi perché hanno masse molto più grandi delle masse delle particelle standard.

Particelle Standard



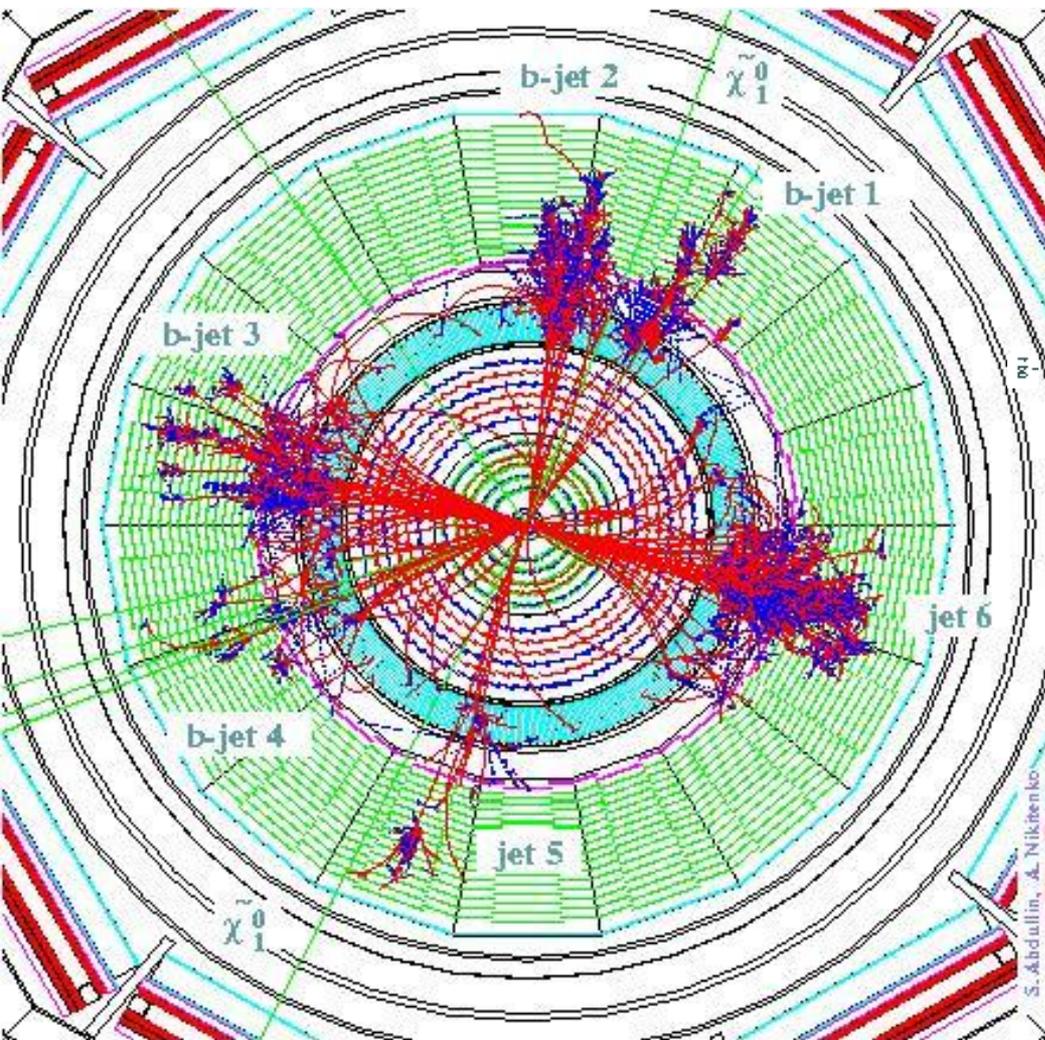
Particelle Supersimmetriche (SUSY)



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; $A_0=0$; $\tan\beta=35$; $\mu>0$



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

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

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

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

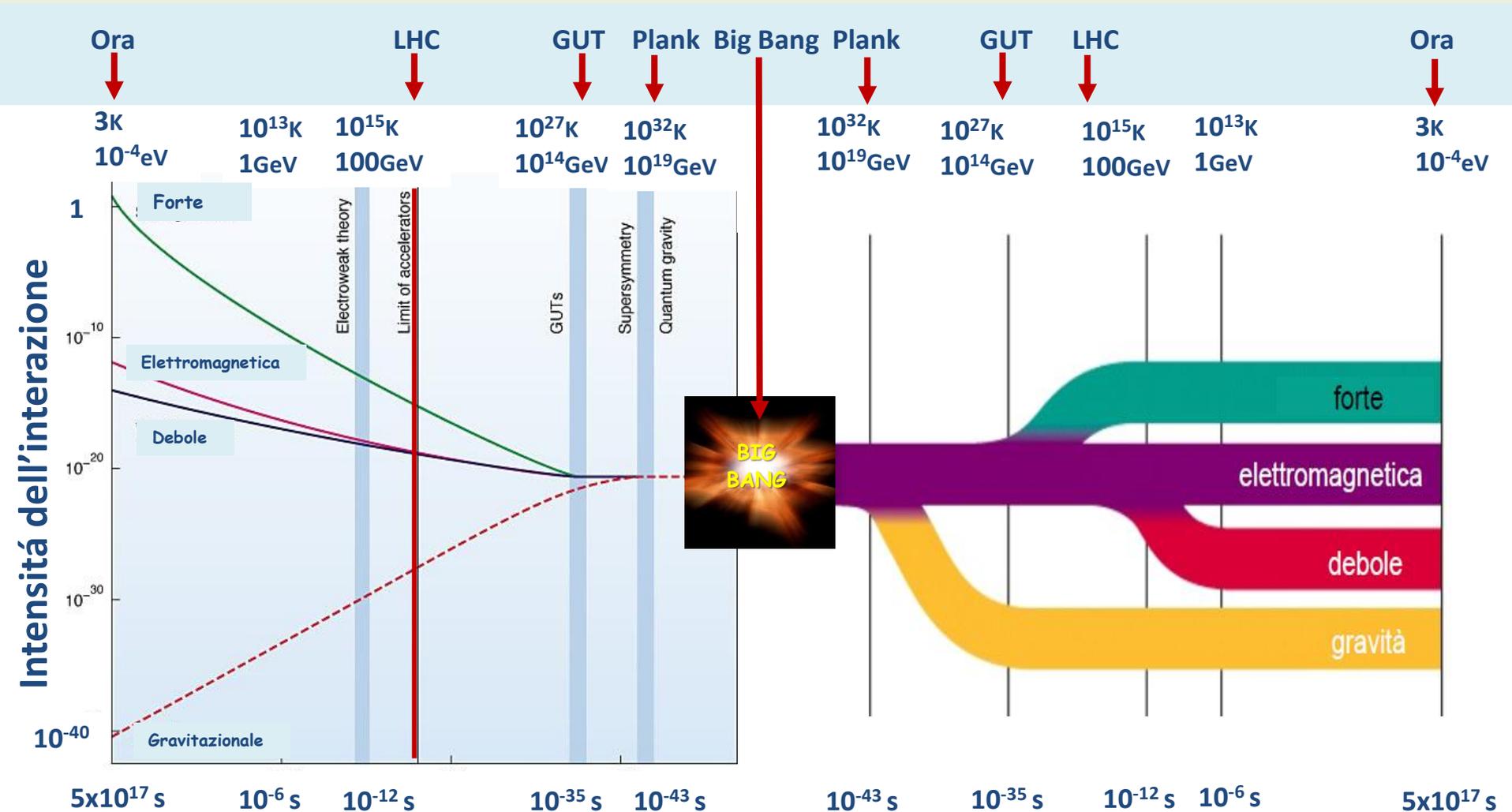
$$m(\tilde{g})=1266 \text{ GeV} ; m(\tilde{t}_1)=1026 \text{ GeV}$$

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

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

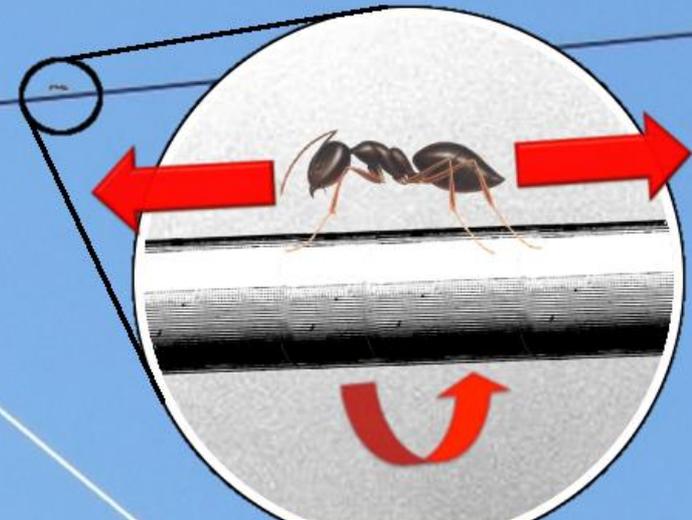
L'unificazione delle Forze

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

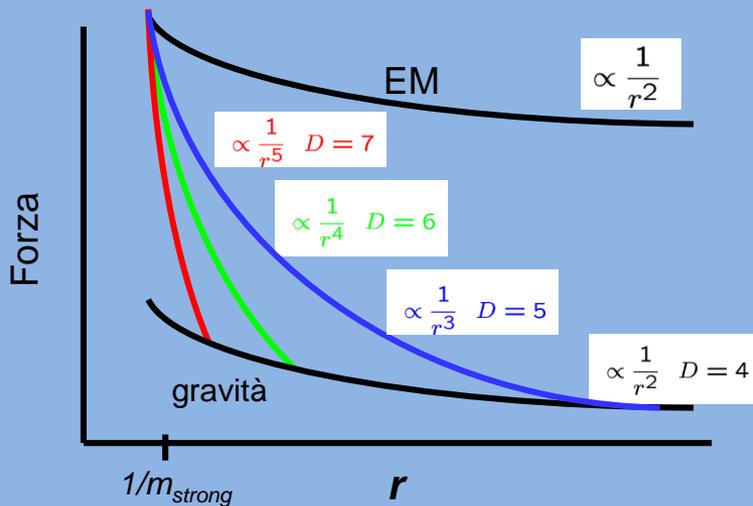


Dimensioni nascoste

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

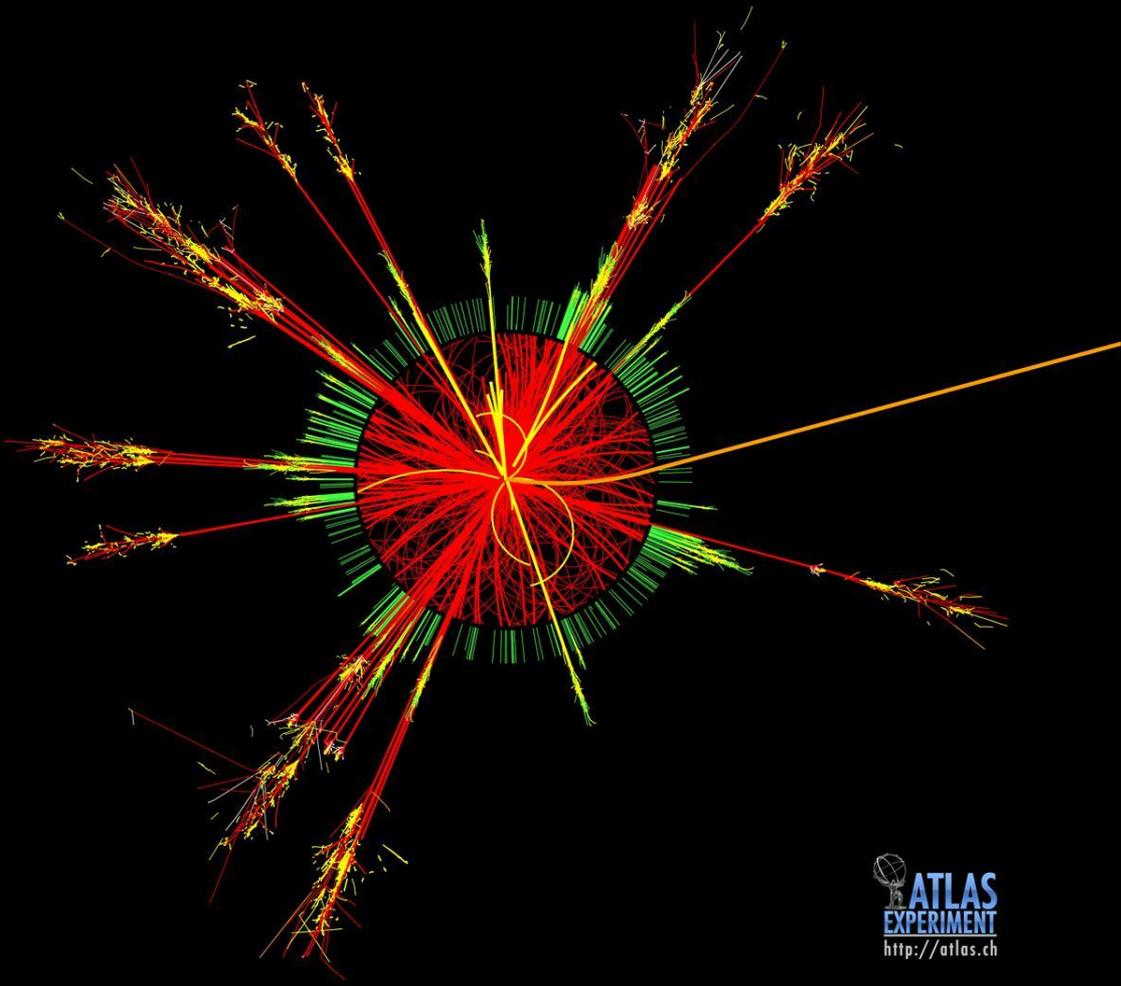
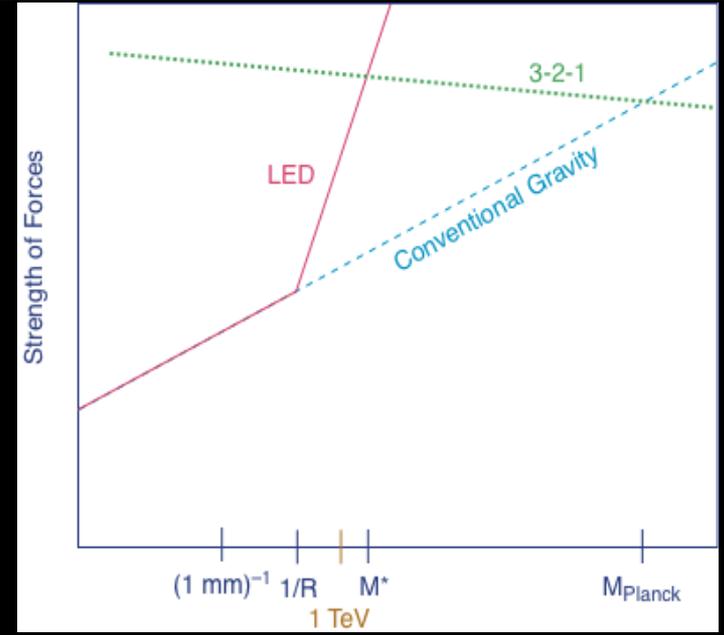
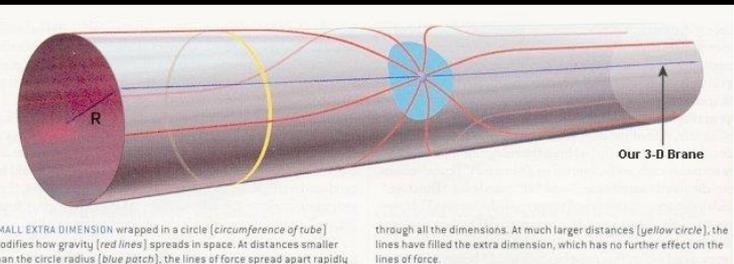


Gravità in n dimensioni nascoste



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

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

The main 2013-14 LHC consolidations

1695 Openings and final reclosures of the interconnections

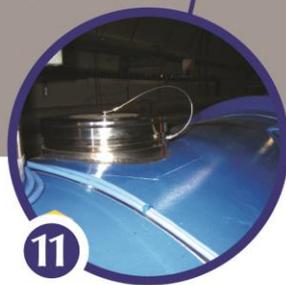
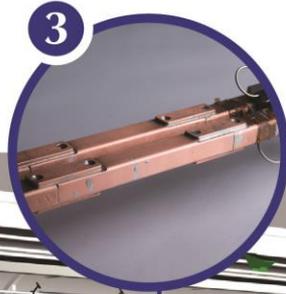
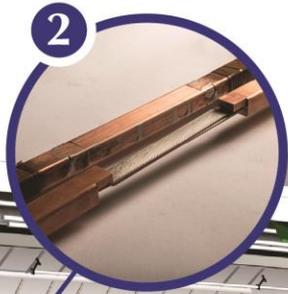
Complete reconstruction of 3000 of these splices

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

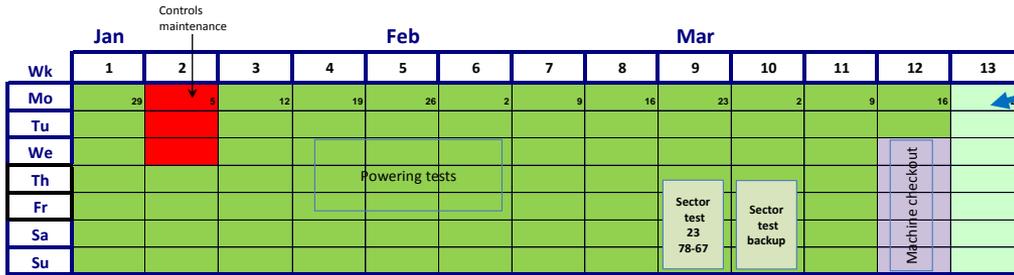
3 quadrupole magnets to be replaced

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

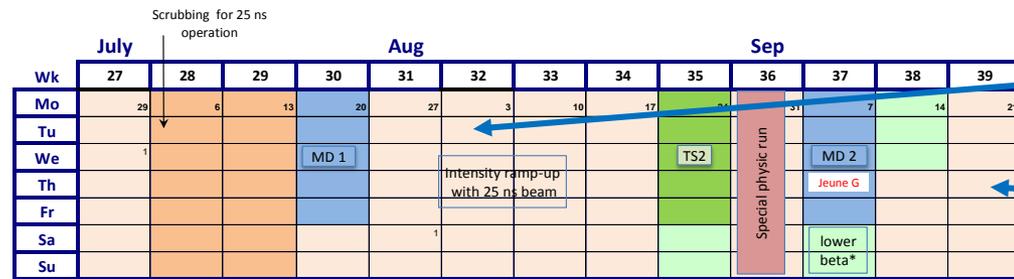
Programma di LHC per il 2015



fasci in LHC a 13 TeV

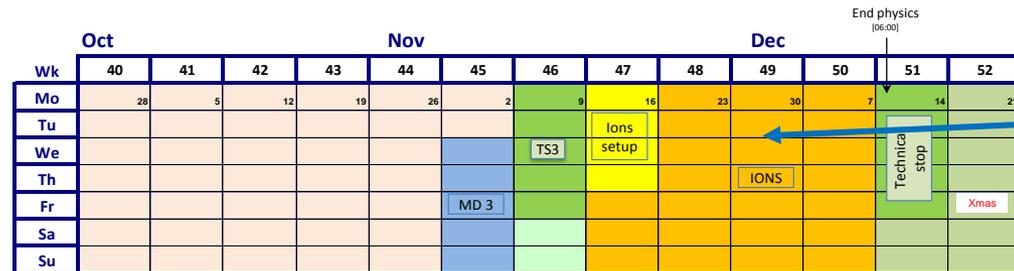


Incroci a 50 ns, $\beta^* 80$ cm



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

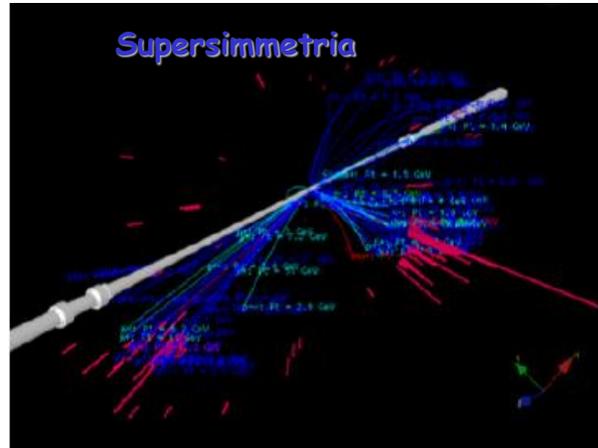
Incroci a 25 ns, $\beta^* 40$ cm



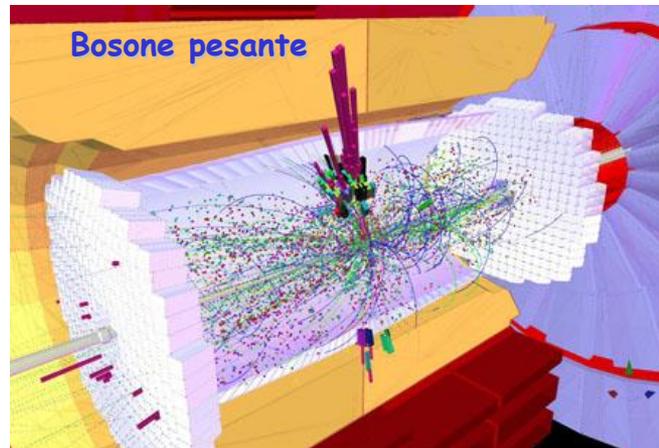
Ioni pesanti (Pb-Pb)

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

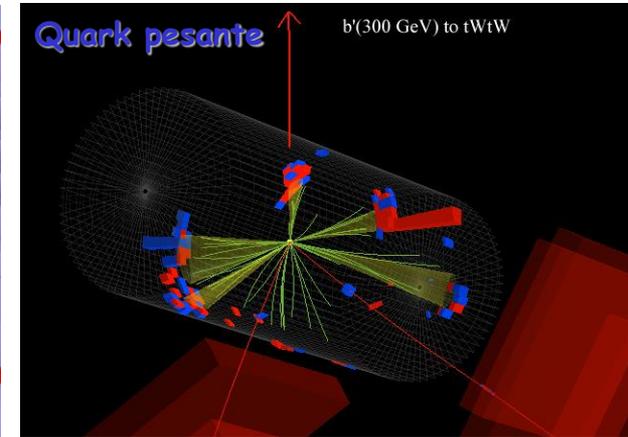
Supersimmetria



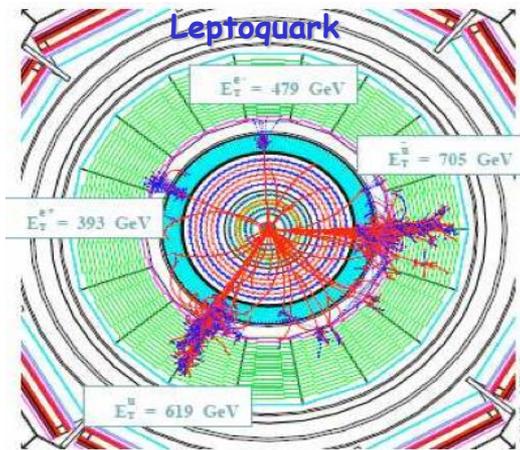
Bosone pesante



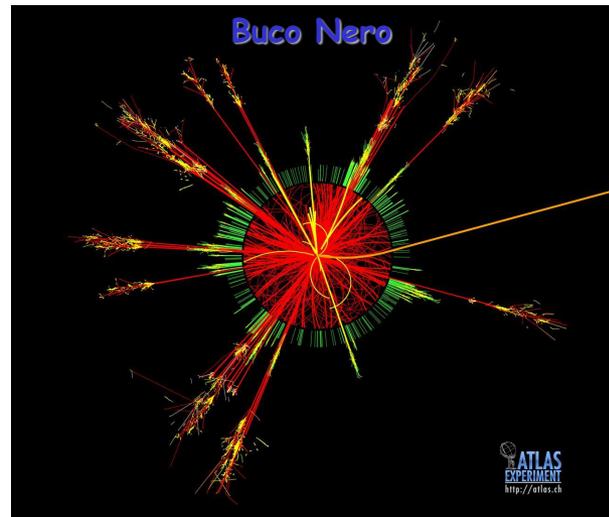
Quark pesante



Leptoquark

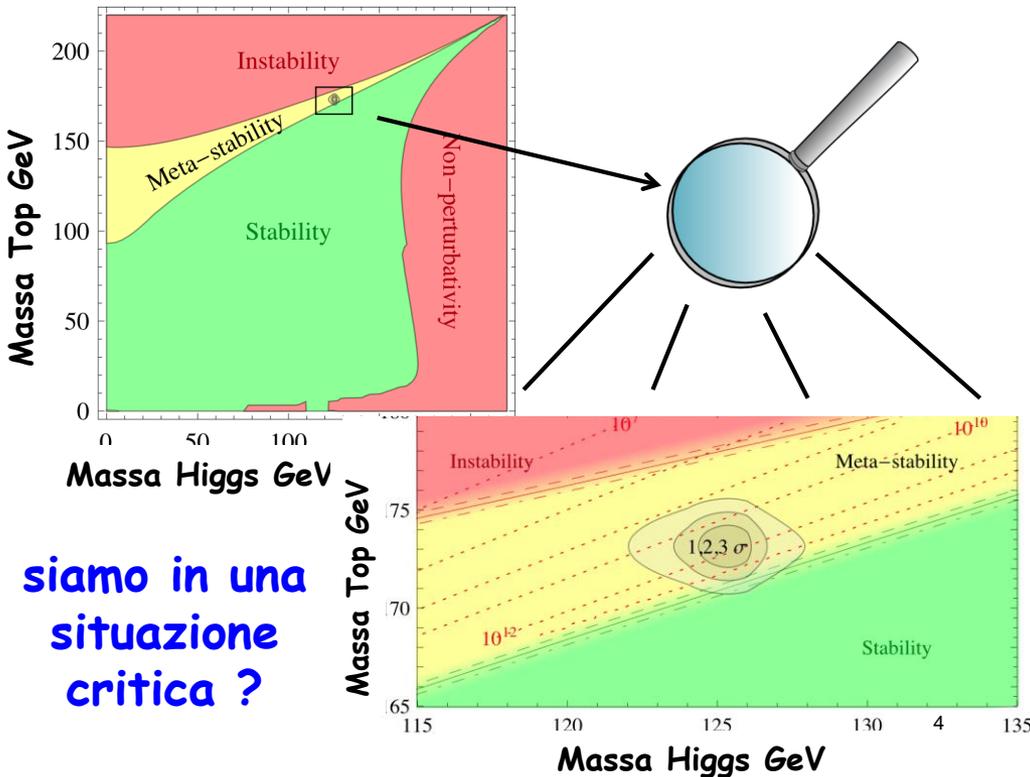
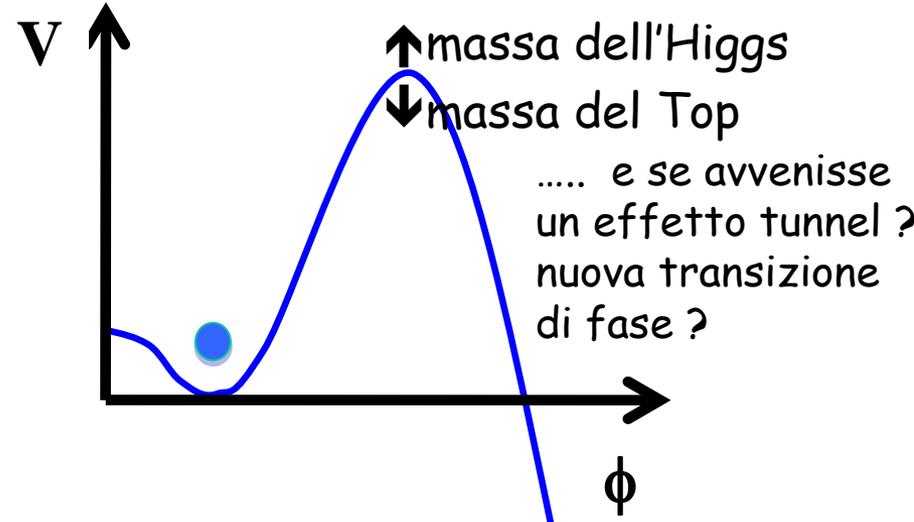
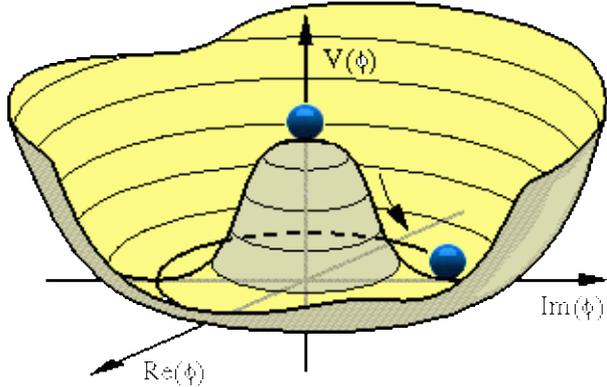


Buco Nero



- * 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?



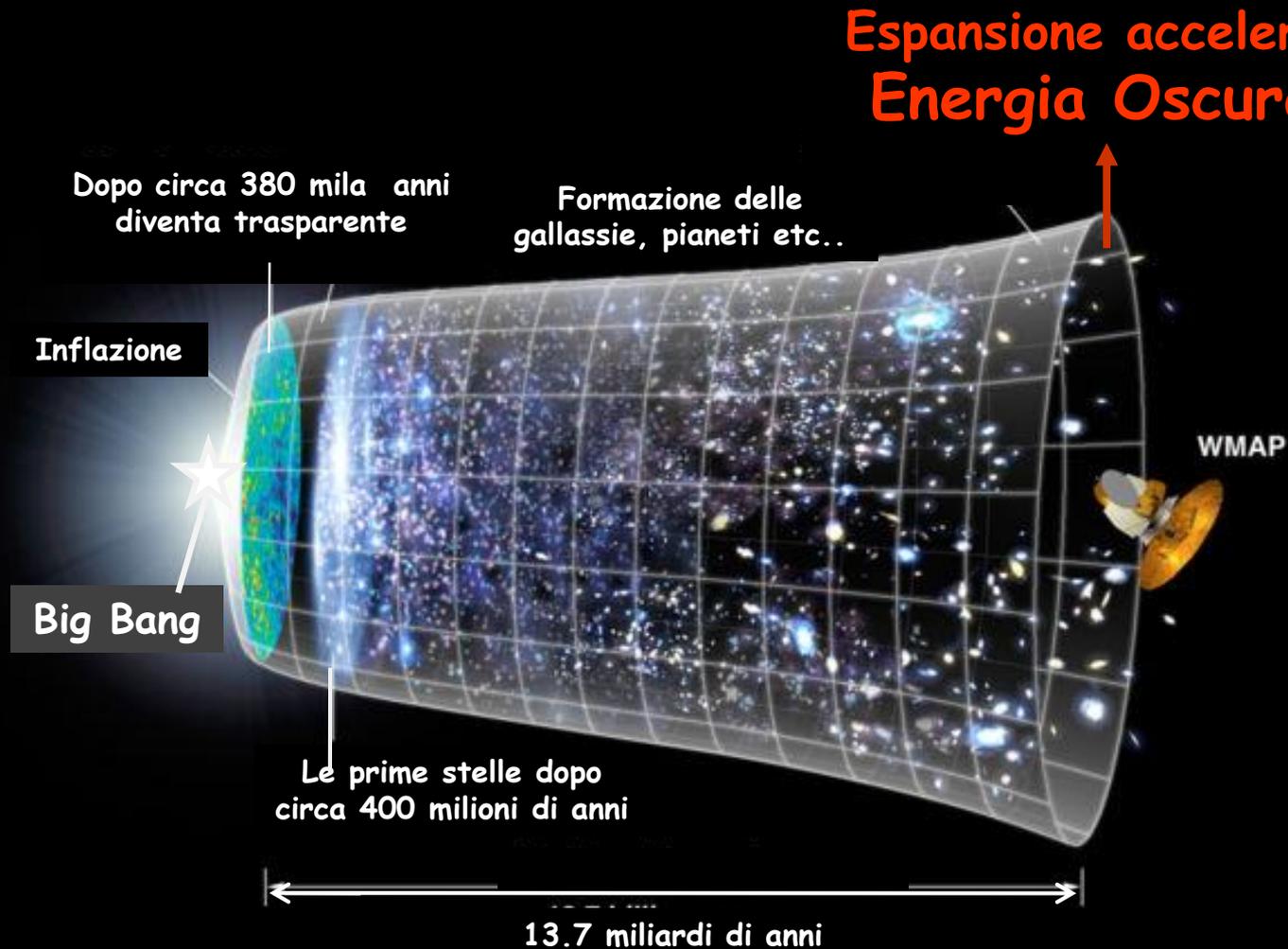
siamo in una situazione critica ?



Slide da G. Giudice

Per $m_h \approx 125 \text{ GeV}$ e $m_{top} \approx 173$ (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 λ -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 ± 0.12 miliardi di anni.

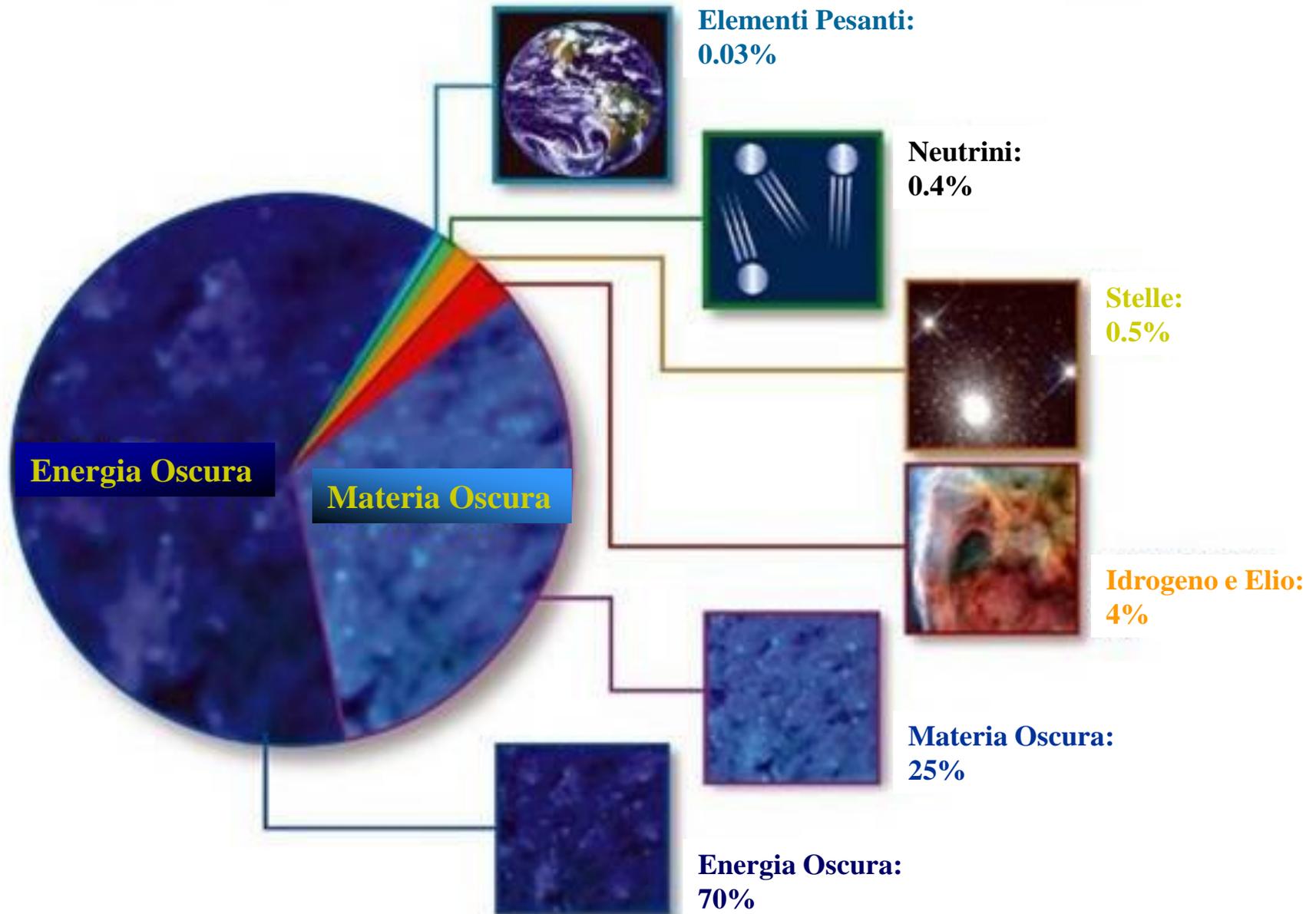
Conclusioni

- ✓ 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, così come fondamentale fu ottanta anni fa la scoperta della radioattività artificiale e dei neutroni lenti
- ✓ 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.
- ✓ Tra pochi giorni LHC riprende a funzionare ad un'energia che da 8 TeV passa a 13 TeV. Si spera così che tra due o tre anni si potrà fare una conferenza dal titolo: "LHC: dalla scoperta del Bosone di Higgs alla scoperta di *'Nuova Fisica'* (supersimmetria, materia oscura, dimensioni nascoste...)" (la lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico).

Altre Slides

Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)

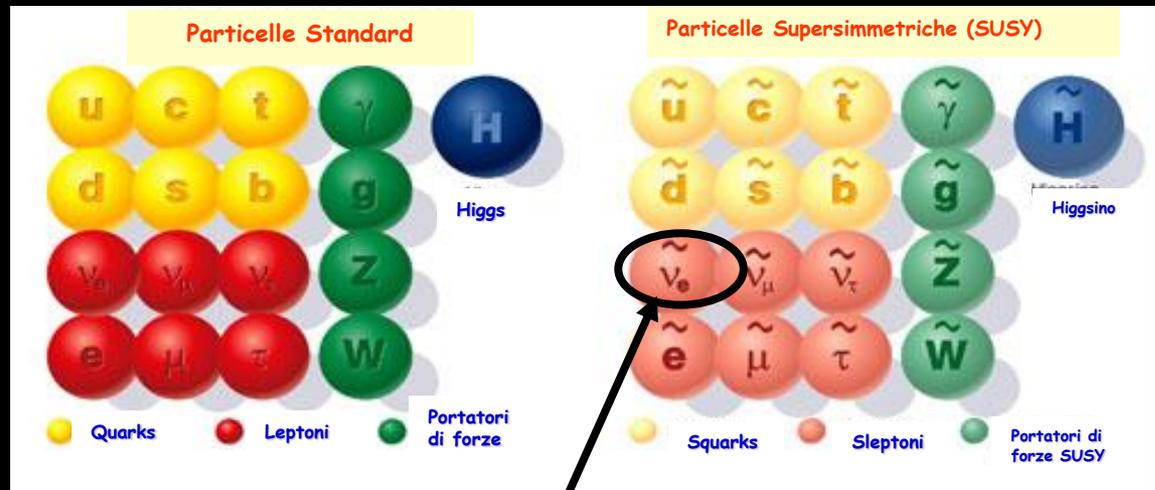
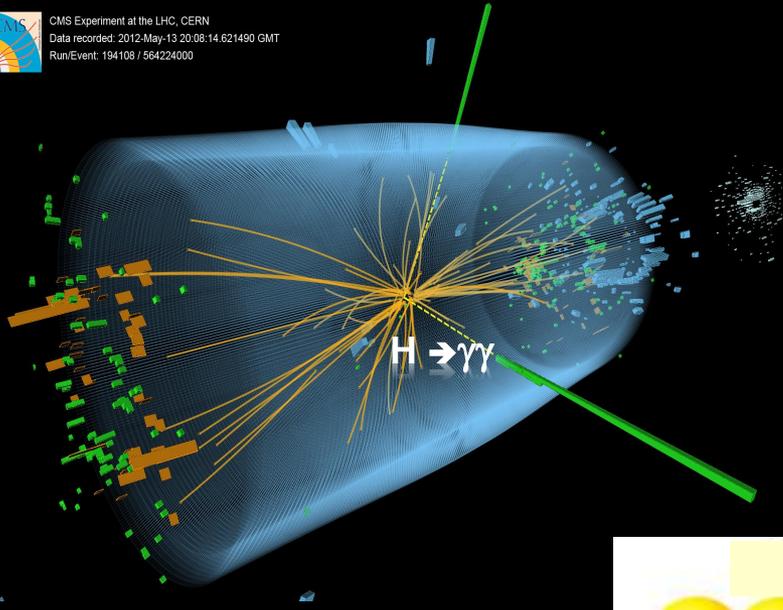


LHC: dalla scoperta del bosone di Higgs alla scoperta della Materia Oscura

(La lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico)



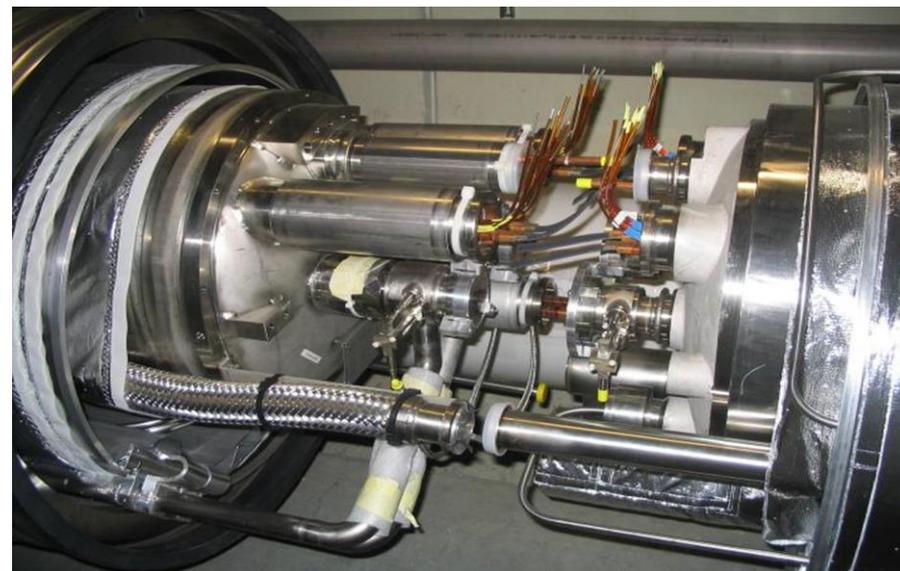
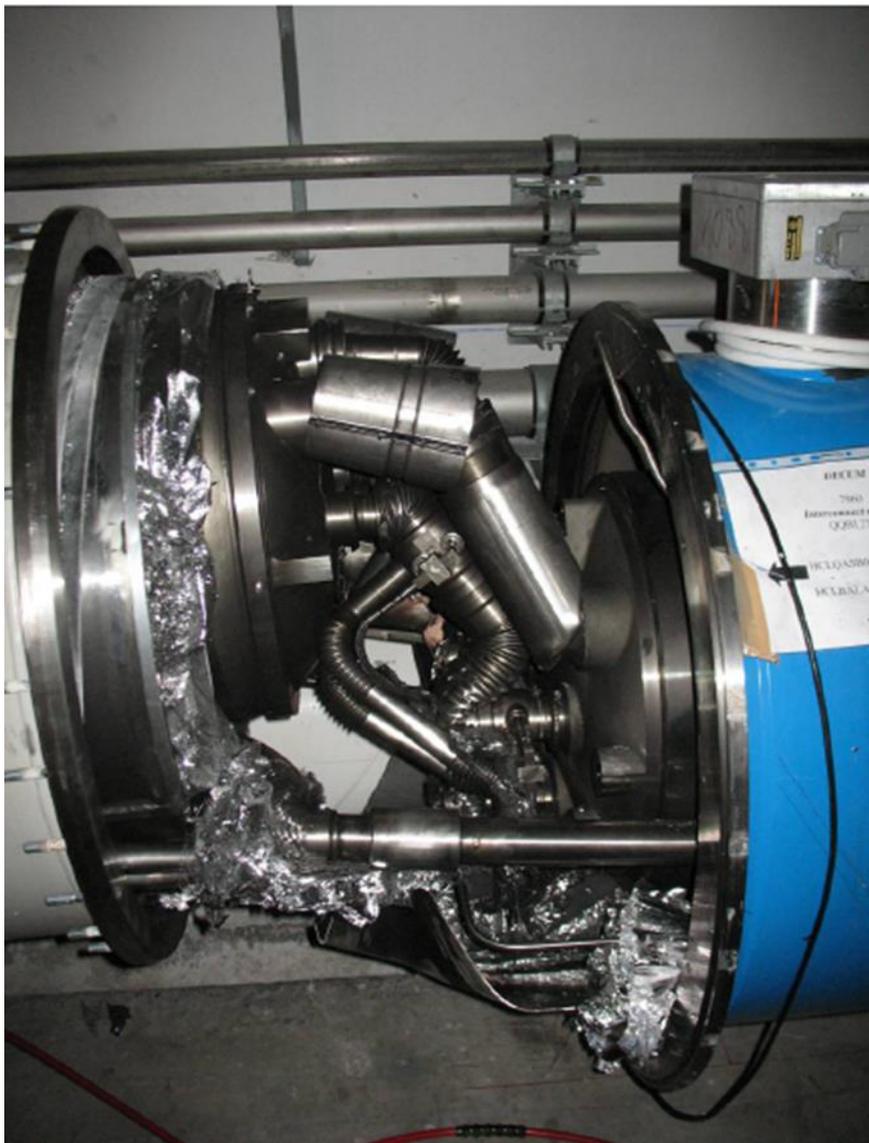
CMS Experiment at the LHC, CERN
 Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
 Run/Event: 194108 / 564224000



candidato come particella

di Materia Oscura

Caffè della Scienza
 3 marzo 2018, Livorno

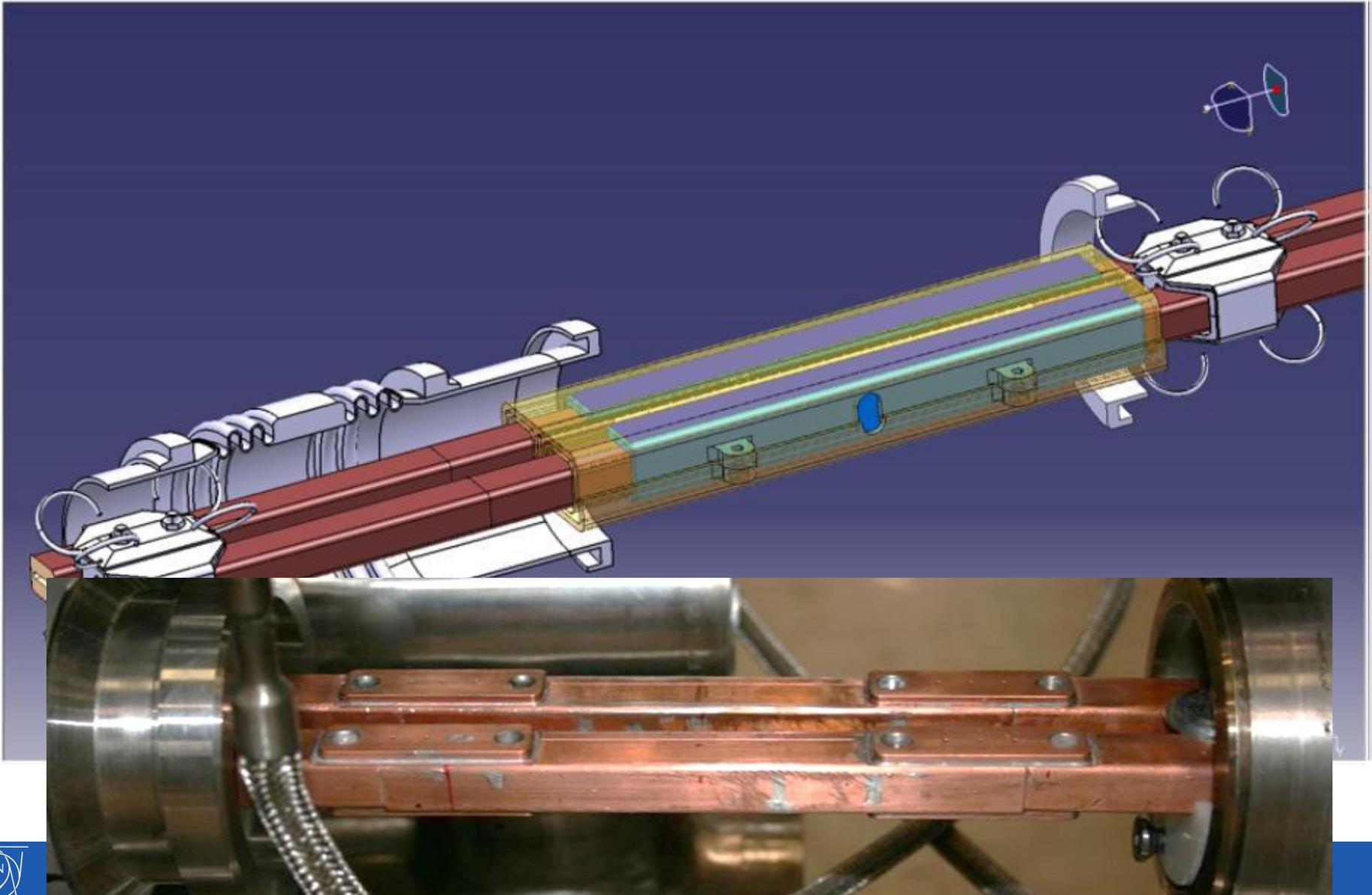


Dal 2013 al 2015 tutte le 1700 giunzioni sono state fatte in modo più affidabile

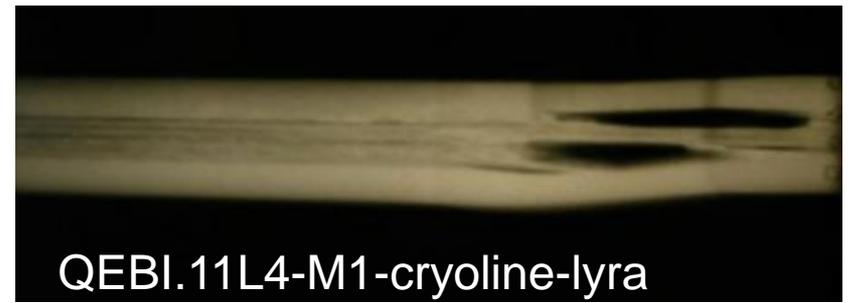
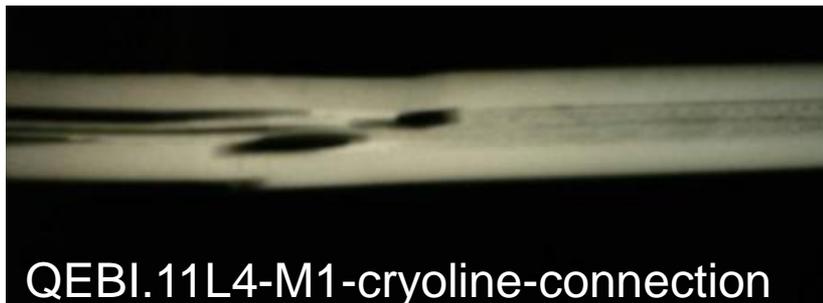
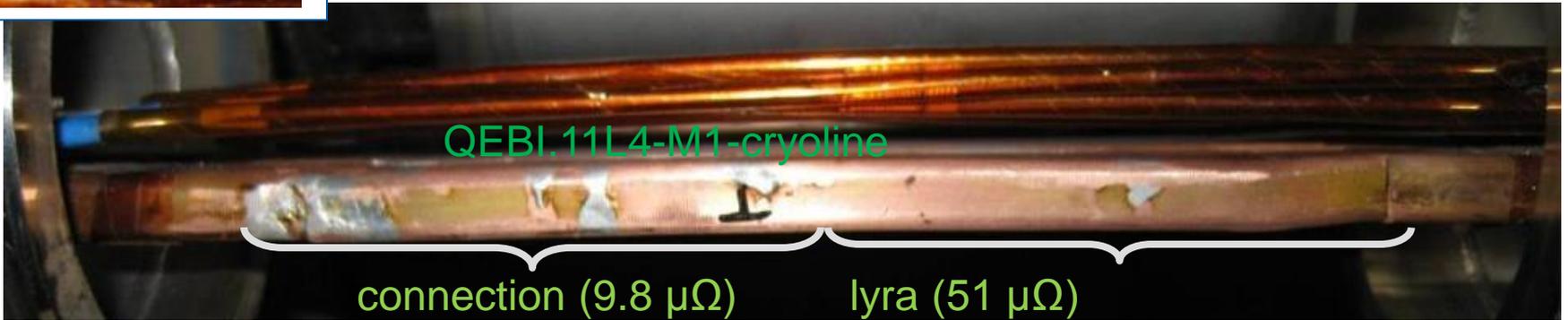
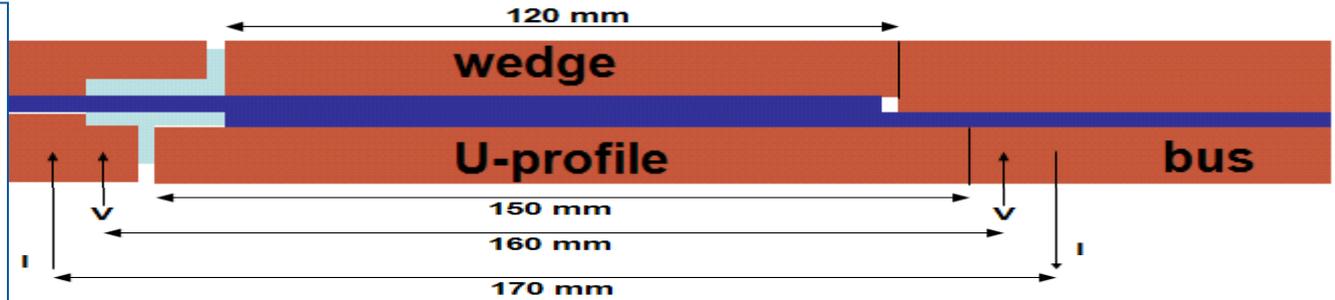
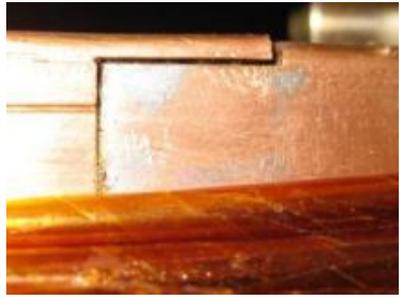


19 settembre 2008

Splice consolidation

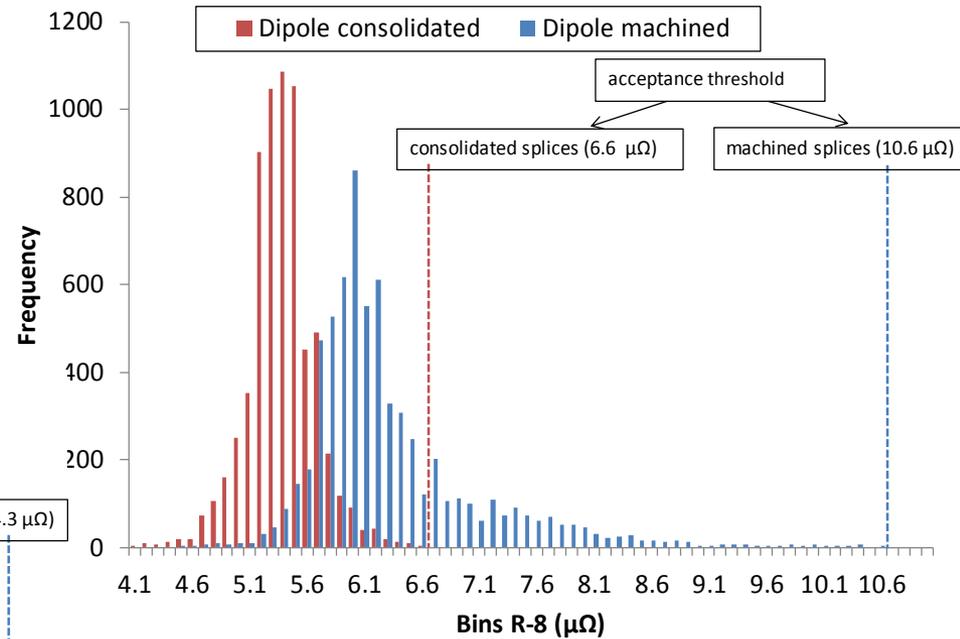


Why consolidating the splices?



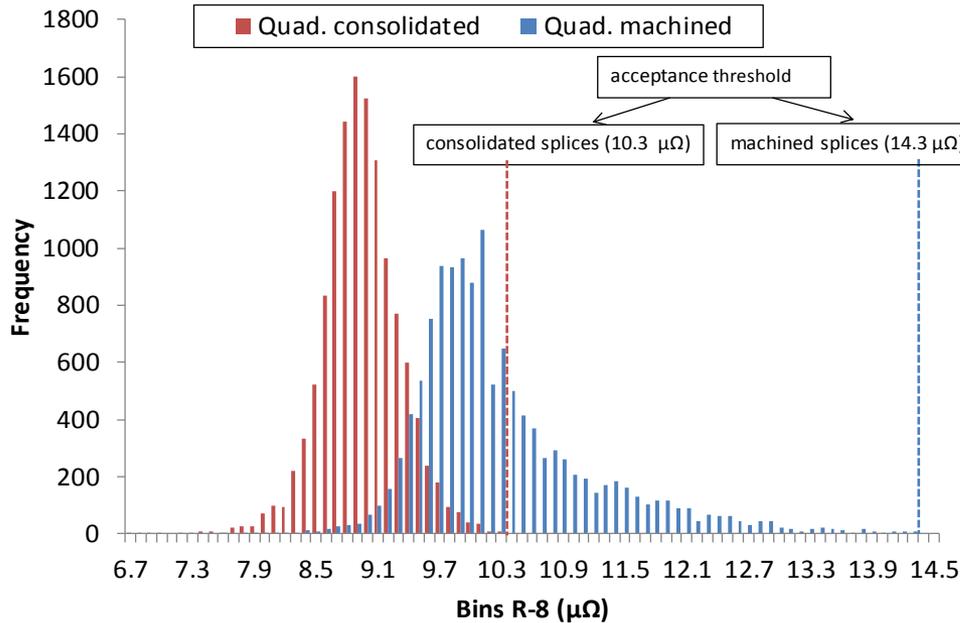
2009 strategy: repair all bad splices above $40 \mu\Omega$ for dipoles and $80 \mu\Omega$ for quadrupoles (ideal values are: RB- $\rightarrow 9.45 \mu\Omega$, RQ- $\rightarrow 16.0 \mu\Omega$) [R16 meas.]

13 kA splice cons. – after LS1

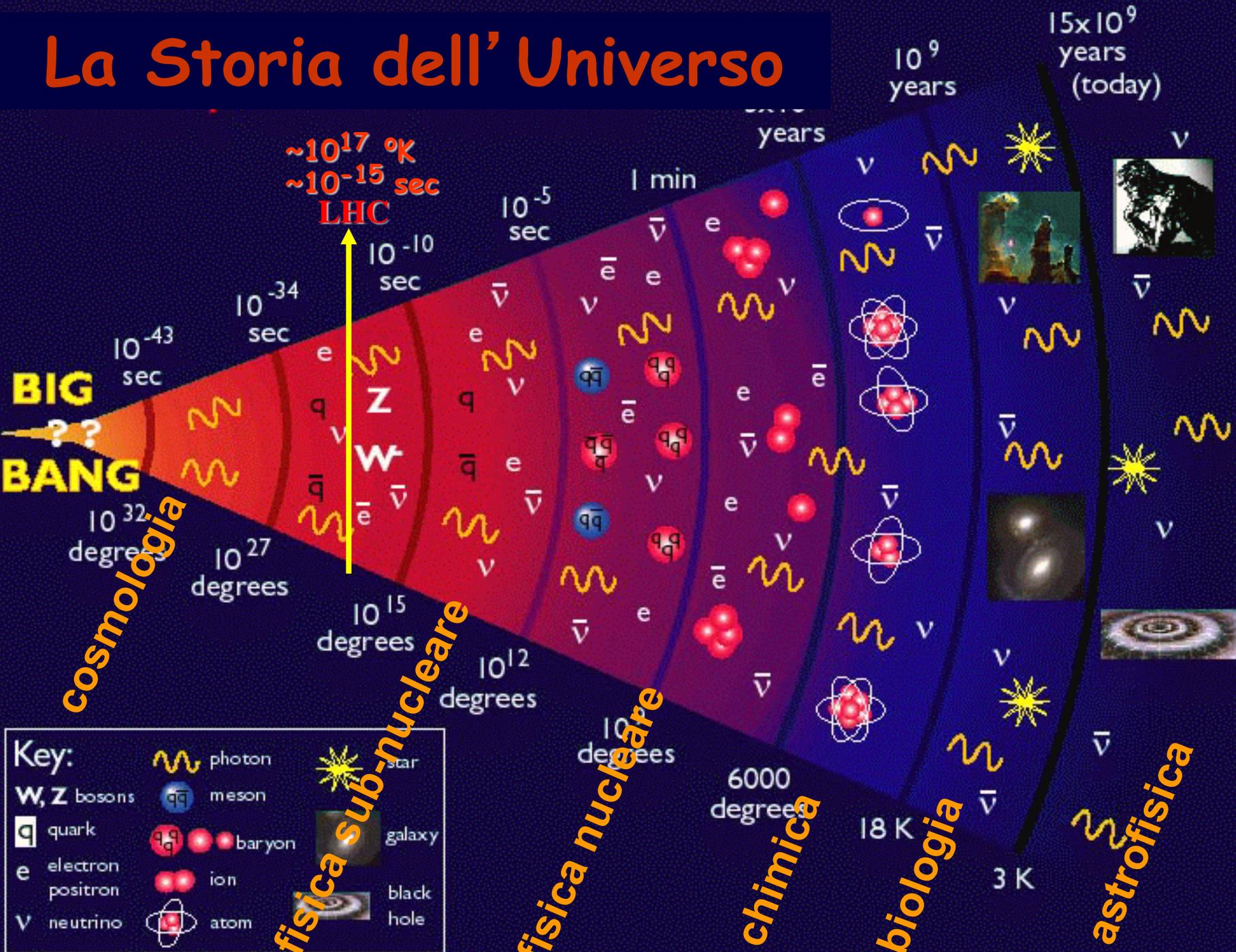


$$\text{Dipoles: } R_{\text{excess}} = R_8 - 5.6 \mu\Omega$$

$$\text{Quads: } R_{\text{excess}} = R_8 - 9.3 \mu\Omega$$



La Storia dell' Universo



BIG BANG

cosmologia

fisica sub-nucleare

fisica nucleare

chimica

biologia

astrofisica

Key:

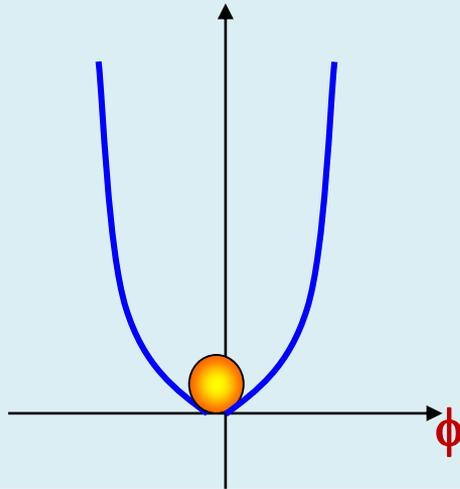
photon	star
W, Z bosons	meson
quark	galaxy
e electron	baryon
positron	ion
v neutrino	atom
	black hole

Rottura spontanea della simmetria

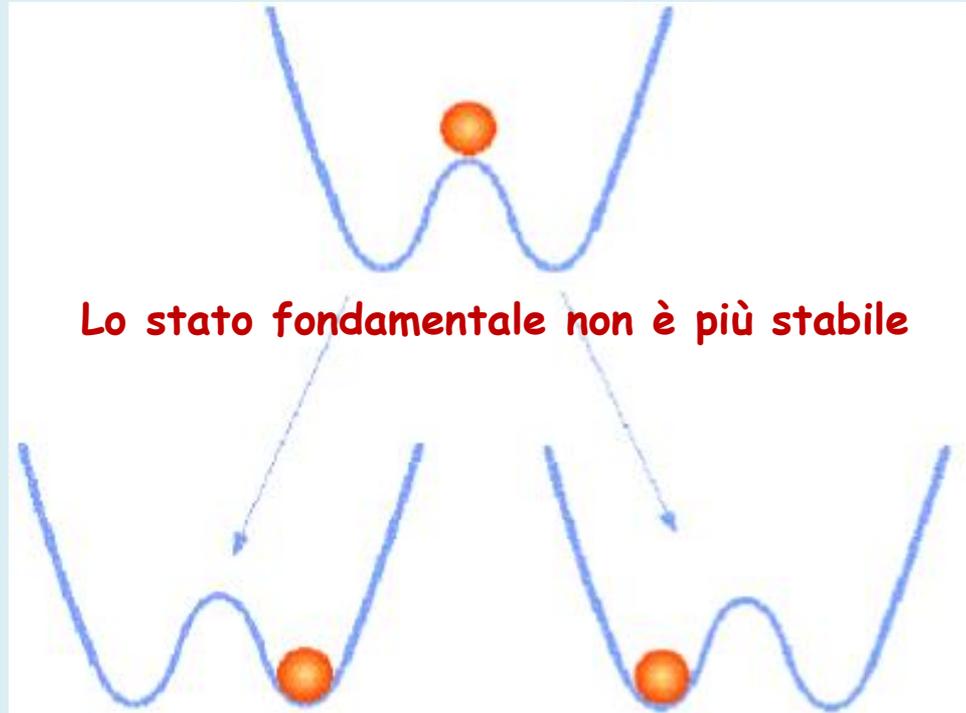
Vediamola in due dimensioni

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

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



Simmetria dello stato fondamentale



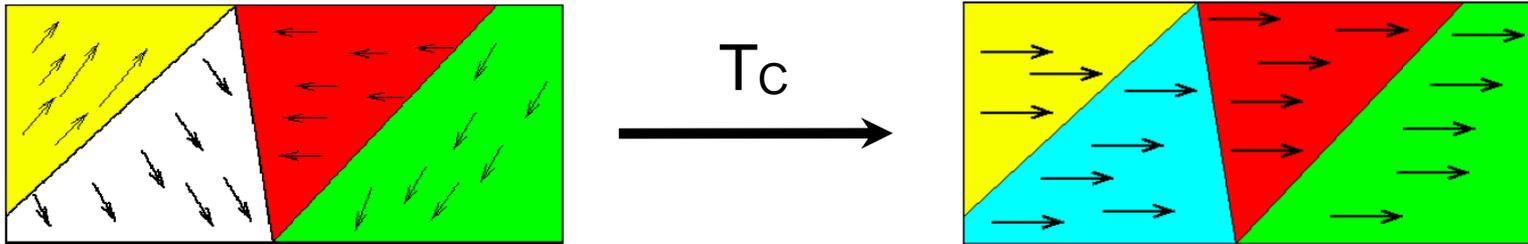
Lo stato fondamentale non è più stabile

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

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:

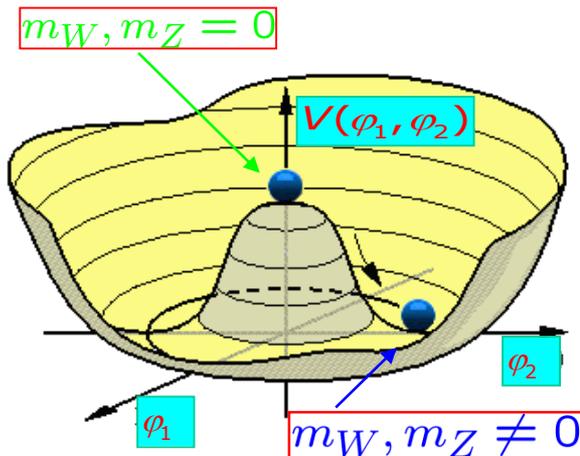


tra tutte le possibili direzioni la magnetizzazione si orienta in una particolare direzione rompendo la simmetria.

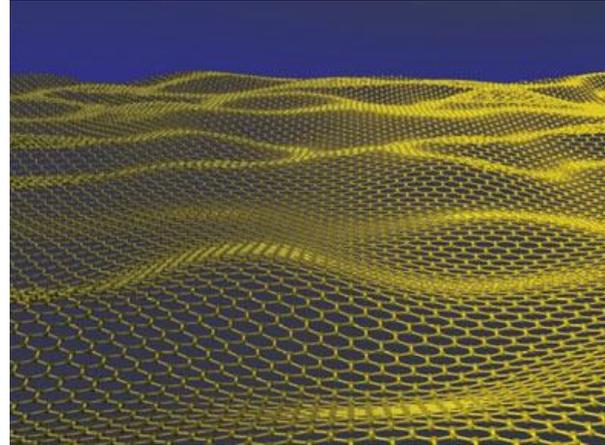
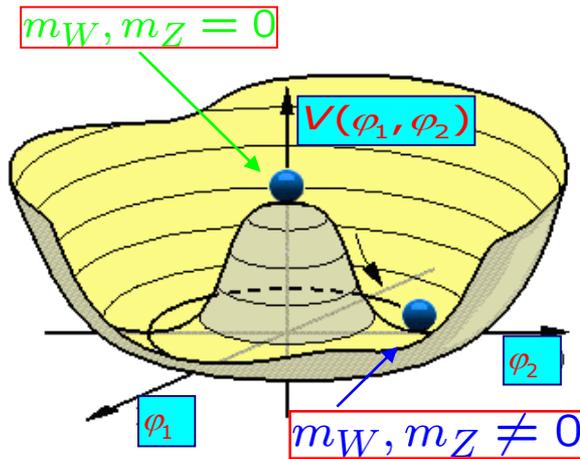
Brout, Englert, Guralnik, Hagen, Higgs, Kibble (1964)

Viene introdotto il campo Φ (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 Φ 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 Φ anche i fermioni acquistano una massa proporzionale all'accoppiamento.



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.



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

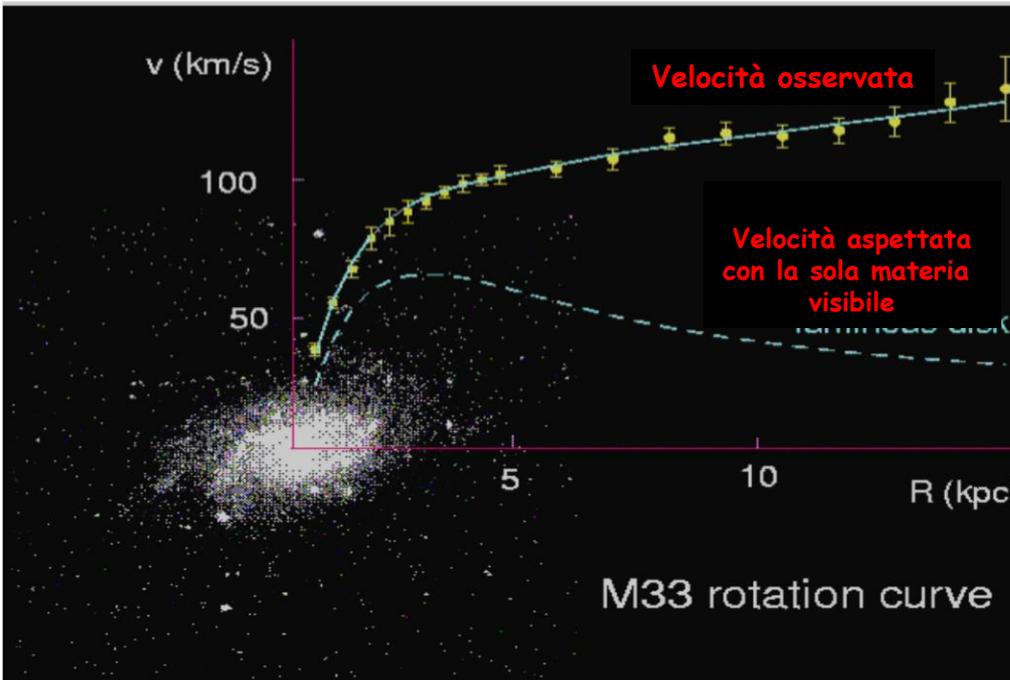
La Lagrangiana (da cui si ricavano le equazioni del sistema) mantiene la simmetria di gauge, ma la scelta di un qualsiasi stato fondamentale rompe la simmetria.

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.

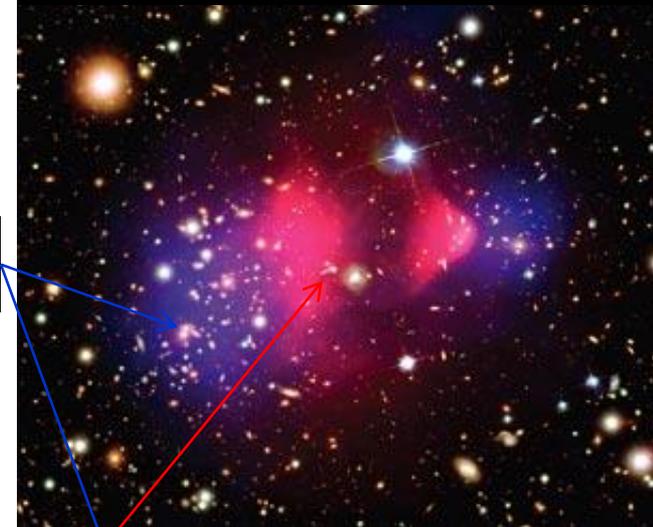
Manifestazioni della Materia Oscura

Galassia M33
Velocità di rotazione



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

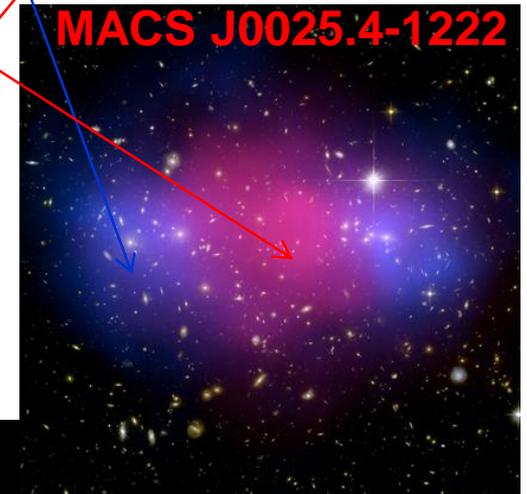
Il "Bullet Cluster"
Formatosi dalla collisione di due grandi cluster di galassie



Materia oscura?

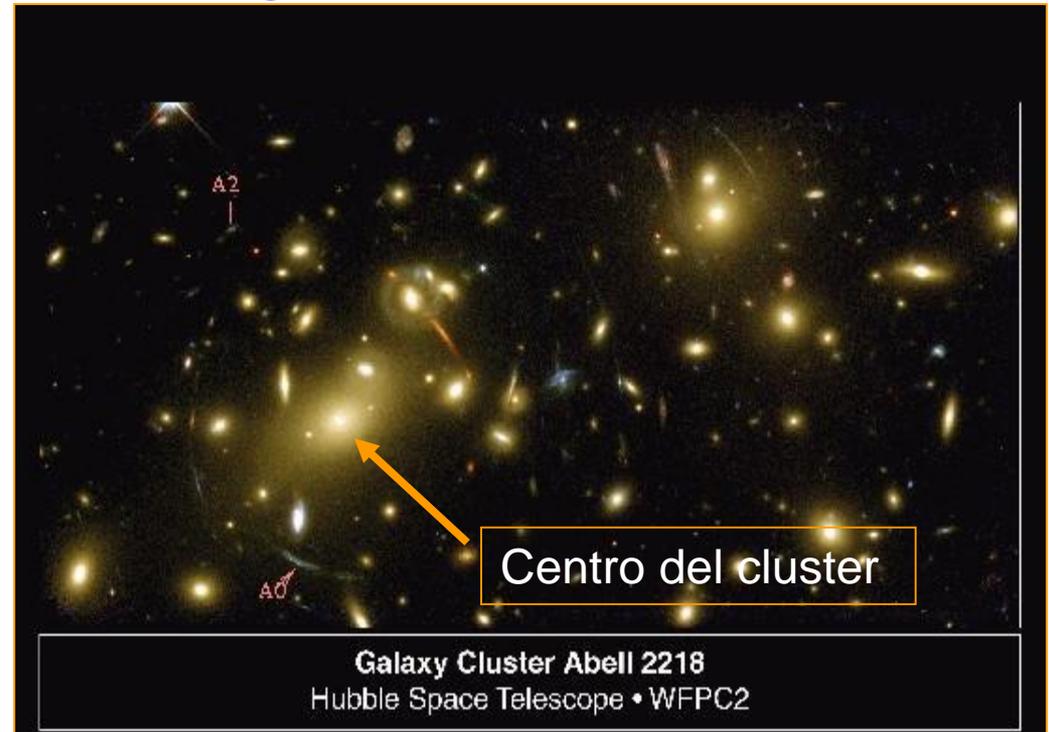
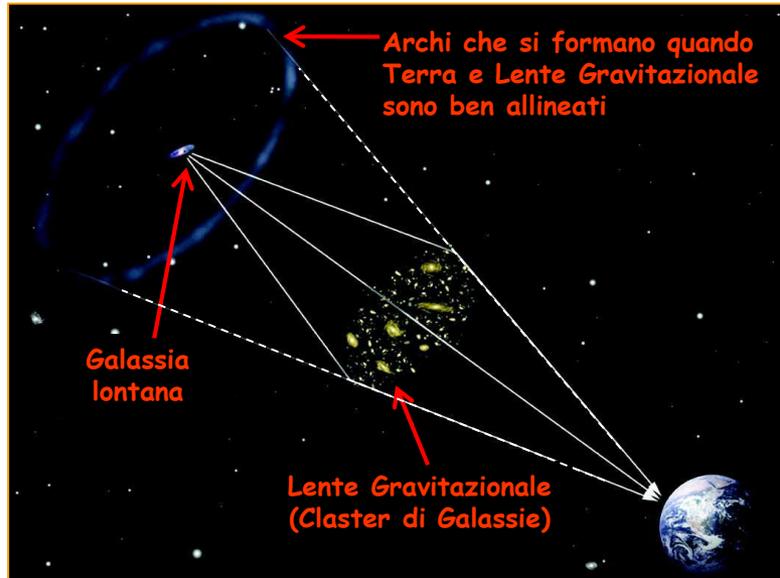
Gas ad alta temperatura

MACS J0025.4-1222



La Materia come Lente Gravitazionale

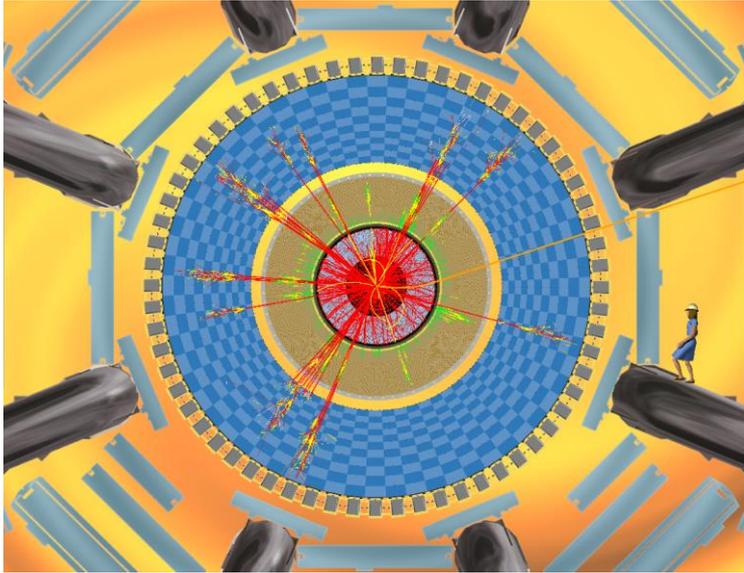
effetto predetto dalla teoria della relatività generale di A.Einstein nel 1936



Le immagini multiple di una stessa galassia (per es. A0 e A2) vengono identificate confrontando gli spettri di luce dei diversi archi. Con così tante immagini è possibile fare un modello preciso della distribuzione di masse del cluster della lente gravitazionale.

Ma l'effetto e' molto piu' forte di quello spiegabile con la massa della Materia Visibile da cui l'ipotesi dell'esistenza della Materia Oscura (cioe' invisibile)

Black Holes a LHC

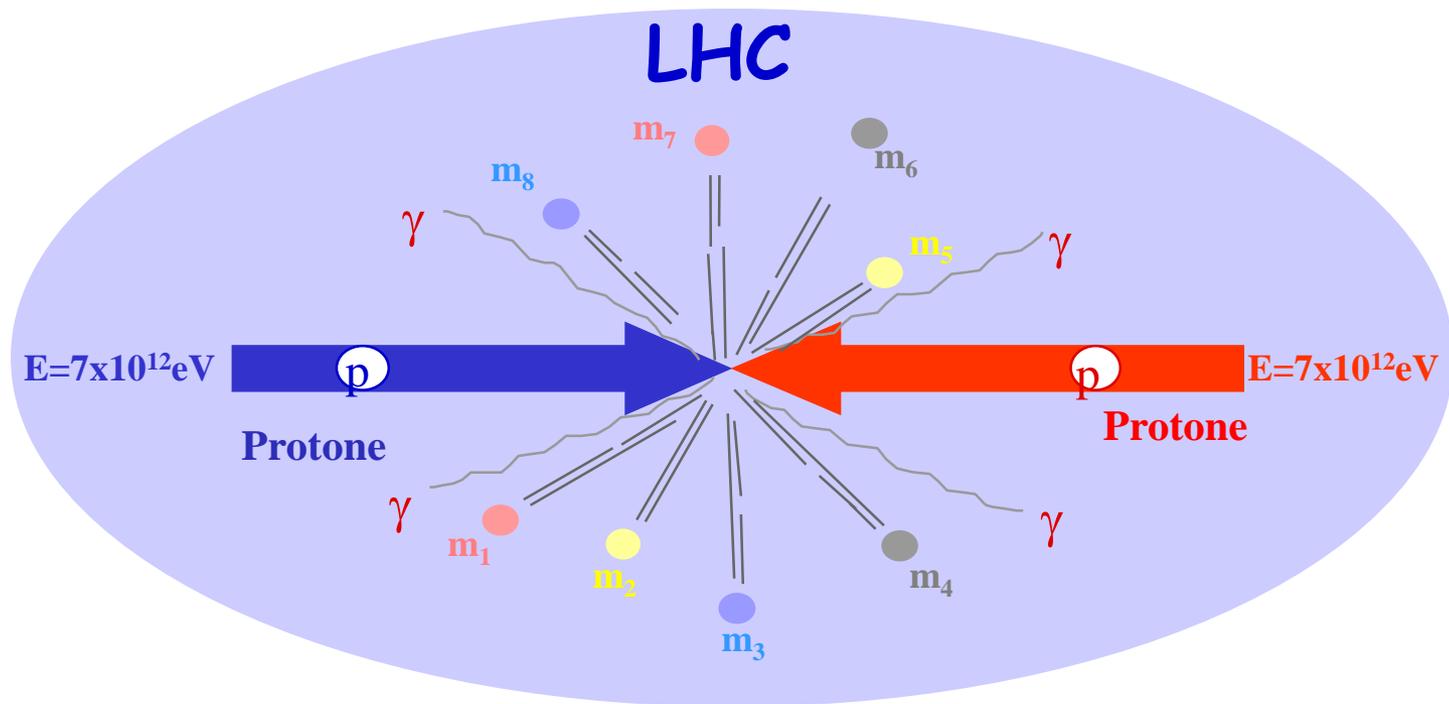


I black holes che potrebbero essere prodotti a LHC sono di massa piccolissima e decadrebbero immediatamente in particelle normali ben misurabili dai nostri rivelatori



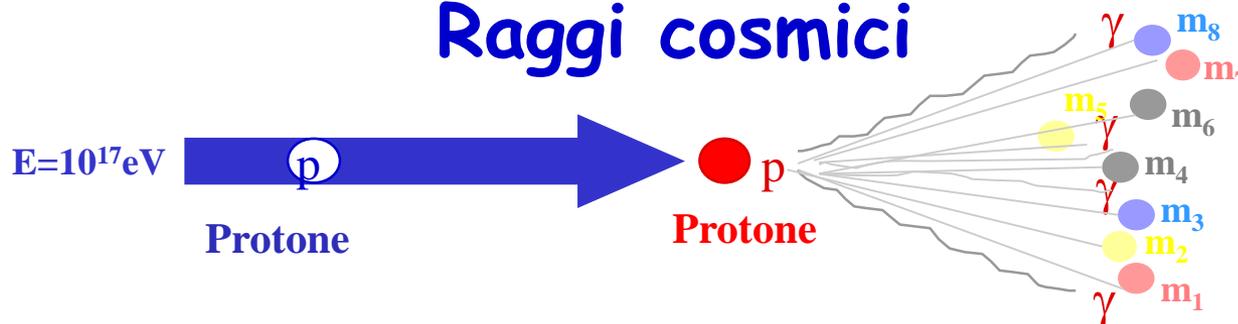
I black holes a LHC non sono niente di simile ai black holes super-massivi (~100.000 volte la massa del sole) che si trovano sparsi nell'Universo

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 !



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

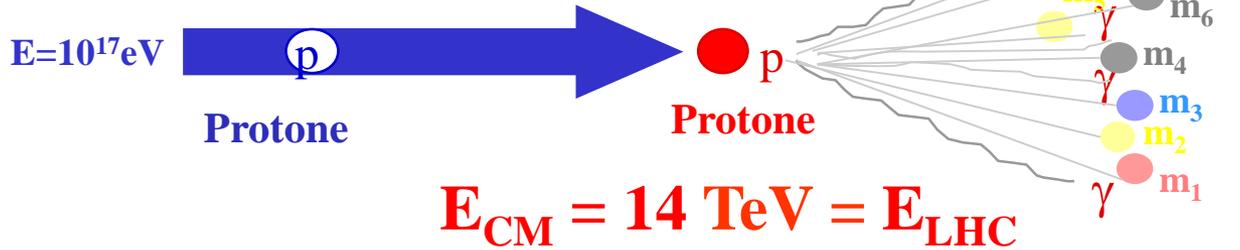
Raggi cosmici



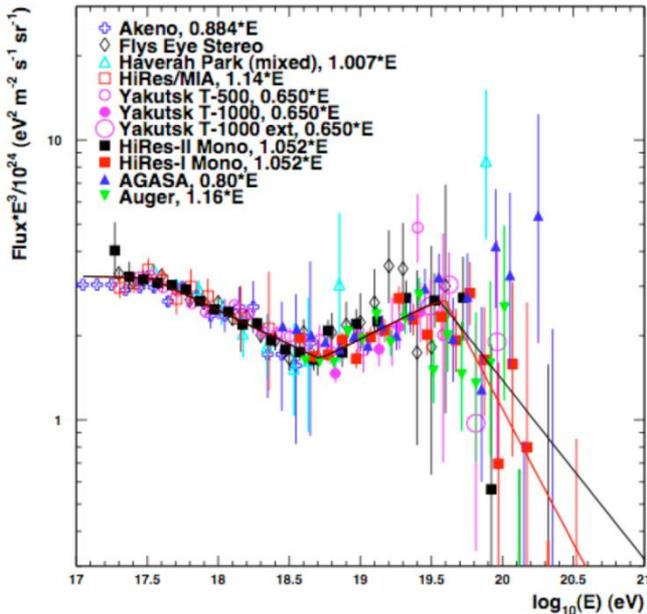
Nelle due collisioni vengono prodotti gli stessi tipi di eventi

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 3×10^{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**

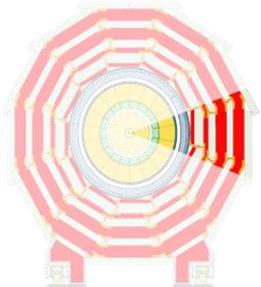
Superficie del Sole = diecimila volte la superficie della Terra, quindi **sul Sole sono già stati fatti circa un milione di esperimenti come LHC**

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 3×10^{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...**

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

Solenoido superconduttore

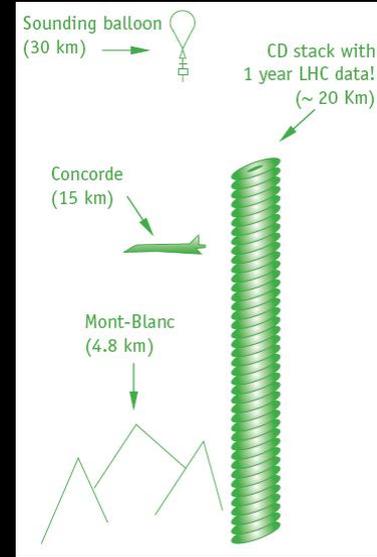
Ferro
Camere per muoni

2T



The LHC Computing Grid

Scheduled = 15301
Running = 10525



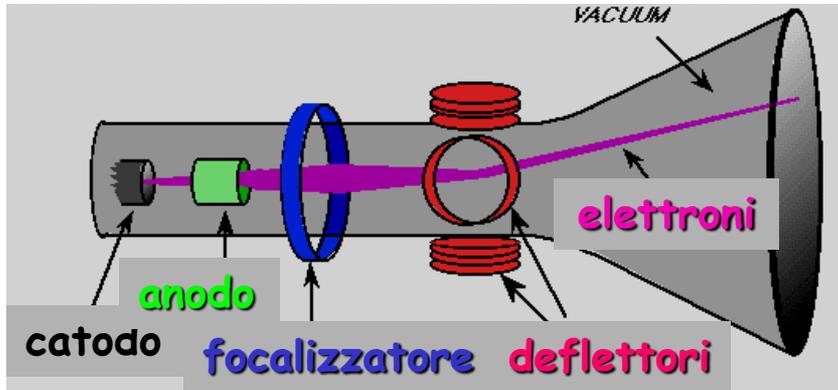
09:25:20 UTC

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.

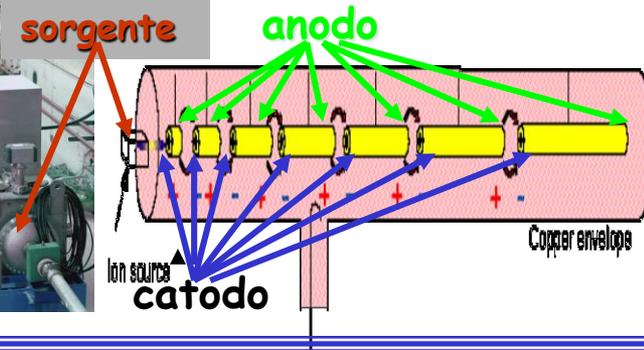
Come si accelerano le particelle

l'acceleratore di casa: il televisore

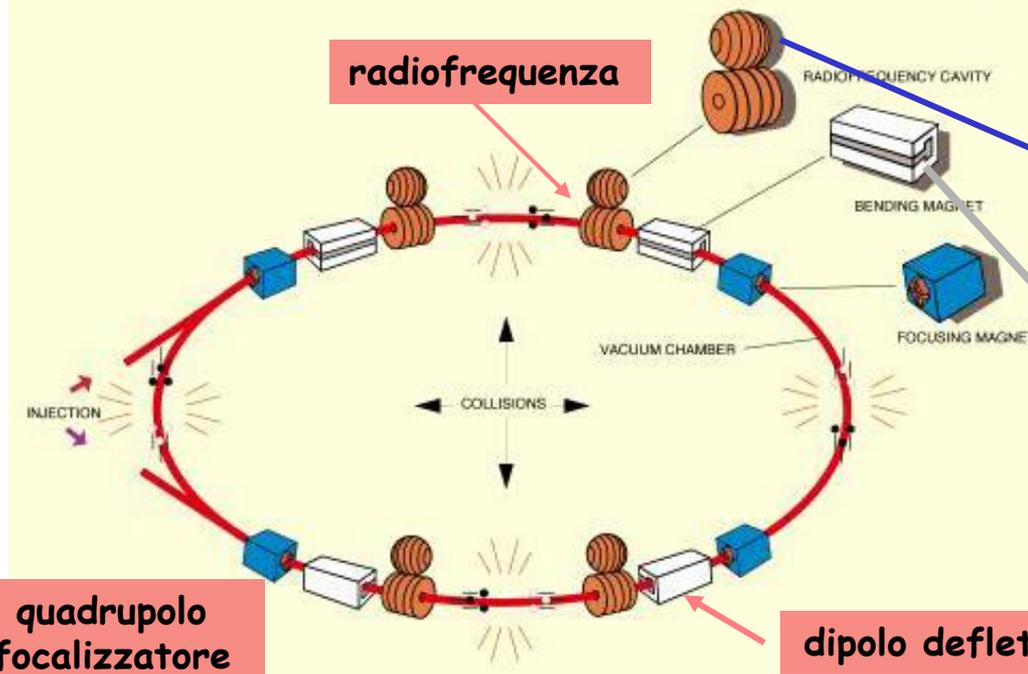


l'energia degli elettroni è ~ 20 KeV

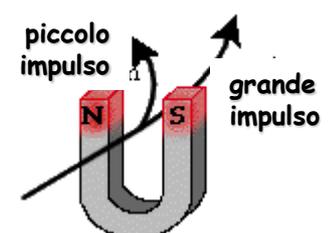
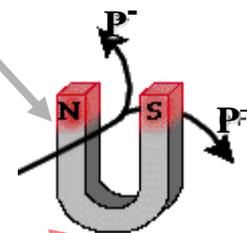
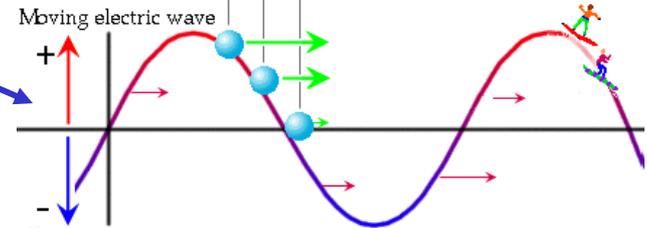
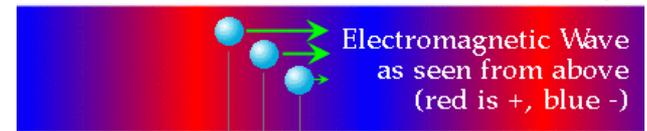
(FERMILAB-Chicago)
acceleratore lineare
energia 400 MeV



le 3 componenti principali di un acceleratore



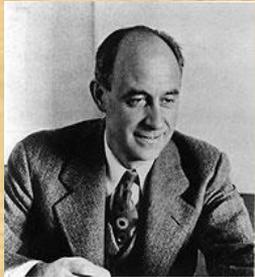
Electromagnetic wave is traveling, pushing particles along with it



I ragazzi di via Panisperna

Un gruppo di giovani fisici dalle potenzialità enormi che daranno un contributo fondamentale allo sviluppo della fisica delle particelle.

Purtroppo dopo poco il gruppo si scioglie a causa della guerra, del fascismo e delle leggi razziali. Solo Amaldi resterà in Italia.



Enrico Fermi

Fermi resta a Roma fino al 1938 e poi, subito dopo aver ricevuto il Premio Nobel, è costretto ad emigrare in America



Franco Rasetti

Rasetti nel '39 si trasferisce in Canada presso l'Università "Laval" del Québec. Si rifiuta di lavorare al progetto "Manhattan". Diventa un famoso paleontologo.



Edoardo Amaldi

Amaldi è l'unico che resta a Roma anche dopo il 1938 e mantiene viva la scuola di fisica nucleare in Italia. È co-fondatore con Pierre Auger del CERN. Nel 1951 promuove la nascita dell'INFN.



Emilio Segrè

Segrè nel 1935 si trasferisce alla Università di Palermo e poi, nel '38 a Berkeley. Nel 1959 riceve il Premio Nobel per la scoperta dell'antiprotone nel 1955.



Bruno Pontecorvo

Pontecorvo va a Parigi con i Joliot-Curie, poi in USA, Canada, Inghilterra ed infine in Russia. Con le sue idee rivoluzionarie sulla fisica del neutrino apre un enorme programma di ricerca sperimentale che verosimilmente ci condurrà a scoprire la fisica oltre il Bosone di Higgs.