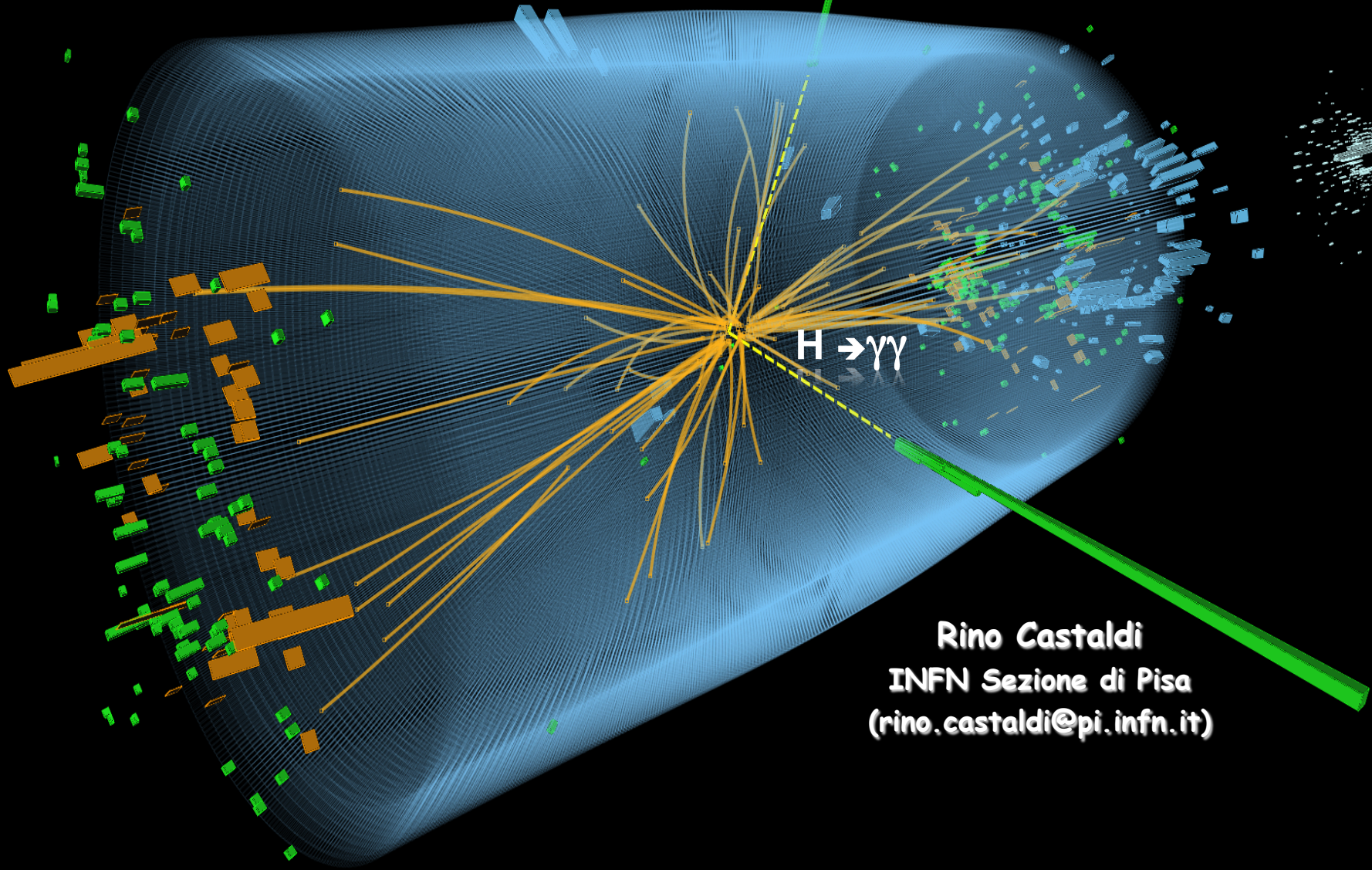


Dalla scoperta della radioattività artificiale alla scoperta del bosone di Higgs

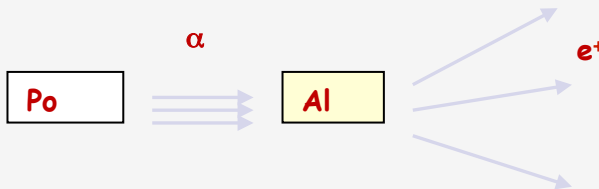
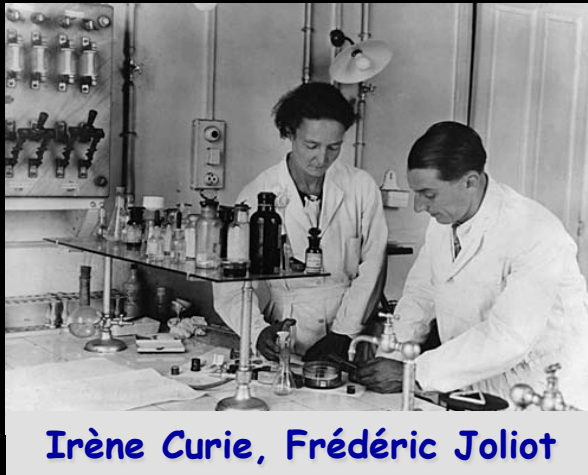
(La lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico)



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


1934 - 2014

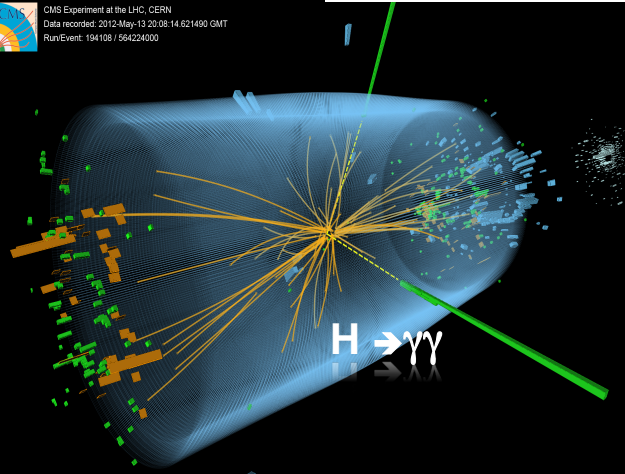
Un viaggio di 80 anni nel mondo subatomico per conoscere la struttura della materia e le leggi che la governano.



$\alpha + {}_{13}\text{Al}^{27} \rightarrow {}_{15}\text{P}^{30} + n$

${}_{15}\text{P}^{31}$: isotopo stabile
 ${}_{15}\text{P}^{30}$: isotopo radioattivo β^+ non esistente in natura

 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 56422400



Roma, 1934 in via Panisperna



A Roma, intorno a Enrico Fermi e Franco Rasetti si è formato un gruppo di giovani fisici: Emilio Segré, Edoardo Amaldi, Ettore Majorana e Bruno Pontecorvo.

Fin dal 1930, Fermi decide che il gruppo deve diventare esperto di tecniche sperimentali di fisica nucleare: Rasetti va a Pasadena da Millikan e poi trascorre un anno a Berlino da Lise Meitner, Segré va da Otto Stern ad Amburgo e da Pieter Zeeman ad Amsterdam e Amaldi va da Peter Debye a Lipsia.



Perché Pontecorvo non è nella foto?
Ecco la risposta di Misha Bilenky!



Majorana



Pontecorvo

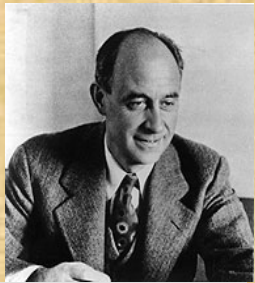
Nel 1932, al ritorno di Rasetti da Berlino, Fermi decide di abbandonare le ricerche sull'atomo per dedicarsi allo studio sperimentale del nucleo.

Quali sono le loro conoscenze del mondo sub-atomico nel 1934 ?

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

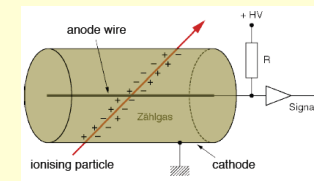
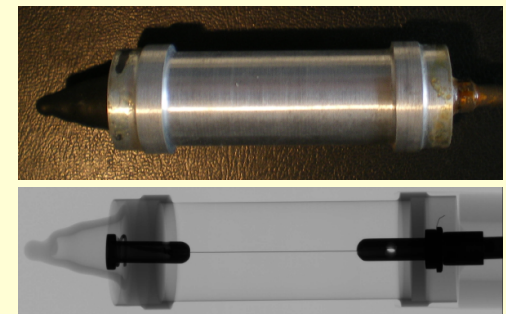
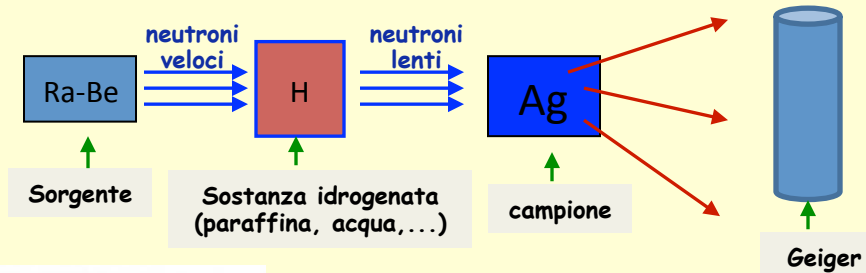
Pontecorvo va a Parigi con i Joliot-Curie, poi in USA, Canada, Inghilterra ed infine in Russia. Con le sue idee rivoluzionarie sulla fisica del neutrino apre un enorme programma di ricerca sperimentale che verosimilmente ci condurrà a scoprire la fisica oltre il Bosone di Higgs.

1934 - Il lavoro di ricerca in via Panisoperna

Dopo la scoperta della radioattività artificiale da parte dei coniugi Curie-Joliot indotta da particelle α su nuclei leggeri, Fermi intuisce che i neutroni, privi di carica, possono essere più efficienti nell'indurre il fenomeno non essendo soggetti alla repulsione columbiana dei nuclei bersaglio.

Il gruppo inizia quindi una serie di esperimenti per studiare la radioattività indotta dai neutroni usando semplicemente una sorgente di Radio-Berillio (fornita loro da Trabacchi) e un contatore Geiger.

Entro l'estate vengono "creati" radioisotopi da oltre 40 dei 60 elementi chimici studiati.



A settembre Pontecorvo e Amaldi hanno il compito di misurare quantitativamente l'intensità della radioattività indotta, ma non ottengono risultati riproducibili. Sabato 20 ottobre Fermi scopre l'effetto della paraffina e il lunedì seguente la scoperta viene pubblicata su la Rivista Scientifica a firma Fermi, Amaldi, Pontecorvo, Rasetti, Segré; i così detti Ragazzi di via Panisoperna.

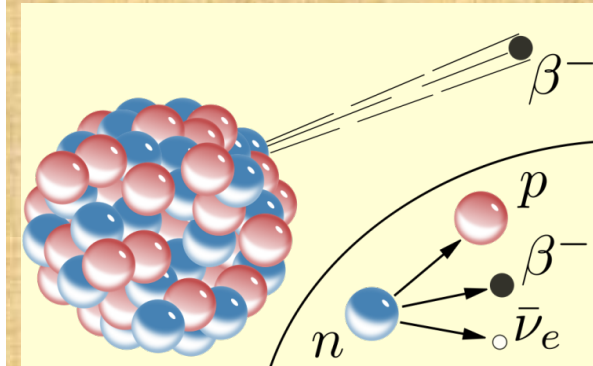
1934: Quali sono le conoscenze che il gruppo di via Panisperna ha del mondo sub-atomico?

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.
Il modello del nucleo composto da protoni e neutroni viene ben stabilito.



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

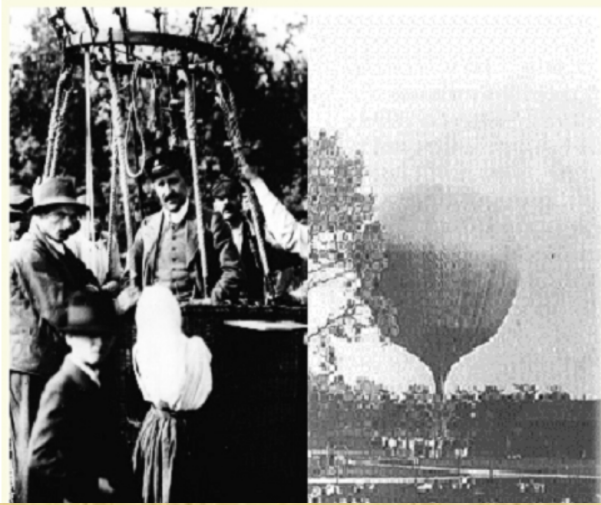
Due mesi dopo Fermi formula la sua teoria del decadimento β e pubblica su "La Ricerca Scientifica" la celebre nota: "Tentativo di una teoria dei raggi β " in cui si assume *"l'ipotesi che gli elettroni emessi dai nuclei non esistano prima della disintegrazione ma vengono formati insieme ad un neutrino, in modo analogo alla formazione di un quanto di luce che accompagna un salto quantico di un atomo."* Fermi chiarisce quindi definitivamente che il neutrone non è uno stato legato protone-elettrone come molti credevano. Il decadimento è dovuto alla "interazione debole".



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. Esiste poi anche l'antimateria prevista da Dirac: il positrone !

Oltre la materia ordinaria...

scoperta con i Raggi Cosmici

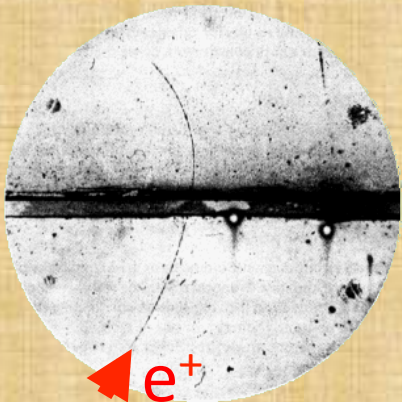


Victor Hess nel 1912 scopre con esperimenti ad alta quota i raggi cosmici

I raggi cosmici primari producono sciame di particelle nell'atmosfera



Sulla superficie della Terra :~ 1/sec/dm²

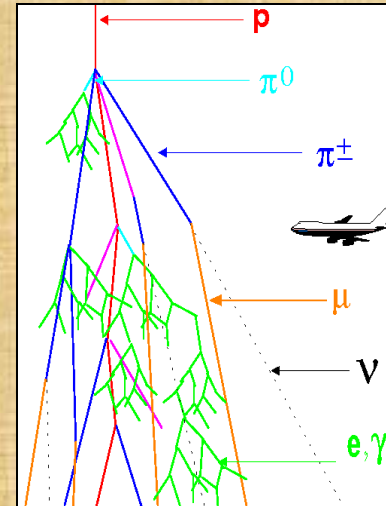


1932- Anderson scopre il positrone

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 %

Il mesotrone è il muone e interagisce debole come l'elettrone !

Rasetti (1941 in Canada) misura la vita media del mesotrone $\tau_{\text{decadimento}} \cong 1.5 \pm 0.3 \times 10^{-6} \text{ s}$

Con il famoso esperimento di **Conversi, Pancini e Piccioni (1942-45 a Roma)** e l'interpretazione datane da **Fermi (1947 in America)**, Teller and Weisskopf si dimostra che il mesotrone misurato nei raggi cosmici non è la particella che interagisce forte prevista dalla teoria di Yukawa, ma è una particella che interagisce debole.

Subito dopo **Pontecorvo (1947 in Canada)** pubblica l'articolo "*Nuclear capture of mesons and the meson decay*" in cui osserva che le probabilità di cattura nucleare di un elettrone e di un muone sono praticamente identiche (se si tiene conto del pur grande fattore dovuto agli effetti cinematici che la diversità della massa delle due particelle comporta).



Pontecorvo e l'universalità e- μ
lo vede così Misha Bilenky

Pontecorvo per primo concepisce l'universalità muone-elettrone (μ - e) nell'interazione debole !
Concetto che è la base fondante di tutta la teoria delle interazioni deboli

Pontecorvo (in Canada) vuol saperne di più sul muone

Con una serie di esperimenti realizzati in collaborazione con E.P.Hincks ottiene tre importanti risultati:

- *Nel decadimento del muone la particella carica è un elettrone*
- *Il decadimento è cinematicamente consistente con un decadimento in un elettrone e due neutrini*
- *Non ci sono fotoni di alta energia nel decadimento del muone, cioè non si osserva nessun decadimento $\mu \rightarrow e + \gamma$*

PHYSICAL REVIEW

VOLUME 17, NUMBER 1

JANUARY 1, 1950

On the Disintegration Products of the 2.2- μ Sec. Meson

E. P. HINCKS AND B. PONTECORVO*

National Research Council of Canada, Chalk River Laboratory, Chalk River, Ontario, Canada

(Received September 19, 1949)

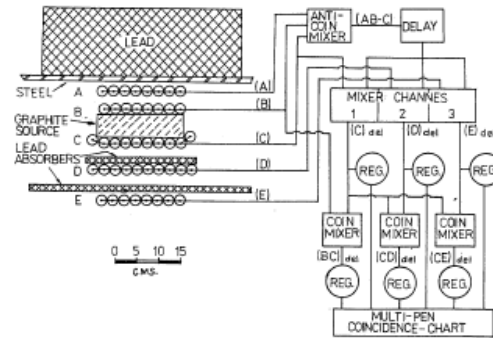
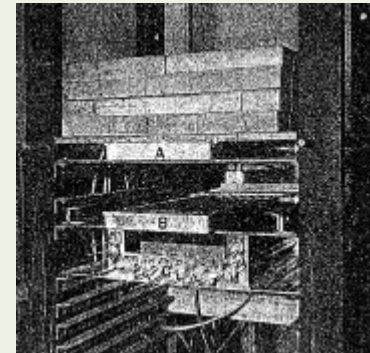
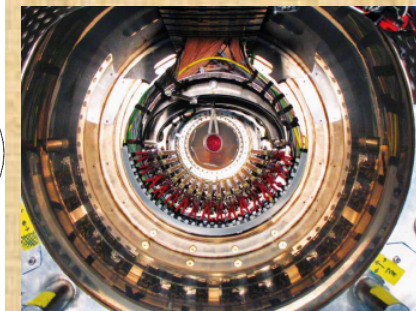
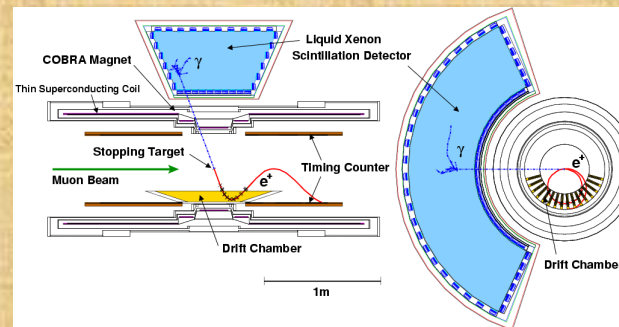


Fig. 8. Experimental arrangement for the detection of bremsstrahlung, with simplified block diagram of the circuits. The lengths of the counters and source are ~ 40 cm



Ancor oggi, 65 anni più tardi, l'esperimento MEG sta cercando il decadimento $\mu \rightarrow e + \gamma$



Esperimento MEG

$$BR(\mu \rightarrow e + \gamma) < 5.7 \times 10^{-13}$$

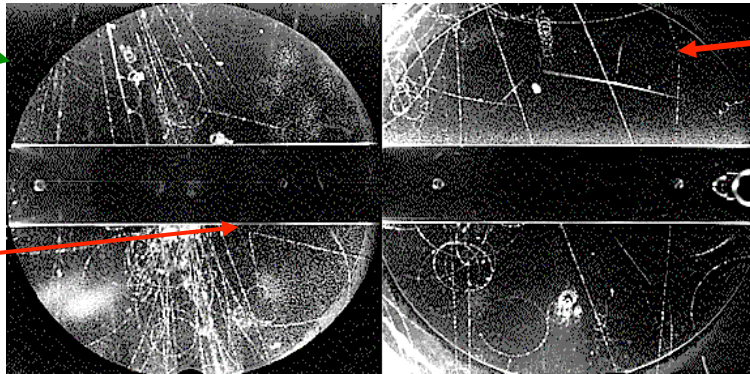
(90% C.L.)

Oltre la materia ordinaria

1937, scoperta del muone (C. Anderson & S. Neddermeyer)

1947, scoperta del pione (C. Powell)

1947, scoperta delle particelle K neutre e cariche (G. Rochester & C. Butler)



$K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$

*Foto di camera a
nebbia esposta
ai raggi cosmici*

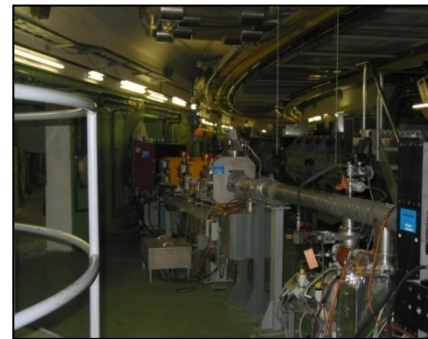
$\Lambda^0 \rightarrow p \pi^-$

Un grande balzo in avanti nella comprensione del mondo subatomico fu reso possibile con la costruzione di acceleratori di particelle.



E. Lawrence costruisce il primo ciclotrone nel 1929 (80 KeV diametro 13cm)

E. Amaldi e P. Auger sono i padri fondatori del CERN

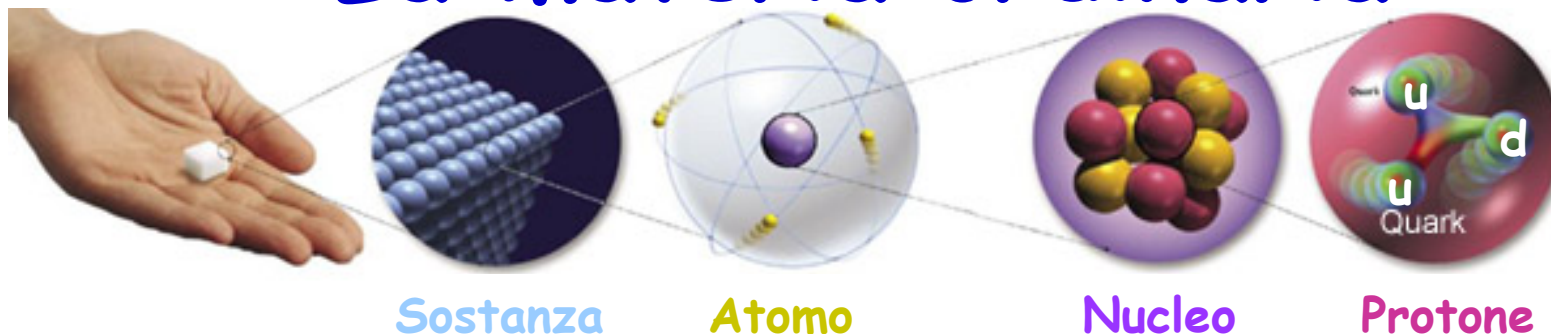


Il proto-sincrotrone del CERN entra in funzione nel 1959 (26 GeV diametro 200 m)

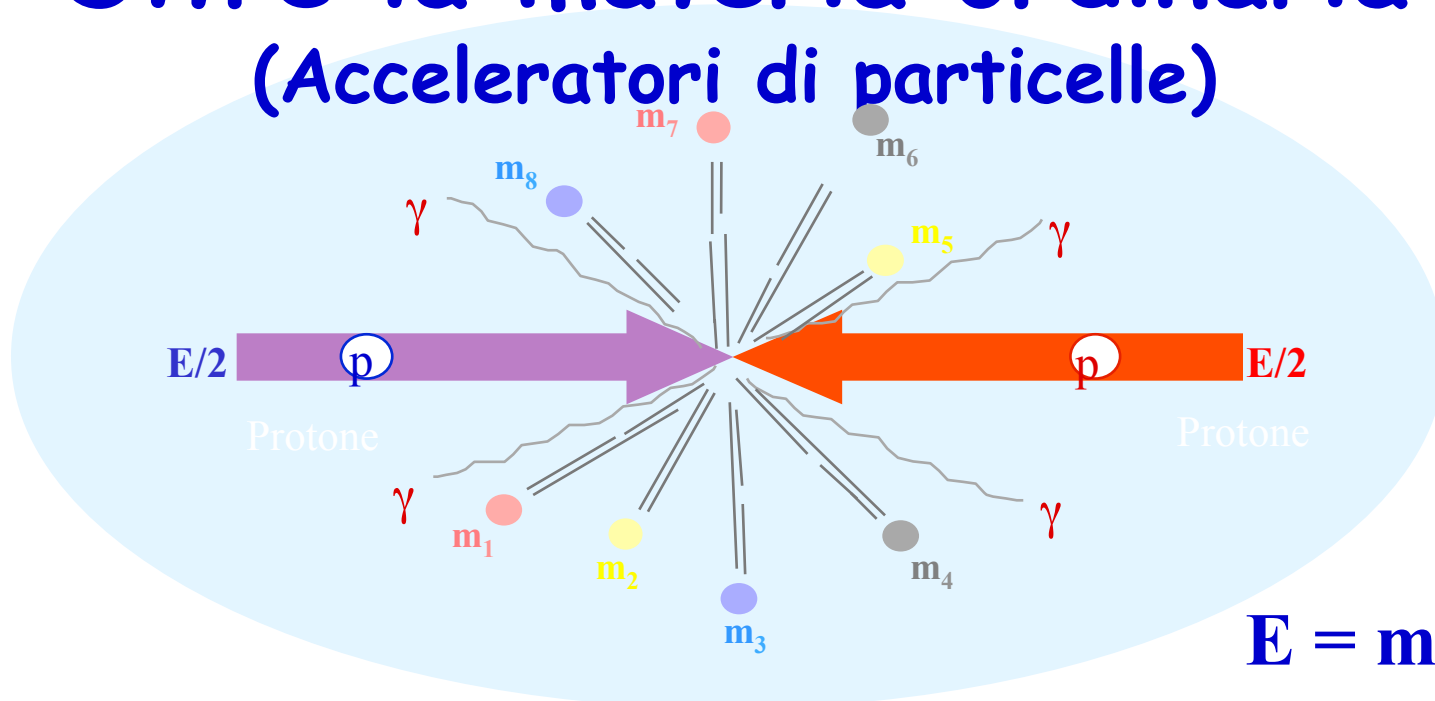
Lo AGS di BNL entra in funzione nel 1960 (33 GeV diametro 257 m)

La scienza e la tecnologia quasi sempre progrediscono di pari passo: per svelare i segreti della natura c'è bisogno di strumenti innovativi per realizzare i quali c'è bisogno di aver capito a fondo le leggi che governano la natura.

La materia ordinaria

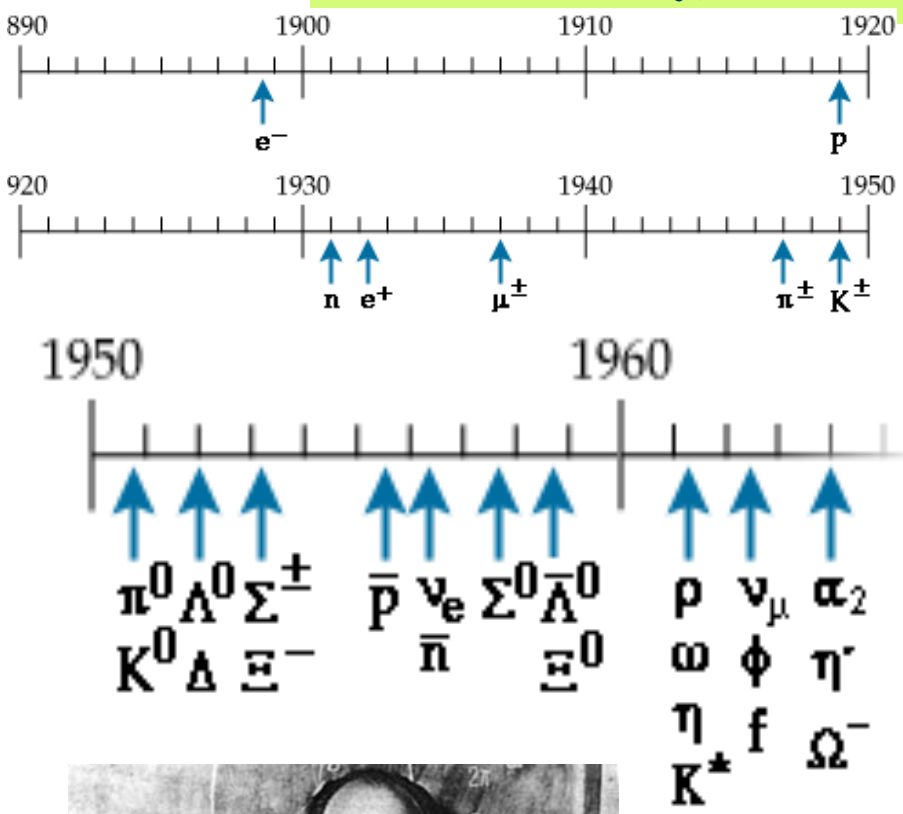


Oltre la materia ordinaria (Acceleratori di particelle)



Nella collisione vengono prodotte molte particelle
sia di materia che di antimateria

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)

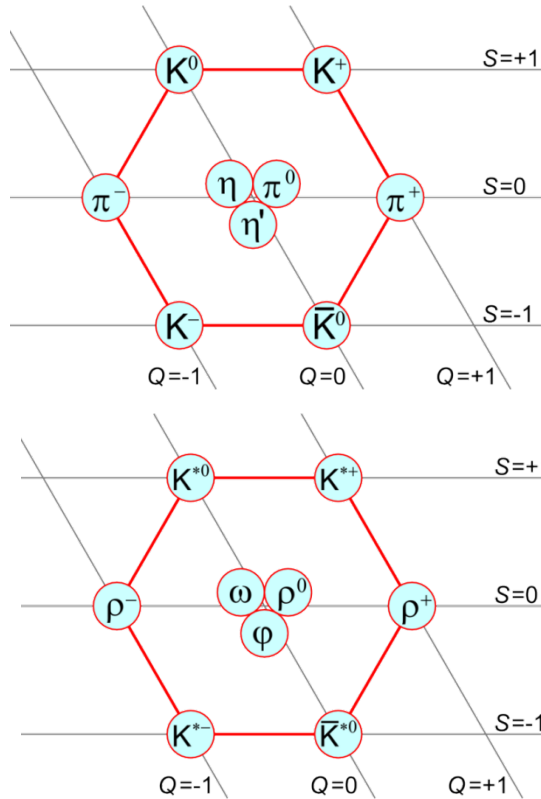
Nel 1964 per mettere ordine nello zoo delle particelle fino ad allora scoperte, Gell-Mann (e Zweig) intuì l'esistenza di una struttura di simmetria ($SU(3)$), ipotizzando l'esistenza di tre particelle che chiamò quark.

- 1964, scoperta dello Ω^-

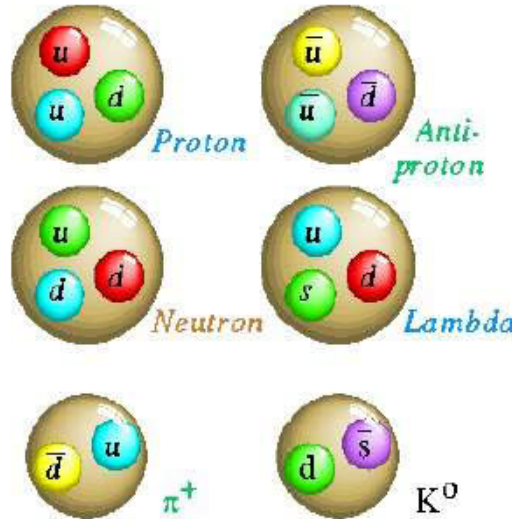
L'ipotesi dei quark

("The 8-fold way")

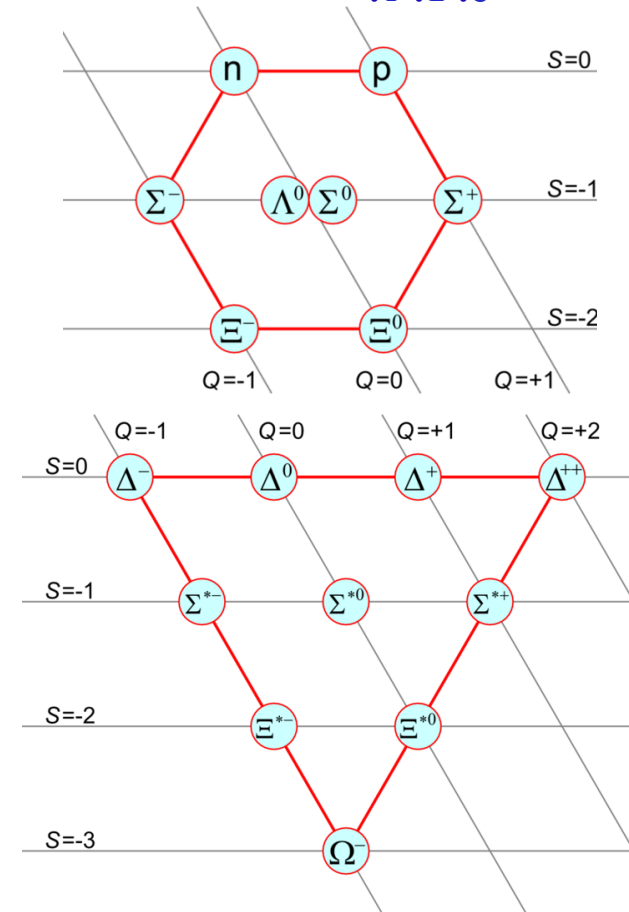
Mesoni ($q_1 q_2^{\text{bar}}$)



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.

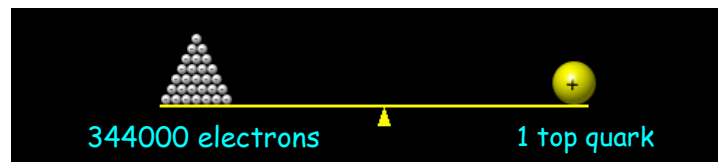
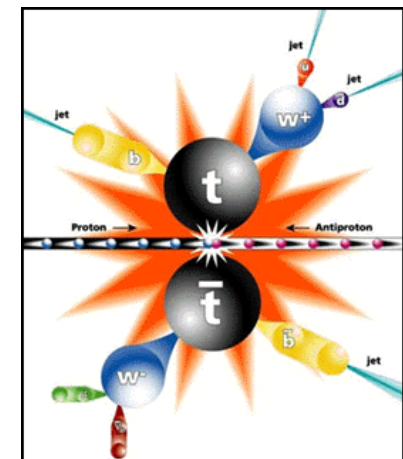
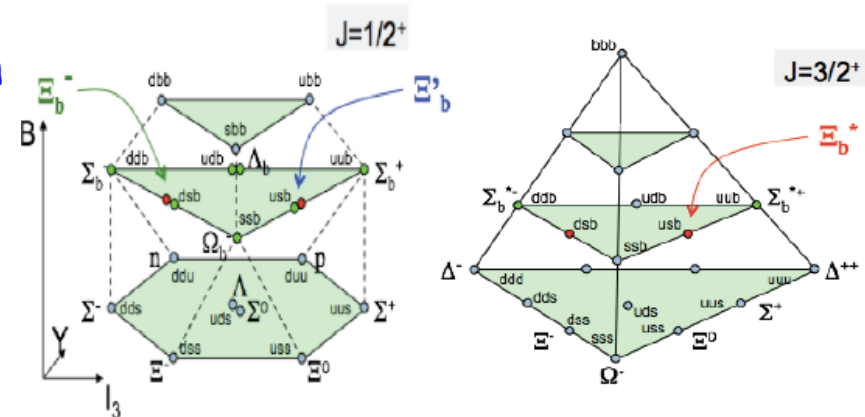
NO! i quark sono sei

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.

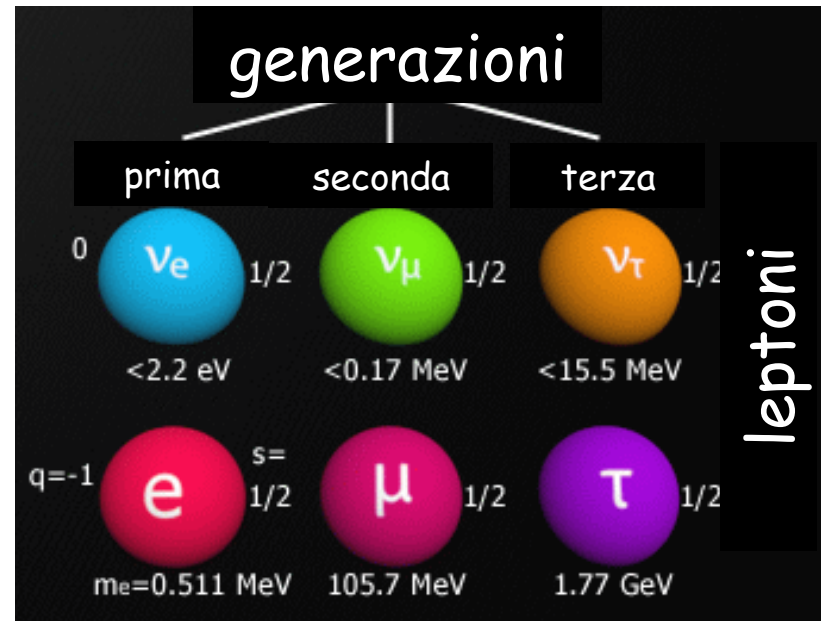
SU4 20-plets

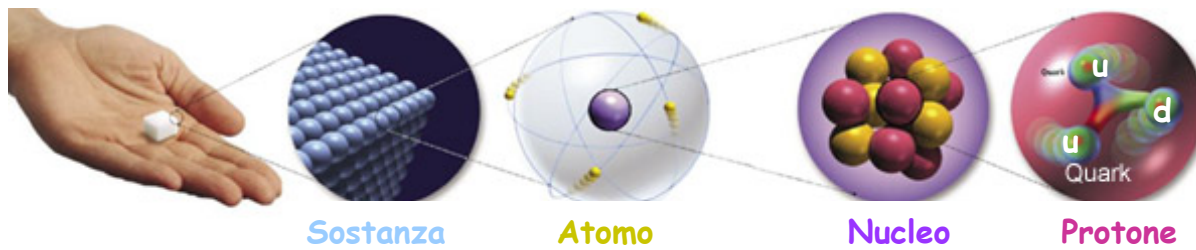


Anche i Leptoni sono sei !

(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

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

- 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 $K \rightarrow \pi e\nu$

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

$$\text{Esempio: } e^+ + e^- \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

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

$$\text{Esempio: } Z^0 \rightarrow \mu^+ + \mu^-$$

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)

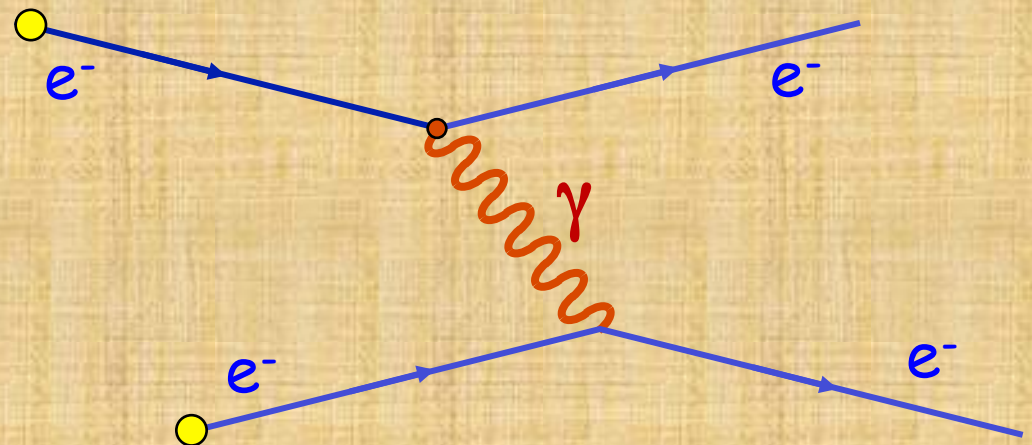
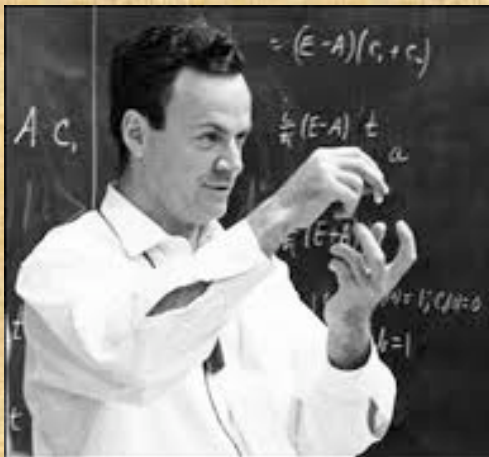
$$\Psi(\mathbf{x}, t) \rightarrow \Psi'(\mathbf{x}, t) = e^{iQ(\mathbf{x}, t)} \cdot \Psi(\mathbf{x}, t)$$

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

La Forza Elettromagnetica: la QED

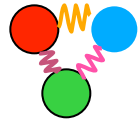
- 1860's: Maxwell, introducendo il concetto di campo, scrive le sue famose equazioni e dimostra che la forza elettrica e quella magnetica sono facce diverse di una stessa interazione, e le unifica nella forza elettromagnetica.
- 1940's: Feynman, Schwinger, Tomonaga rendono la teoria di Maxwell compatibile 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 !

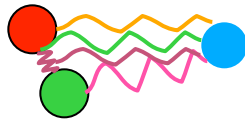


La Forza Forte: la QCD

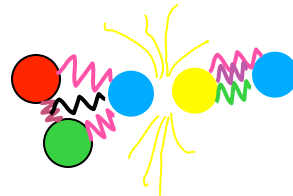
La forza forte fra i quarks decresce con il diminuire della loro distanza e all'interno degli adroni si comportano come se fossero liberi (*libertà asintotica*). Quando si cerca di allontanare i quarks tra loro la forza aumenta e obbliga i quarks a restare *confinati* all'interno degli adroni. Questo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

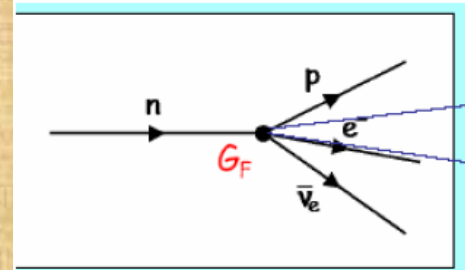
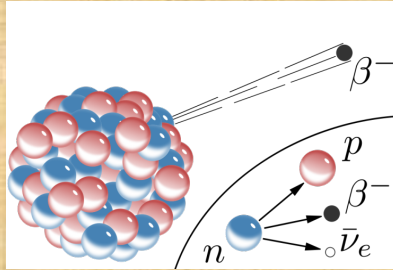


Gross, Wilczek and Politzer, nel 1974 capirono che una **teoria di gauge** era l'unica teoria di campo compatibile con una forza che godesse contemporaneamente della **libertà asintotica** e del **confinamento**:

Nasceva così la QCD !

La Forza Elettrodebole

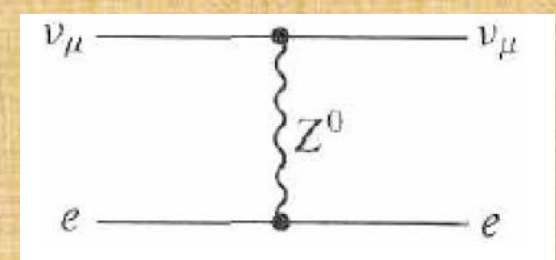
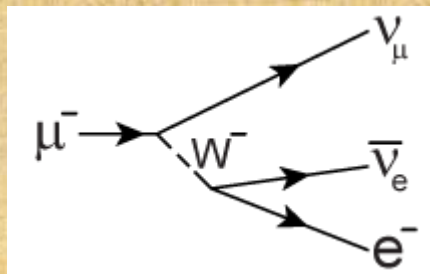
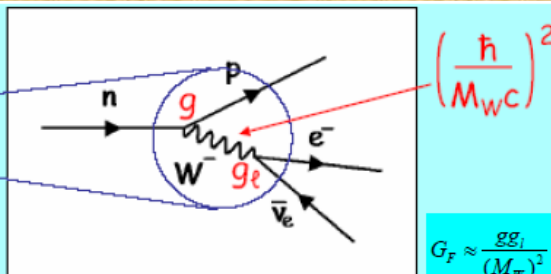
Agli inizi degli anni 60 la teoria di Fermi era ancora considerato il modello migliore per spiegare la fenomenologia delle interazioni deboli, ma non era completamente soddisfacente e ad alte energie violava l'unitarietà.



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.

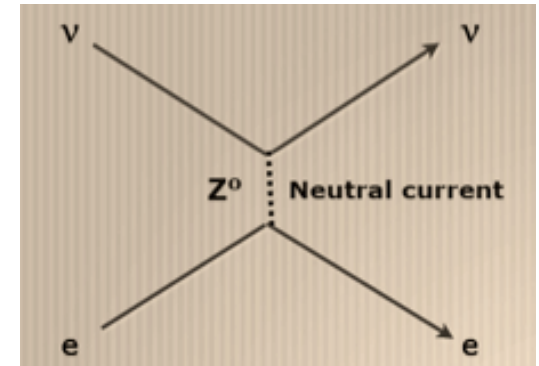
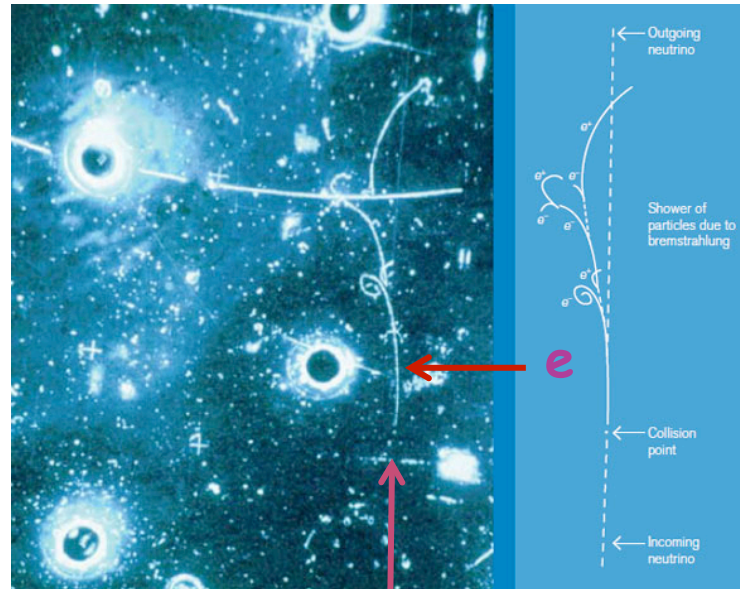
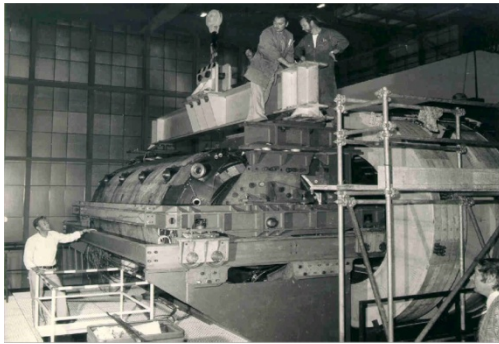
L'interazione elettromagnetica è mediata da un **bosone di gauge**, il fotone, con massa nulla che quindi è mediatore di una forza con raggio d'azione infinito

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

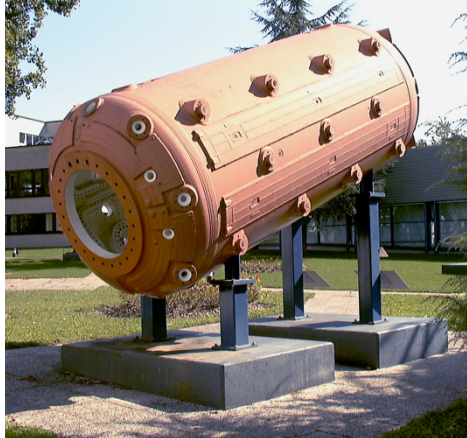


Si scoprono le correnti neutre al CERN

La tecnica della camera a nebbia, lo strumento fondamentale che ha permesso la scoperta di tantissime nuove particelle, viene migliorata con la camera a bolle: In una camera a nebbia, un vapore sovrassaturo condensa in piccole goccioline lungo la traiettoria delle particelle cariche ionizzanti. La camera a bolle usa invece un liquido sotto pressione di poco sotto il punto di ebollizione. Con una rapida diminuzione di pressione che abbassa il punto di ebollizione del liquido si formano delle piccole bollicine lungo il passaggio delle particelle ionizzanti.



Le correnti neutre vengono scoperte al CERN nel 1973



ν_{μ}

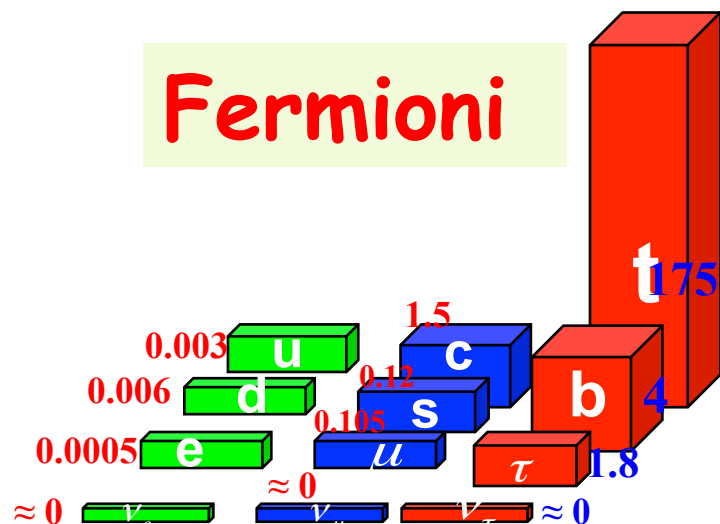
Il modello standard prende forma... ma ci sono difficoltà !

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.

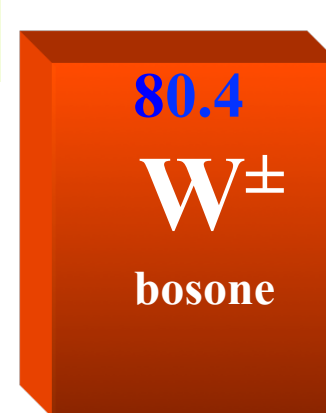
l'invarianza di gauge richiede che le particelle mediatrici dell'interazione abbiano massa nulla come il fotone e i gluoni; ma i W^\pm e lo Z^0 , mediatori di una interazione a corto raggio come l'interazione debole, non possono avere masse nulle !

Le masse (in GeV)

Fermioni



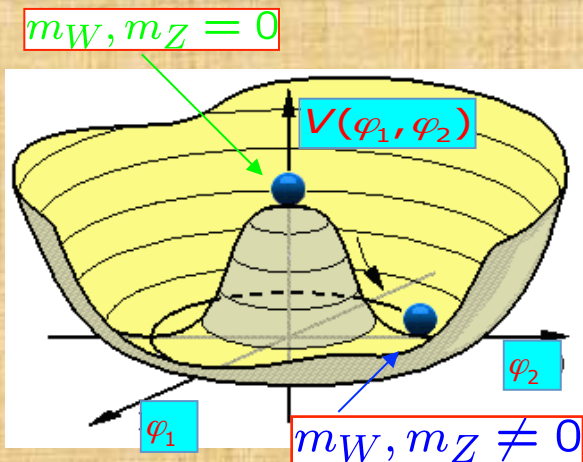
Bosoni



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.

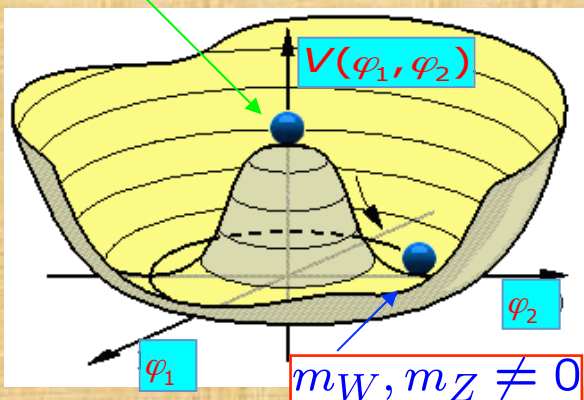
La Lagrangiana (da cui si ricavano le equazioni del sistema) mantiene la simmetria di gauge, ma la scelta di un qualsiasi stato fondamentale rompe la simmetria.

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.

$$m_W, m_Z = 0$$



$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

settore di gauge

massa ai quark e ai leptoni

massa ai W^\pm e Z^0

Campo di Higgs

Il campo di Higgs

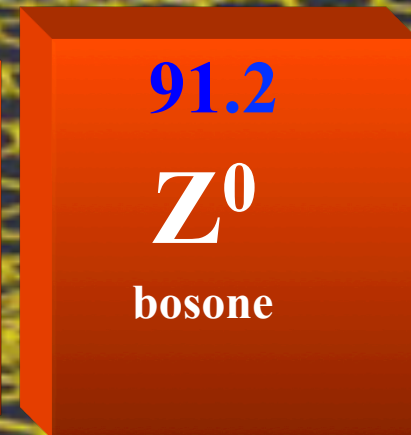
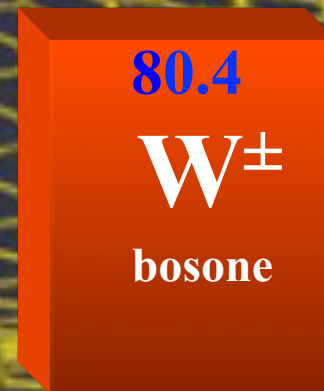
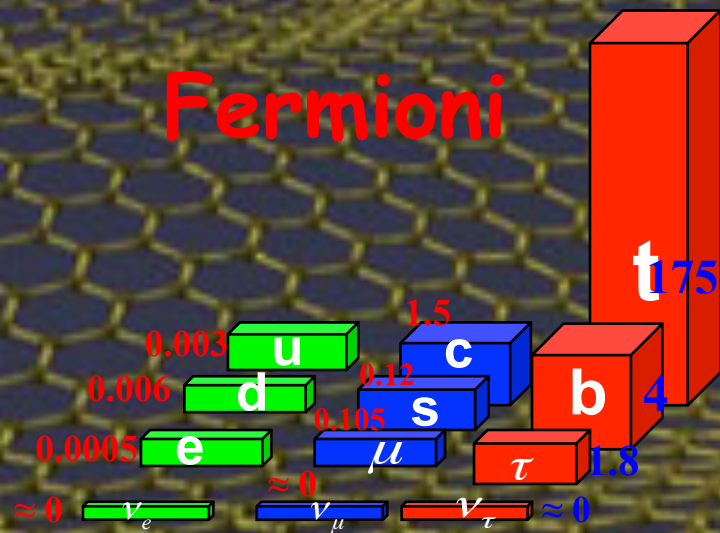
Ipotesi

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

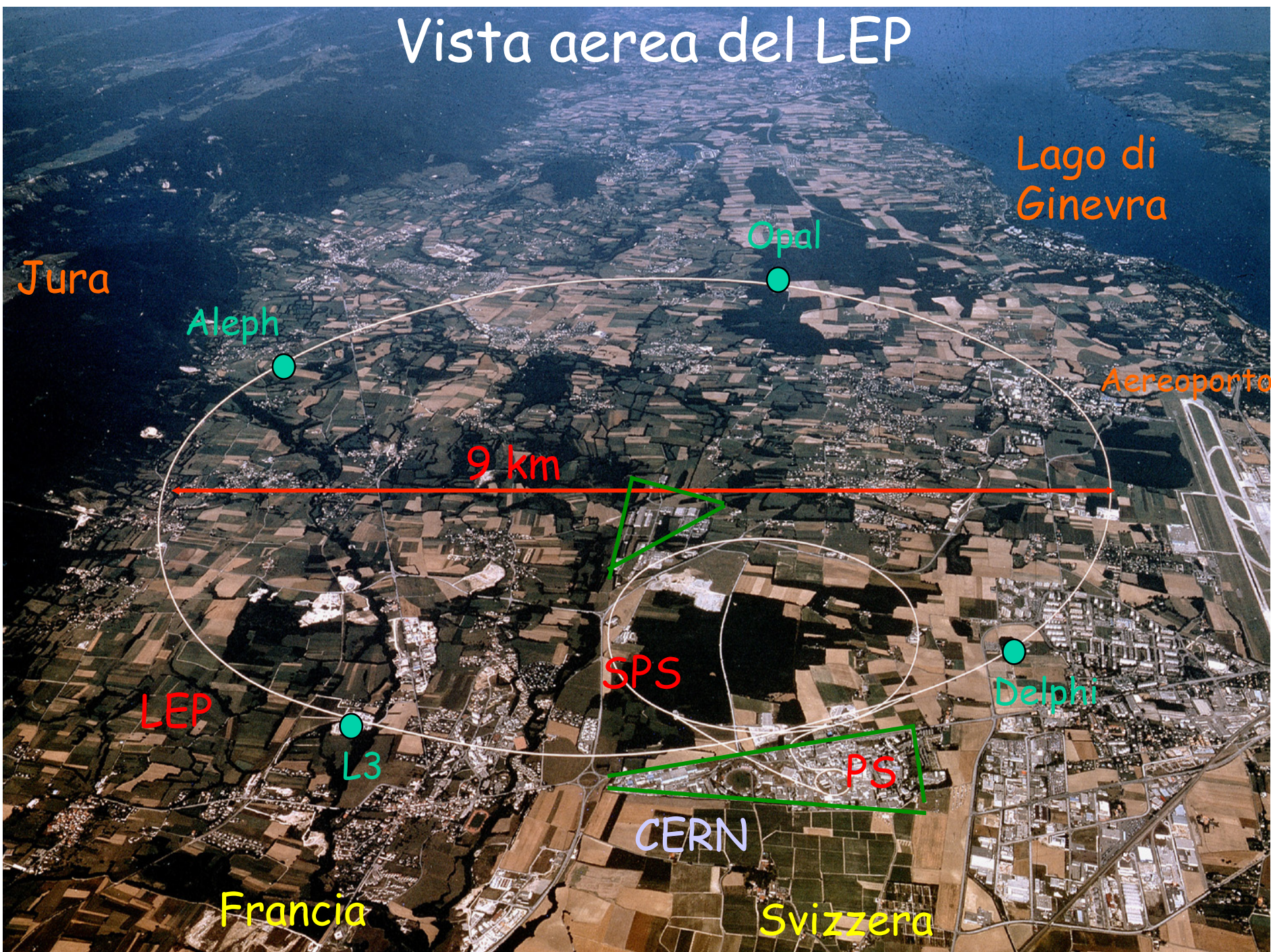
- ✓ 1967/68: l'unificazione dell'interazione elettromagnetica e debole prende la sua forma definitiva con l'integrazione nel modello del meccanismo di Higgs.
- ✓ 1973: La scoperta al CERN delle "correnti neutre" nelle interazioni neutrino-nucleone, spiegabili con lo scambio di uno Z^0 sancisce definitivamente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

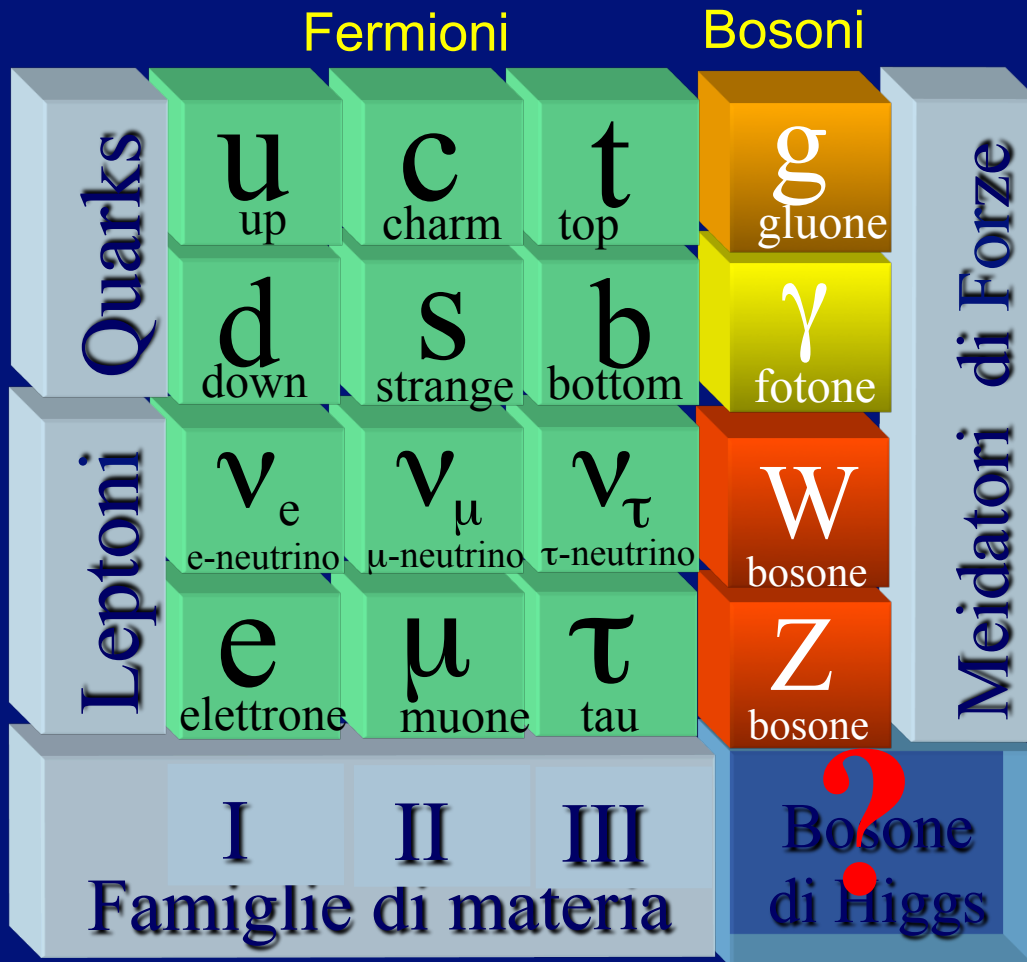
CERN

Francia

Svizzera

Il Modello Standard

(alla fine del secondo millennio)



Interrogativi:

✓ perché le masse delle particelle mediatrici delle forze variano da 0 a circa 90 GeV?

✓ perché le masse delle particelle di materia variano da quasi 0 a circa 170 GeV?

Soluzione più semplice:

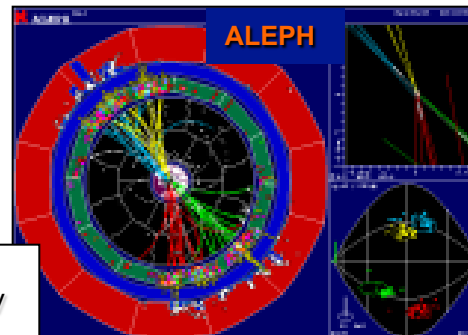
➤ un campo scalare pervade l'Universo (il campo di Higgs). Le particelle interagiscono con esso. Più forte è l'interazione più grande è la massa...

....ma il Bosone di Higgs non si trova !

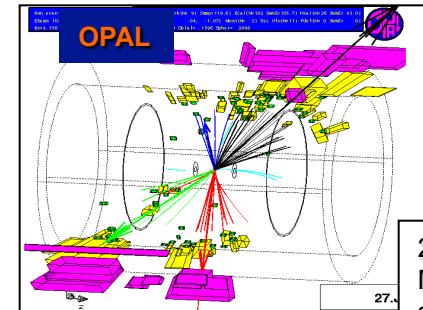
Ricerca dell'Higgs a LEP

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

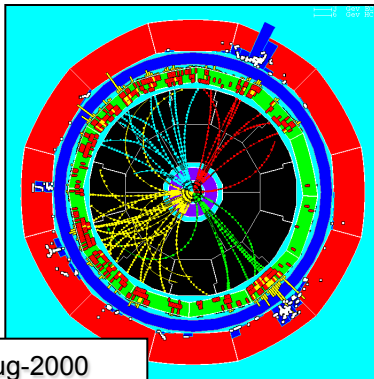
Sono stati visti alcuni eventi compatibili con una massa di un H intorno a 114 GeV: troppo pochi per poter affermare che si trattava del bosone di Higgs !



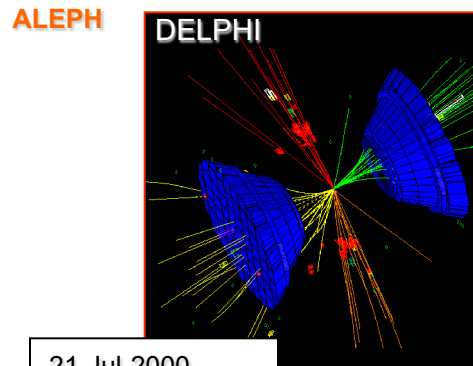
31-Jul-2000
Mass: 112 GeV
 $s/b_{115} = 2.0$



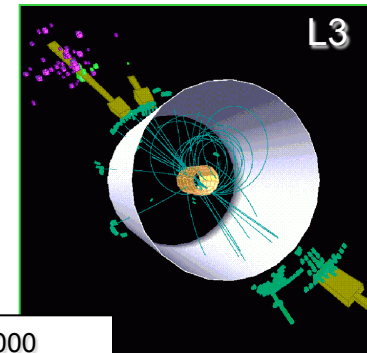
27-Jun-2000
Mass: 113 GeV
 $s/b_{115} = 0.52$



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

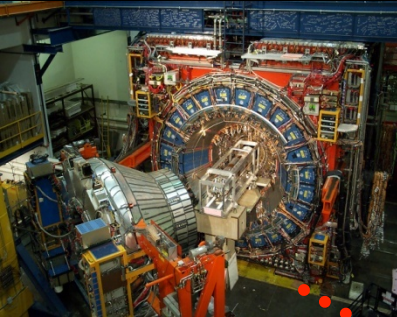


21-Jul-2000
Mass: 114 GeV
 $s/b_{115} = 0.4$

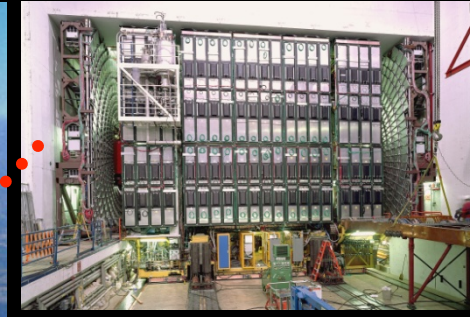
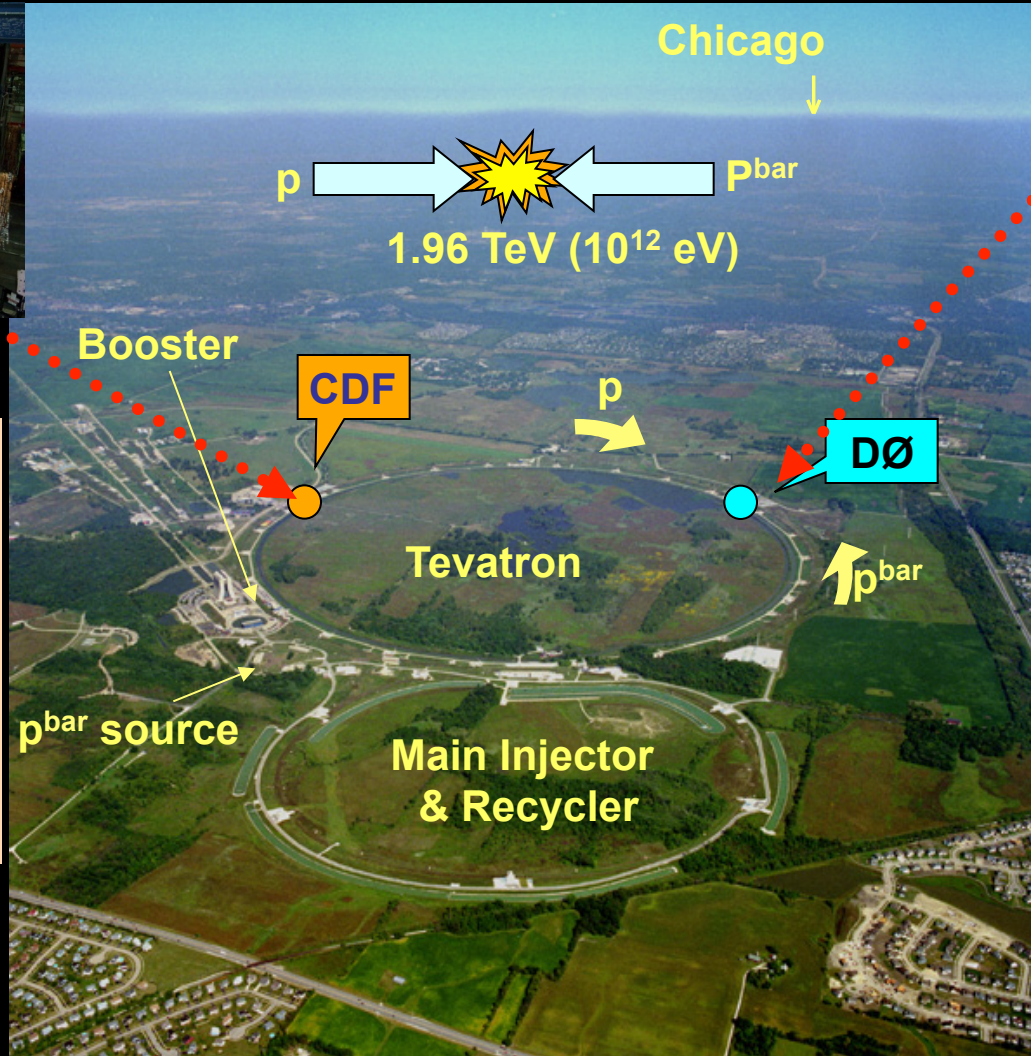


14-Oct-2000
Mass: 114 GeV
 $s/b_{115} = 2.0$

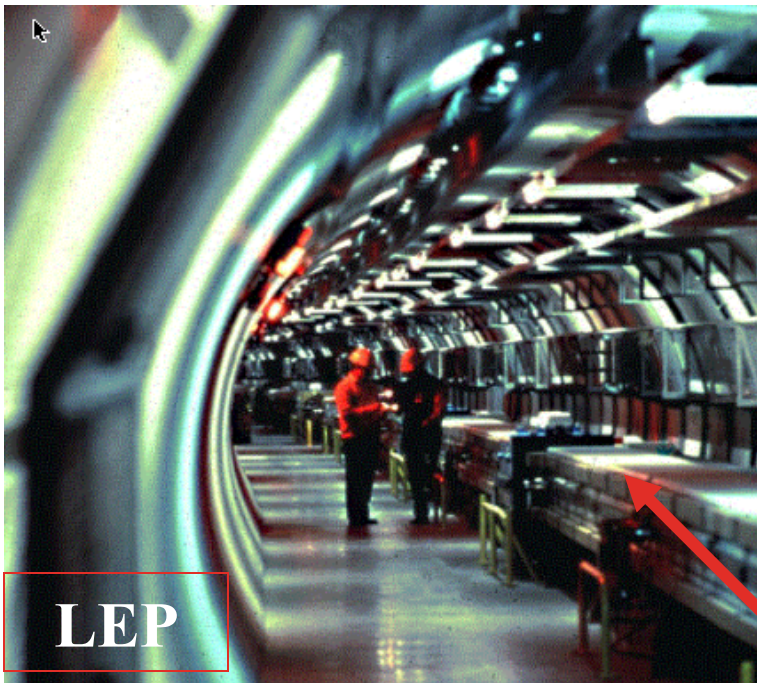
Ricerca dell'Higgs al TeVatron



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



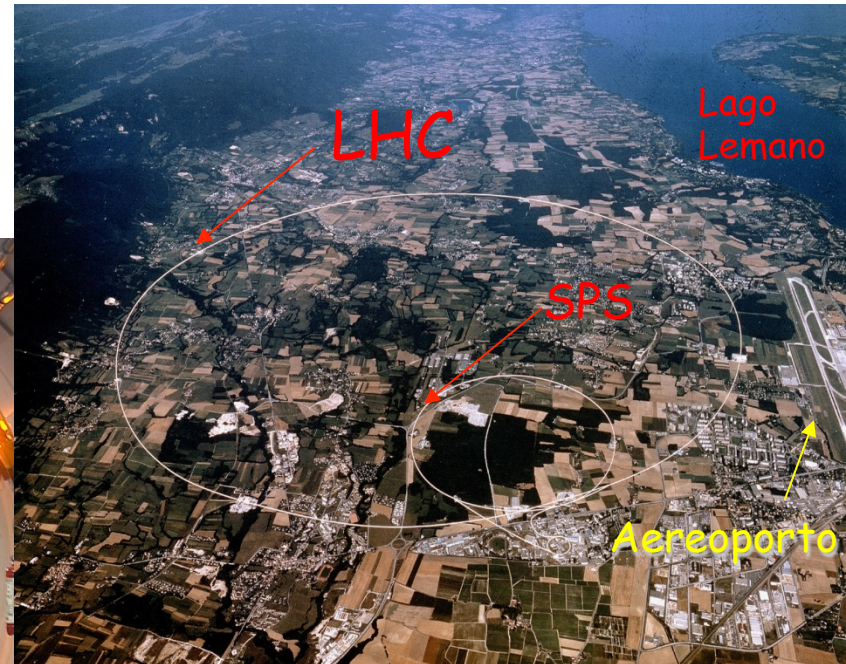
Nel 2000 i magneti di LEP vengono rimossi e inizia l'installazione di LHC

SPS

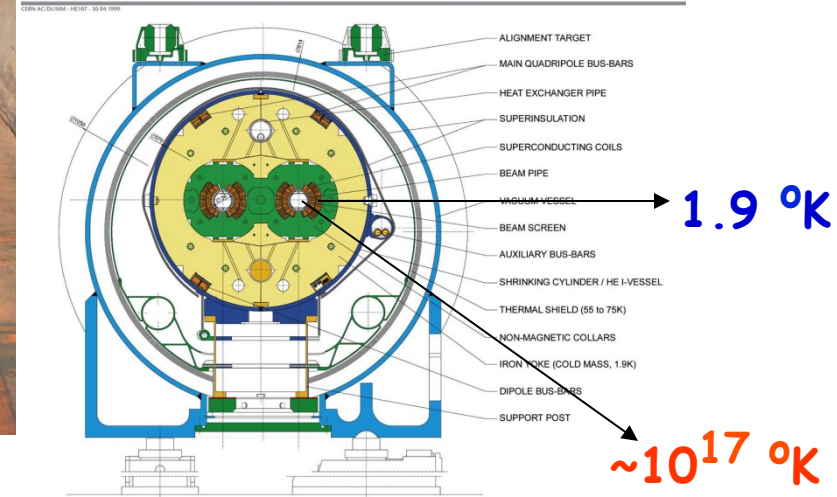
Il Large Hadron Collider del CERN



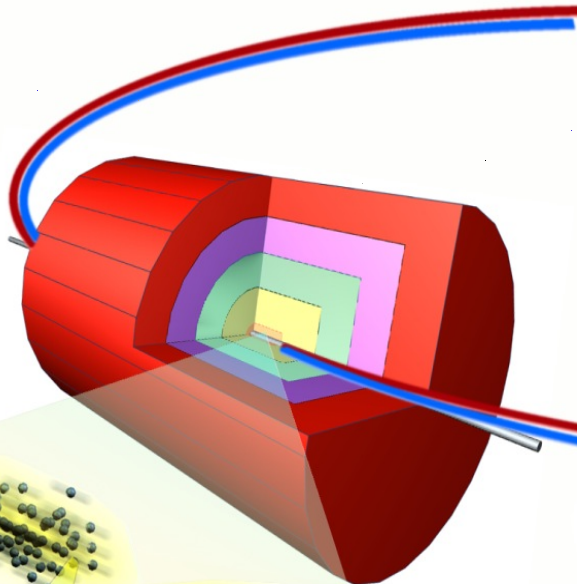
9300 Magneti superconduttori
1232 Dipoli (15m, 1.9 °K) 8.4 tesla 11700 A
448 Main Quads, 6618 Correttori.
Circonferenza 26.7 km



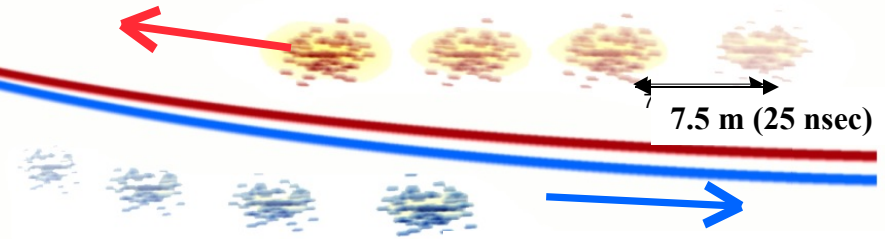
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



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

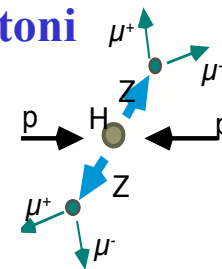
14 TeV

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

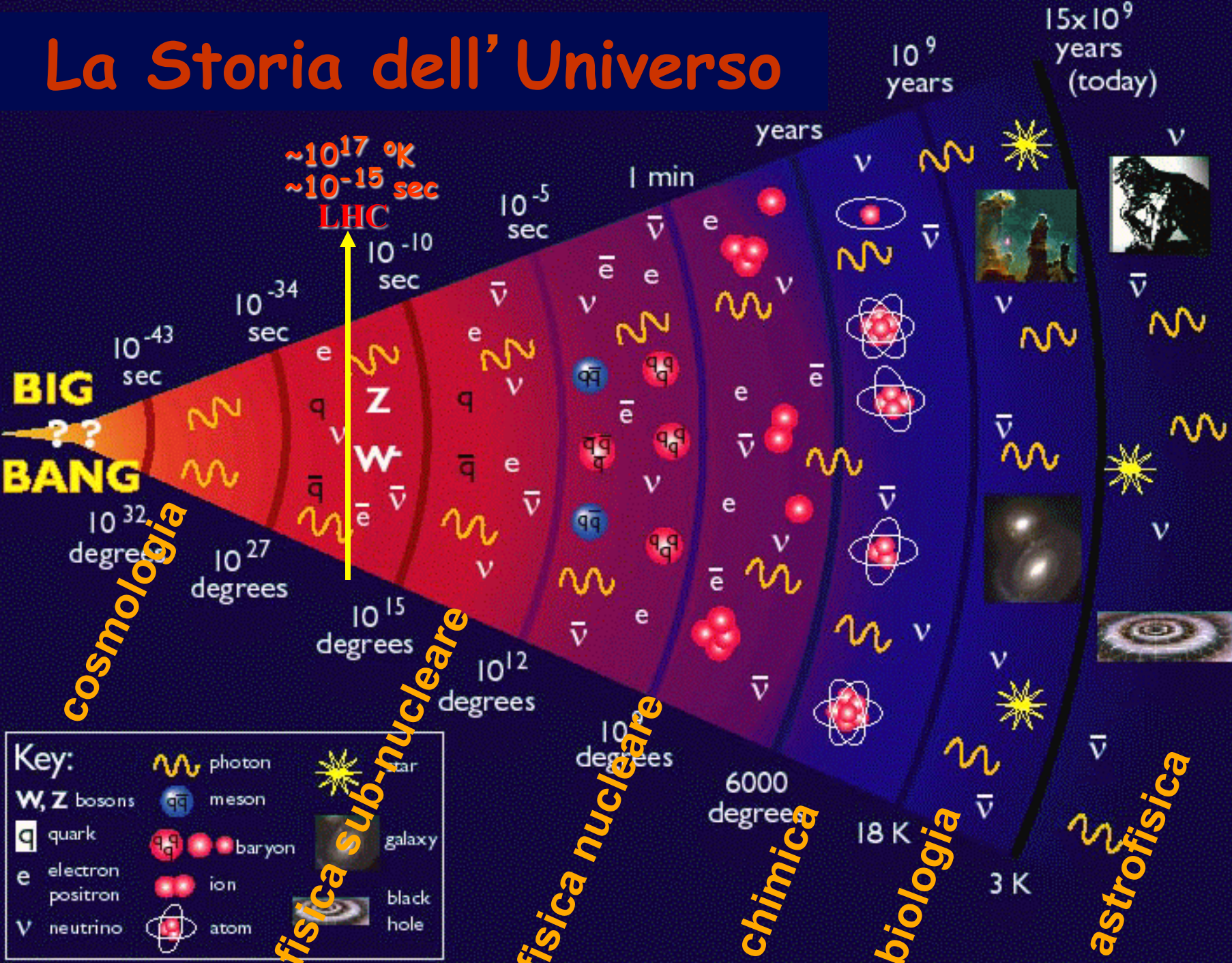
Collisione tra i “partoni” dei due protoni

“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



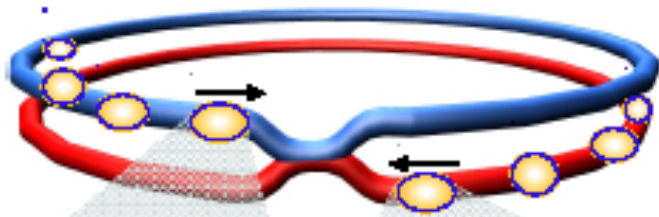
La Storia dell' Universo



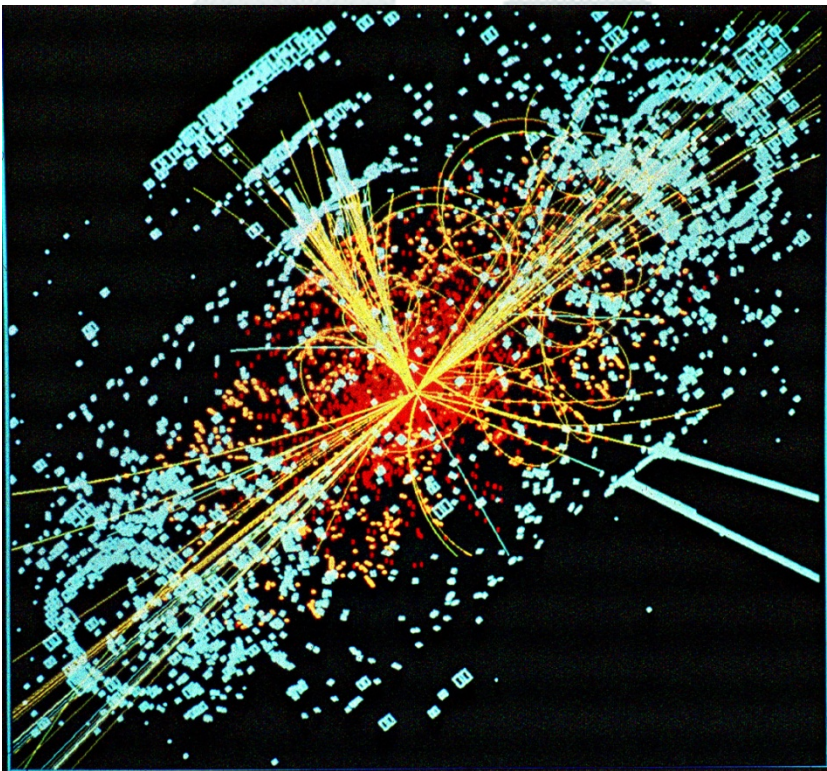
Key:

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

Collisioni protone-protone a LHC



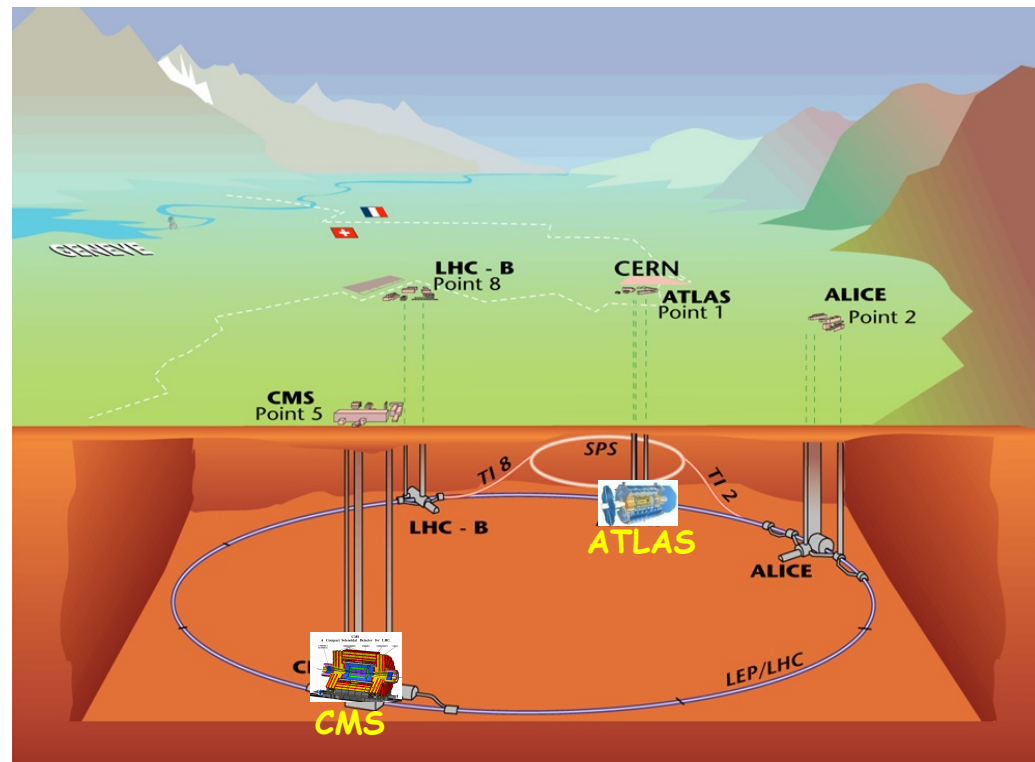
~600 milioni di eventi al secondo
~40 miliardi di particelle al secondo
~1000 particelle ogni 25 ns
Selezione di 1 evento su diecimila miliardi



“quasi” mini-Big Bang

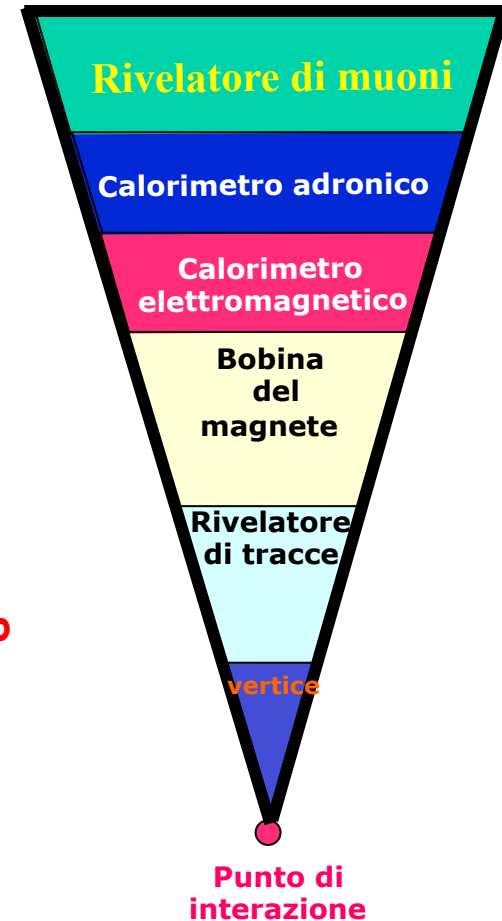
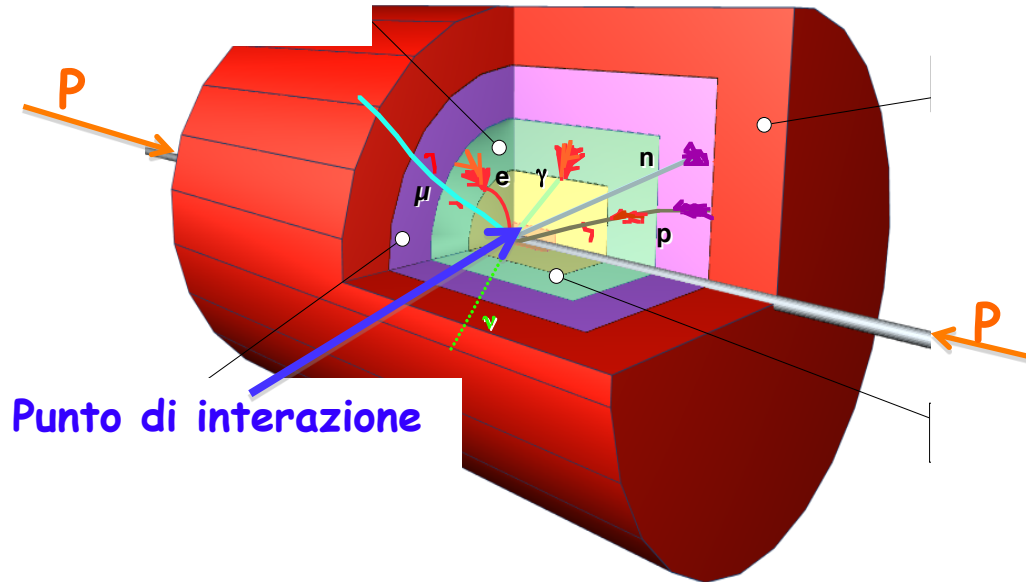
$\sim 10^{17}$ °K , $\sim 10^{-15}$ sec

⇒ 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)

(*)

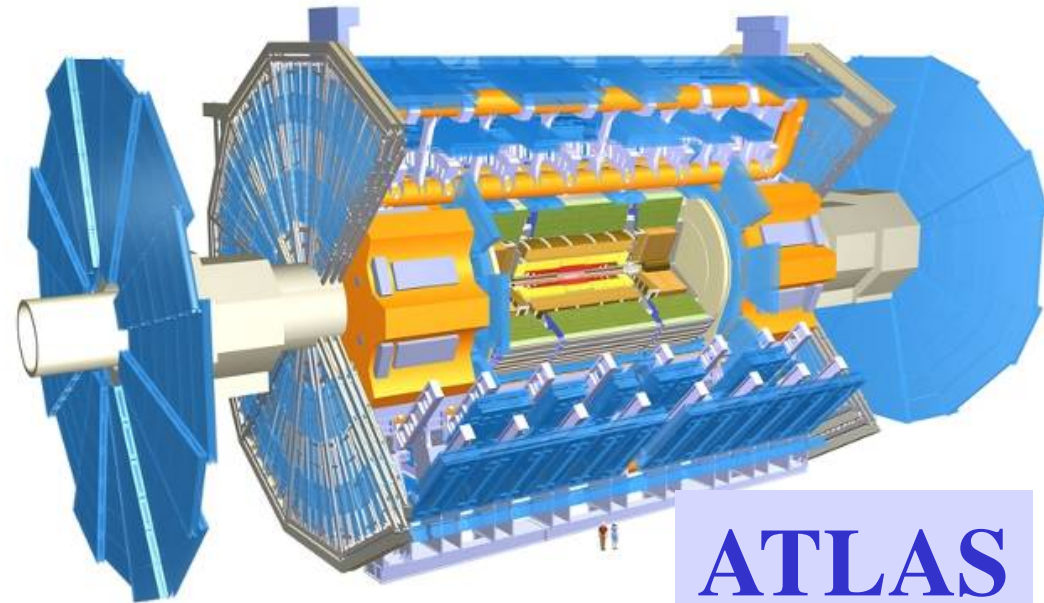
Pioni, $\tau=2.6 \times 10^{-8}$ sec, $E=20$ GeV, $\gamma = E/m = 20/0.140 = 142.86$, $\gamma\tau = 0.0037$ msec, distanza media percorsa = $c \gamma \tau = 1.1$ km

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!**

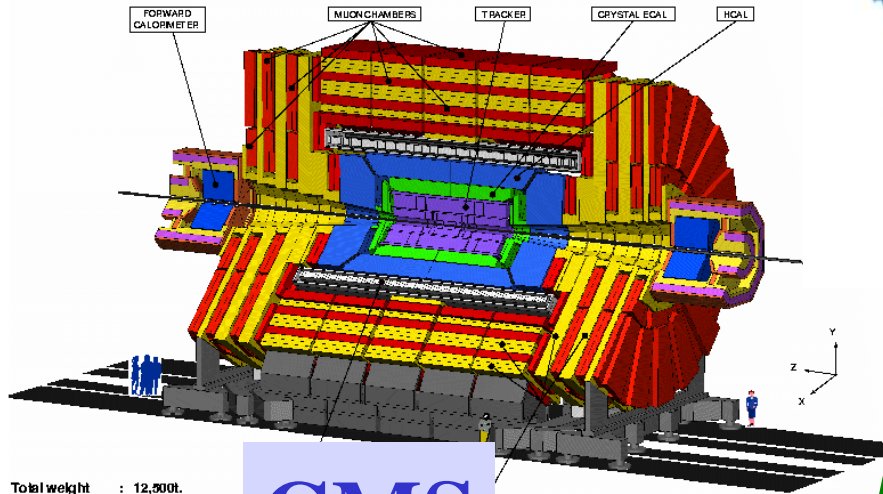
Quanto sono grandi ATLAS e CMS?



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

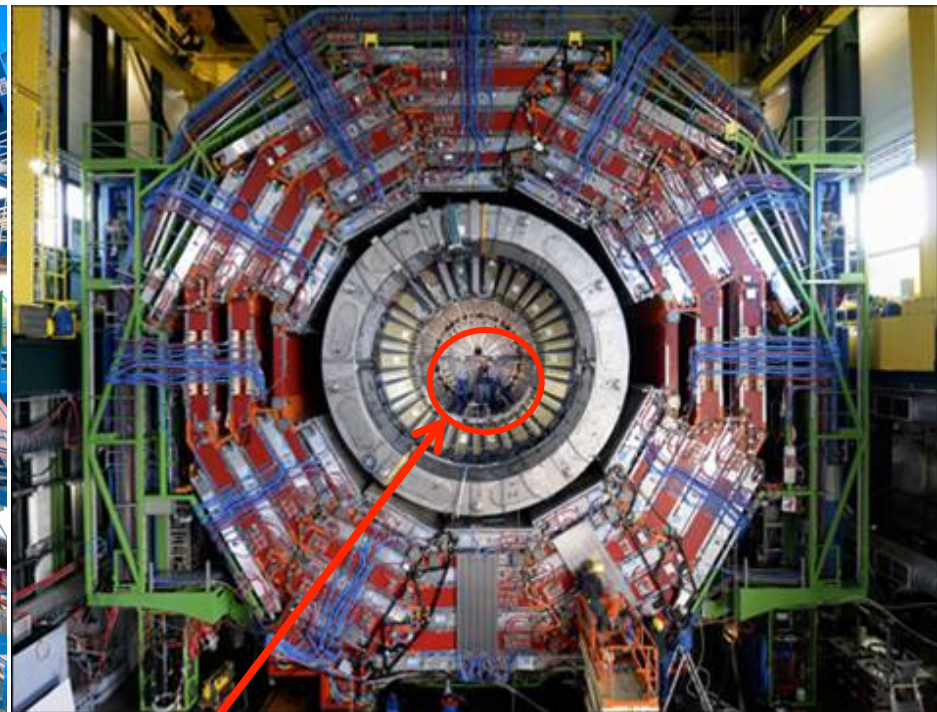
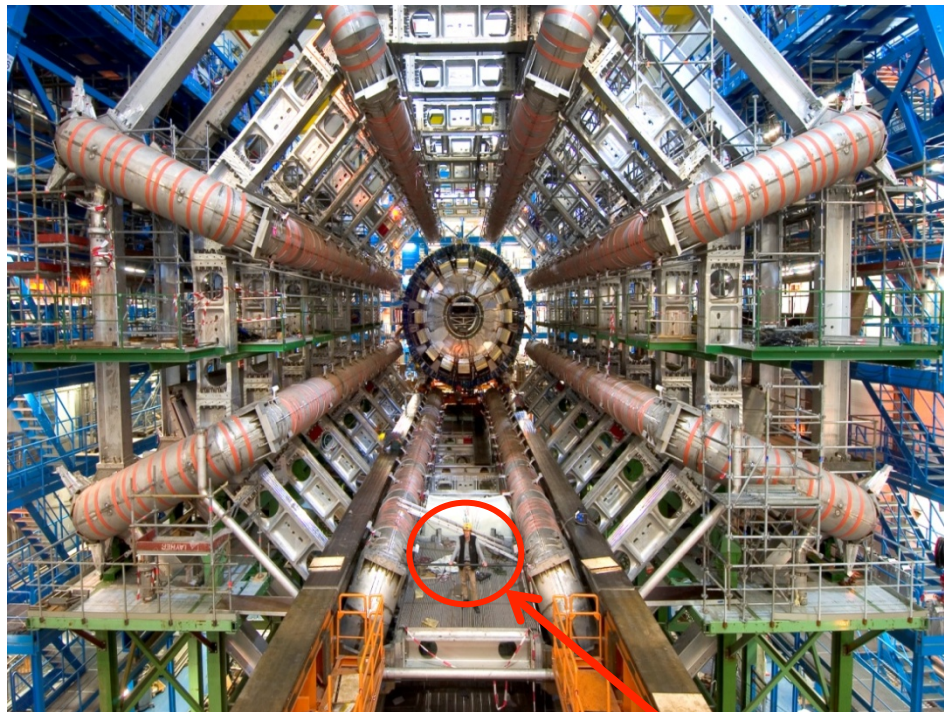
J.L.B.P.P

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

ATLAS e CMS

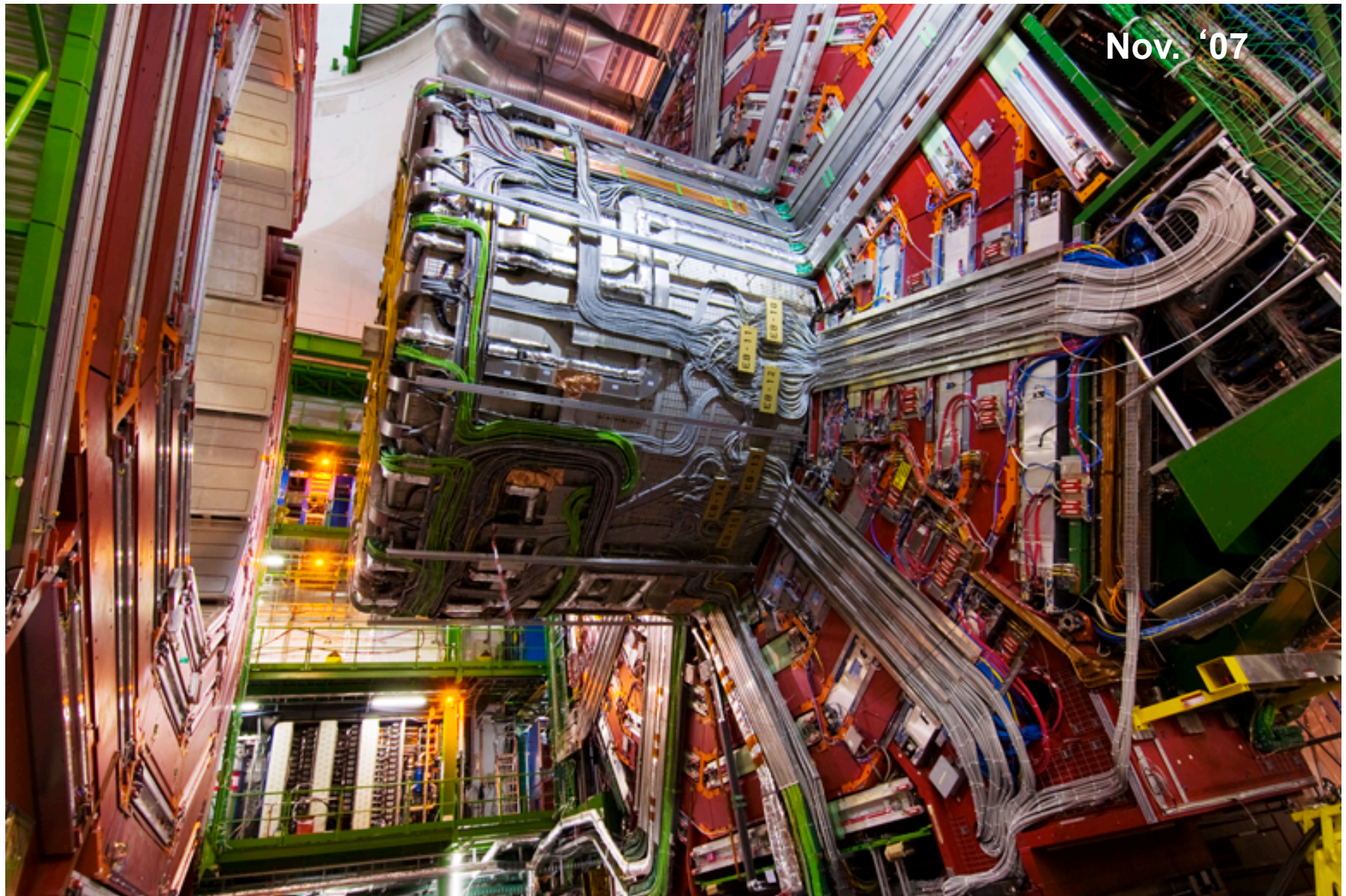
~ 3000 persone tra fisici, ingegneri e studenti lavorano in ciascun dei due esperimenti

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

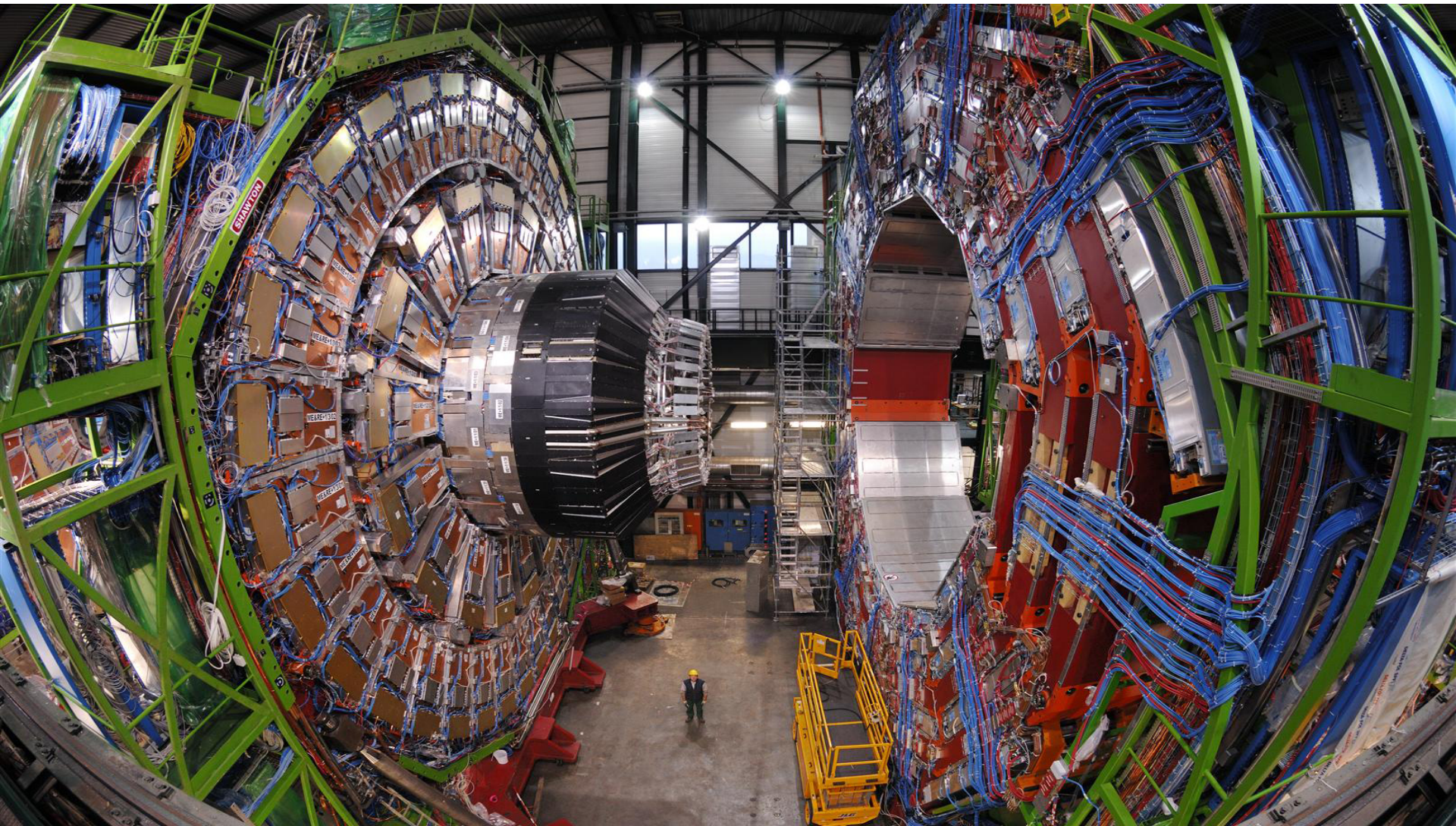


Persone

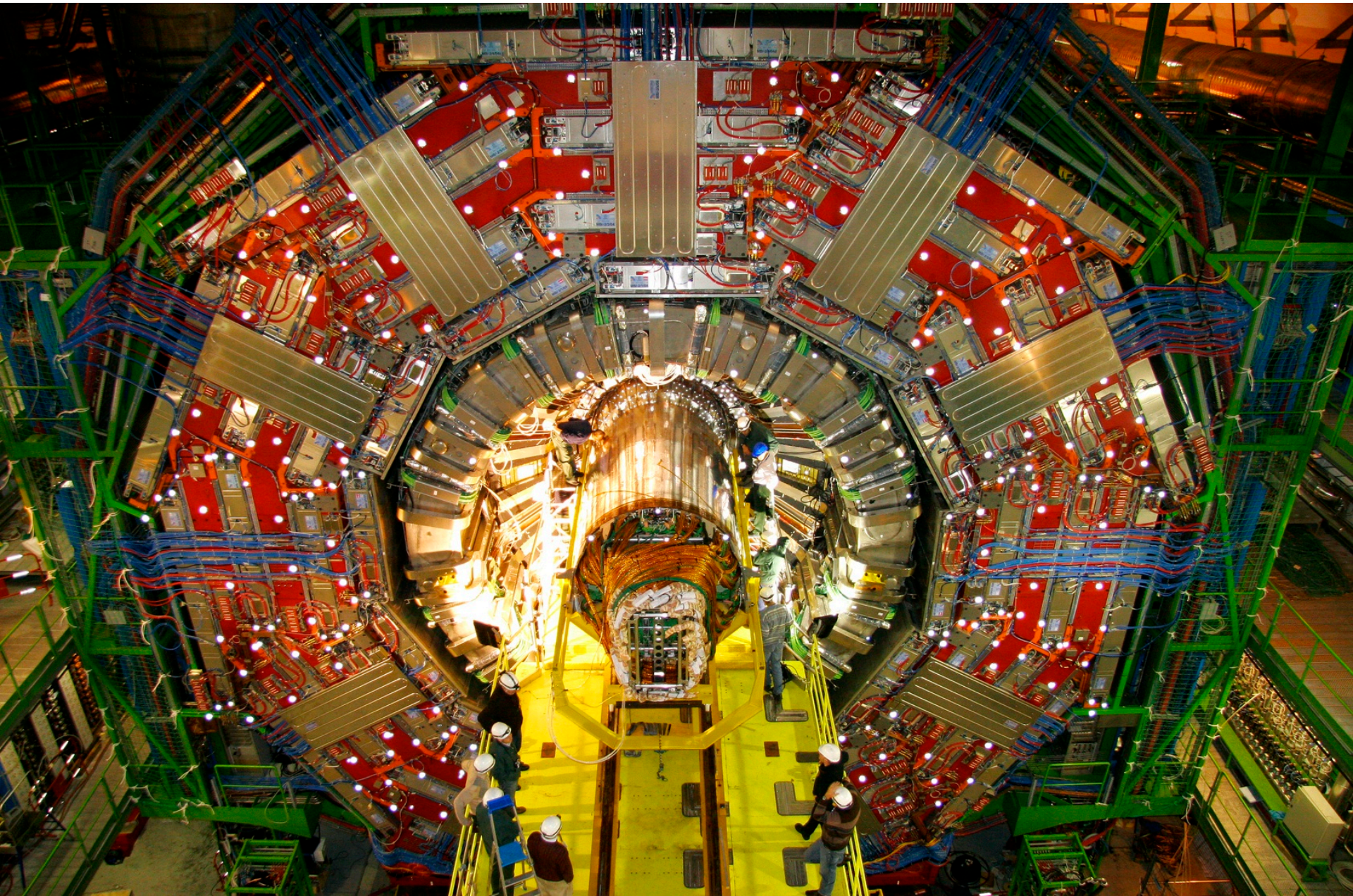
Il rivelatore CMS



Il rivelatore CMS



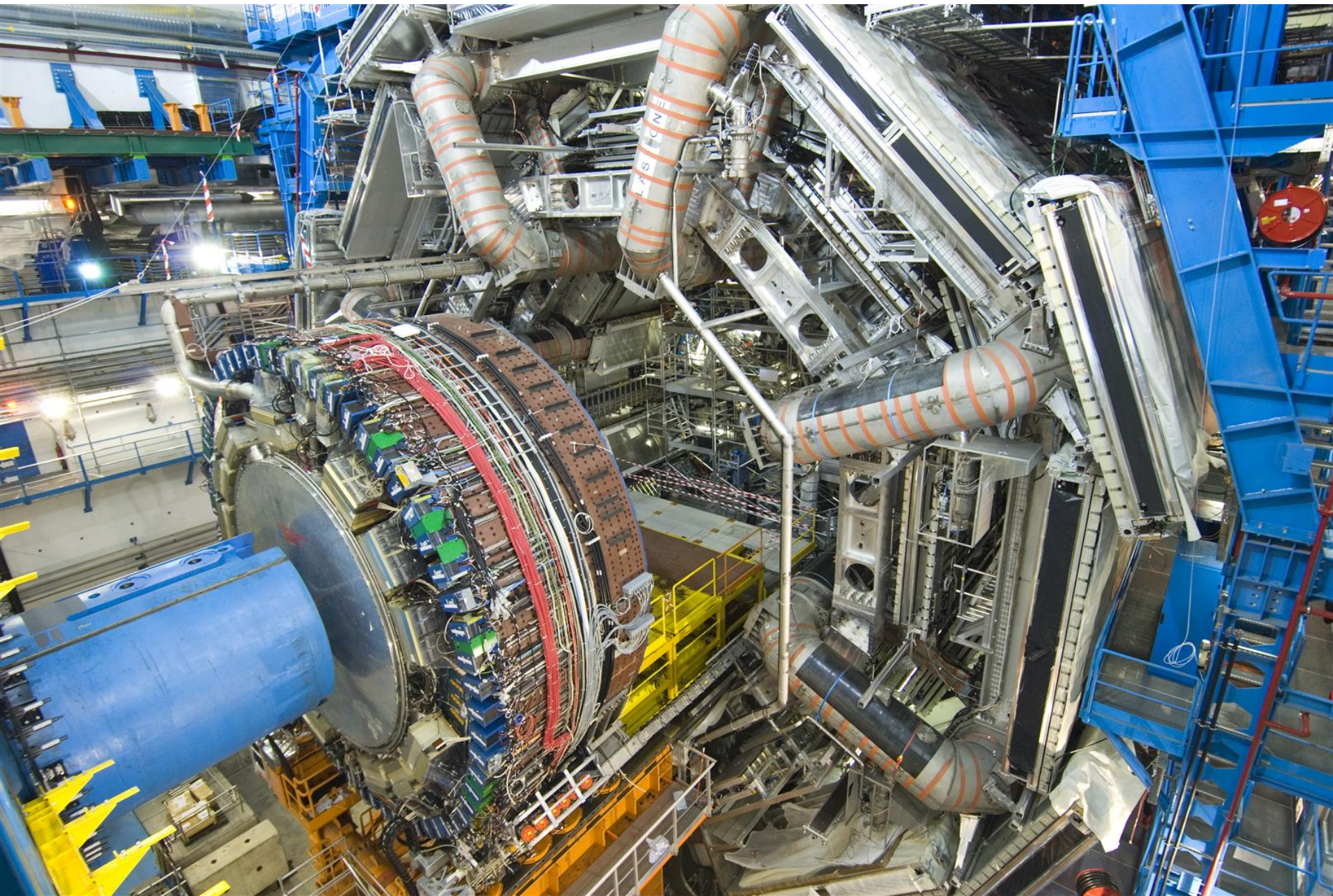
Il rivelatore CMS



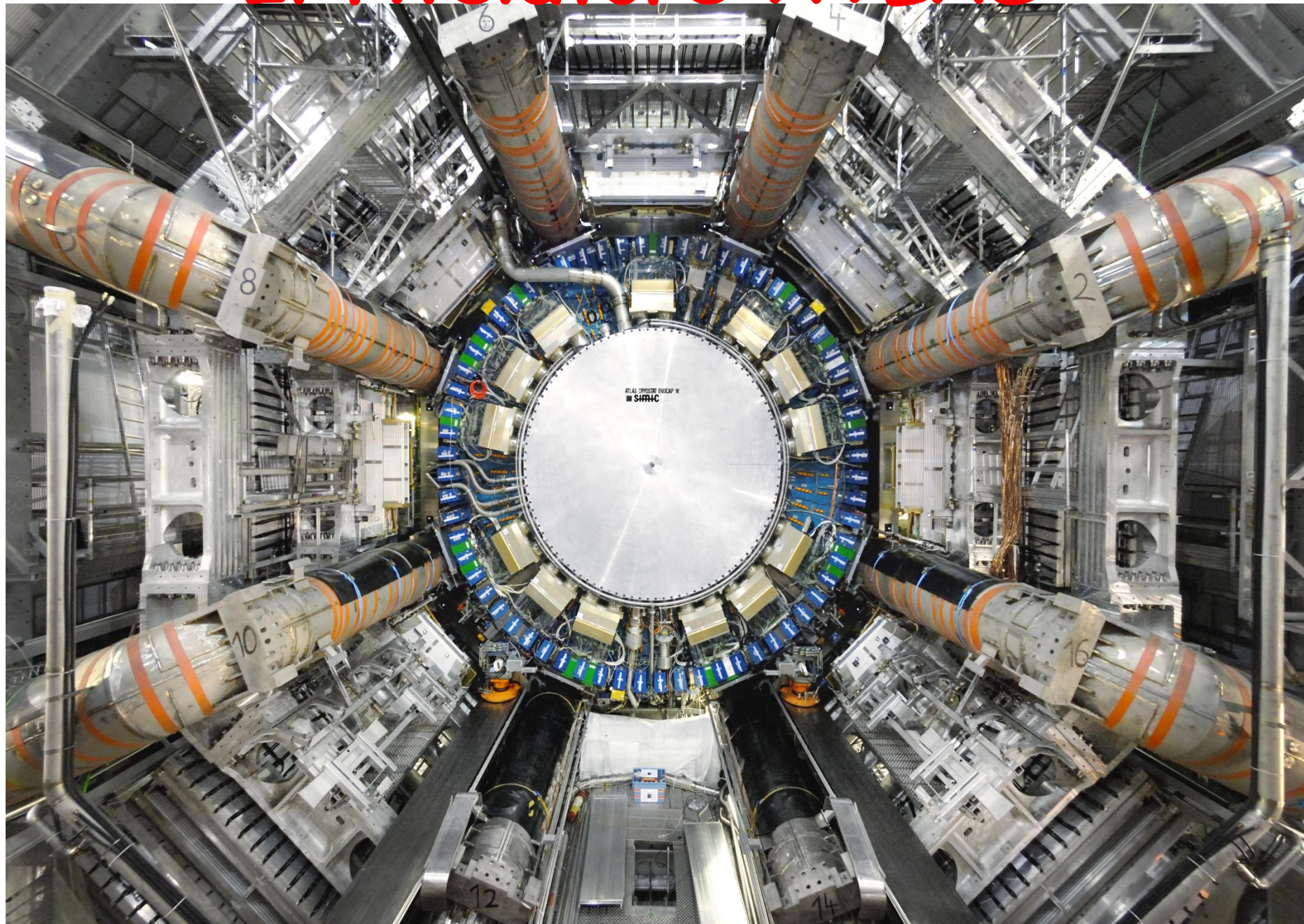
Una riunione della Collaborazione CMS



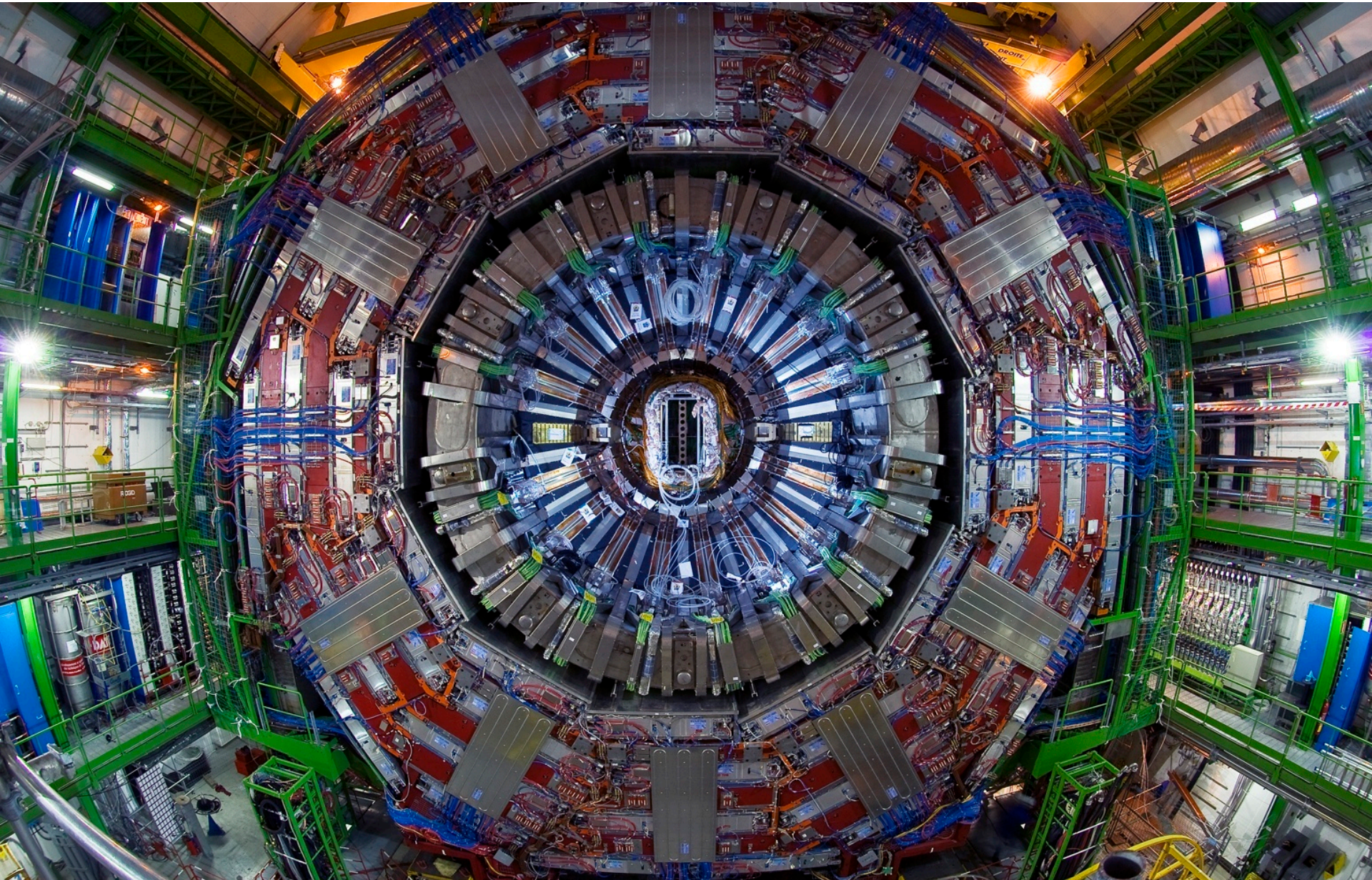
Il rivelatore ATLAS

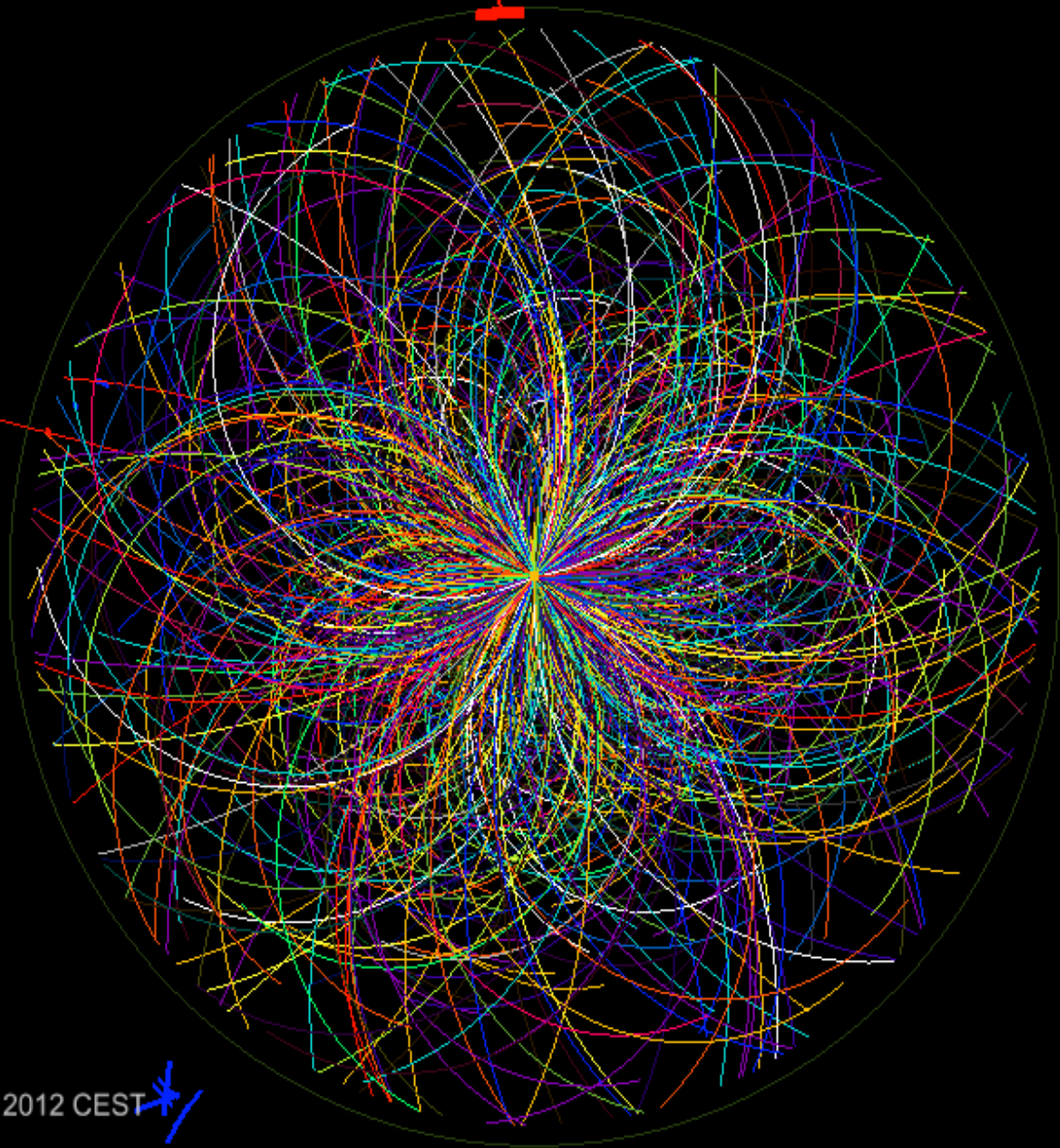


Il rivelatore ATLAS



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.

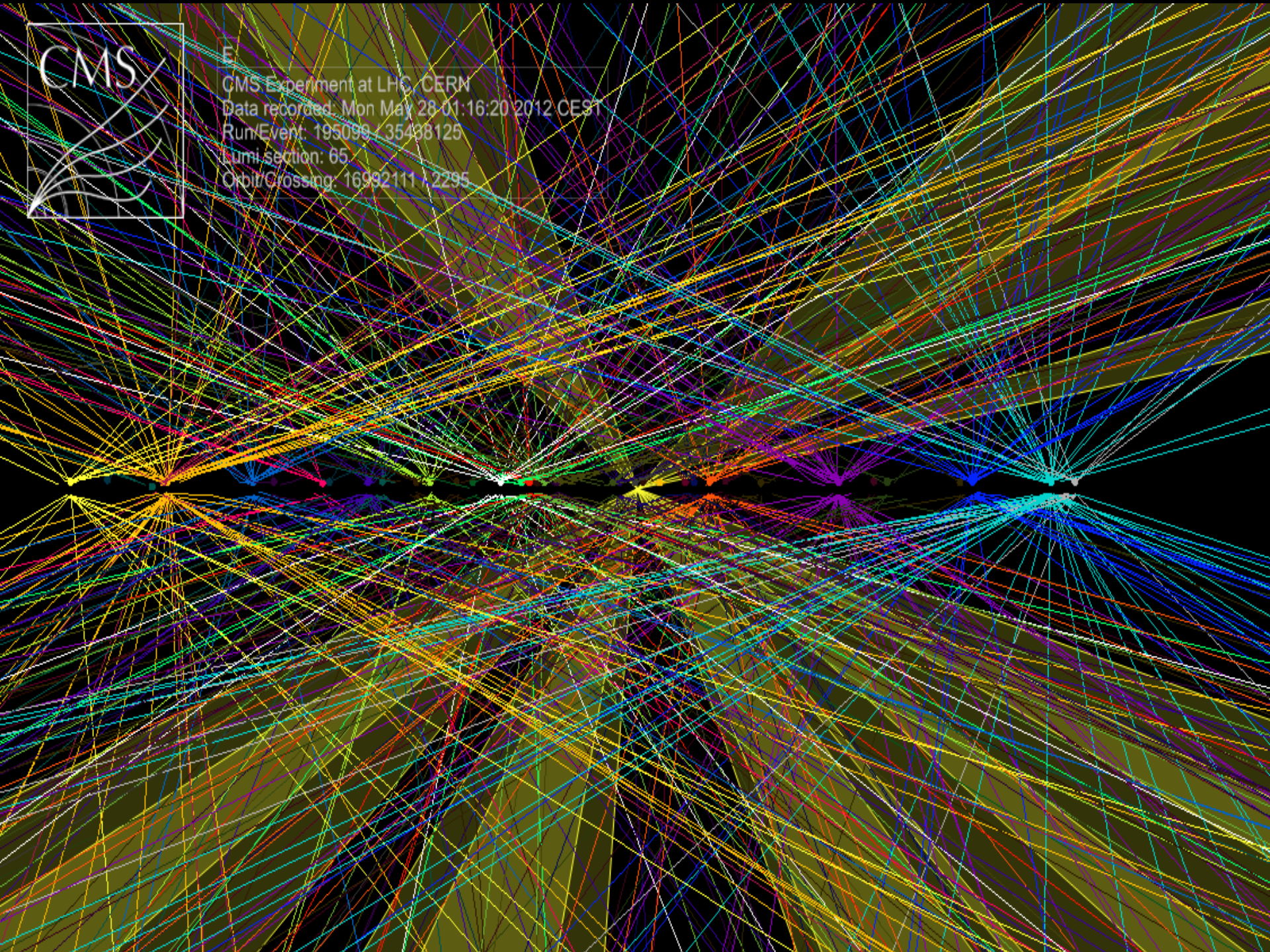




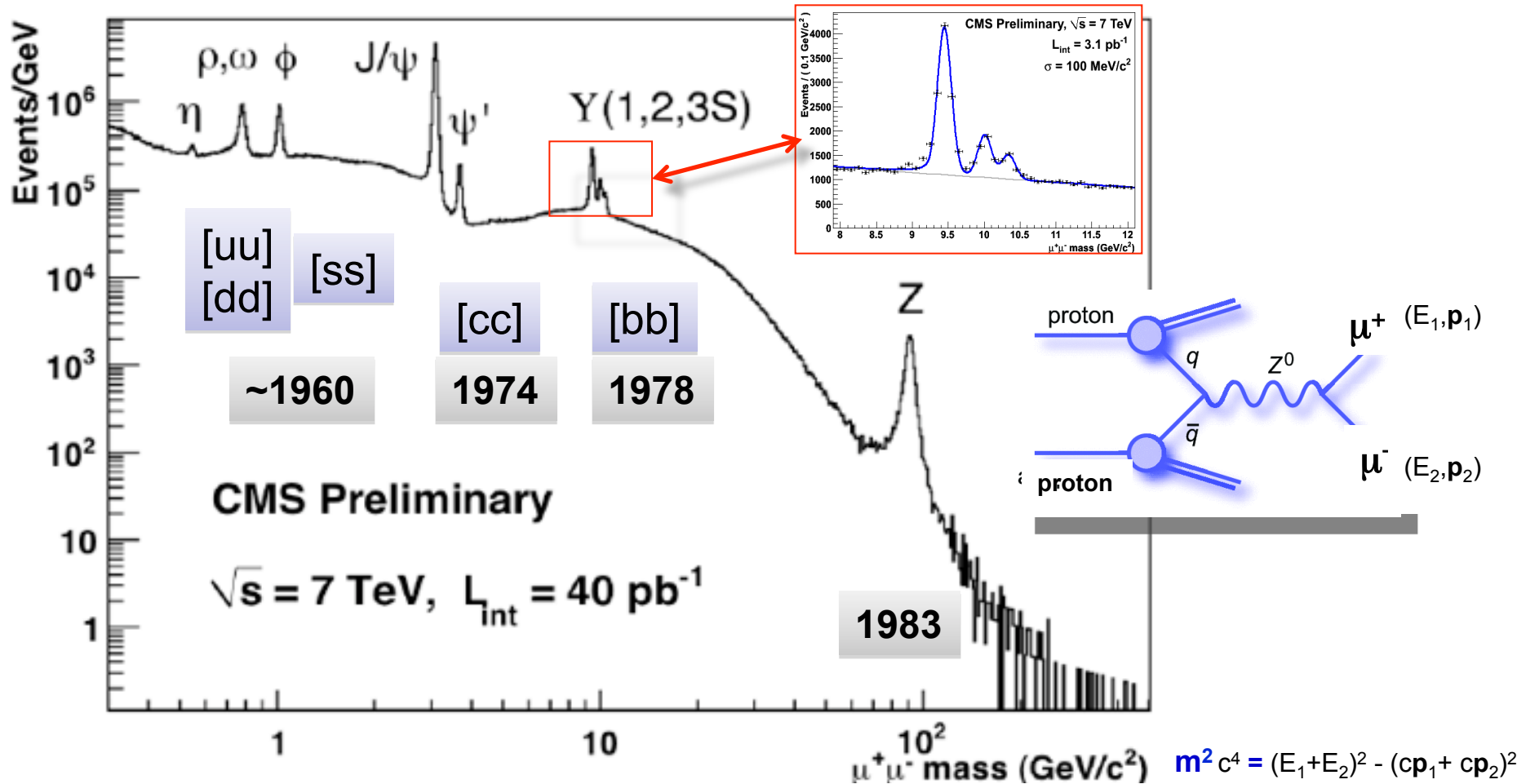
CMS Experiment at LHC, CERN
Data recorded: Mon May 28 01:16:20 2012 CEST
Run/Event: 195099 / 35438125
Lumi section: 65
Orbit/Crossing: 16992111 / 2295



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

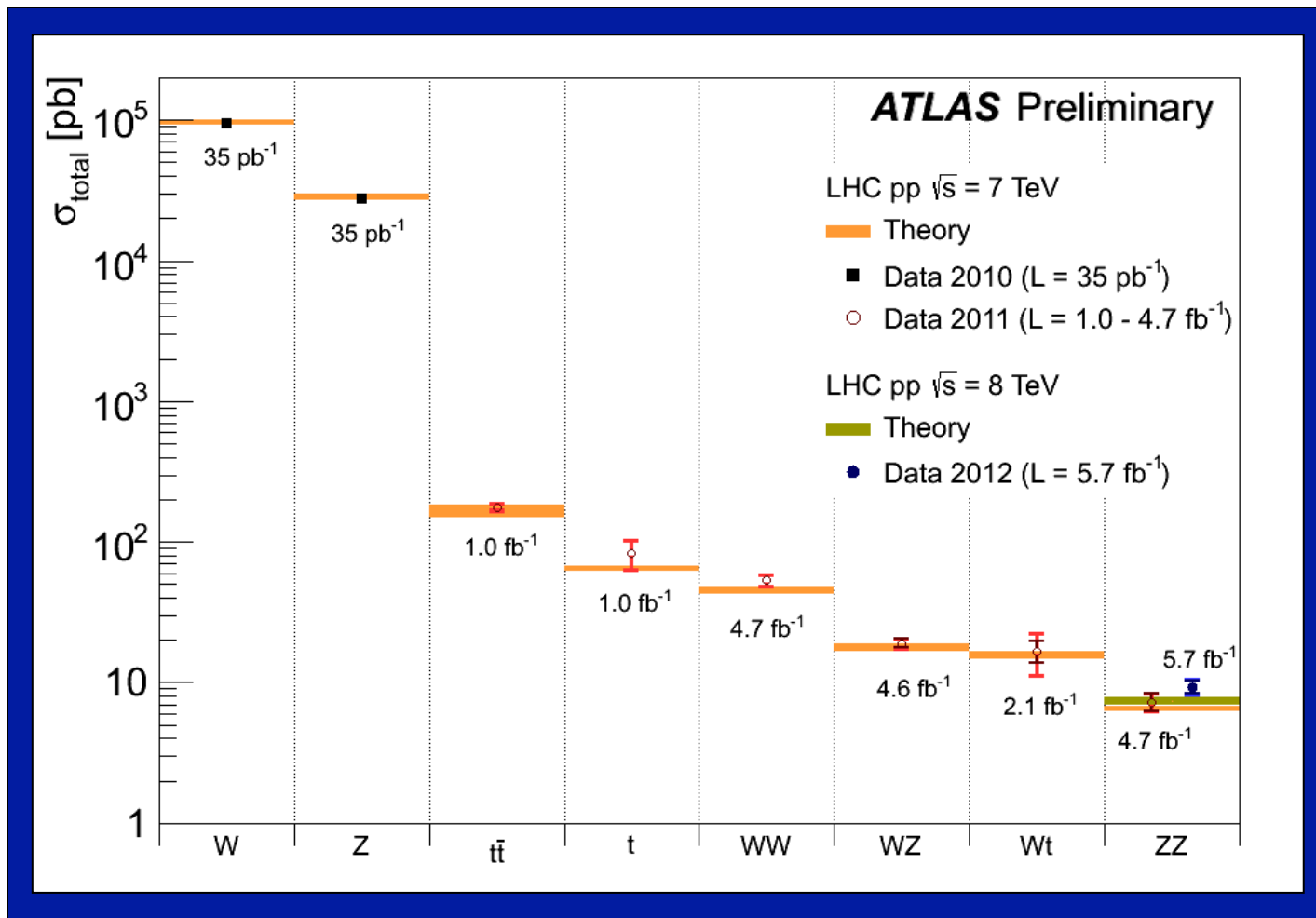


La riscoperta del Modello Standard



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

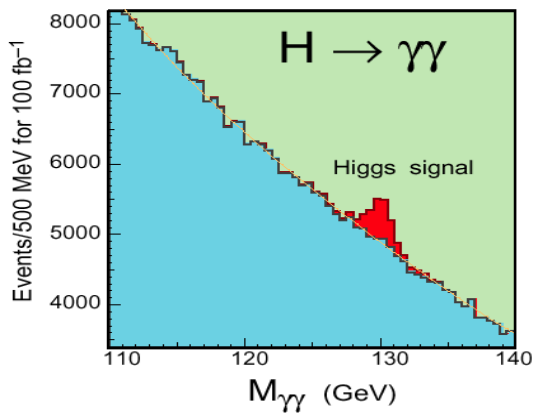
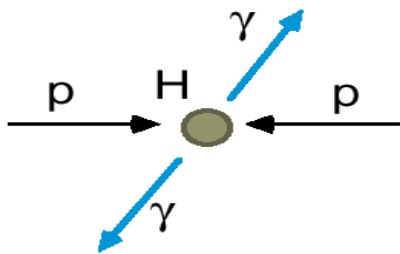
La verifica del Modello Standard



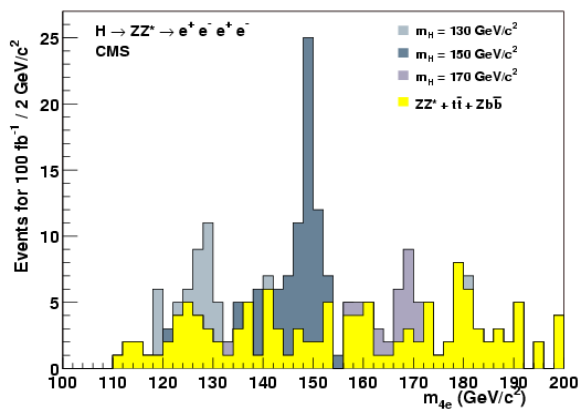
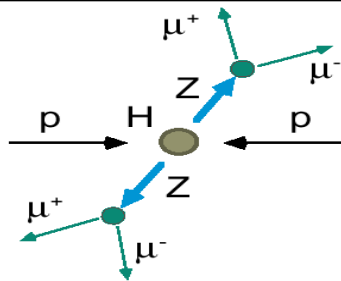
Dati raccolti (ATLAS) fino a metà del 2012
e confronto con le previsioni della teoria

Eventi di Higgs in CMS

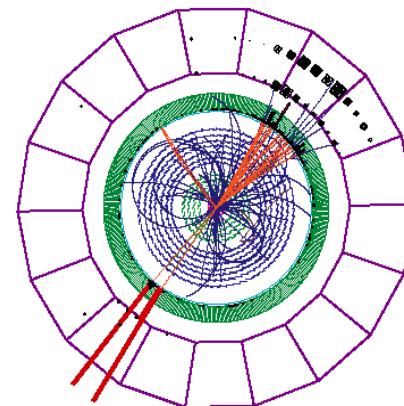
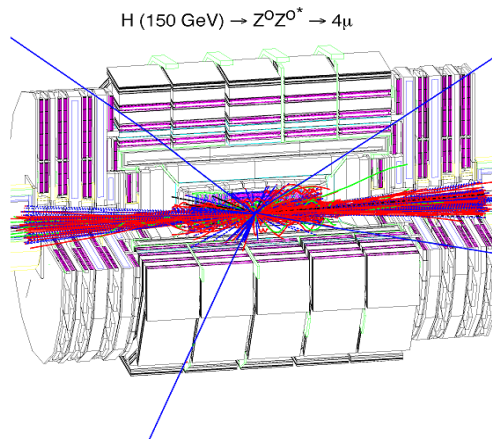
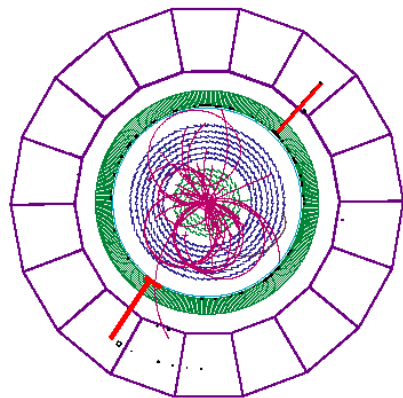
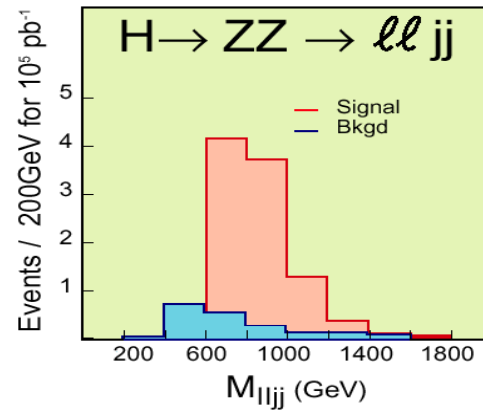
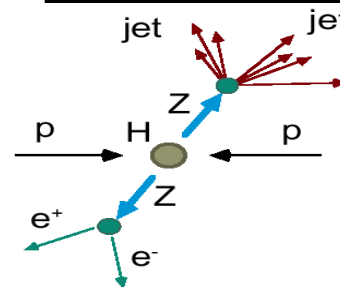
$M_H < 150 \text{ GeV}$



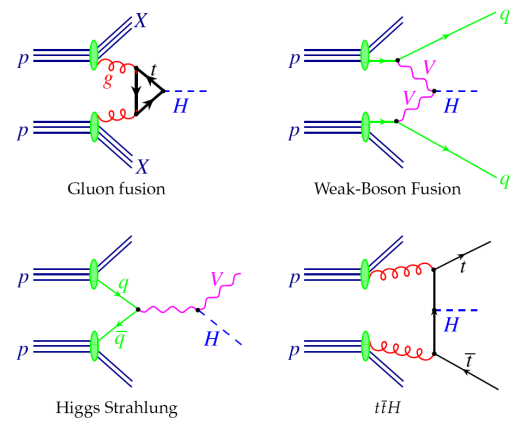
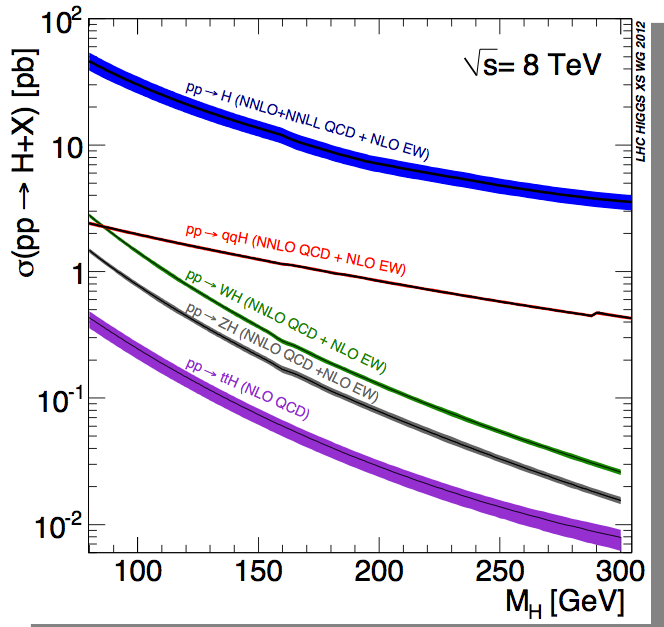
$130 < M_H < 500 \text{ GeV}$



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



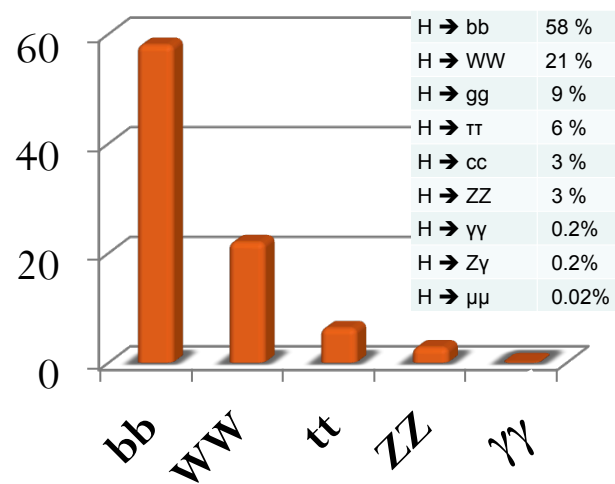
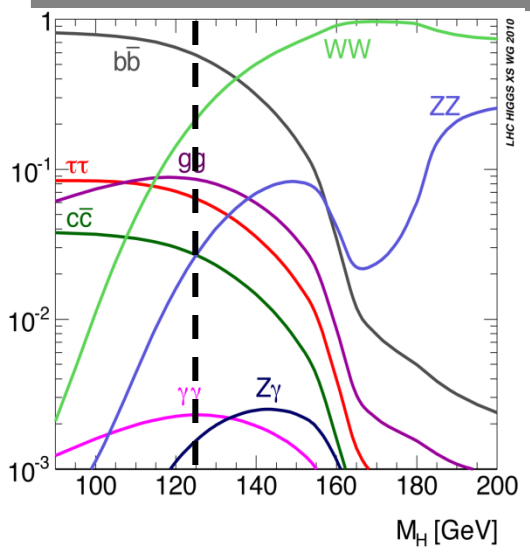
Sezioni d'urto di produzione e canali di decadimento



Nel Modello Standard se si conosce la massa del bosone di Higgs si conoscono anche la sezione d'urto di produzione ed i canali di decadimento

@ $M_H = 125 \text{ GeV}$

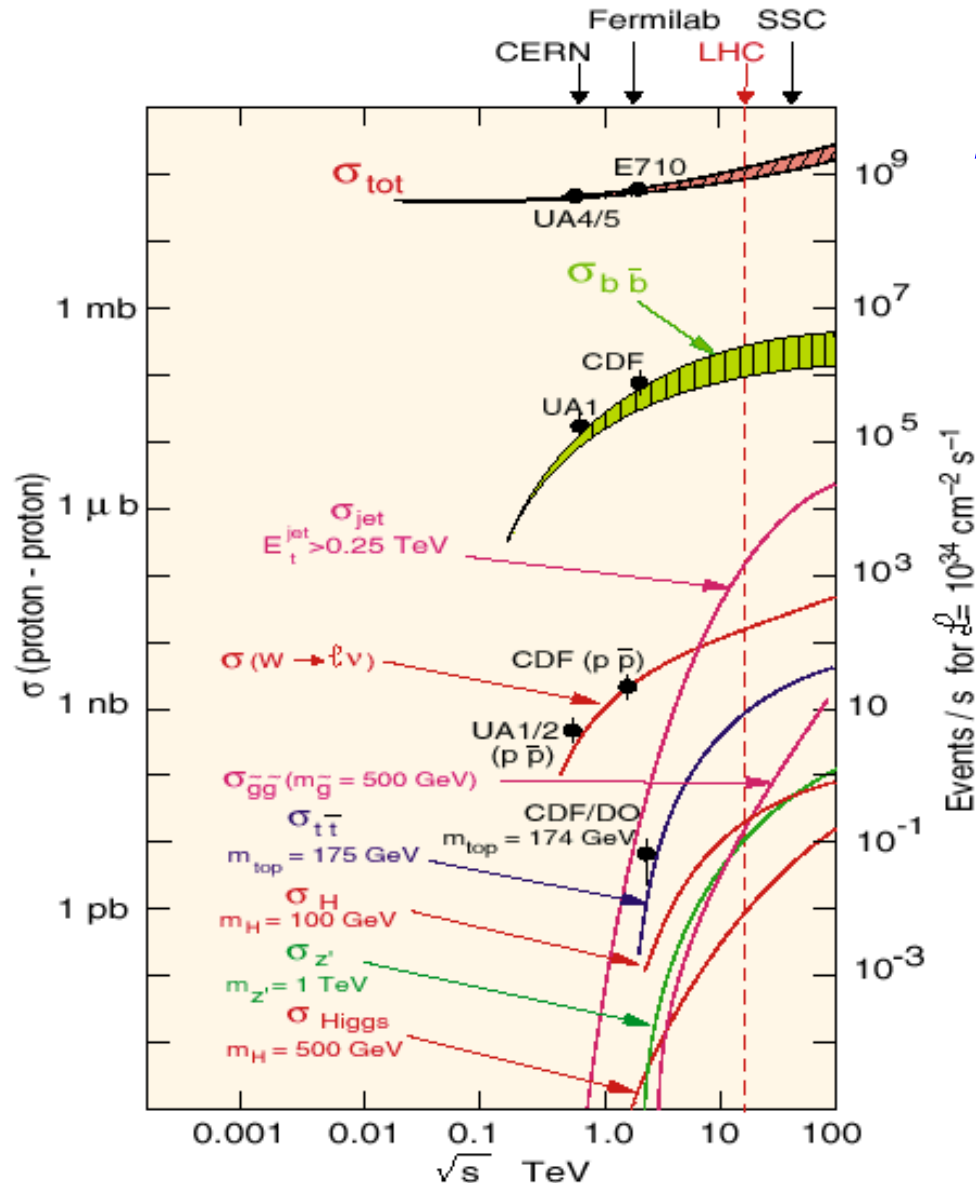
$\sigma_H \sim 15 \text{ pb}$



Frazioni di decadimento:
 $4l \quad 1.2 \cdot 10^{-4} \quad (ZZ \rightarrow 4l)$
 $\gamma\gamma \quad 2.3 \cdot 10^{-3}$
 $2l2\nu \quad 1.0 \cdot 10^{-2} \quad (WW \rightarrow 2l2\nu)$
 $\tau\tau \quad 6.0 \cdot 10^{-2}$
 $bb \quad 5.8 \cdot 10^{-1}$

Higgs decade in 10^{-22} secondi

Frequenza delle interazioni p-p a LHC



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

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

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

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

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

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

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



Cercare un ago in un pagliaio ...

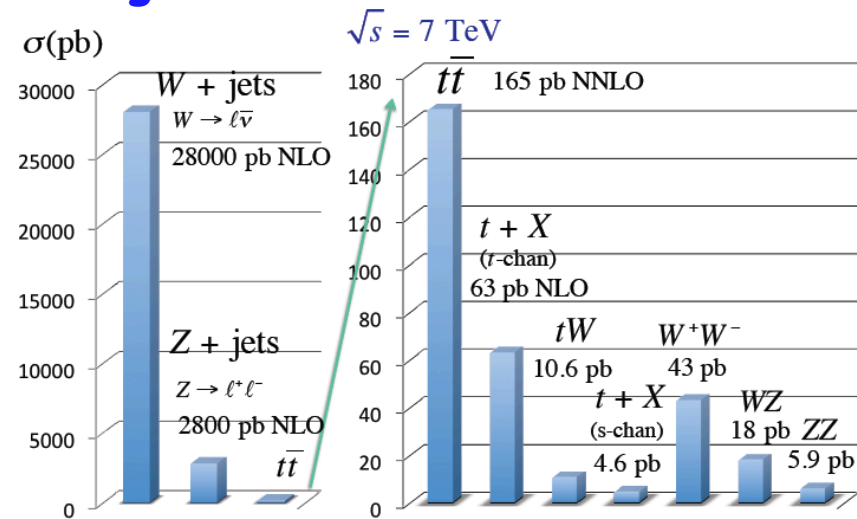


... non solo i pochi aghi prodotti sono nascosti tra tante pagliuzze (un ago su 7 miliardi di pagliuzze), ma ci sono anche molti eventi che producono stati finali molto simili a quelli in cui si ha il bosone di Higgs ... pagliuzze che assomigliano ad aghi !

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

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

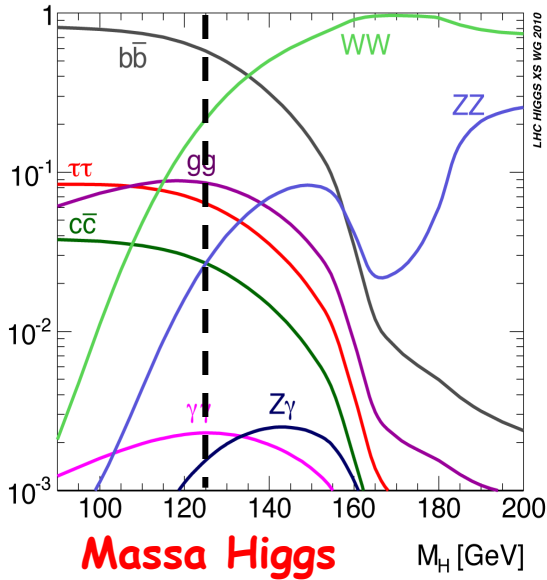
- È necessario scegliere i canali di decadimento con meno fondo dove cercare l'Higgs...



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 $\sim 2 \text{ GeV}$

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

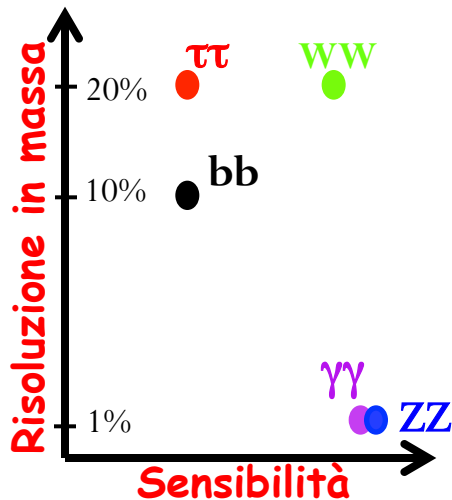
➤ $BR = 1.0 \cdot 10^{-2}$, canale con risoluzione in massa del 20% e molti eventi di fondo: ~ 1500 eventi aspettati. Dopo tutte le selezioni 60 eventi e 300 di fondo

$H \rightarrow \tau\tau$:

➤ $BR = 6.0 \cdot 10^{-2}$, 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

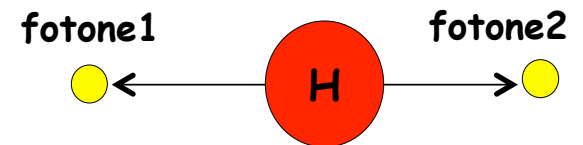
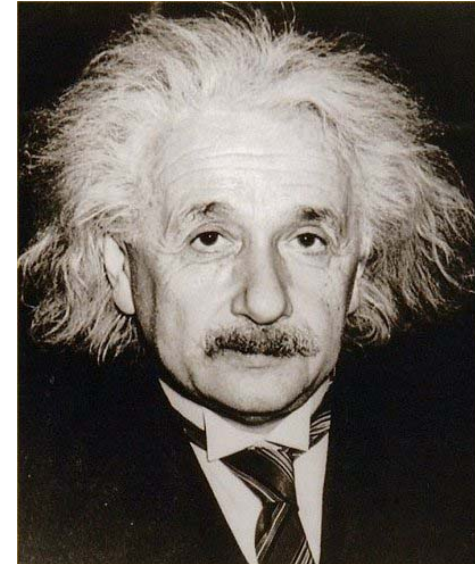
$H \rightarrow bb$:

➤ $BR = 5.8 \cdot 10^{-1}$, 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



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.



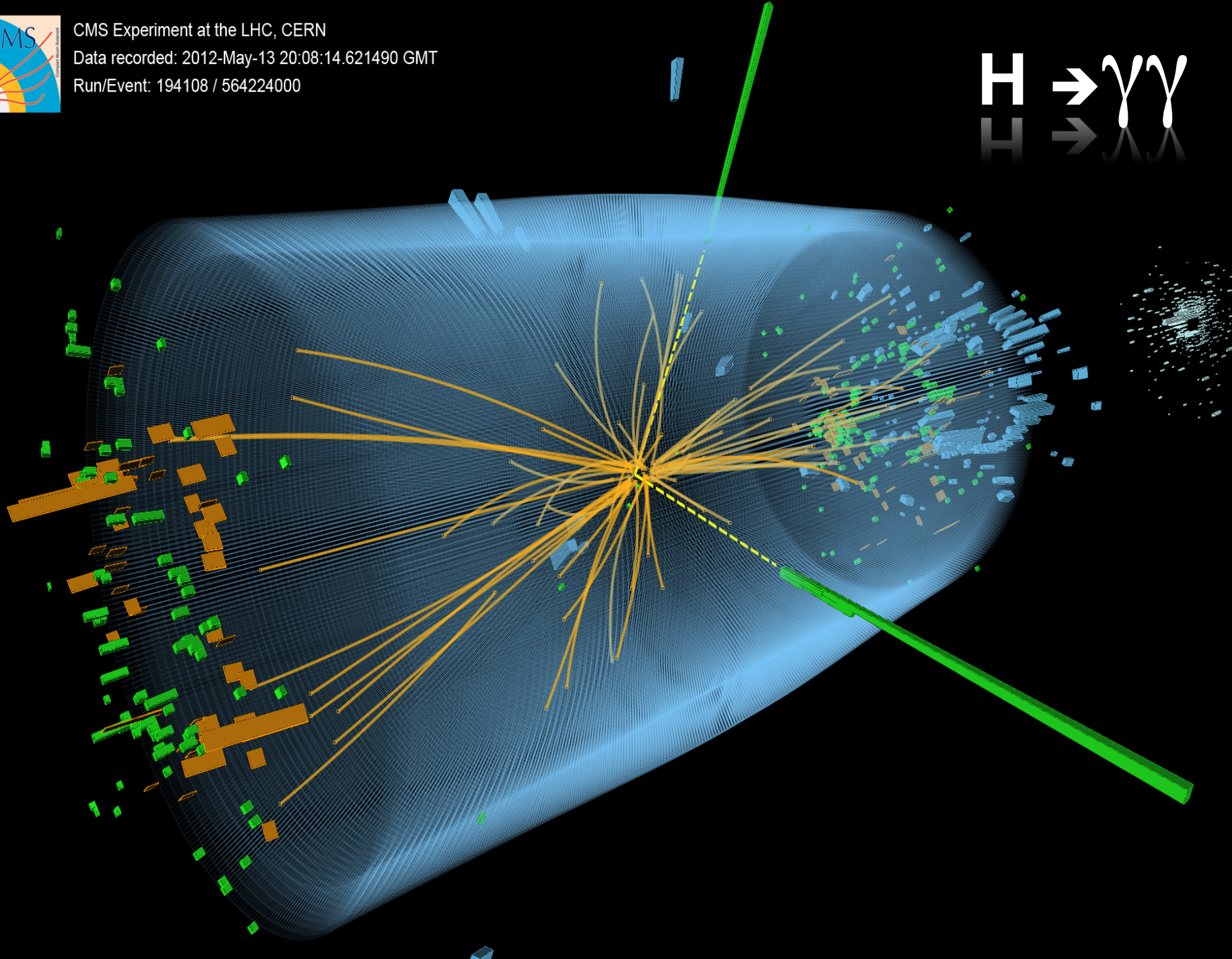
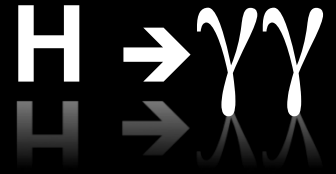
$$M_H c^2 = E_1 + E_2$$



CMS Experiment at the LHC, CERN

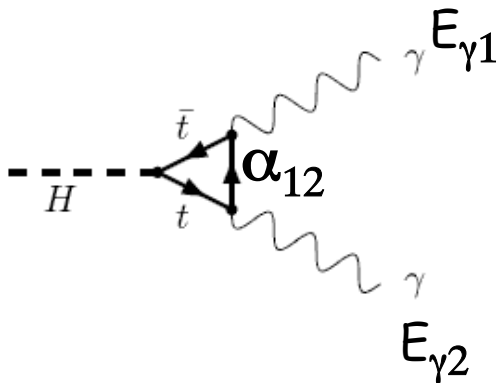
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

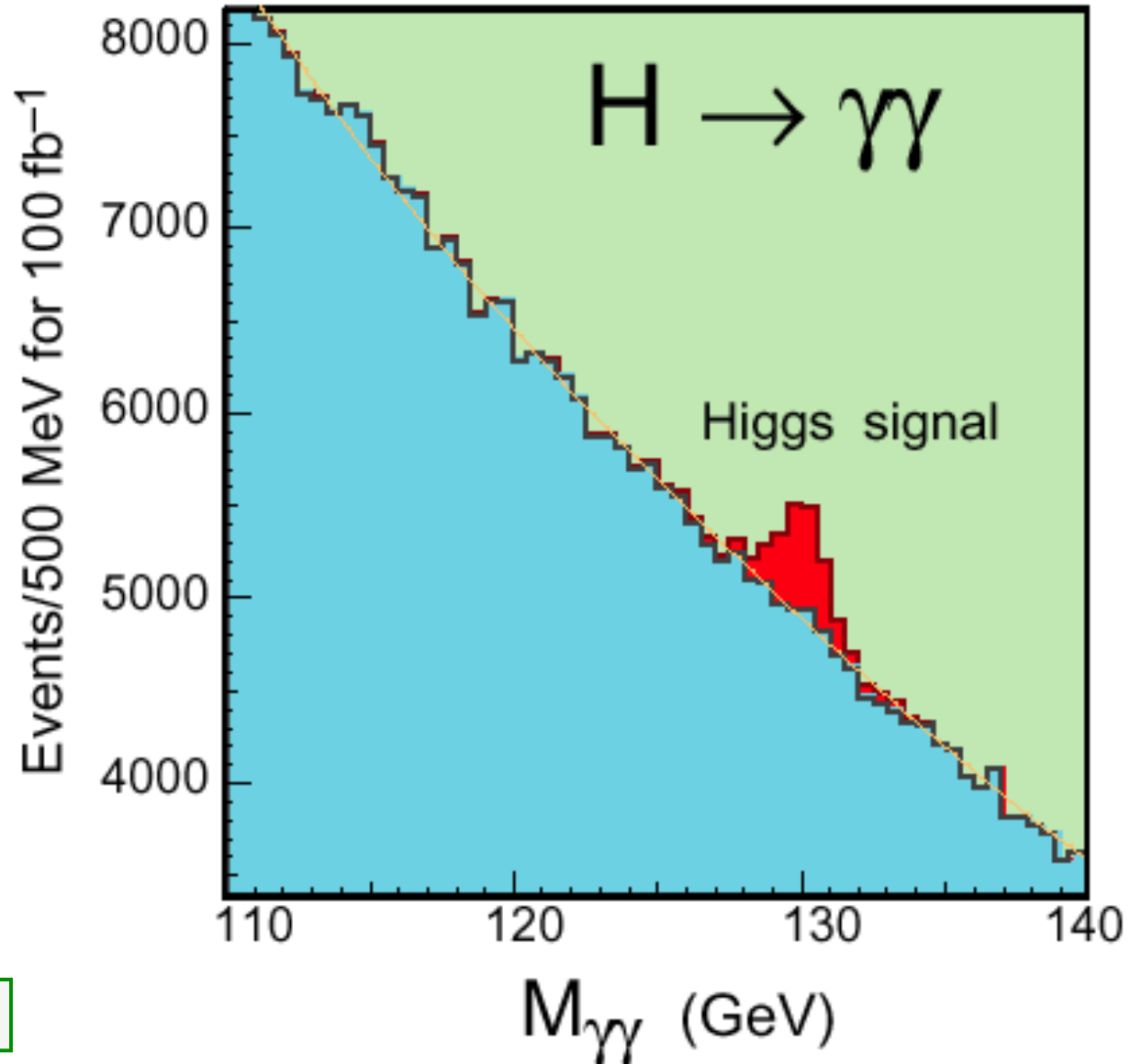


Decadimento dell'Higgs in due fotoni

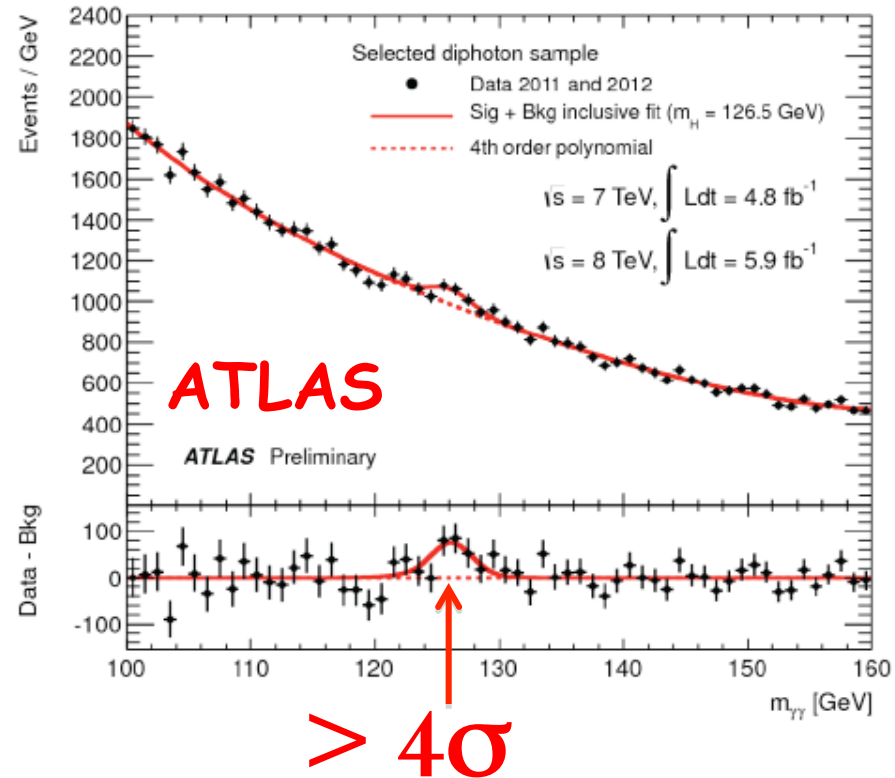
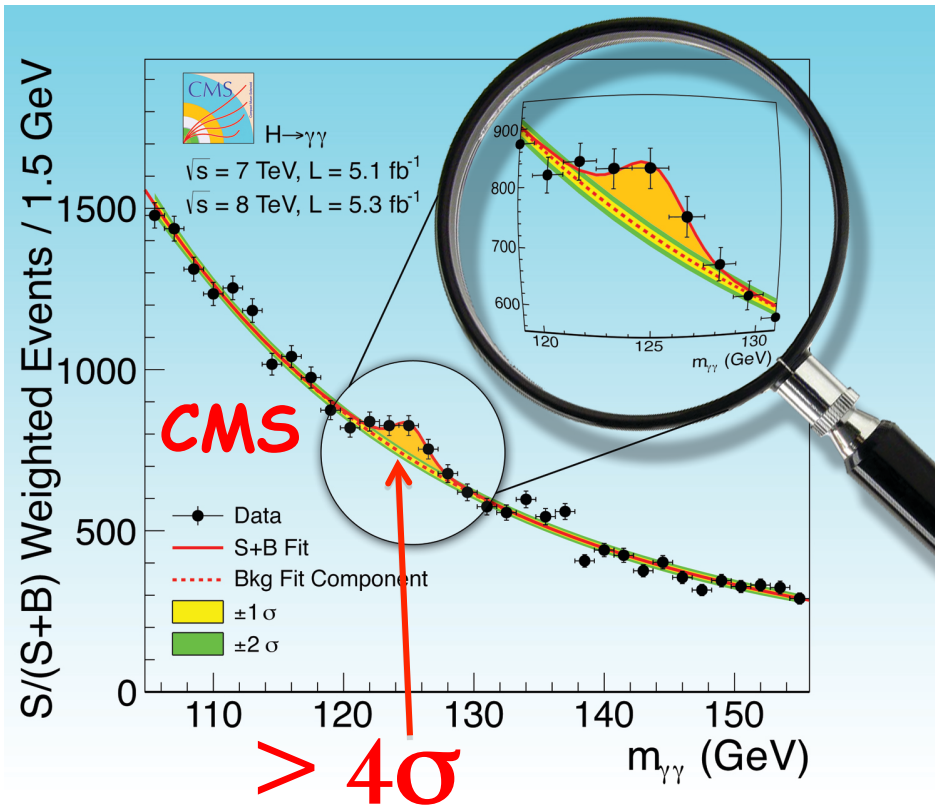
Segnale dell'Higgs di massa 130 GeV per una luminosità integrata di 100 fb^{-1} . Con questa luminosità ci si aspettano 2.000 eventi di Higgs su 30.000 eventi di fondo nell'intervallo di 2 GeV della risoluzione dell'apparato



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



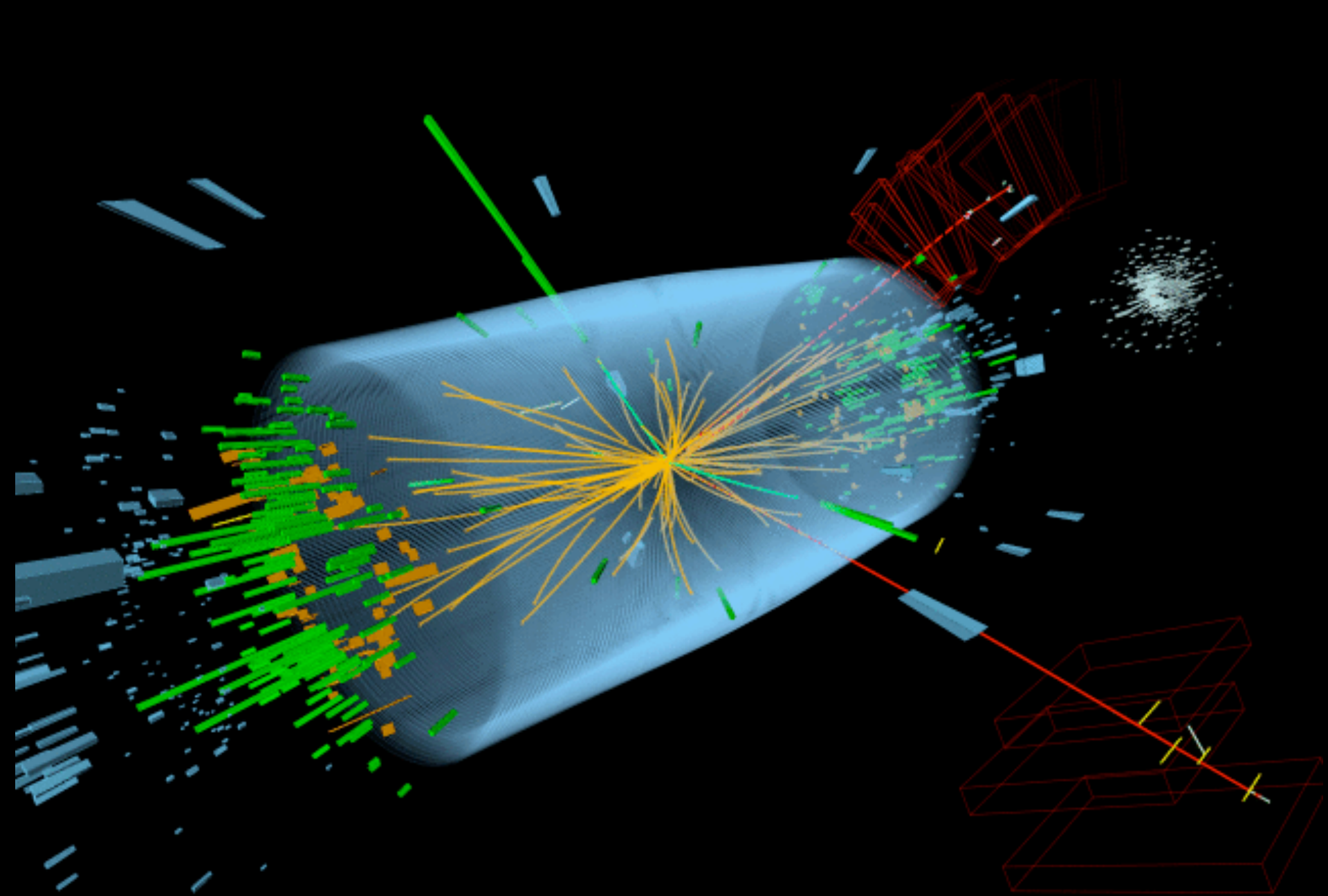
Ricerca di $H \rightarrow \gamma\gamma$



"4σ" ⇒ 3.15×10^{-5} è la probabilità di assenza di segnale:

--> evidenza notevole di segnale

"4σ" 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.

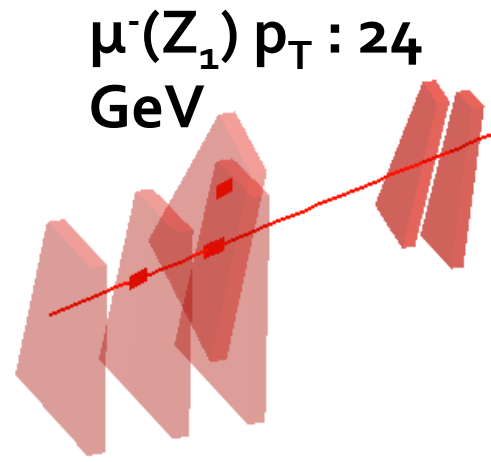


candidate ZZ event with two electrons and two muons

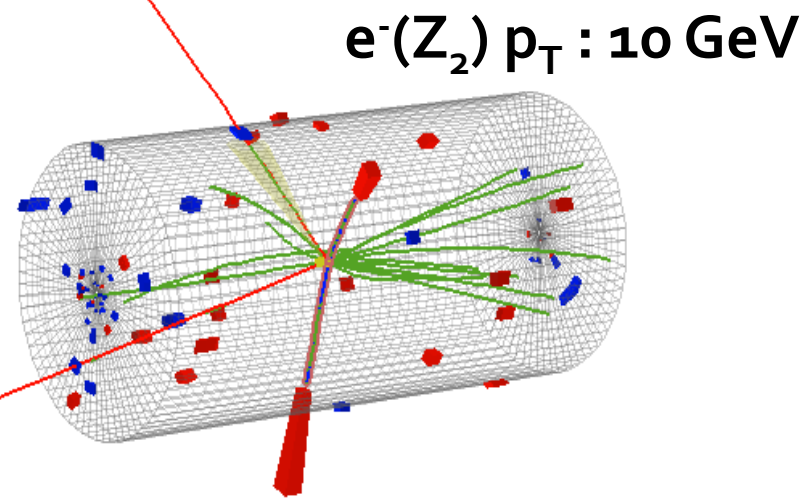


$\mu^+(Z_1) p_T : 43 \text{ GeV}$

Massa invariante dei
4-leptoni : 126.9 GeV



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



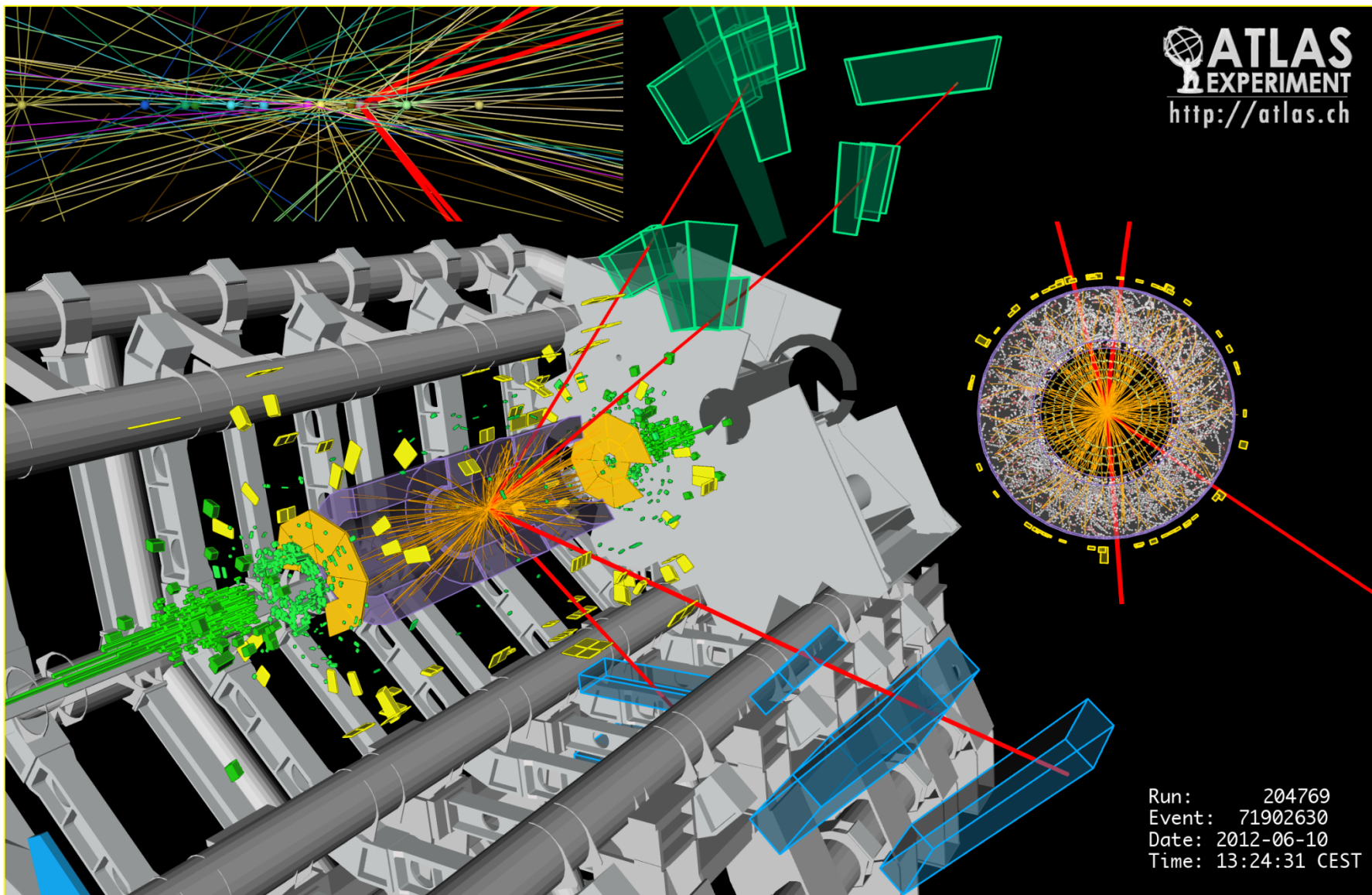
$e^-(Z_2) p_T : 10 \text{ GeV}$

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

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

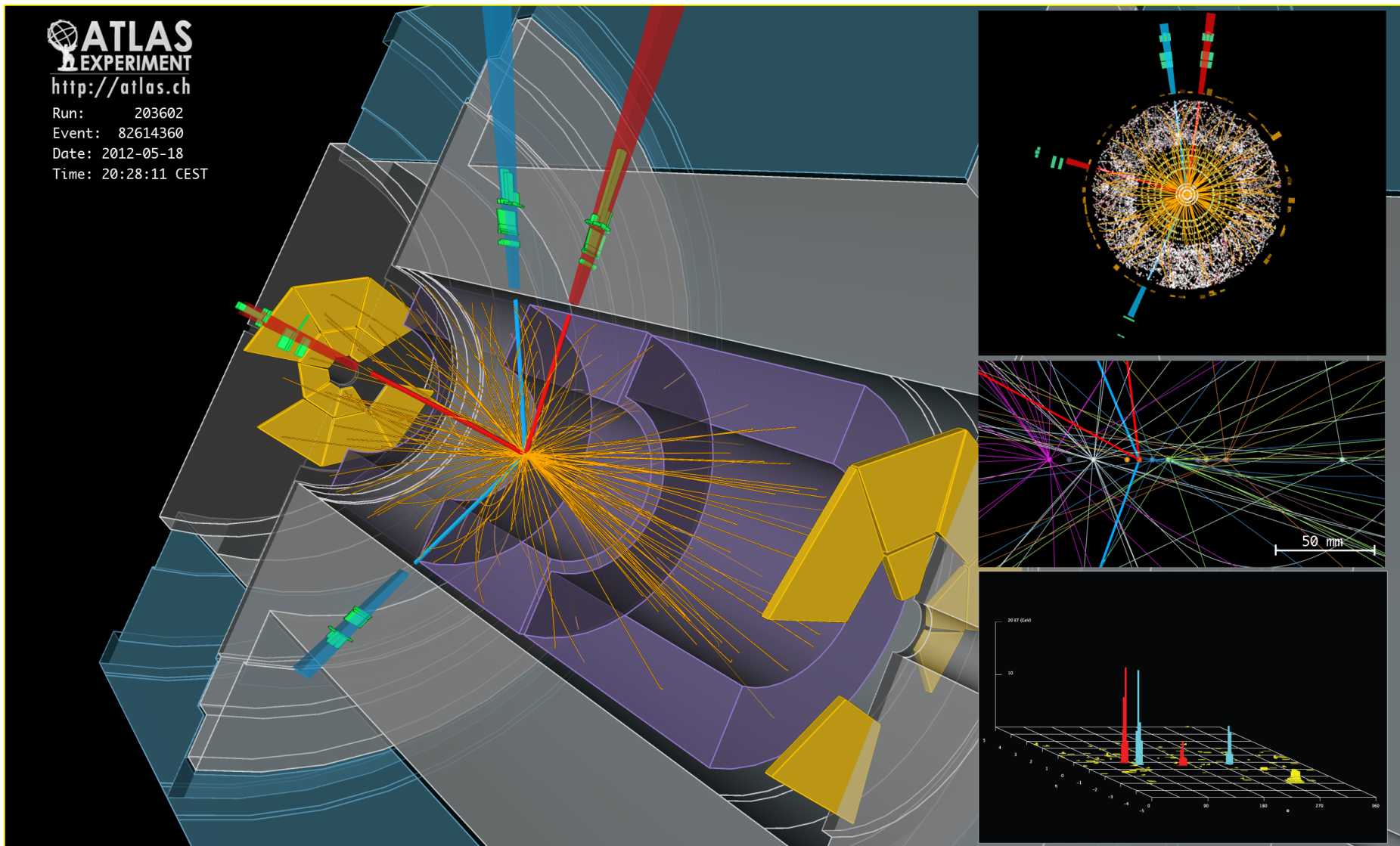
<http://atlas.ch>

Run: 203602

Event: 82614360

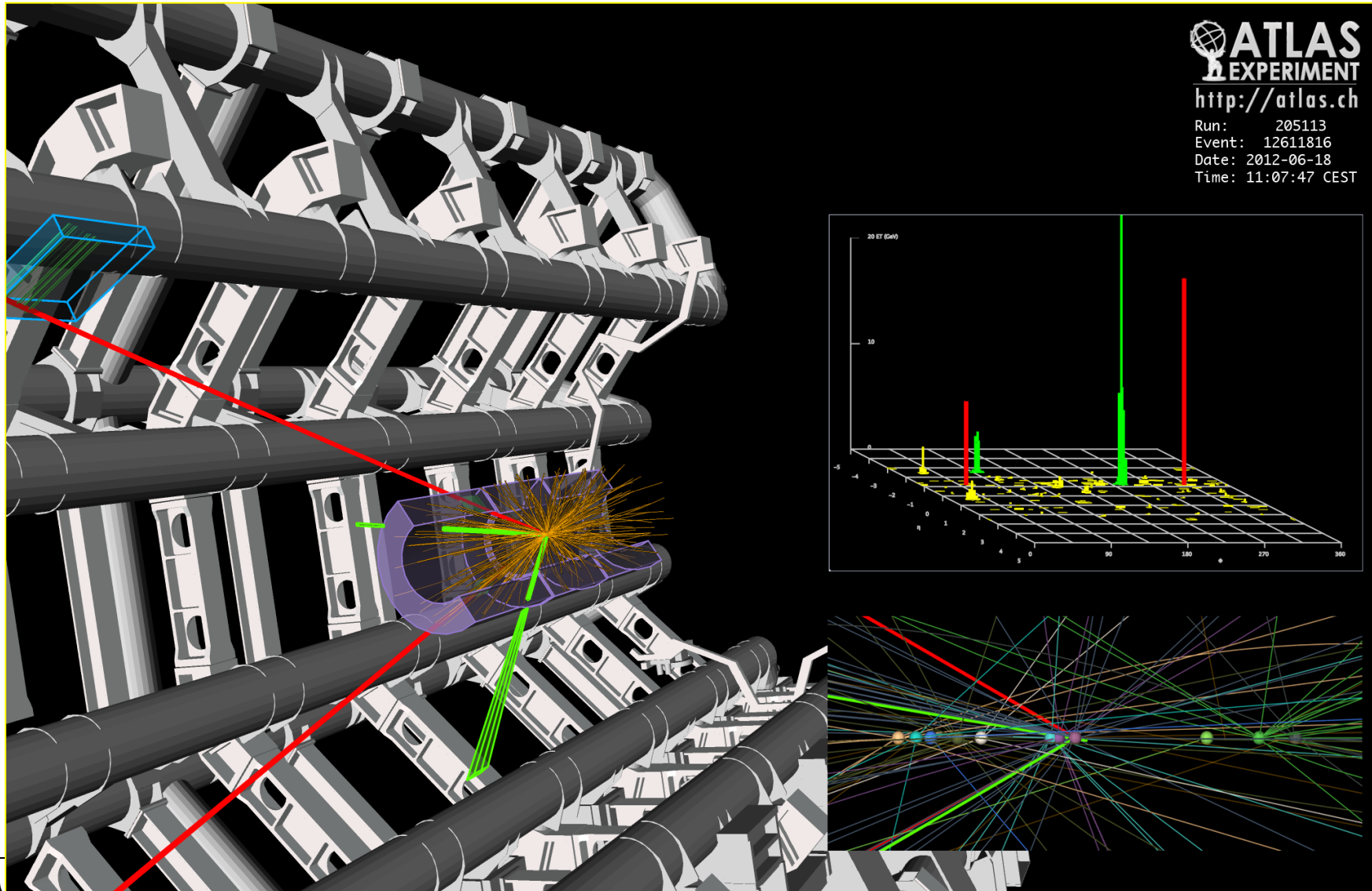
Date: 2012-05-18

Time: 20:28:11 CEST

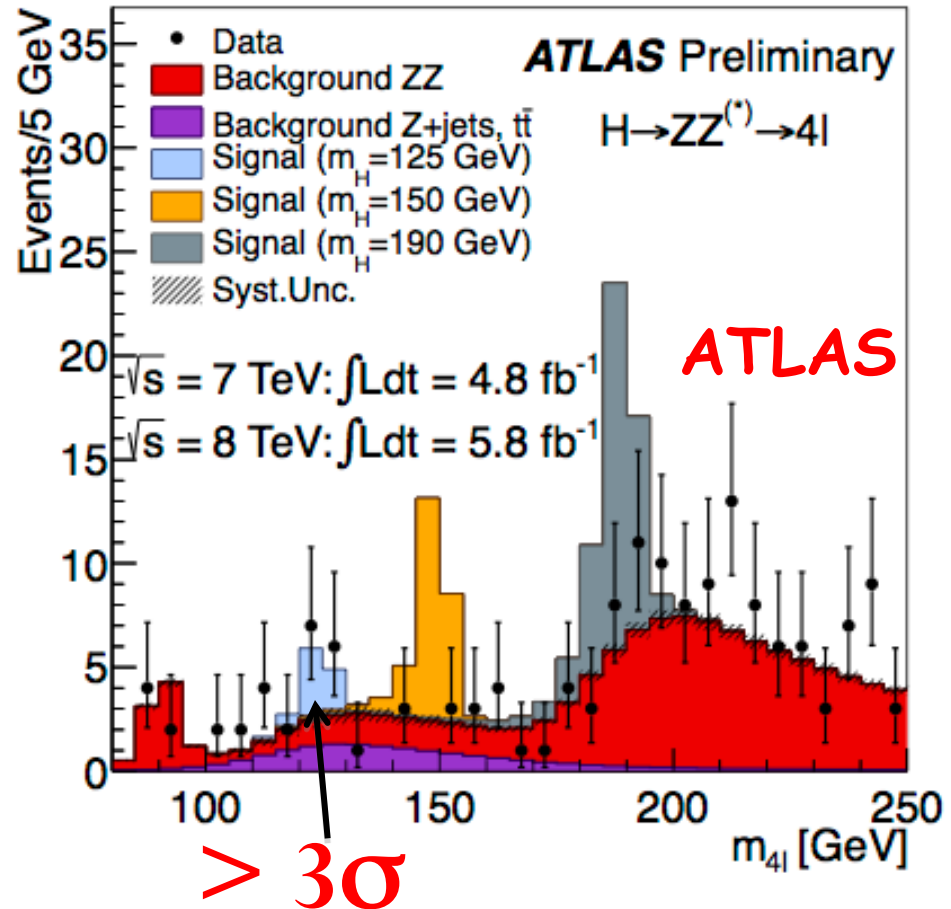
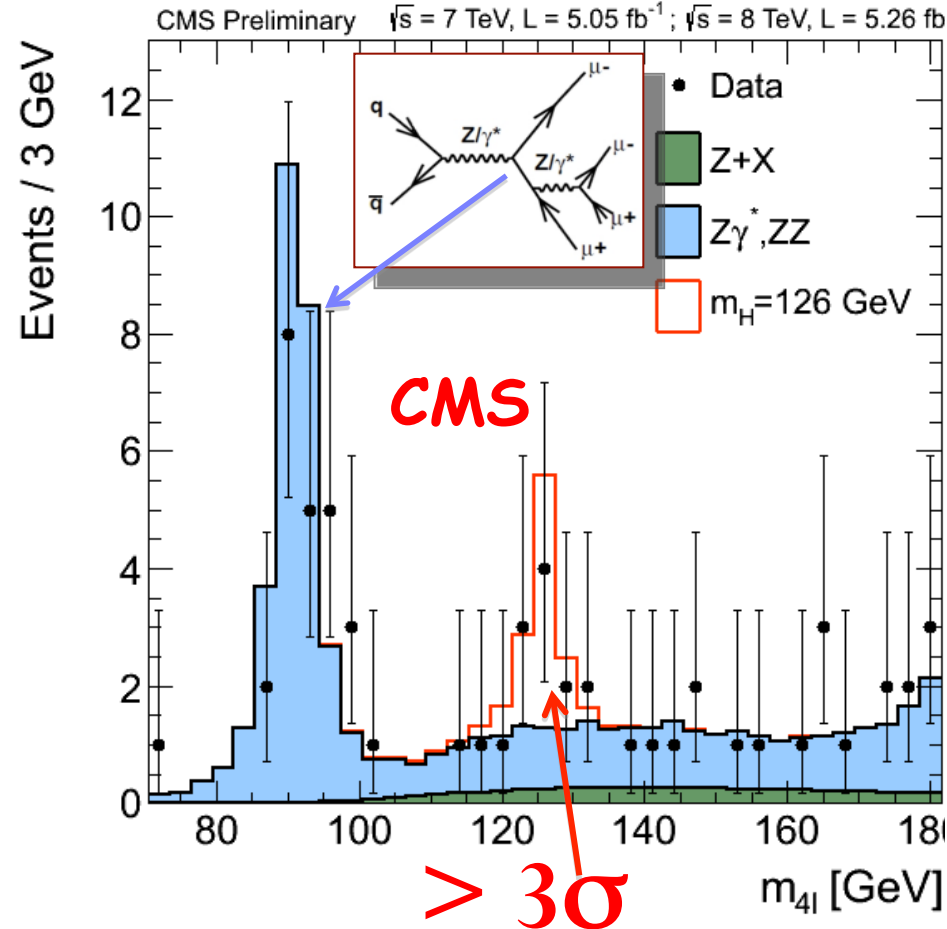


$2e2\mu$ candidate with $m_{2e2\mu} = 123.9 \text{ GeV}$

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



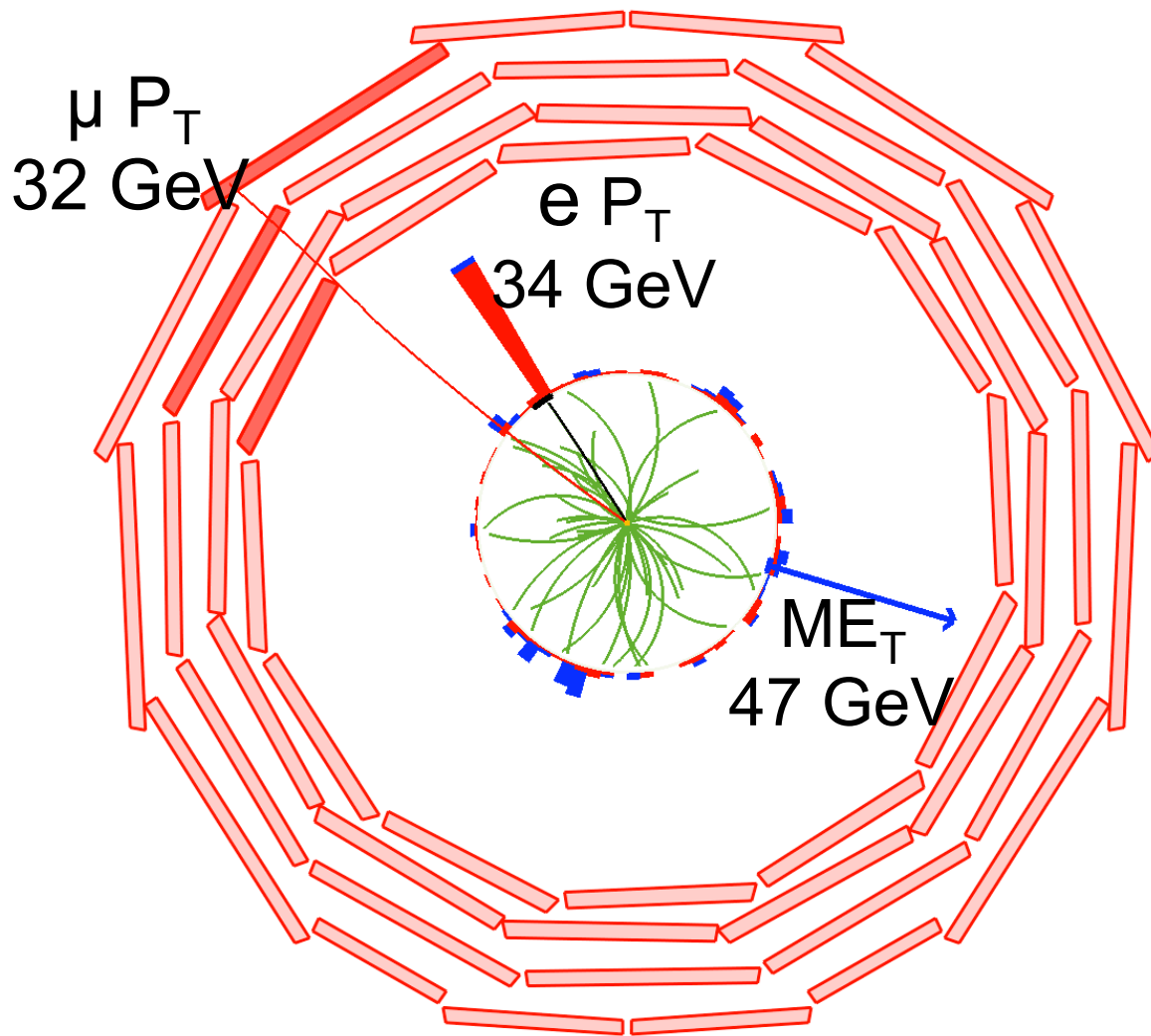
Ricerca di $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$



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

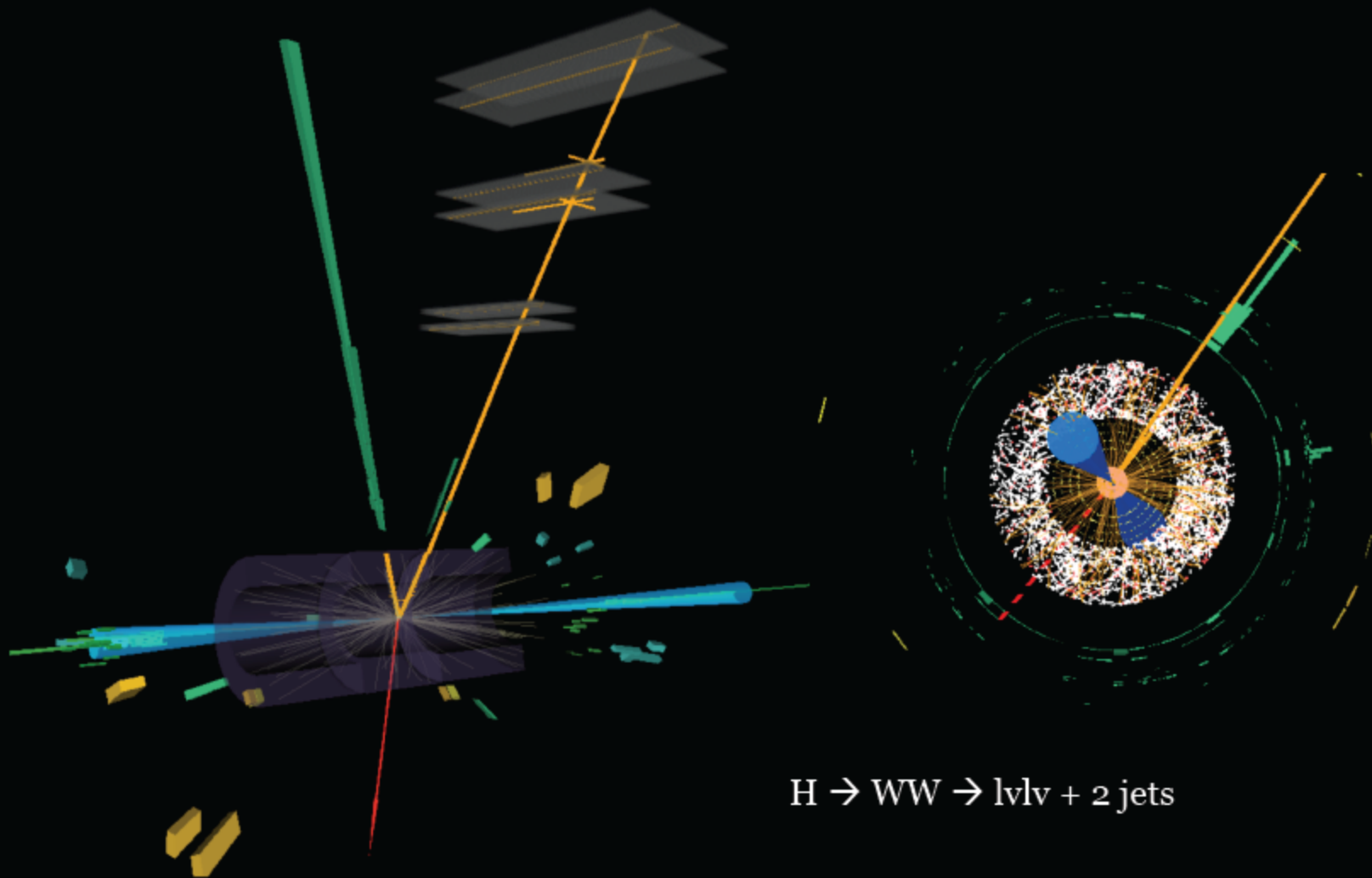


Eventi caratterizzati dalla presenza di:
2 leptoni (e/ μ) di alto p_T
e grande E_T mancante

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.

➤ $\geq 2\sigma$

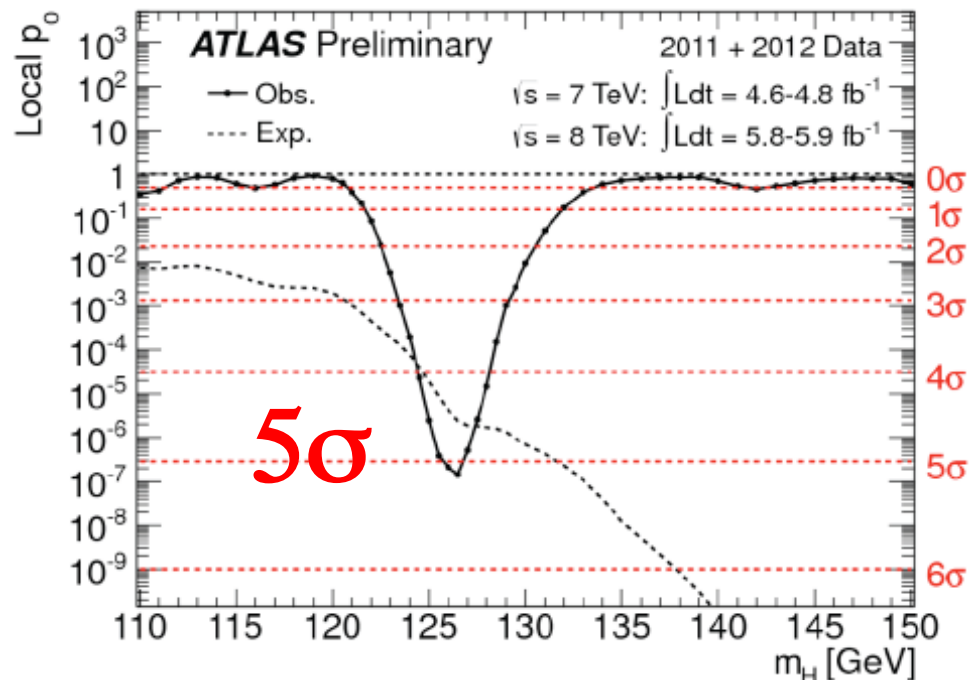
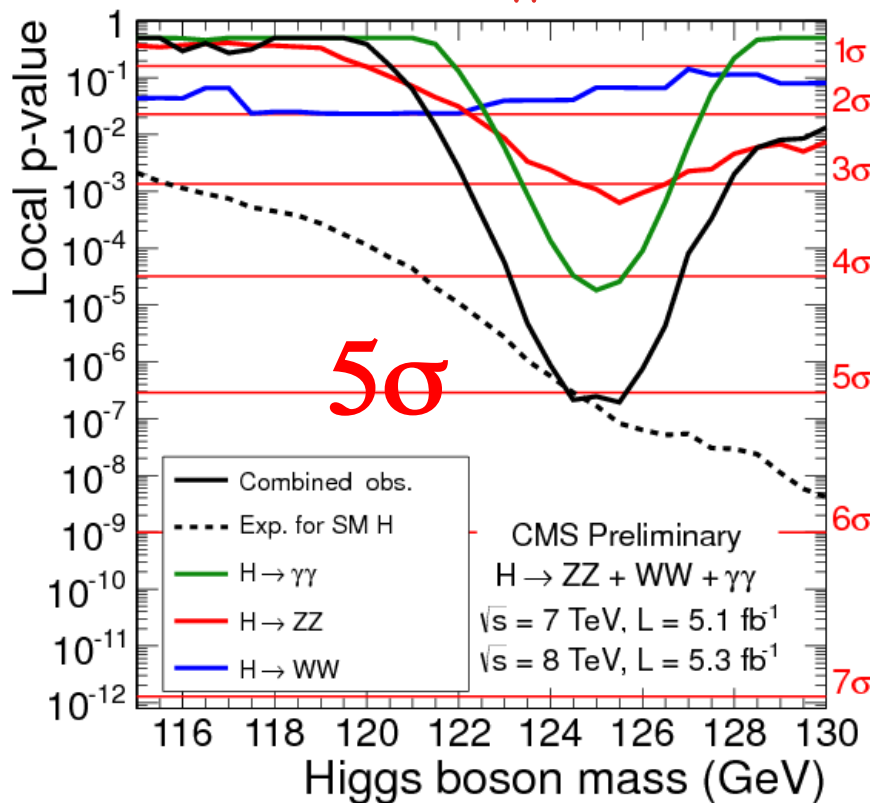
$H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$



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

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 !!!

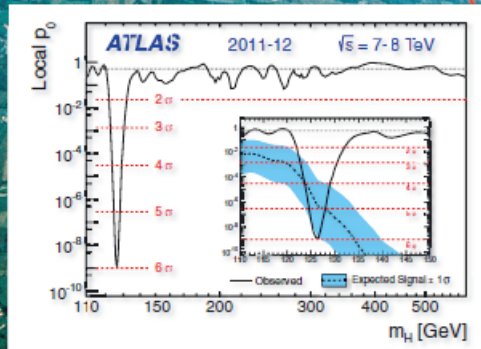
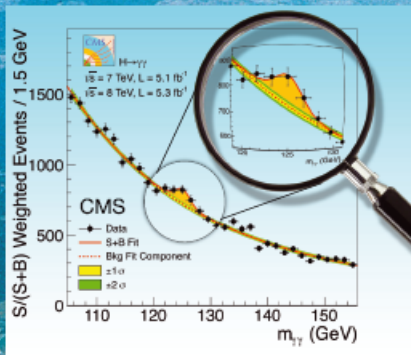
$$"5\sigma" \Rightarrow 2.85 \times 10^{-7}$$



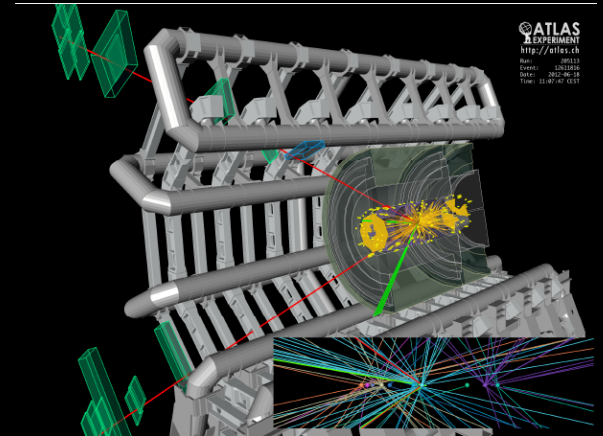
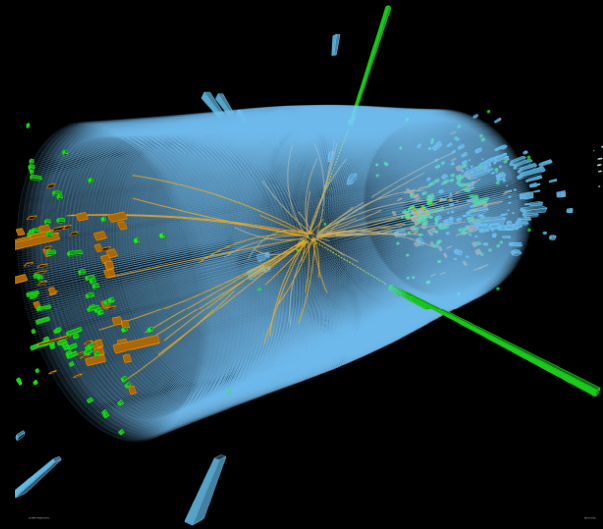
“scoperta”



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



www.elsevier.com/locate/physletb



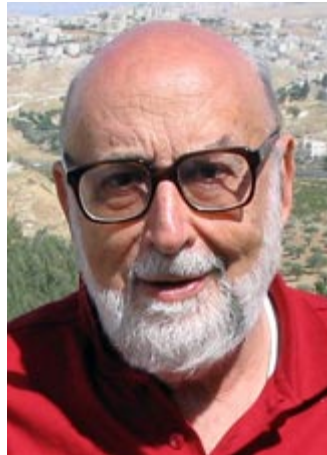
Congratulations to both
Atlas and CMS Collaborations
and to the builders of the LHC
on a magnificent achievement!

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.

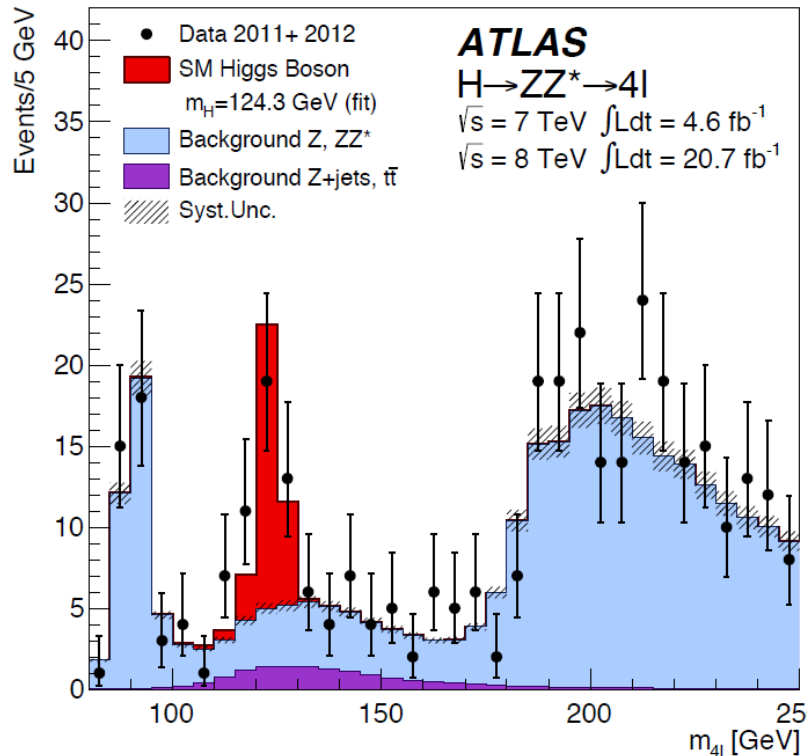


Robert Brout

H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 leptoni

Tutta la statistica

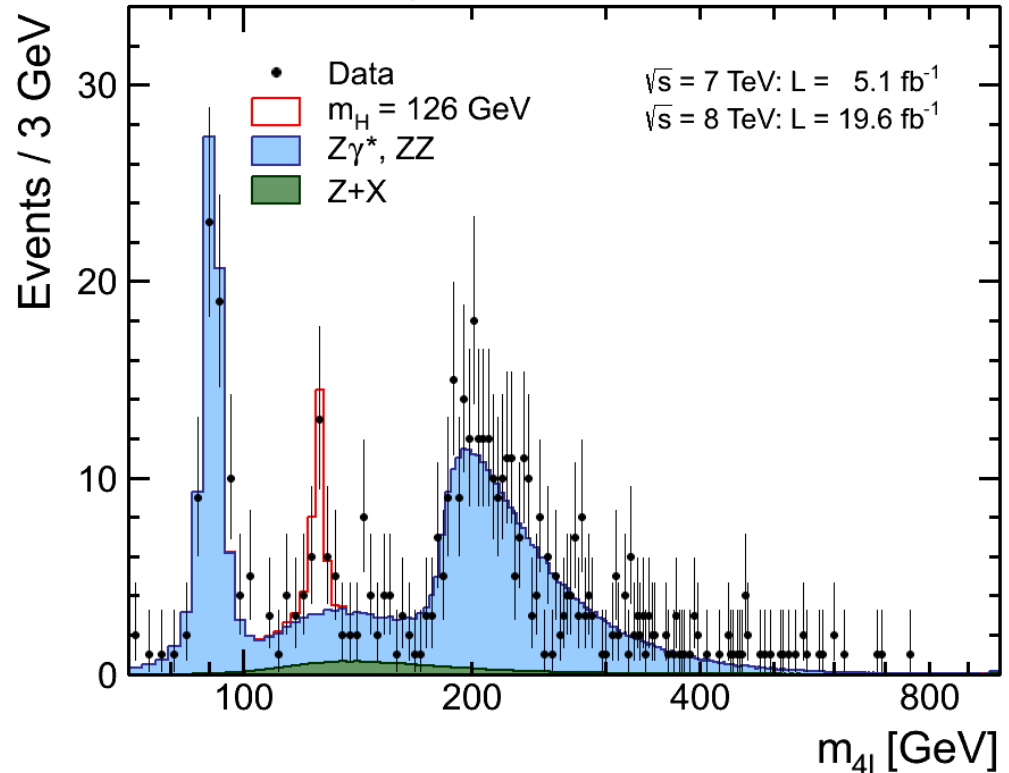
ATLAS



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



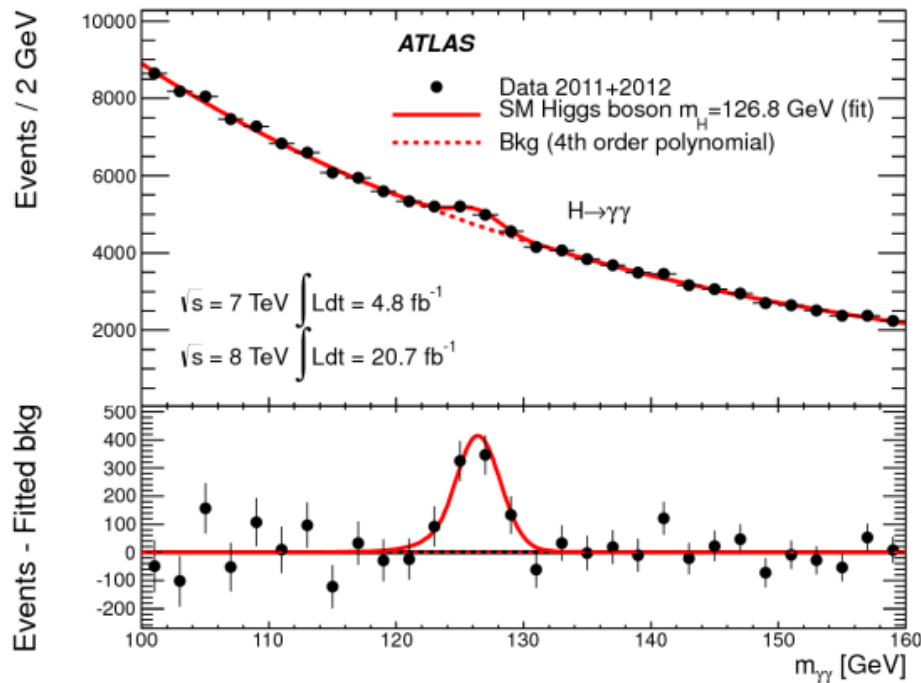
6.7 σ (7.1 σ asp.)

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

H \rightarrow $\gamma\gamma$

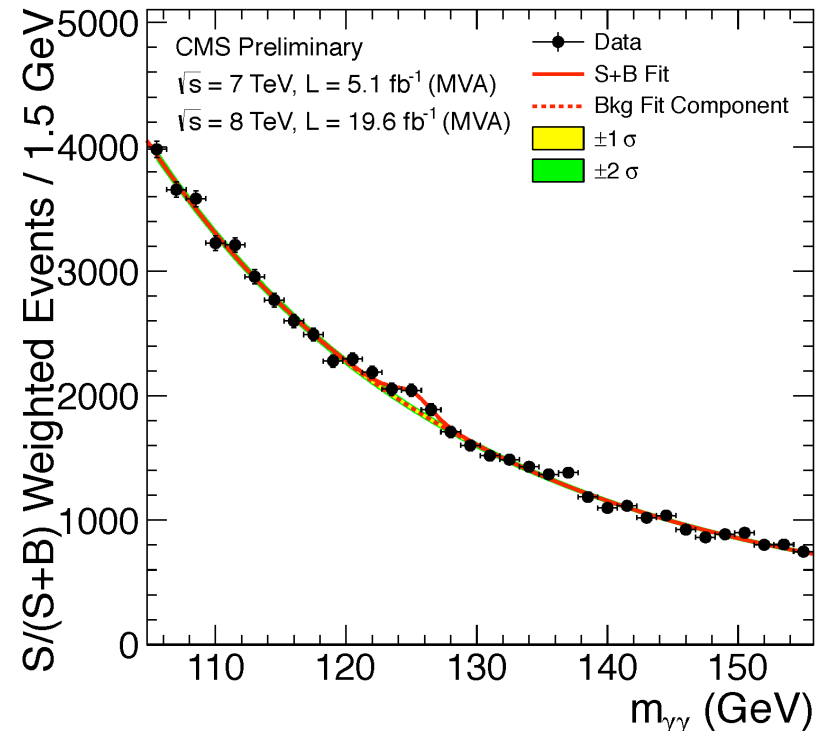
Tutta la statistica

ATLAS



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

CMS

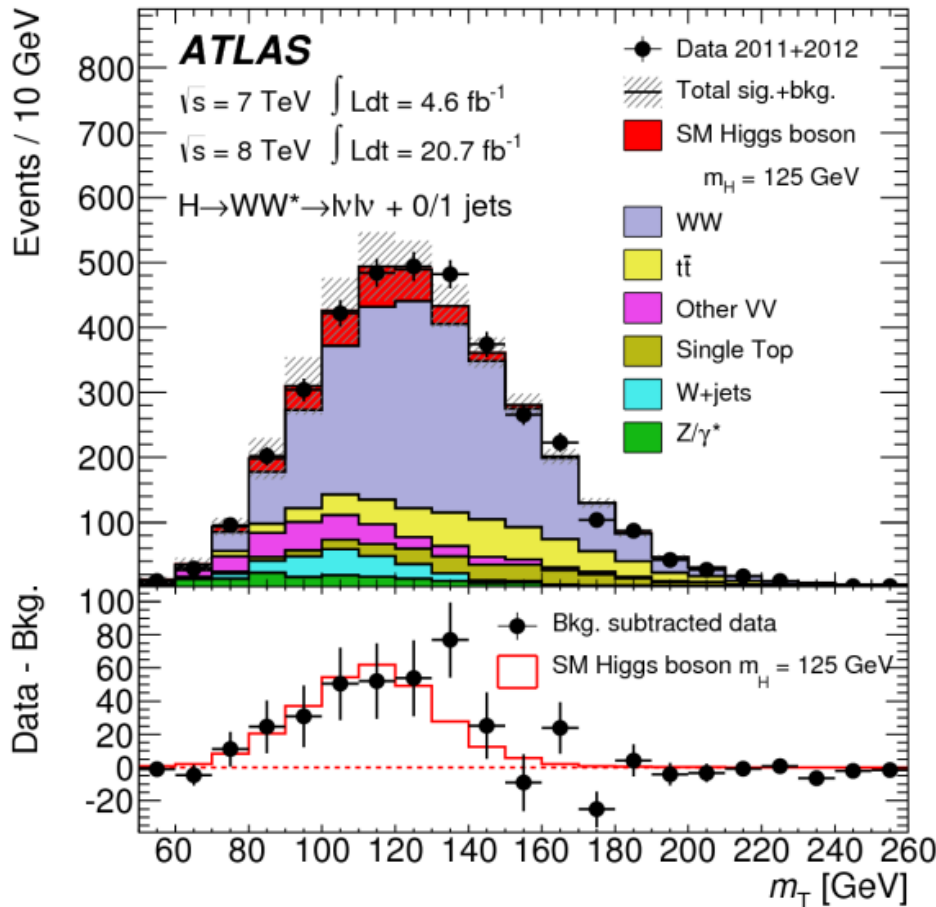


3.2 σ (4.2 σ asp.)
 $m_H = 125.4 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst}) \text{ GeV}$

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

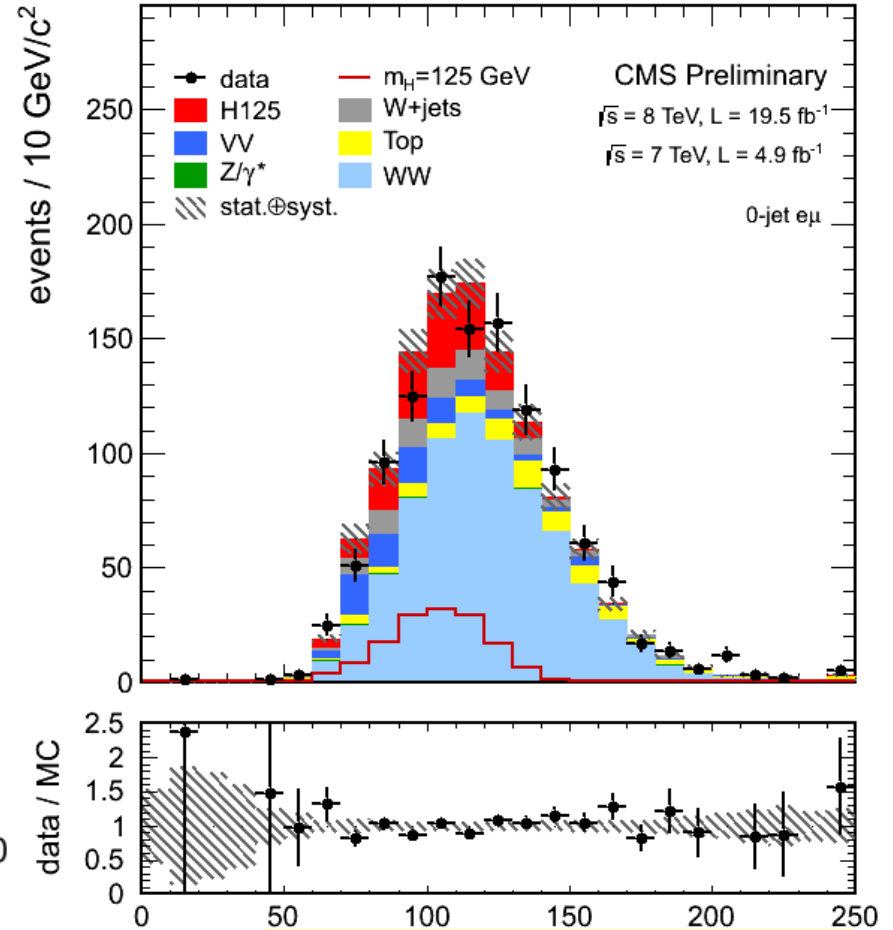
Tutta la statistica

ATLAS



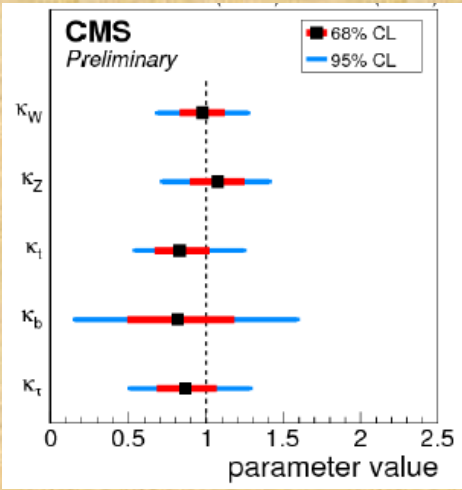
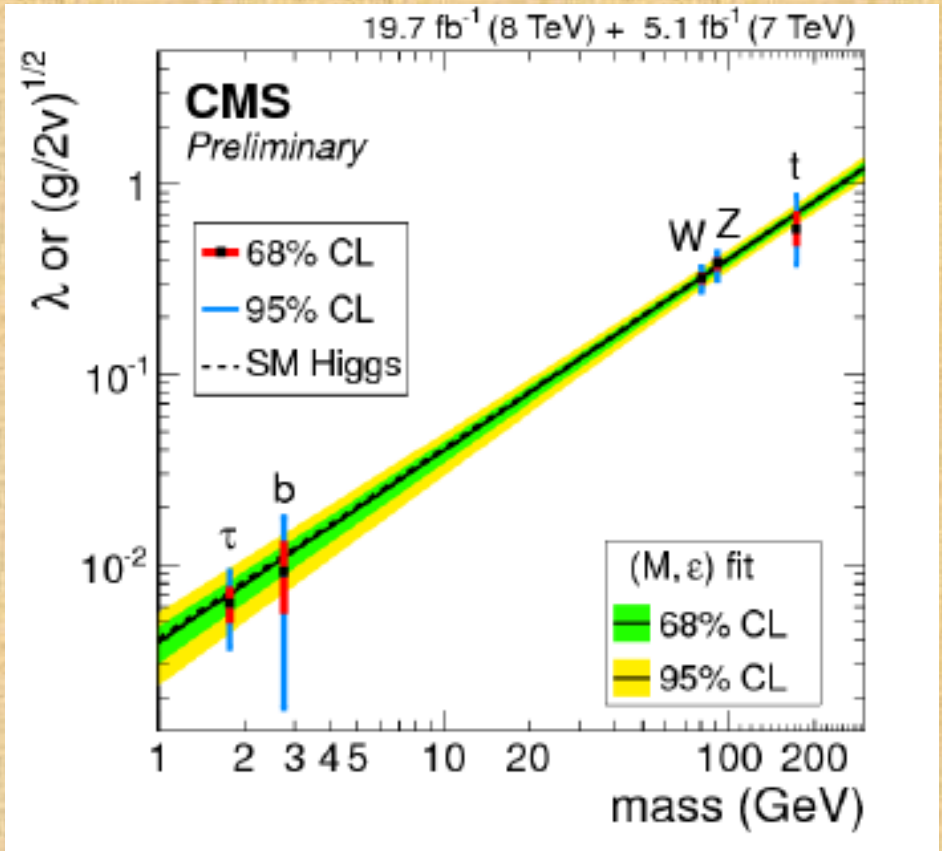
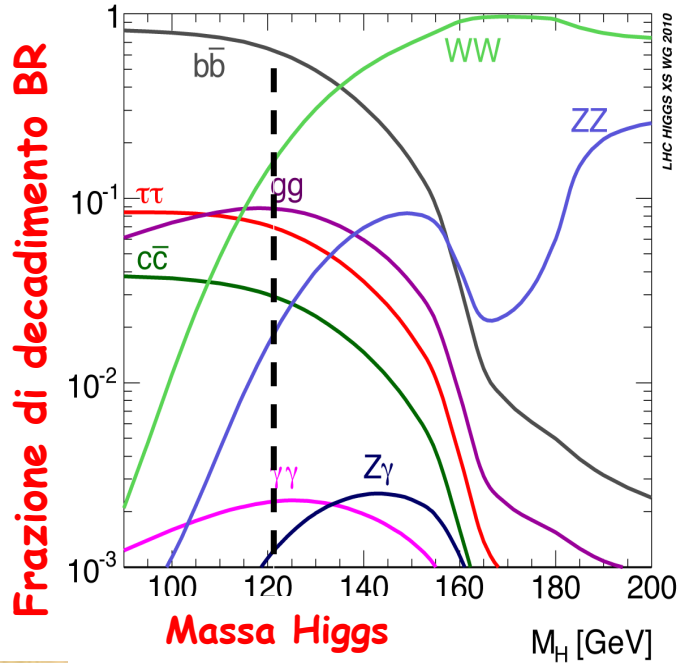
**3.8σ , (3.7σ asp.)
 $m_H = 125 \text{ GeV}$**

CMS



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

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



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:

- * *Che cosa è la Materia Oscura, di cui l'Universo sembra essere permeato?*
- * *Perché il mondo è fatto di materia (che fine ha fatto l'antimateria)?*
- * *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?*
- * *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?*

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



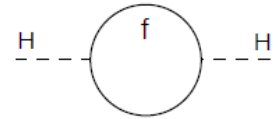
Meccanismo di Higgs

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

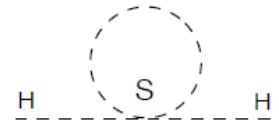
$$= 125 \text{ GeV}$$

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

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



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

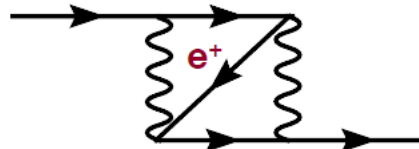
$$= 0.5 \text{ MeV}$$

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

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

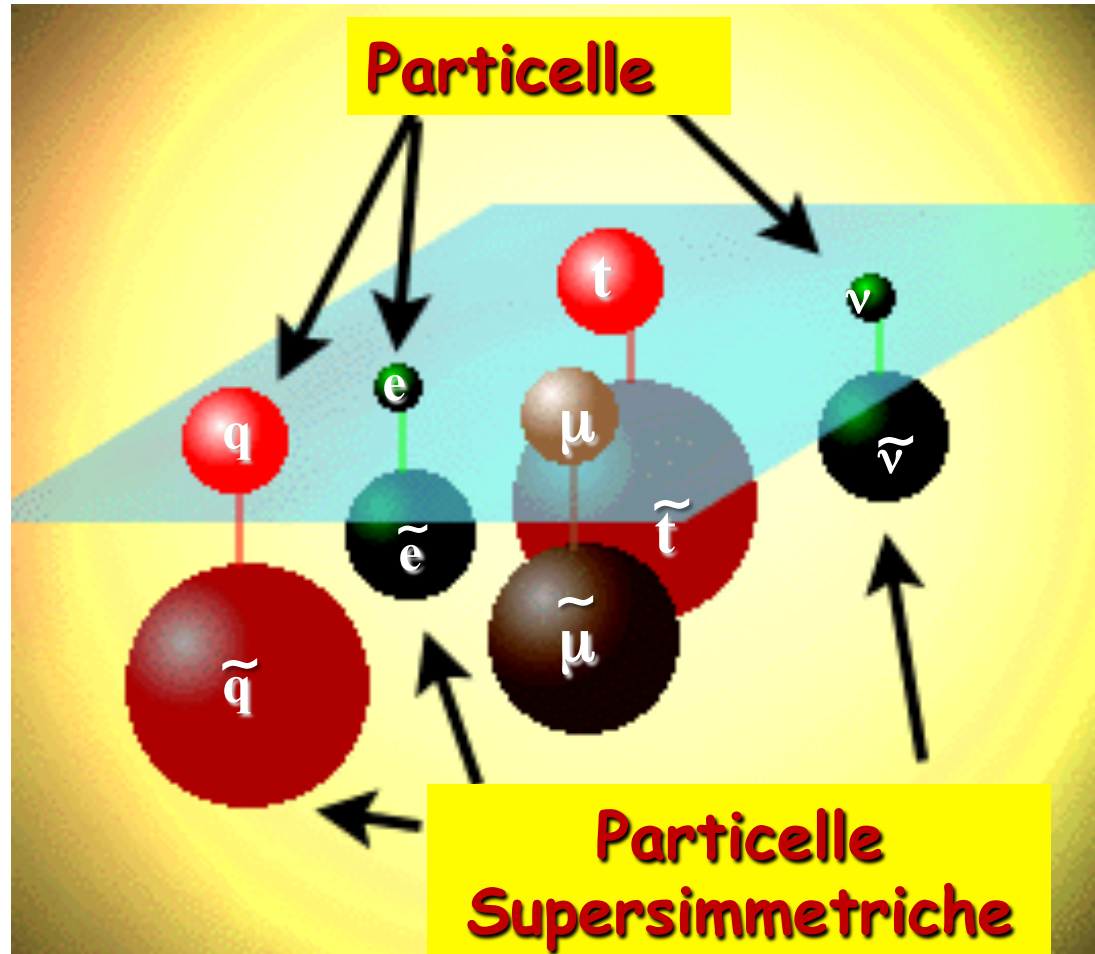
La massa del bosone di Higgs tende a divergere a causa delle fluttuazioni delle particelle virtuali nel vuoto quantistico ($\Delta E \times \Delta t \approx \hbar$) che interagiscono con esso.

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.

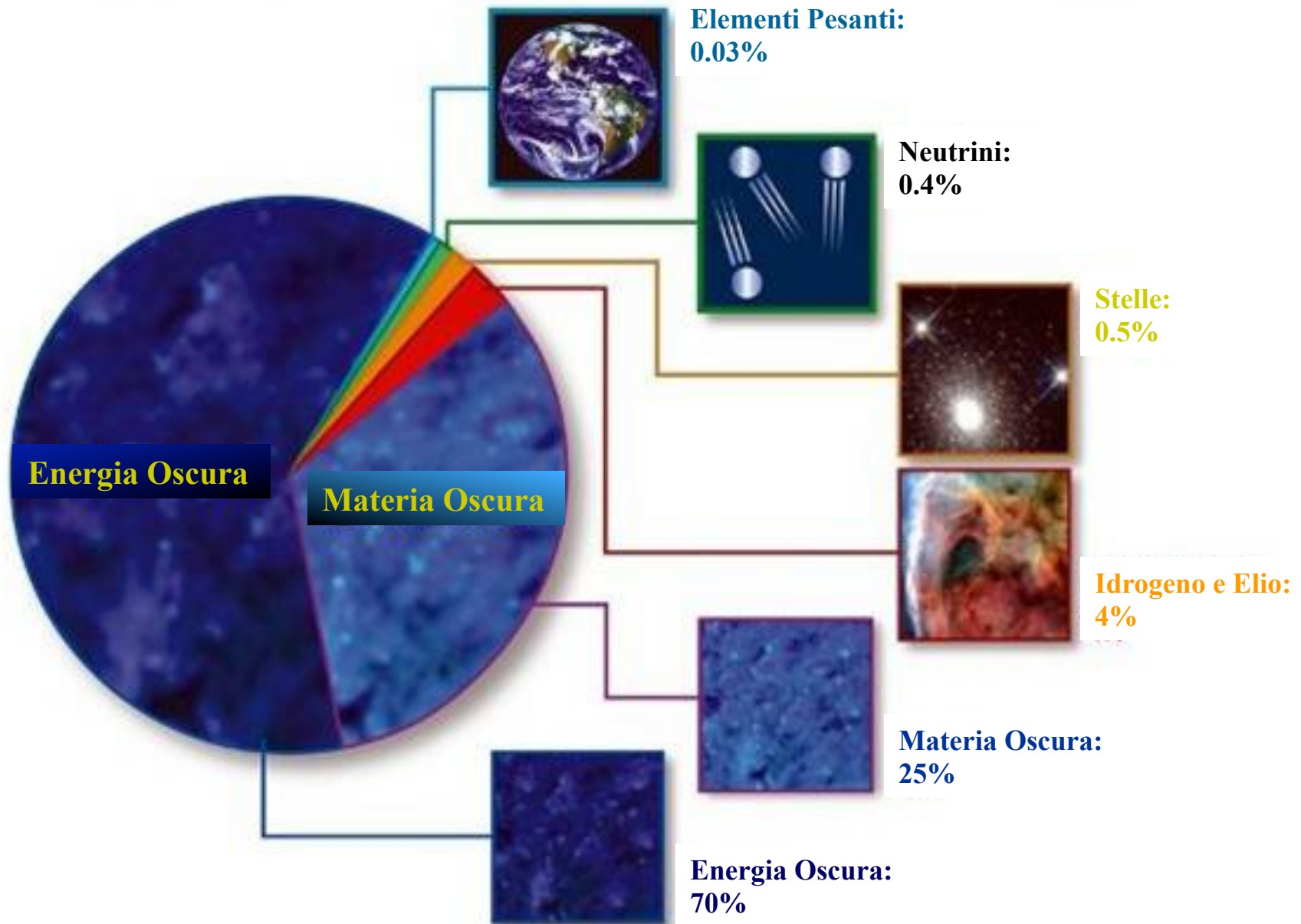
L'inconsistenza del modello potrebbe essere risolta se esistesse un mondo di particelle supersimmetriche corrispondente al mondo delle particelle standard.



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

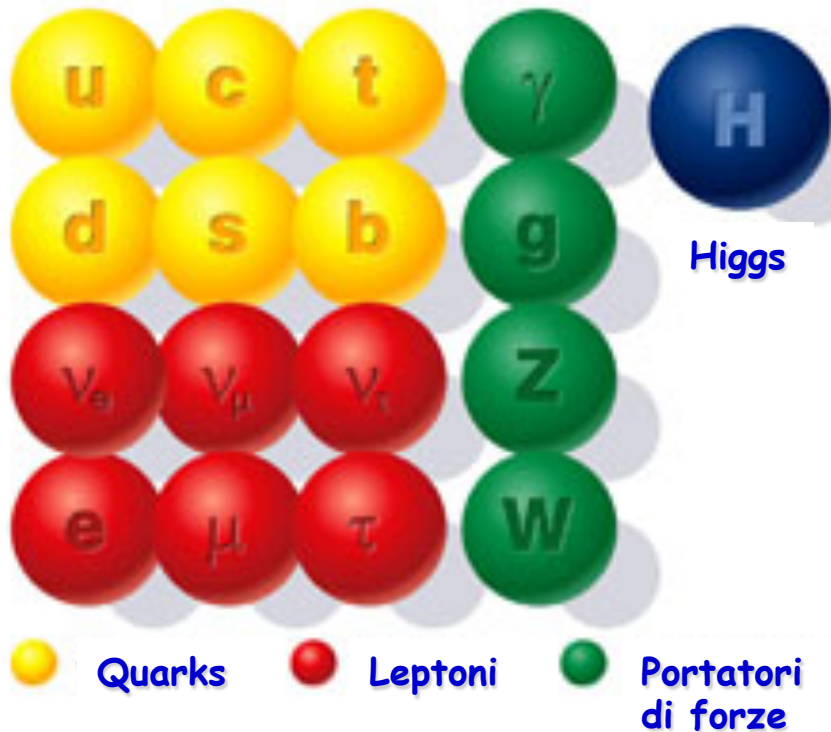
Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)

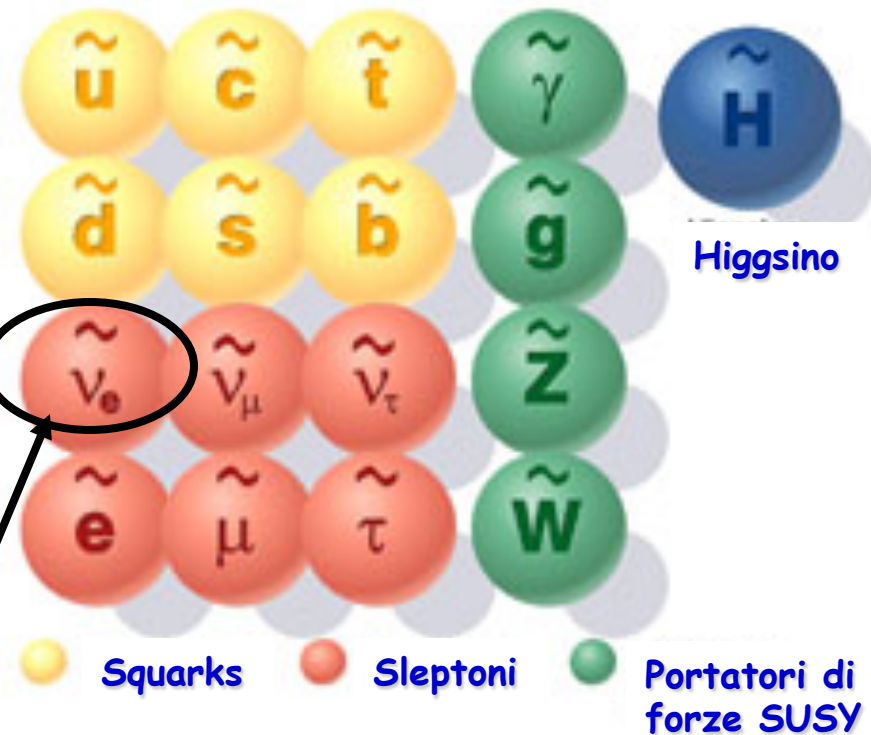


La **Materia Oscura** e' dovuta all'esistenza di **Particelle Supersimmetriche** ?
Tali particelle potrebbero non essere state scoperte fino ad oggi perché hanno masse molto più grandi delle masse delle particelle standard.

Particelle Standard



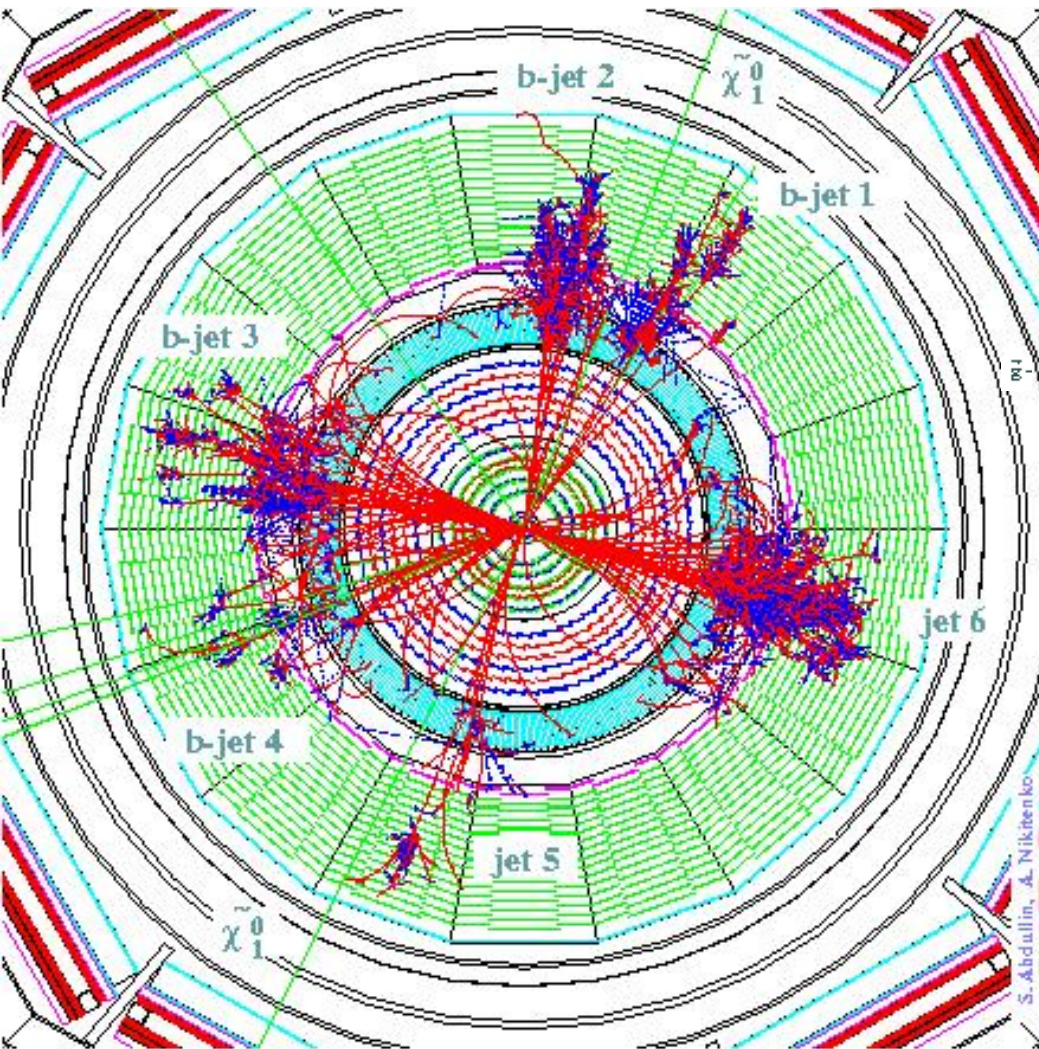
Particelle Supersimmetriche (SUSY)



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)

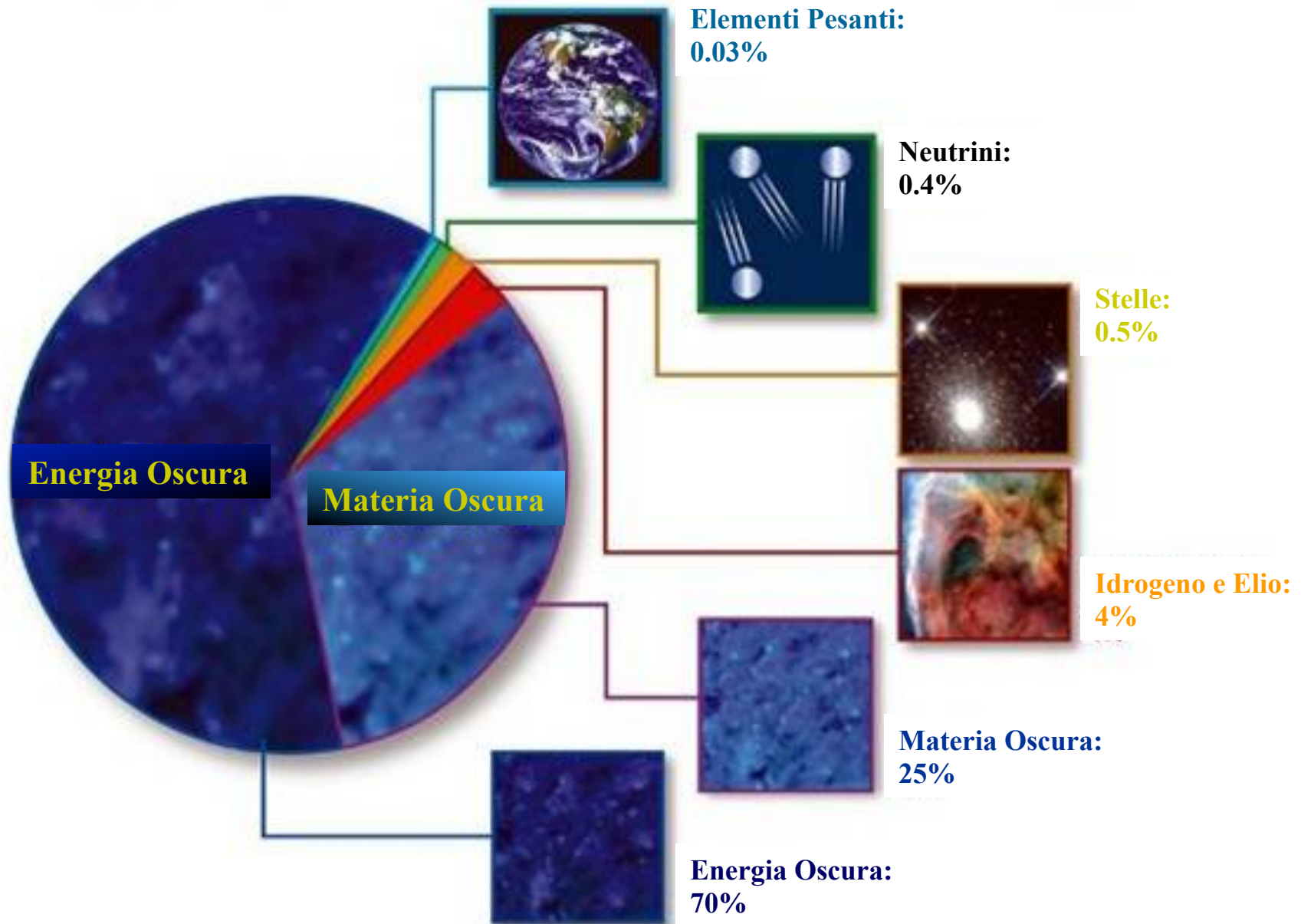
$$m(\tilde{g})=1266 \text{ GeV} ; m(\tilde{t}_1)=1026 \text{ GeV}$$

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

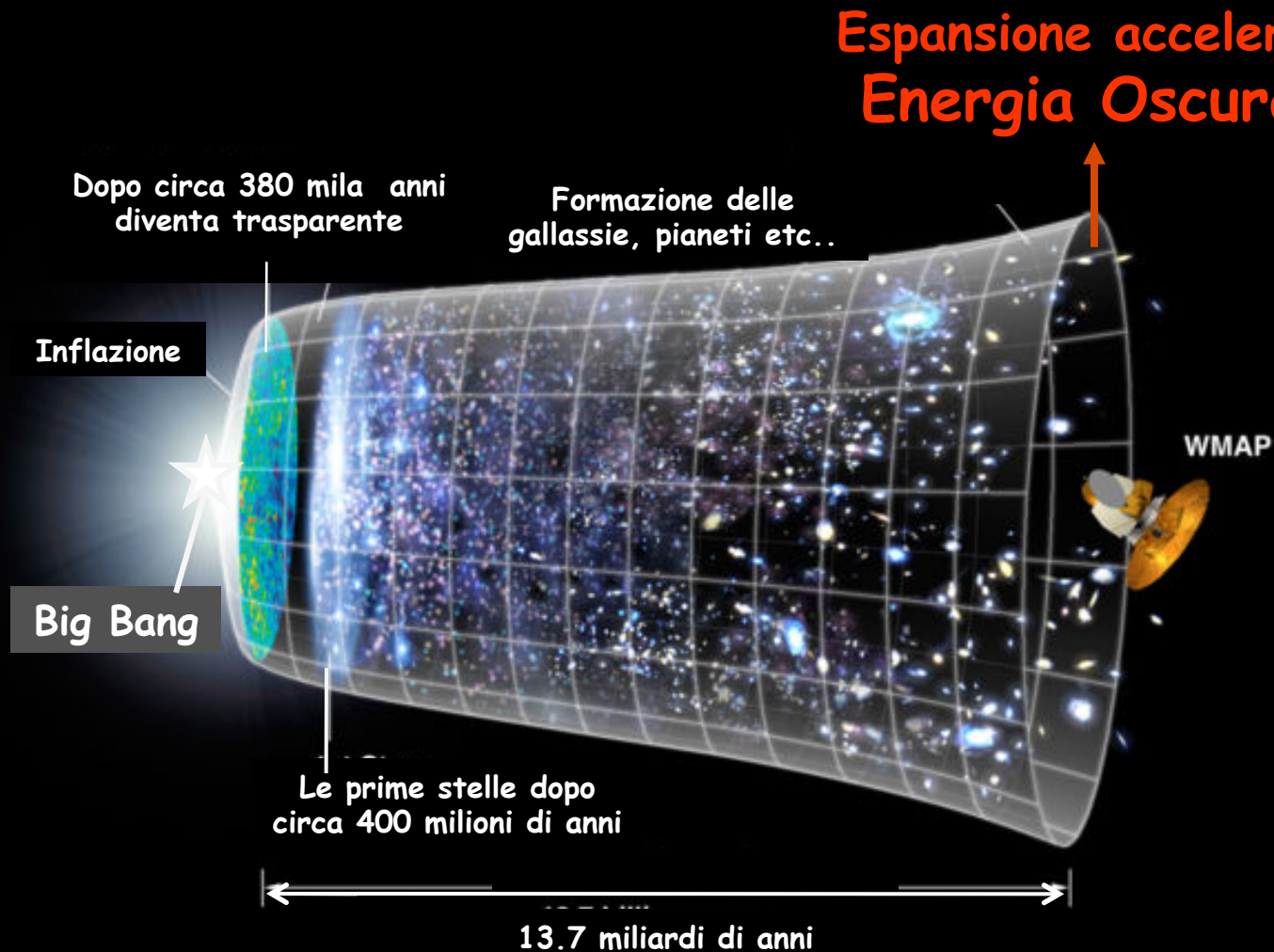
$$m(\tilde{\chi}_1^0)=214 \text{ GeV}; m(h)=119 \text{ GeV}$$

Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)

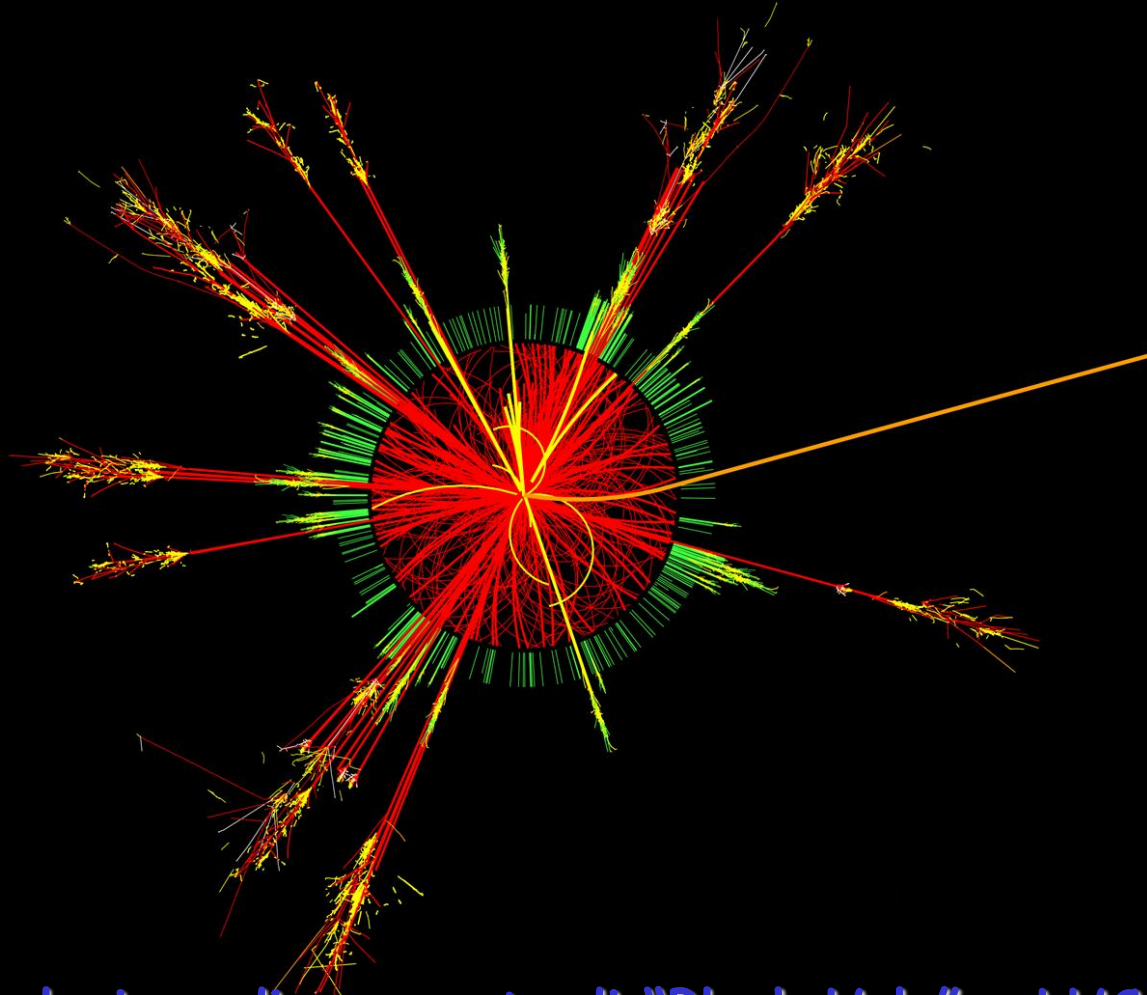


L'espansione dell'Universo dal Big Bang ad Oggi



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.

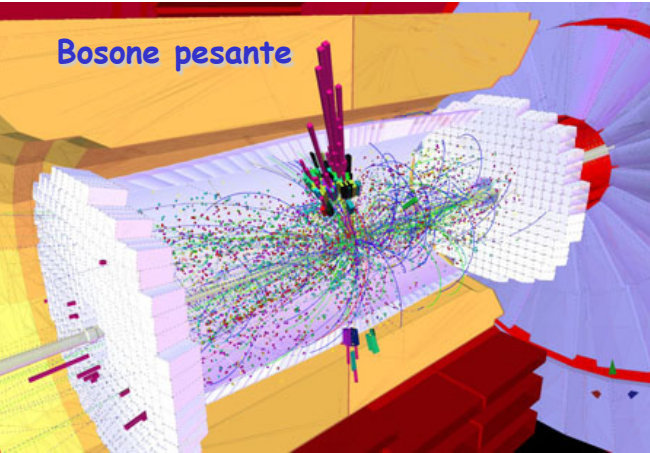
Se esistessero in natura delle dimensioni nascoste accessibili solo alla gravità, oltre alle 4 dimensioni del nostro spazio tempo, alle energie di LHC si potrebbero creare dei piccoli "Black Hole" che potrebbero essere rivelati dagli apparati sperimentali come eventi del tipo simulato in figura



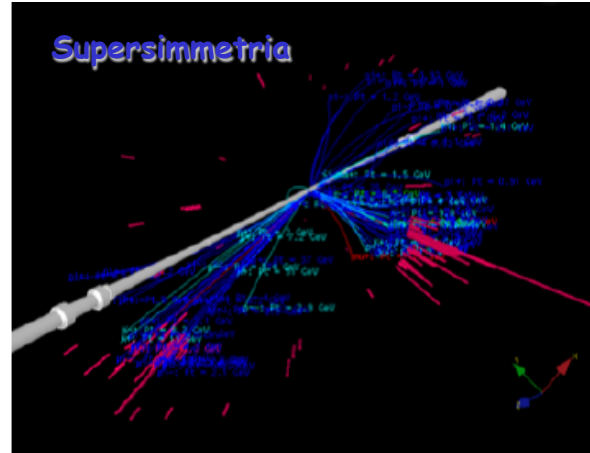
Simulazione di un evento di "Black Hole" a LHC

Altri eventi spettacolari non prevedibili potrebbero indicare l'esistenza di nuova fisica

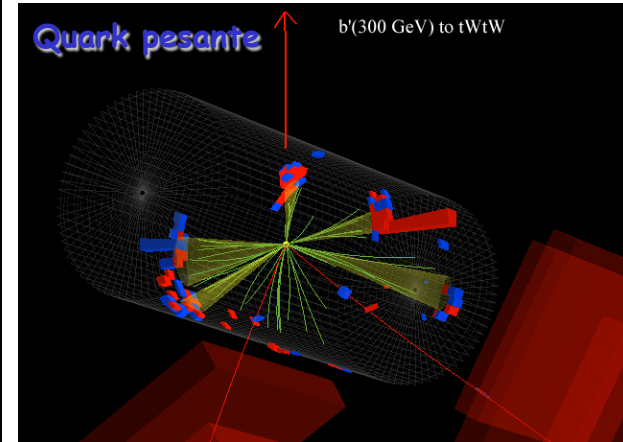
Bosone pesante



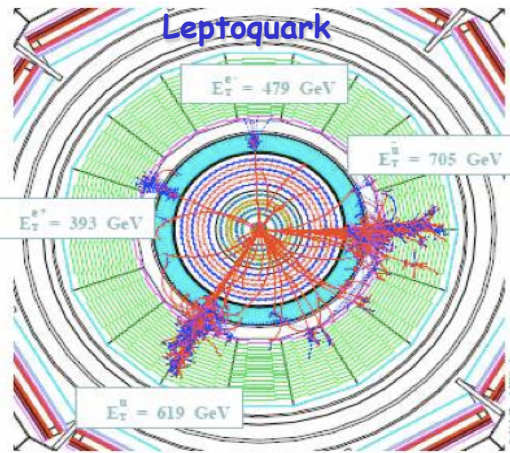
Supersimmetria



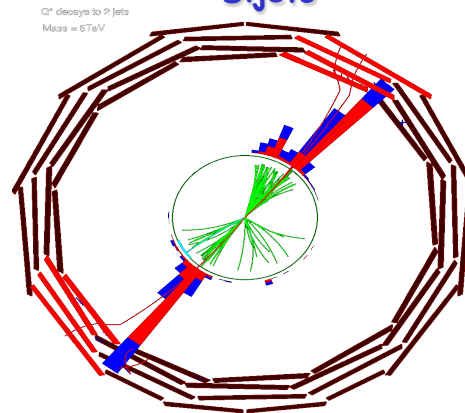
Quark pesante



Leptoquark



Dijets



- * 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 ? ? ? ?


Conclusioni

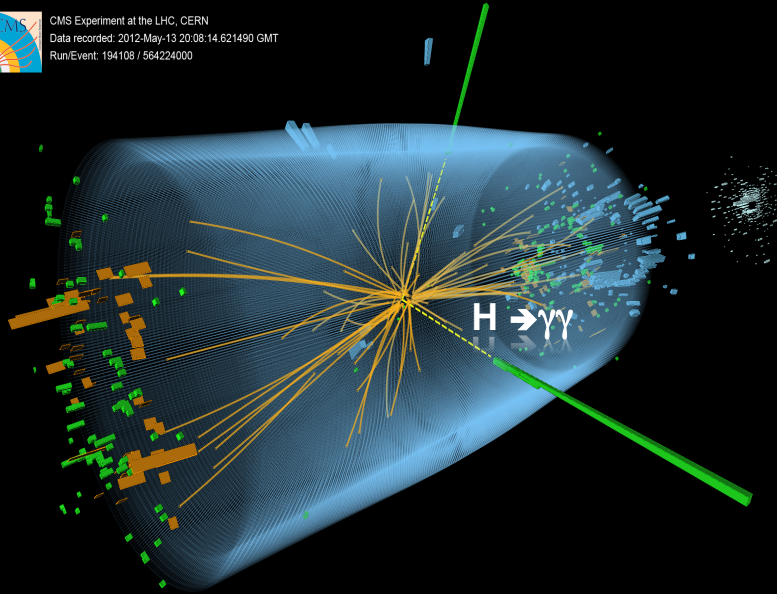
- ✓ L'esistenza del Bosone di Higgs è la conseguenza sperimentalmente osservabile del meccanismo di rottura spontanea della simmetria elettrodebole (meccanismo di Higgs) ed è la prova della bontà del Modello Standard.
- ✓ La sua scoperta è stata pertanto un passo fondamentale per la comprensione delle leggi che regolano il nostro Mondo, così come fondamentale fu ottanta anni fa la scoperta della radioattività artificiale....
- ✓ 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.
- ✓ Forse tra ottanta anni qualcuno farà una conferenza dal titolo:
"2014-2094: Dalla scoperta del Bosone di Higgs alla comprensione dell'Energia Oscura"
(la lunga strada che conduce alla conoscenza del mondo fisico).

2014 - 2094

Dalla scoperta del bosone di Higgs alla comprensione dell'Energia Oscura

(un viaggio di 80 anni per conoscere la struttura dell'Universo e le leggi che lo governano)

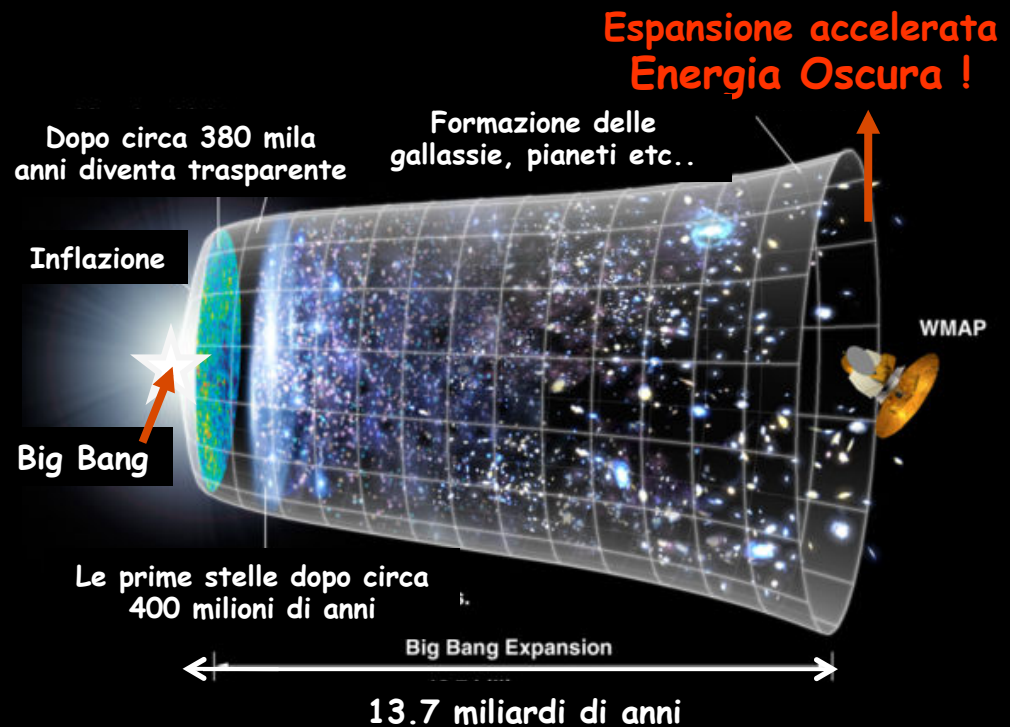
 CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



La teoria descrive completamente l'evoluzione dell'Universo da uno stato primordiale denso, caldo e uniforme a quello presente in espansione accelerata lungo una fascia di tempo di 13.72 ± 0.12 miliardi di anni.

Prof. Xxxx Yyyyy

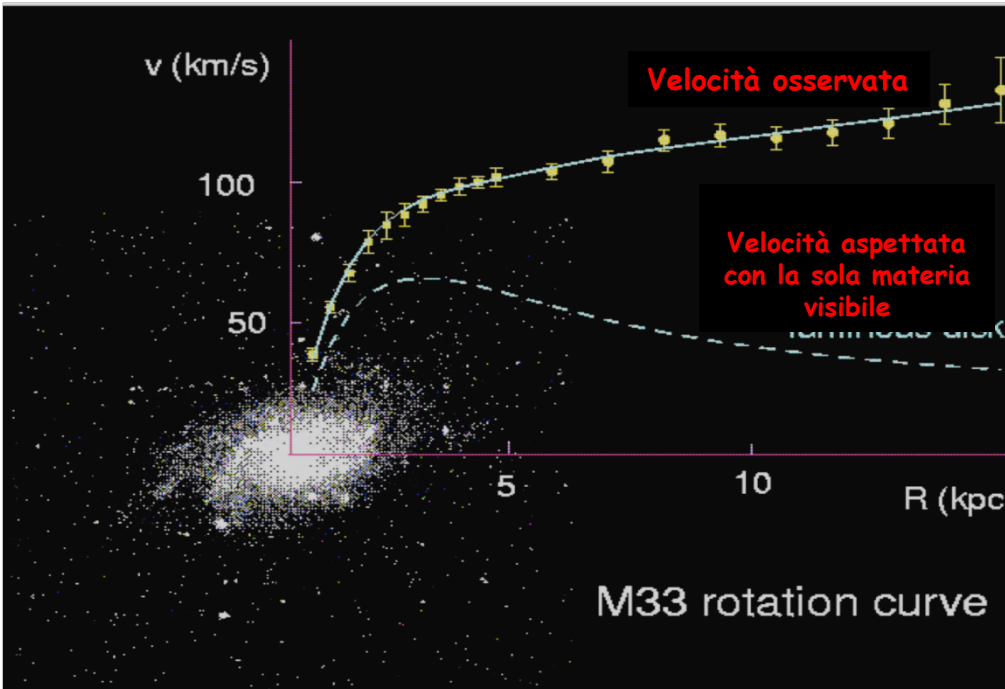
Dipartimento di Fisica di Pisa



Altre Slides

Manifestazioni della Materia Oscura

Galassia M33
Velocità di rotazione



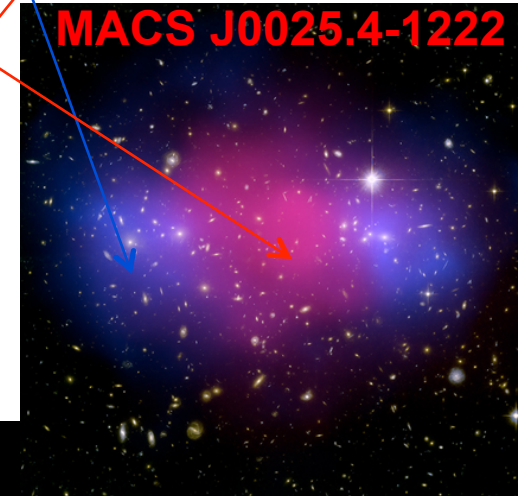
Materia oscura?

Gas ad alta temperatura

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

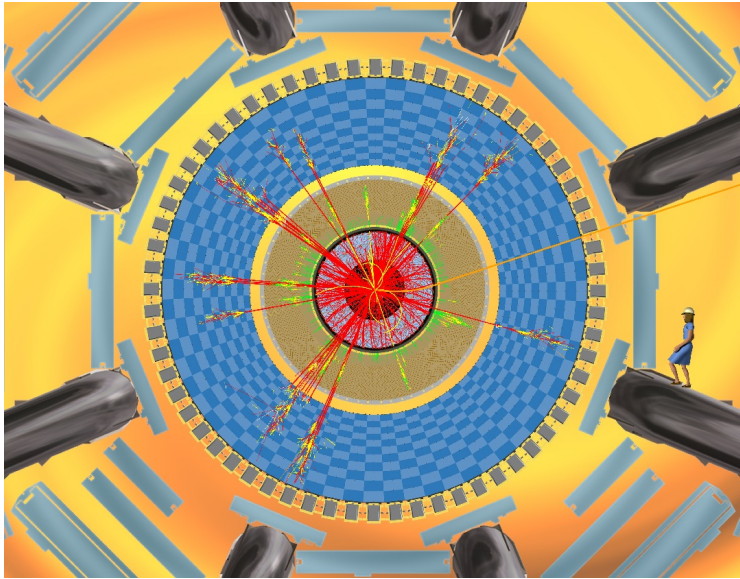


MACS J0025.4-1222



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

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

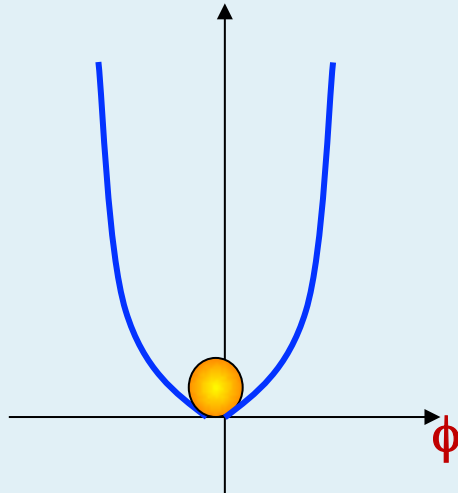
La paura che a LHC possa venir creato un piccolo ma vorace Buco Nero in cui la Terra venga inesorabilmente inghiottita è totalmente priva di senso !

Rottura spontanea della simmetria

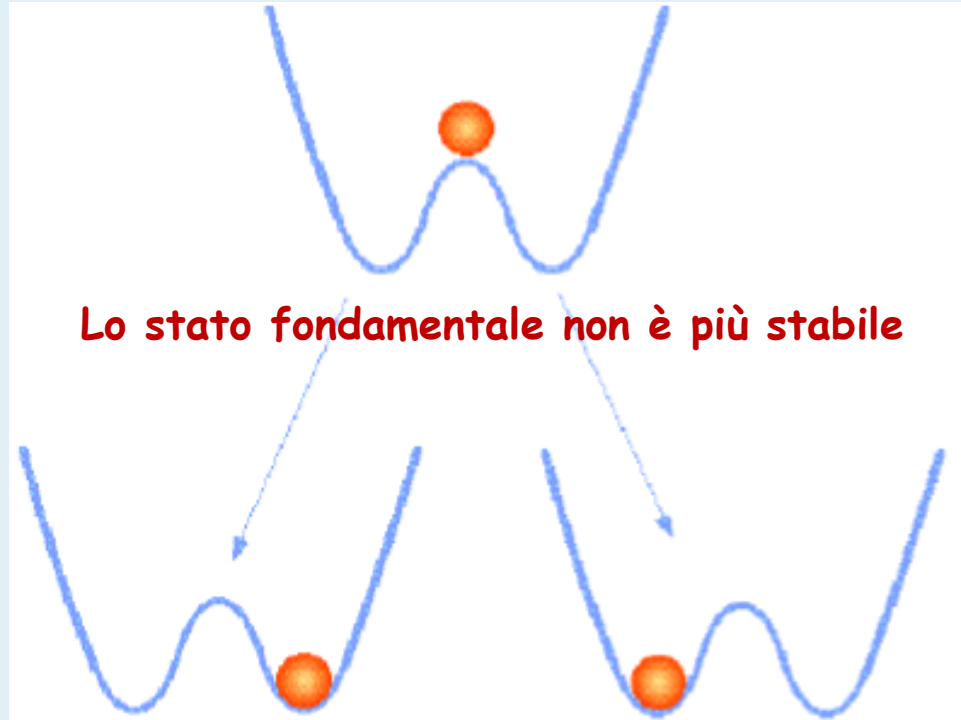
Vediamola in due dimensioni

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

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



Simmetria dello stato fondamentale



Lo stato fondamentale non è più stabile

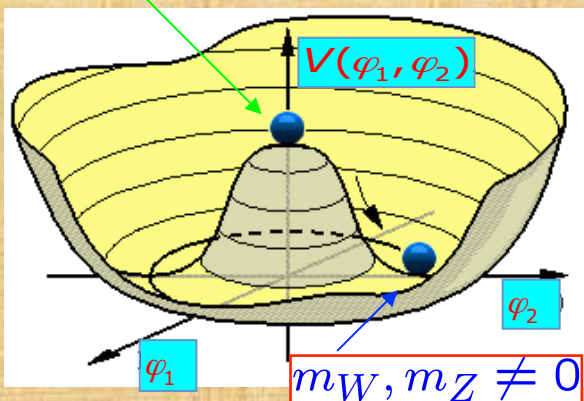
Per andare in uno stato stabile, deve scegliere o destra o sinistra. La simmetria si rompe in modo "spontaneo"! Lo stato stabile non è più simmetrico

Rottura spontanea della simmetria

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.

$$m_W, m_Z = 0$$



$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + \text{h.c.} \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

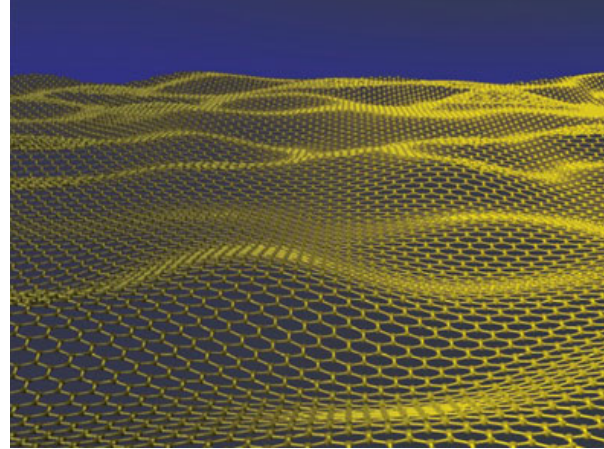
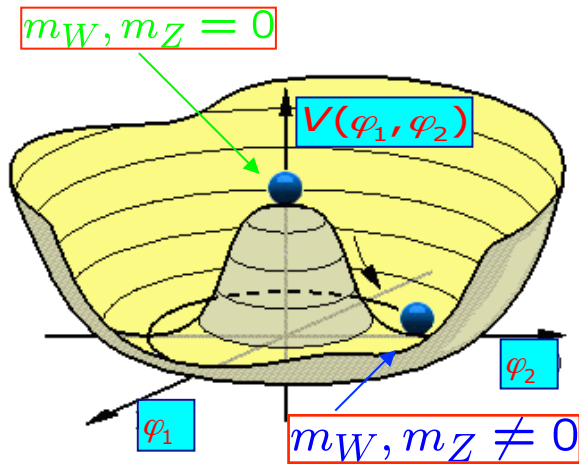
settore di gauge

massa ai quark e ai leptoni

massa ai W^\pm e Z^0

Campo di Higgs

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.



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

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.

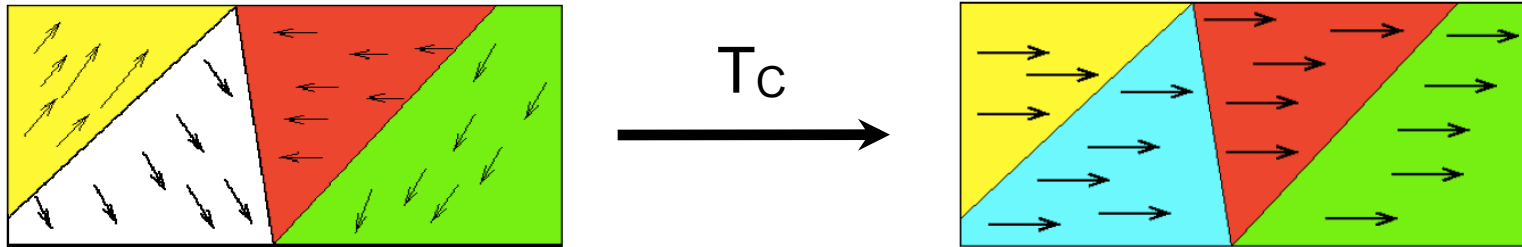
I Bosoni W^\pm e Z e le particelle di materia interagendo con questo campo non possono più muoversi alla velocità della luce perché hanno acquistato una massa.

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:

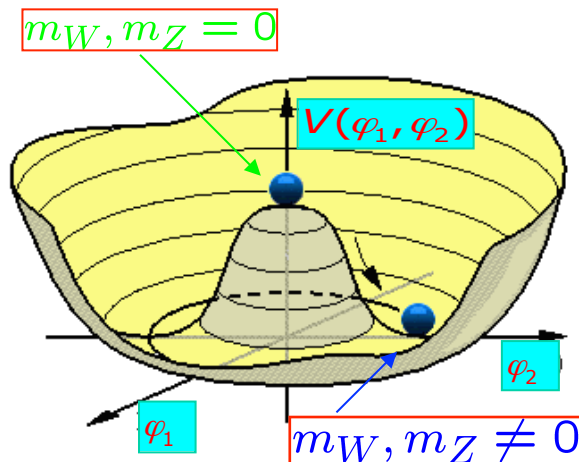


tra tutte le possibili direzioni la magnetizzazione si orienta in una particolare direzione rompendo la simmetria.

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

Viene introdotto il campo 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.



Invarianza di gauge

Anche la teoria delle interazioni elettrodeboli deve rispettare l'invarianza di gauge....

ma ci sono difficoltà !

Non si riesce a trovare il modo di dare massa ai mediatori dell'interazione (W^\pm e Z^0) ed alle altre particelle senza violare la simmetria di gauge !

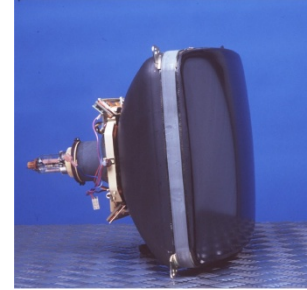
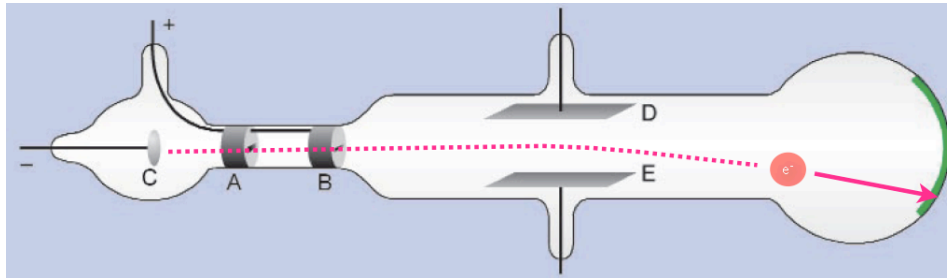
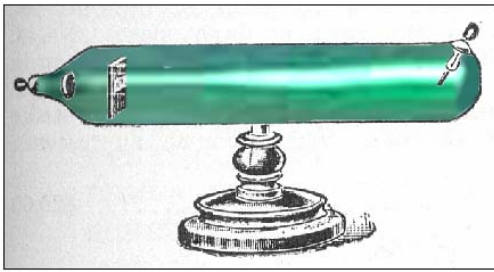
L'atomo

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

Radiazione α (nucleo di Elio: 2 protoni + 2 neutroni), radiazione β (elettrone), radiazione γ (fotone)

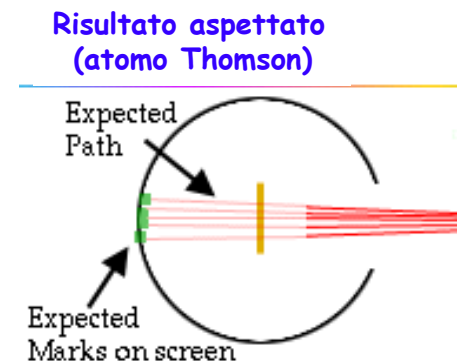
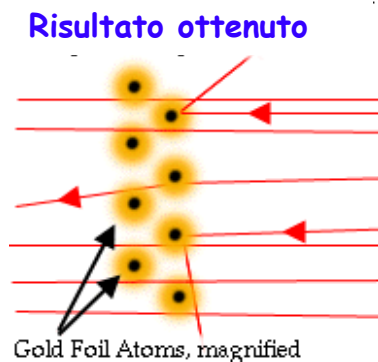
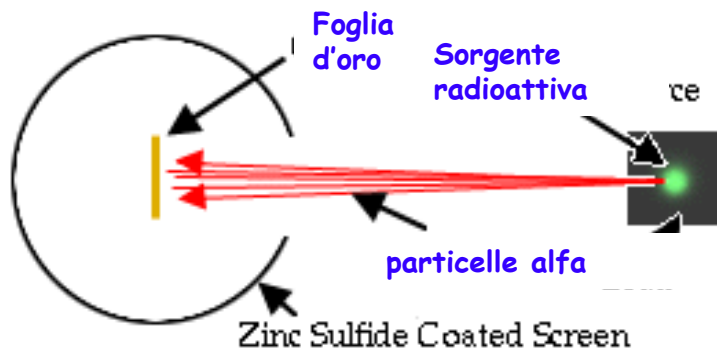
1897: Scoperta dell'elettrone, J.J. Thomson

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)

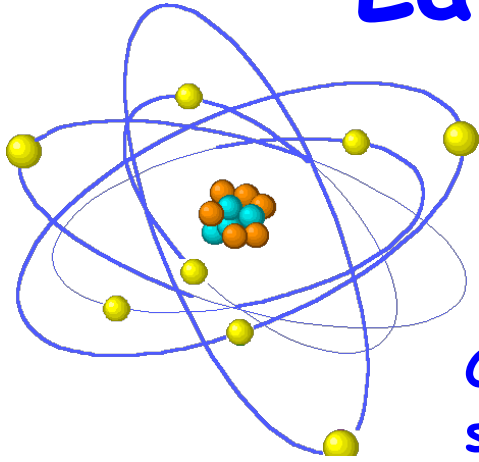


1911: Scoperta del nucleo, E. Rutherford

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

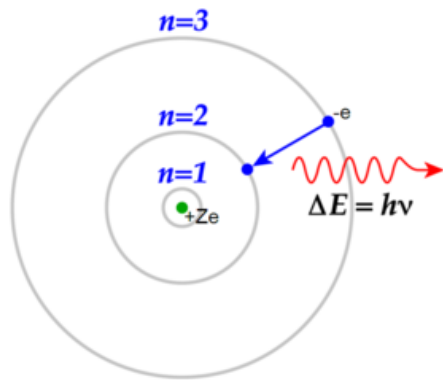
Problema: l'atomo di Rutherford è instabile !

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.

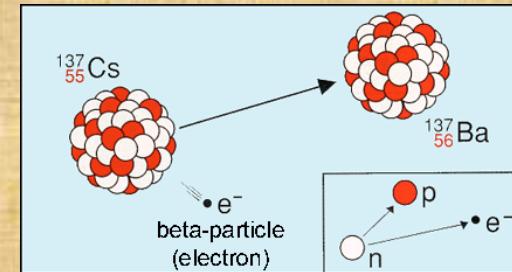
Il nucleo è composto da protoni e neutroni

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

.... poi ci sono i neutrini !

(il problema del decadimento β)

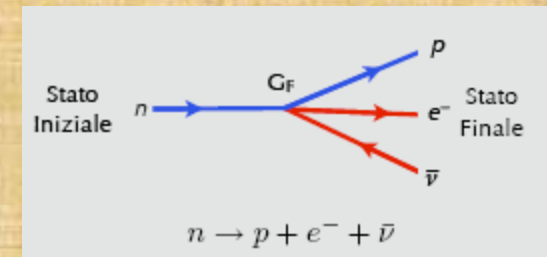
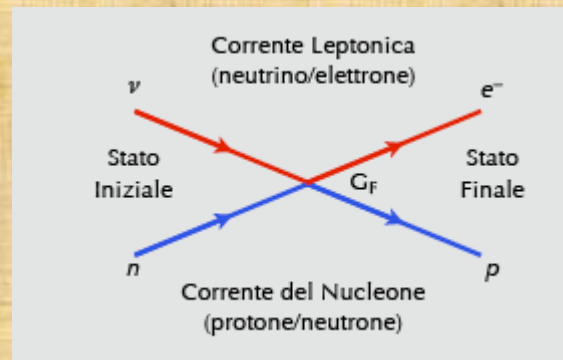
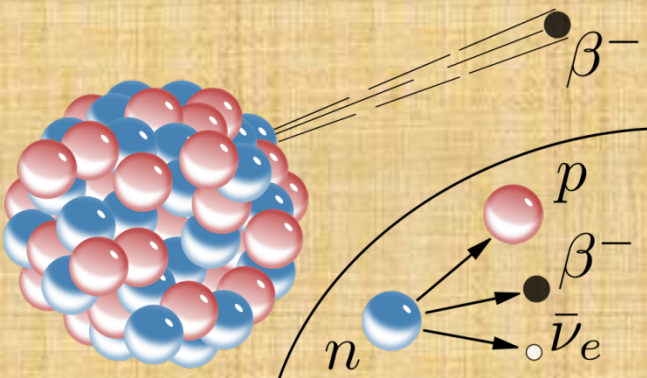
- ✓ 1911-1914: si studia la radioattività: un nucleo si trasforma in un altro emettendo un elettrone (radiazione β): ${}_Z^A N \rightarrow {}_{Z+1}^A N' + e^-$



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 β 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.**

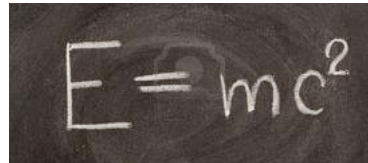


Nel frattempo... molti sono i progressi teorici

• 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.

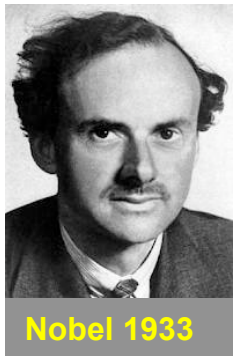
1926 Schroedinger sviluppa la meccanica ondulatoria.

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



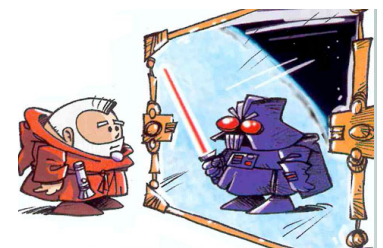
- Nel 1928 Dirac cerca di conciliare le due teorie per descrivere il moto degli elettroni liberi ad alta energia e scrive l'equazione:

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

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"

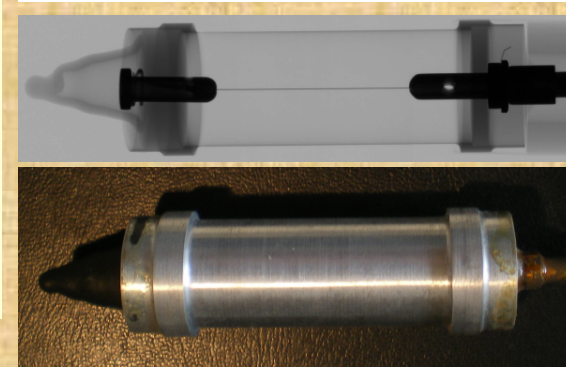
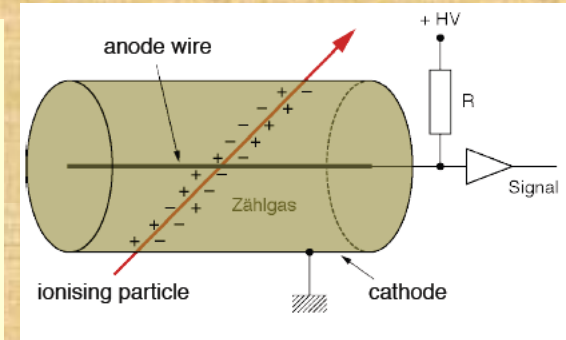
- l'antimateria esiste !



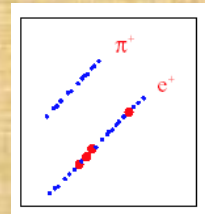
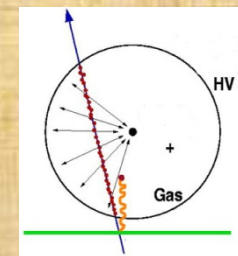
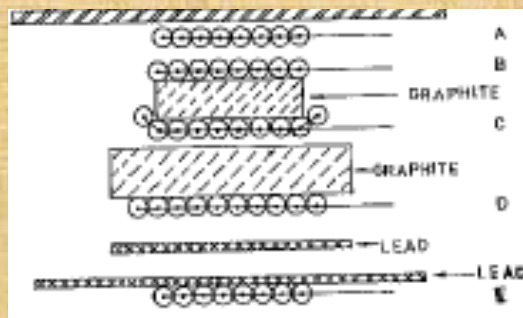
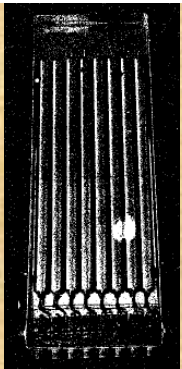
Pontecorvo un è un esperto dei più avanzati rivelatori di particelle

Pubblica un articolo di rivista (*"Recent development in proportional counter technique, Helv.Phys.Acta,1950, vol 23,p.97*) sui rivelatori a gas proporzionali con alta amplificazione che permettono di misurare al passaggio di una particella carica non solo la posizione ma anche l'energia depositata nel gas. Il rivelatore a gas che descrive in questo articolo non è molto diverso dai moderni rivelatori a gas che si usano oggi.

- fili di tungsteno di 50-100 μm di diametro
- tubi catodici con diametri da 0.2 fino a 5 cm di diametro
- riempiti con Argon (o Xenon) + 20% CH_4 per limitare la scarica
- alimentati con tensioni di 2-3 KV...



Insomma utilizza tubi a gas molto simili ai così detti "straw tubes" di 4 mm con i quali ATLAS ha costruito il grande rivelatore TRT a LHC !

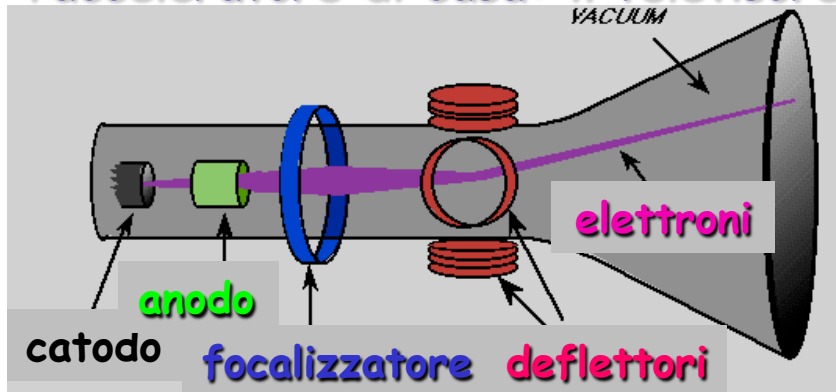


Tubi proporzionali a gas usati da Pontecorvo

"Straw tubes" a gas proporzionali usati da ATLAS

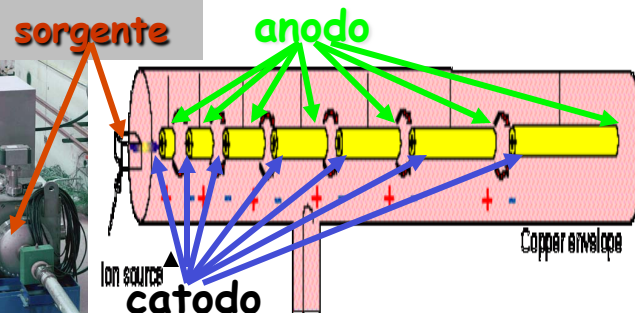
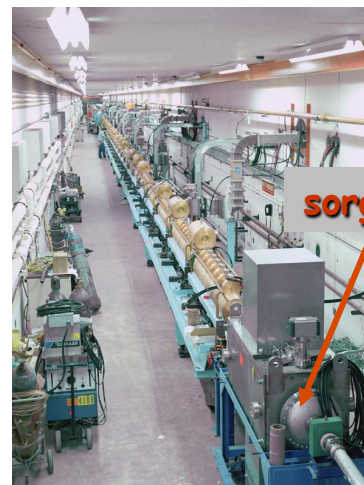
Come si accelerano le particelle

l'acceleratore di casa: il televisore

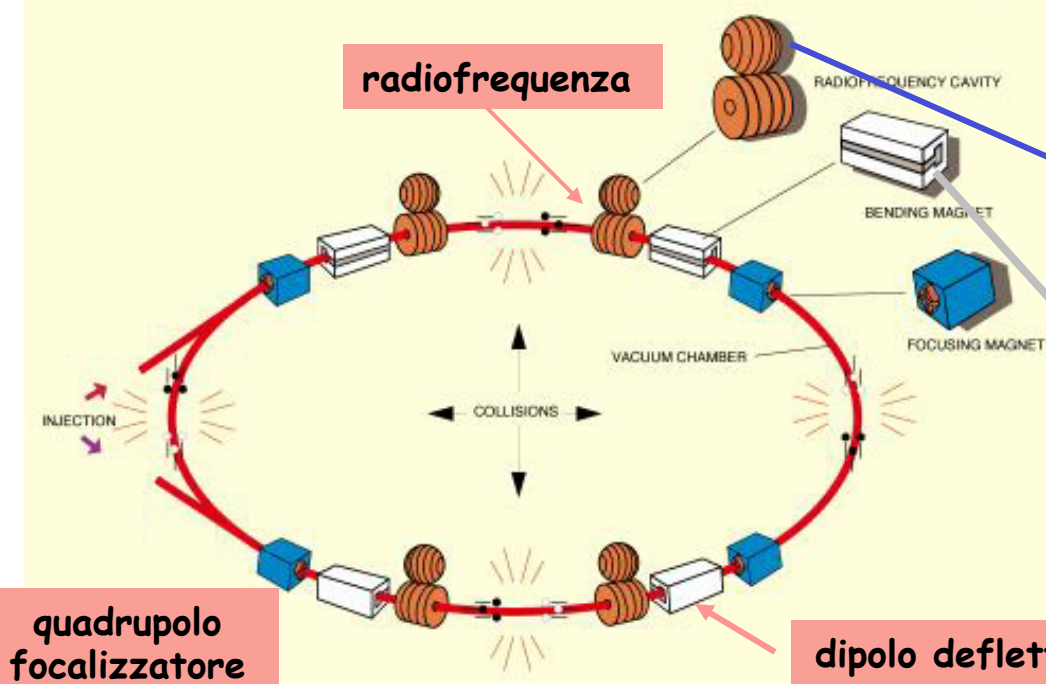


l'energia degli elettroni è ~ 20 KeV

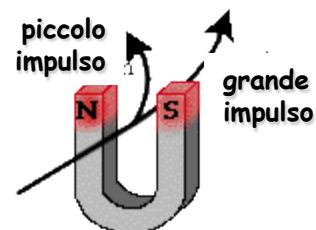
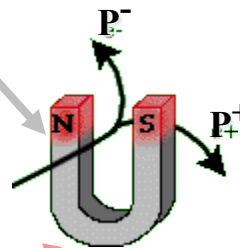
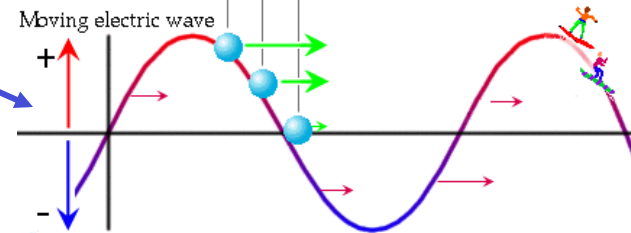
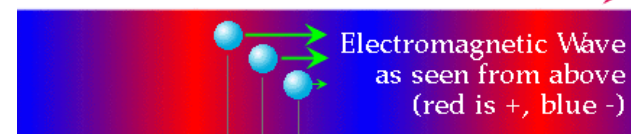
(FERMILAB-Chicago)
acceleratore lineare
energia 400 MeV



le 3 componenti principali di un acceleratore

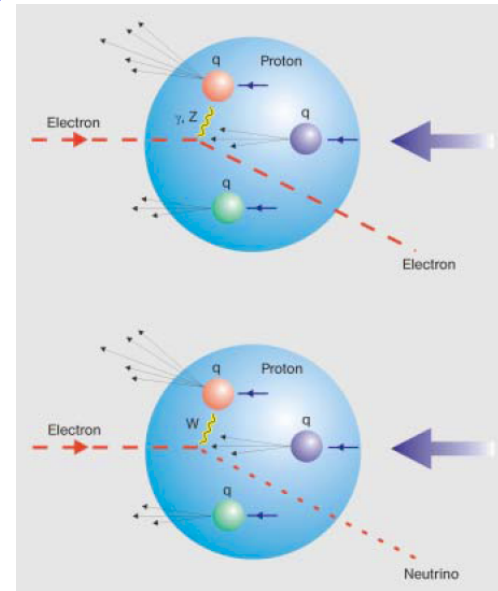


Electromagnetic wave is traveling, pushing particles along with it



Prima evidenza dei quark (deep inelastic scattering)

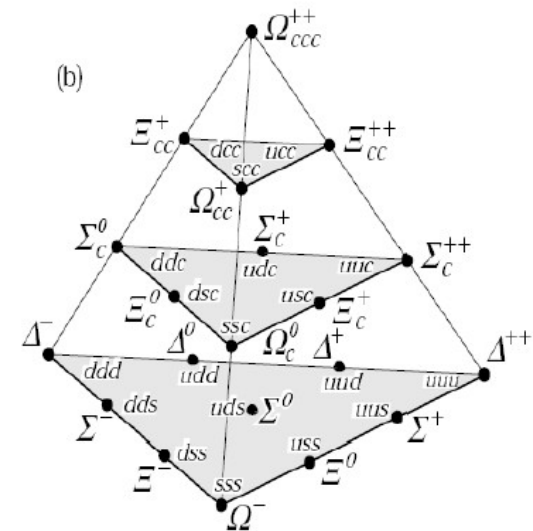
Con un esperimento simile a quello di Rutherford, ma usando come proiettili elettroni di alta energia, a SLAC si dimostra sperimentalmente che dentro il protone sono presenti delle strutture puntiformi (che furono chiamate partoni). Si scopre infatti che i grandi angoli di scattering sono più frequenti di quanto ci si aspetterebbe se la struttura del protone fosse uniforme.



1970: Glashow, Iliopoulos e Maiani propongono l'esistenza di un quarto quark, il "charm" (fascino), carica $+2/3e$.

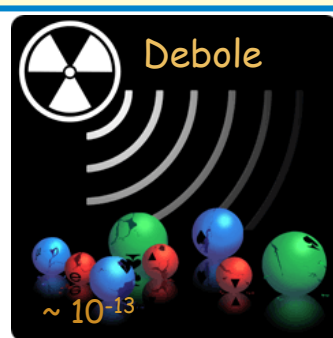
1974: viene scoperta la particella J/ψ da due esperimenti indipendenti (da Ting a BNL e da Richter a SLAC) con massa 3.1 GeV che decade in due μ .

Ma allora i quark sono più di tre !
sono forse quattro ?

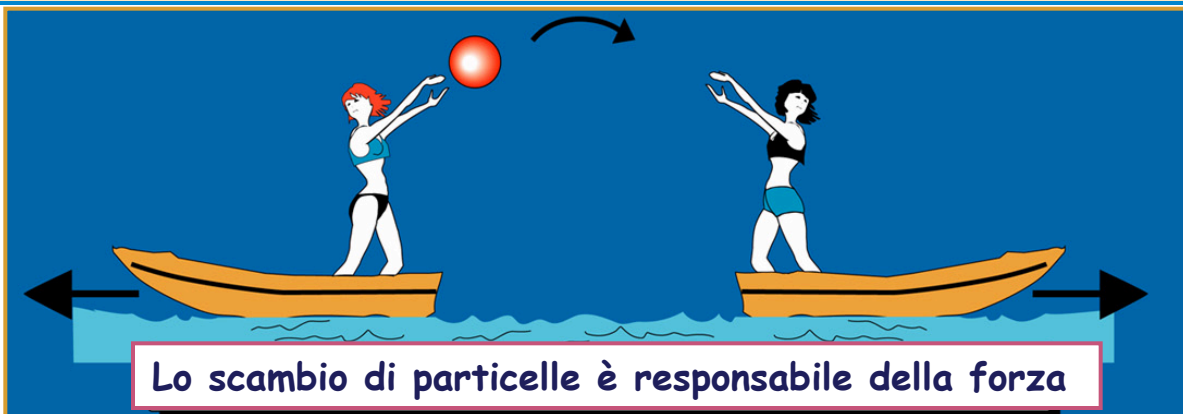


Come interagiscono le particelle elementari?

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)



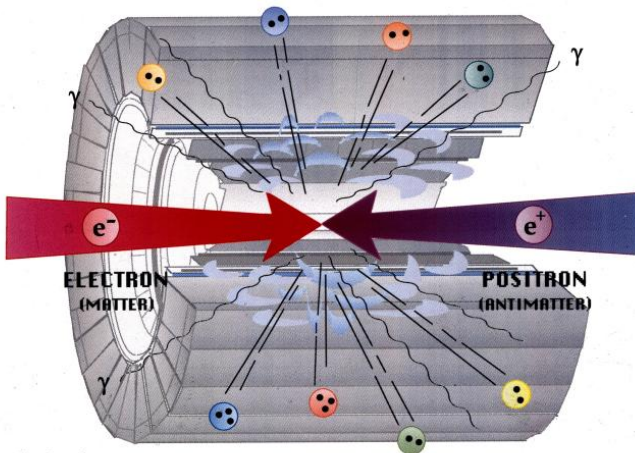
Pensiamo che tutte queste 4 diverse interazioni siano dovute allo "scambio" di altre particelle, chiamate "mediatrici" o "vettori" dell'interazione.



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 ($m_Z \approx 91 \text{ GeV}$) 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.

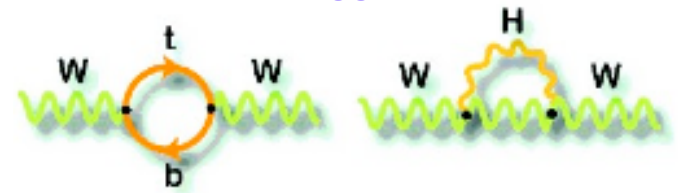


Dal 1989 al 1995 vengono prodotti e misurati milioni di Z^0 permettendo di verificare le previsioni del Modello Standard al meglio del percento. La massa dello Z^0 viene misurata con l'incredibile precisione dello 0.02% e inoltre viene verificato che il numero delle famiglie di neutrini è effettivamente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

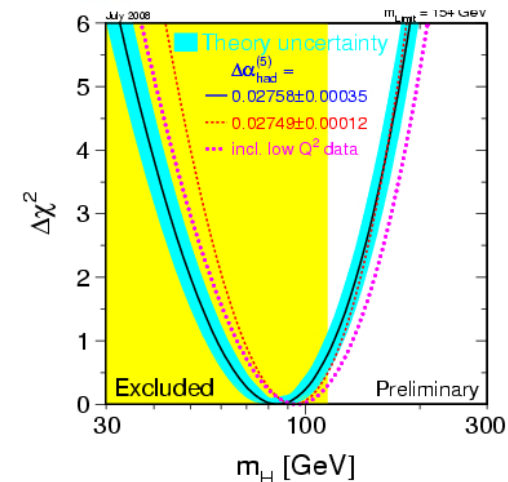
Un vero trionfo del Modello Standard !

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 ≈ 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.



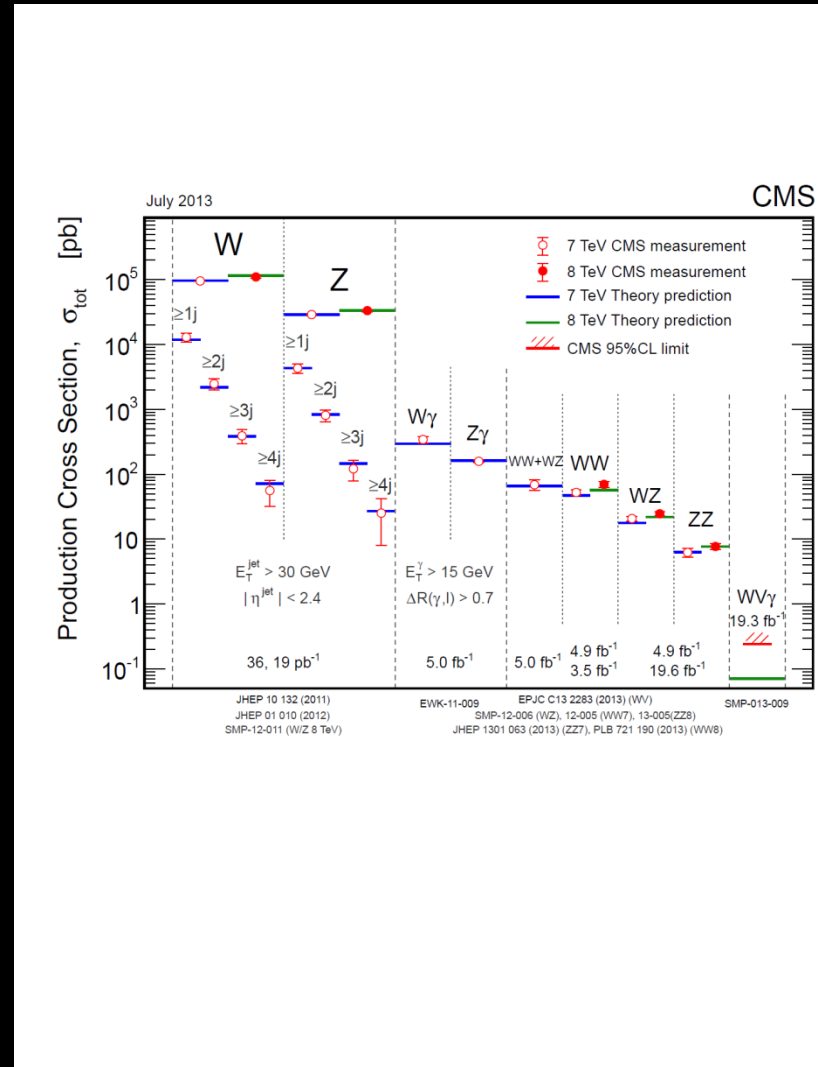
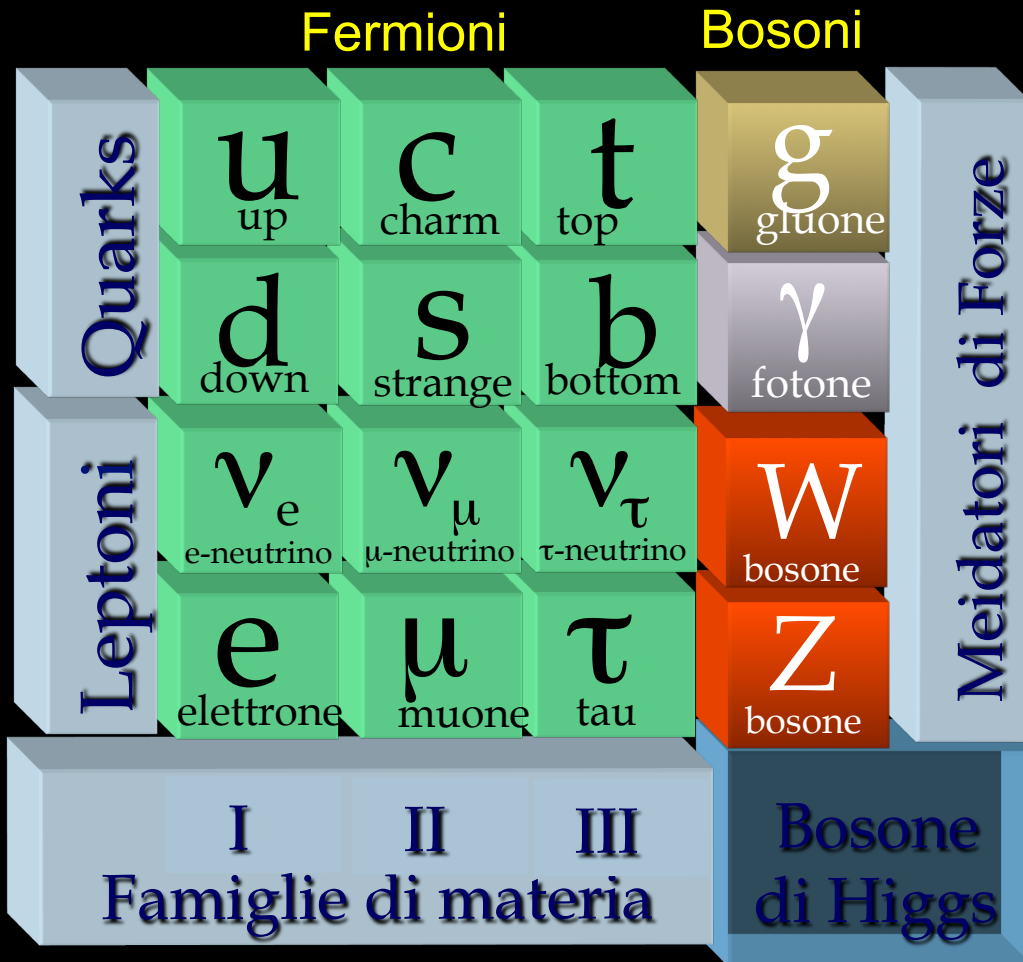
- ✓ Tuttavia le misure di precisione della massa del quark top e del W indicano che se il bosone di Higgs esiste non può essere molto più pesante di 114 GeV. Calcolando infatti le correzioni alla massa del top e del W (dette correzioni radiative) secondo diagrammi come quelli qui a lato è possibile valutare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



SLC: Acceleratore Lineare (2 miglia)



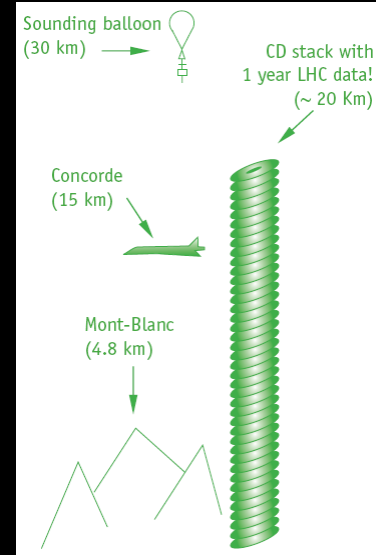
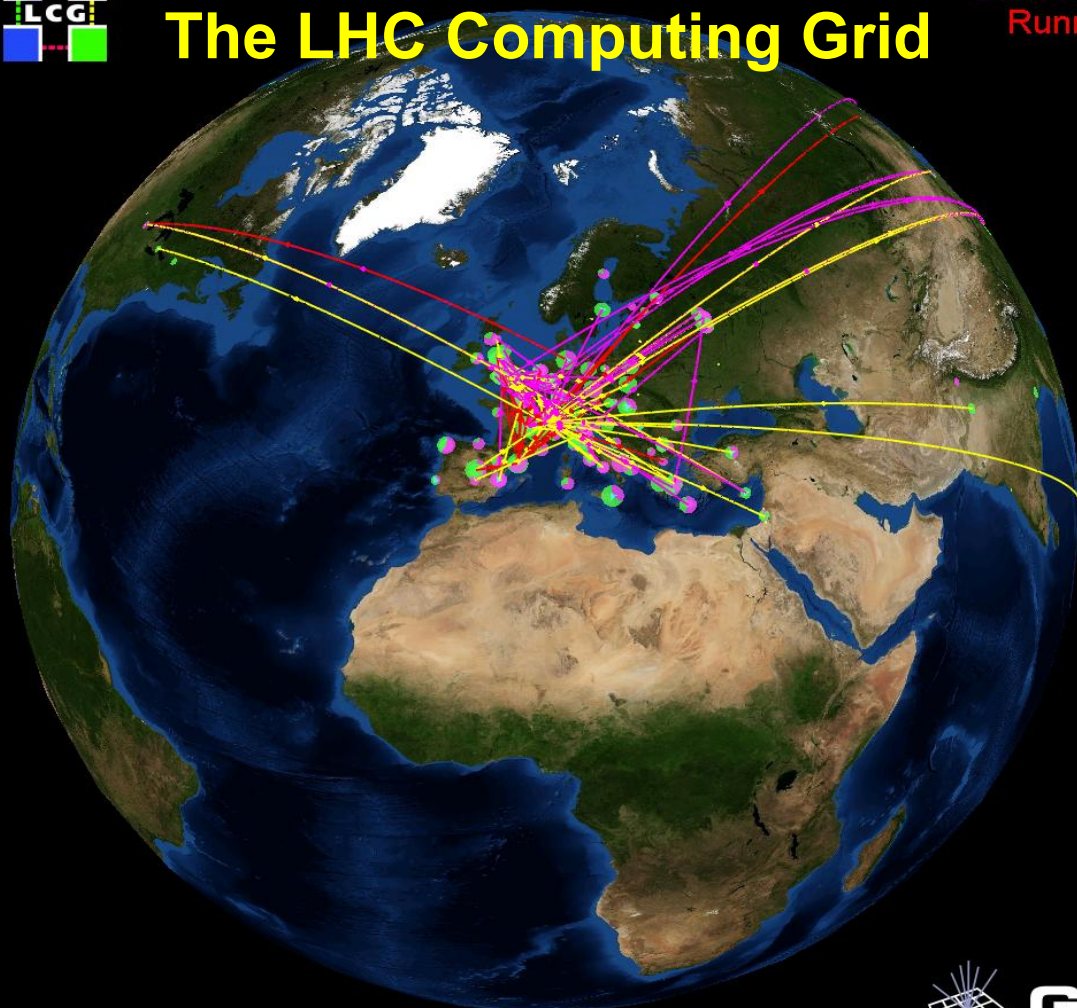
Il Modello Standard



... e finalmente il Bosone di Higgs è stato scoperto a LHC !

The LHC Computing Grid

Scheduled = 15301
Running = 10525



09-25-20 UTC

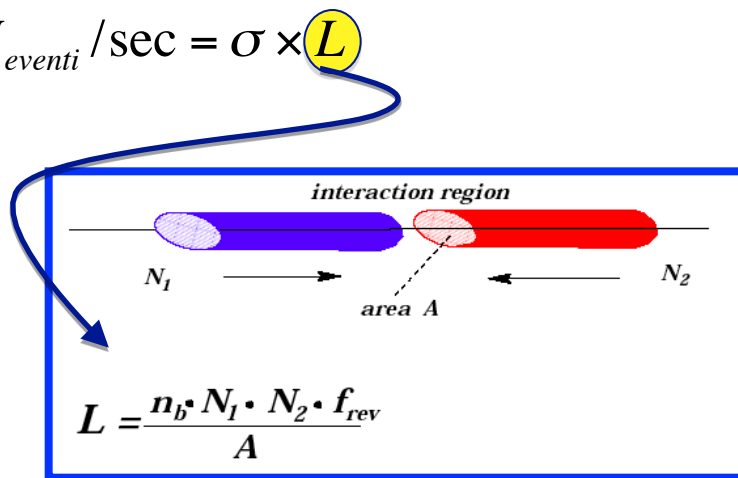
Gli esperimenti di LHC producono circa 15 Milioni di Gigabytes di dati ogni anno (circa 20 milioni di CD, una pila alta 20 Km!). Questo corrisponde a scrivere ~30,000 Enciclopedie Britanniche ogni secondo!

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

Luminosità (L), sezione d'urto (σ) 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 σ) per il numero di protoni che si riesce a far scontrare ogni secondo (luminosità L).

$$N_{\text{eventi}} / \text{sec} = \sigma \times L$$



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_{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

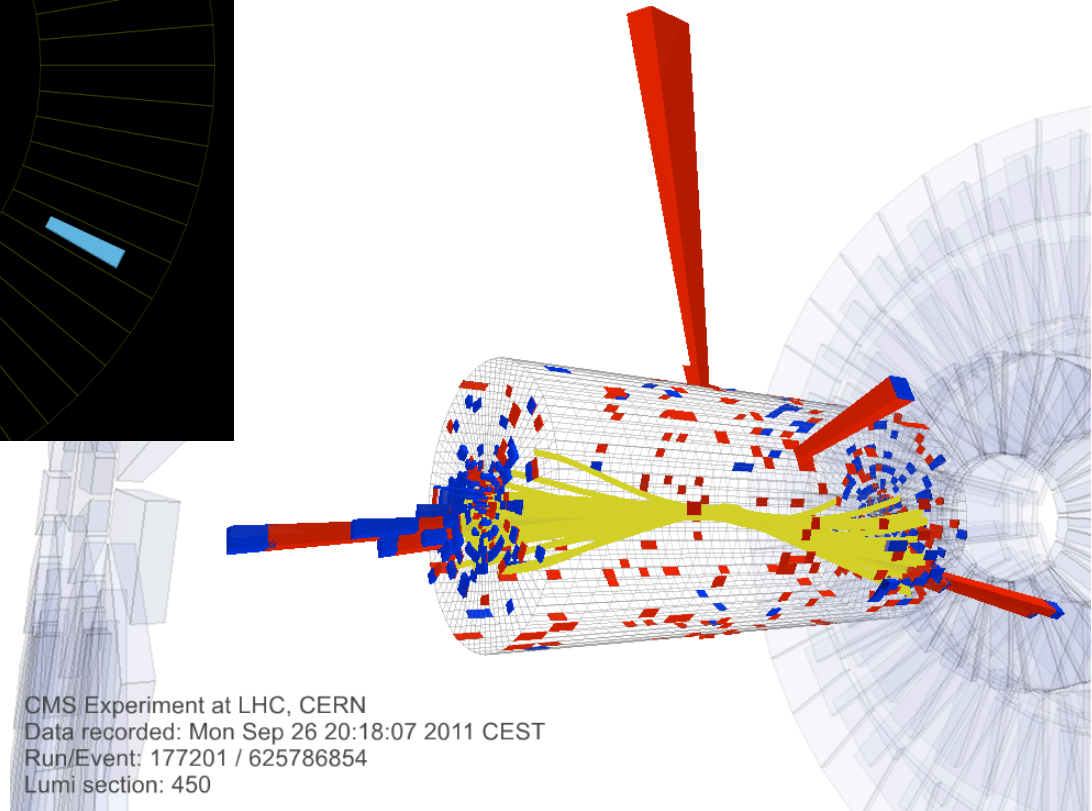
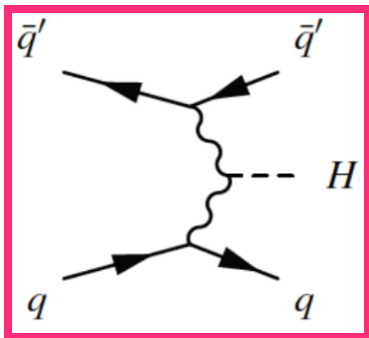
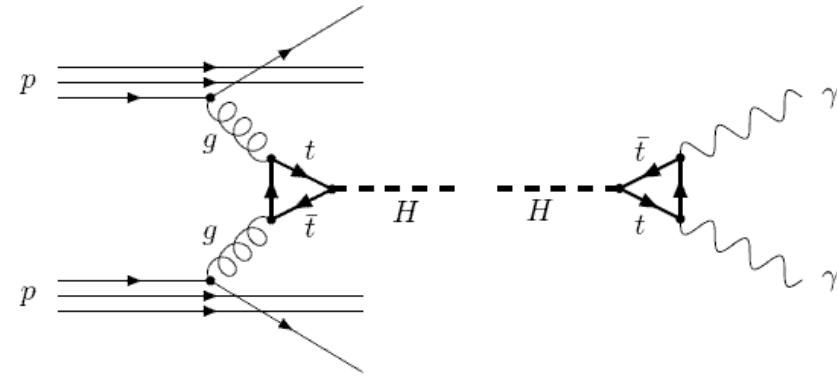
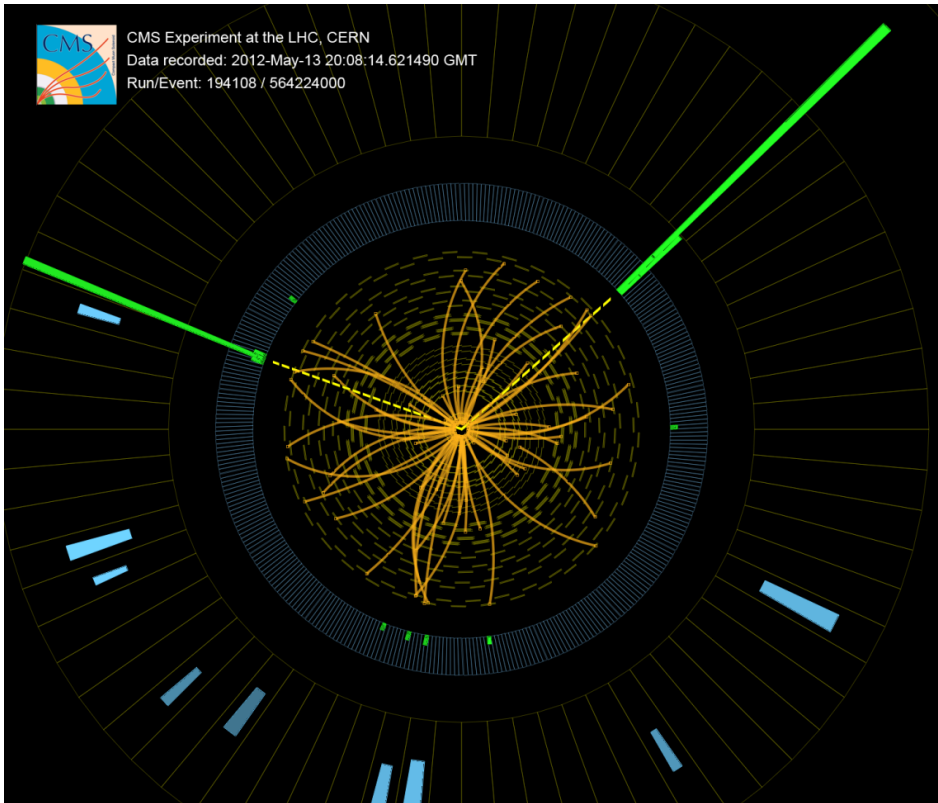
$N_{\text{higgs}} \approx 540$ all'ora

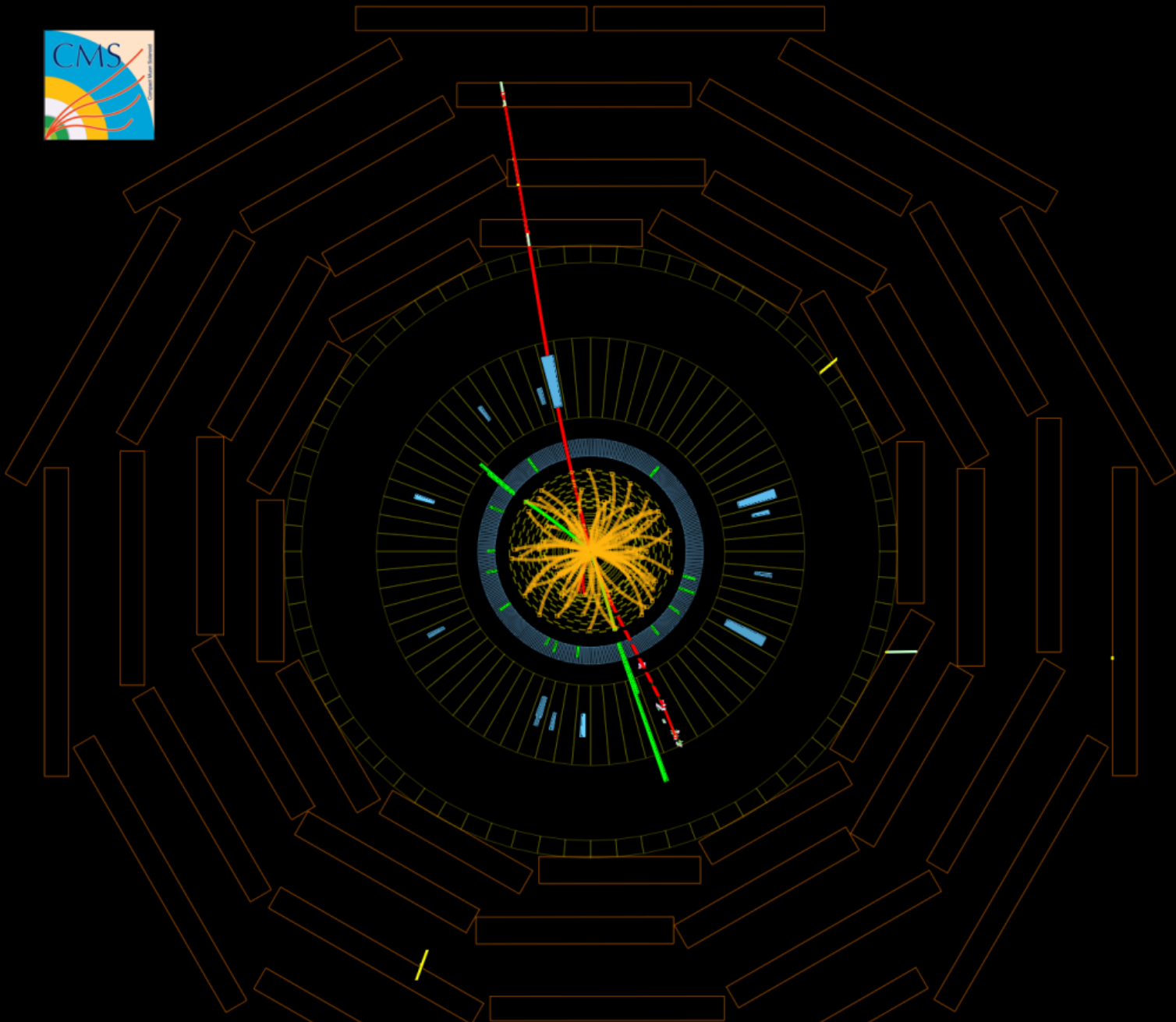
(se si scontrassero due soli protoni al secondo produrrei un solo Bosone di Higgs ogni $\sim 3 \times 10^{21}$ anni (~ 200 miliardi di volte l'età dell'Universo !)

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

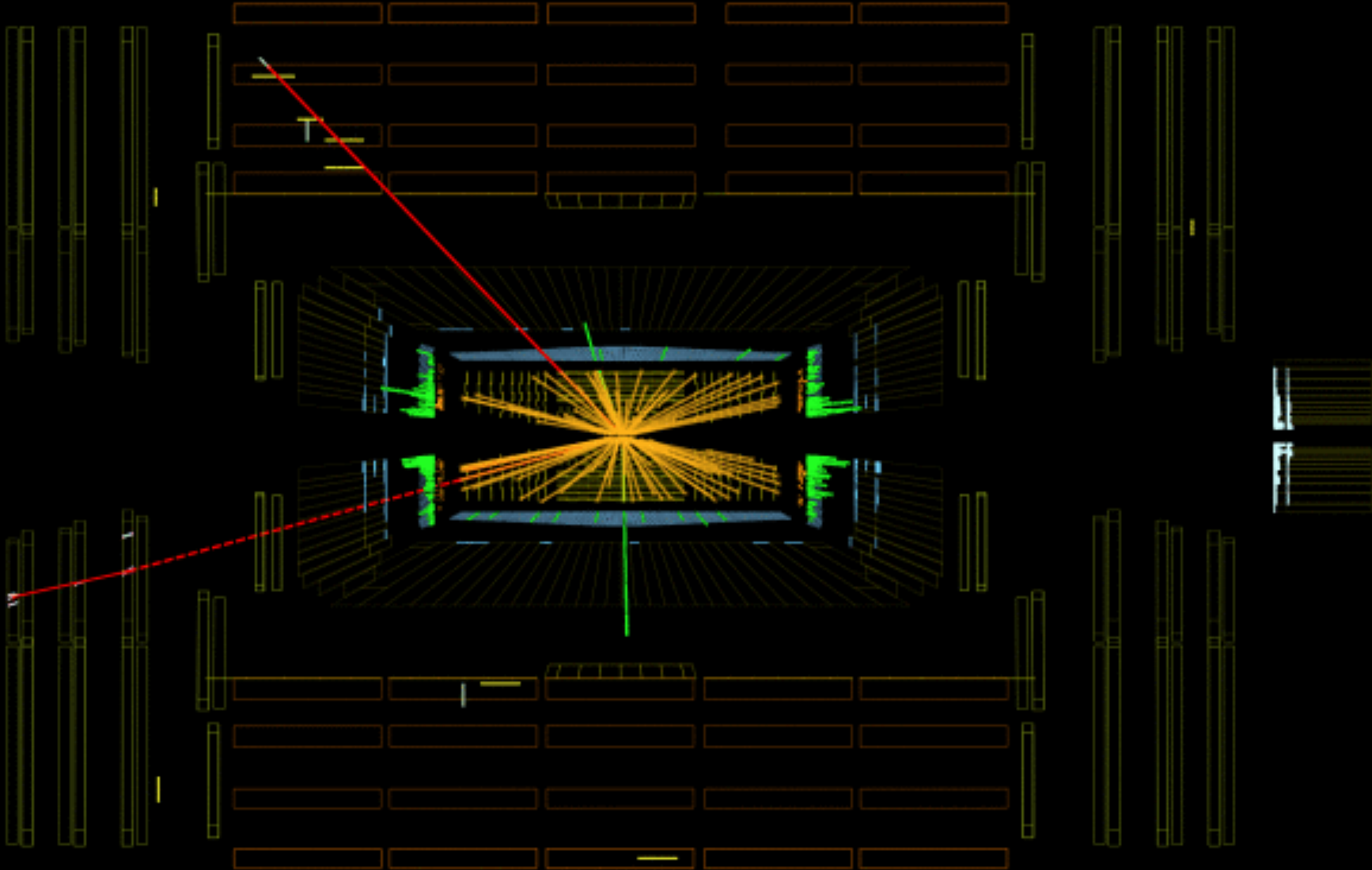
$\int L dt \approx 10 \text{ fb}^{-1}$ ➤ ≈ 150.000 Higgs prodotti ($15 \text{ pb} \times 10000 \text{ pb}^{-1}$)
 ma se sono così tanti sarà facile vederli !

Ricerca $H \rightarrow \gamma\gamma$





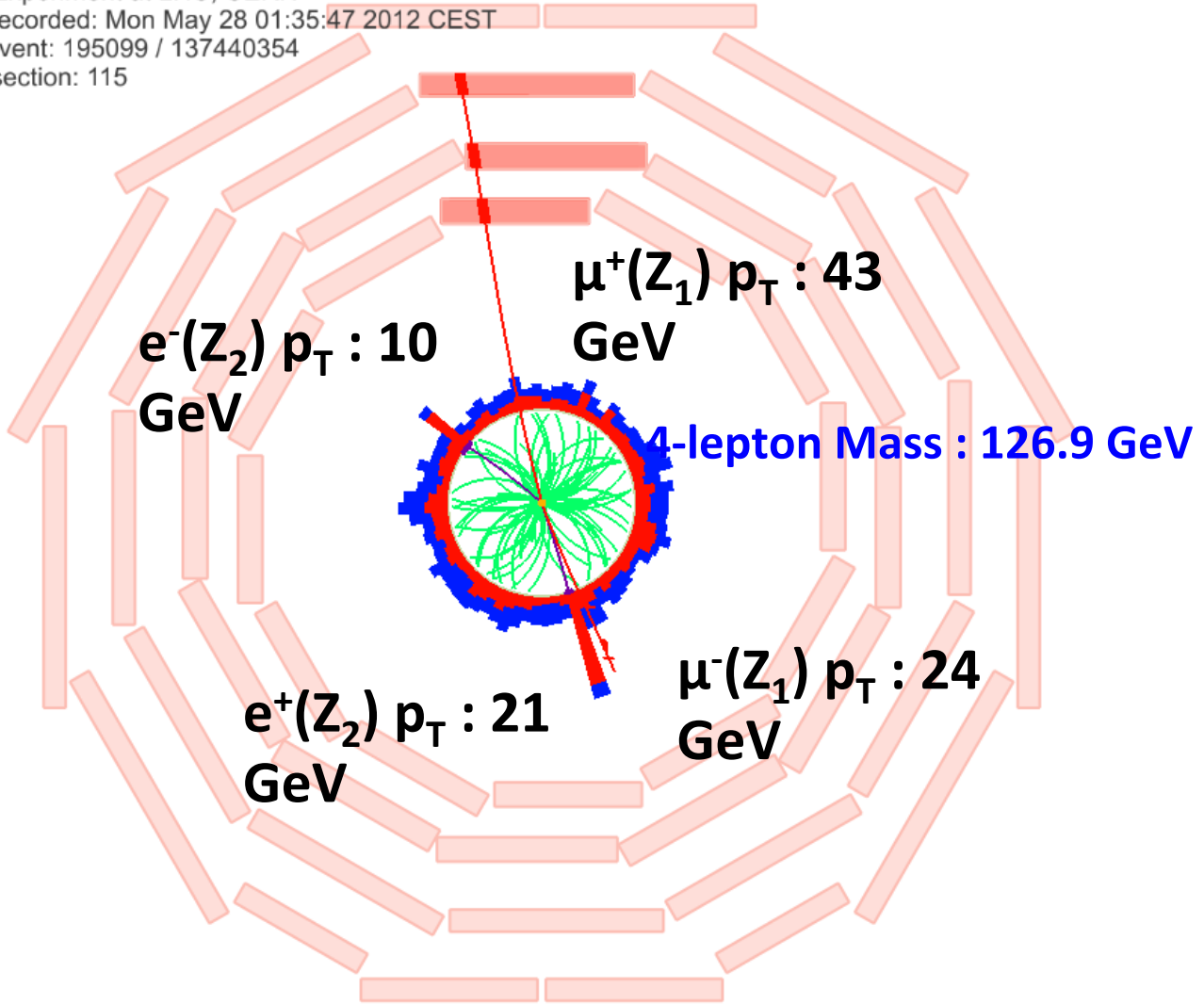
candidate ZZ event with two electrons and two muons



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

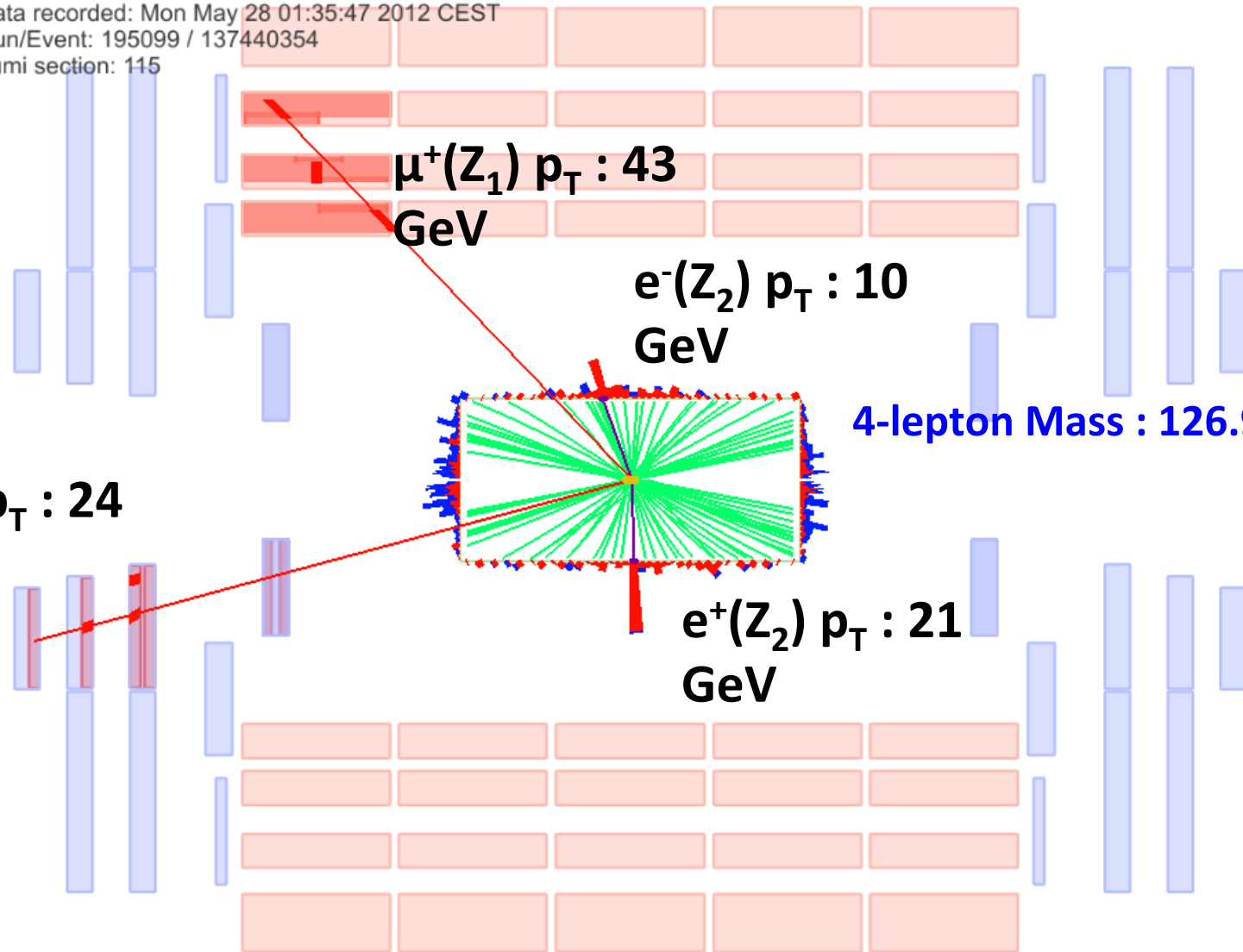
$\mu^-(Z_1) p_T : 24$
GeV

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

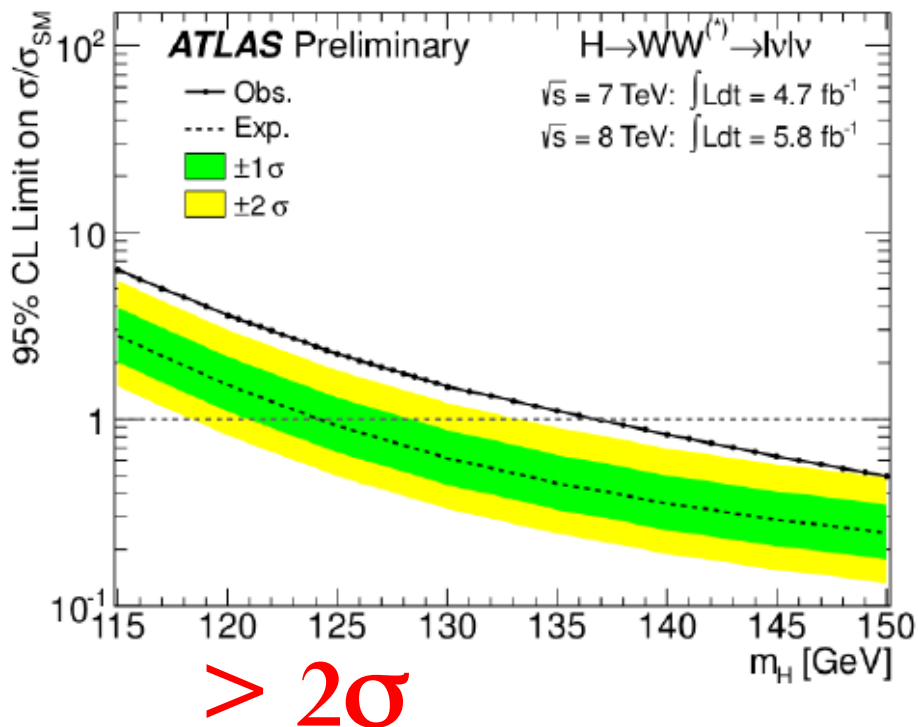
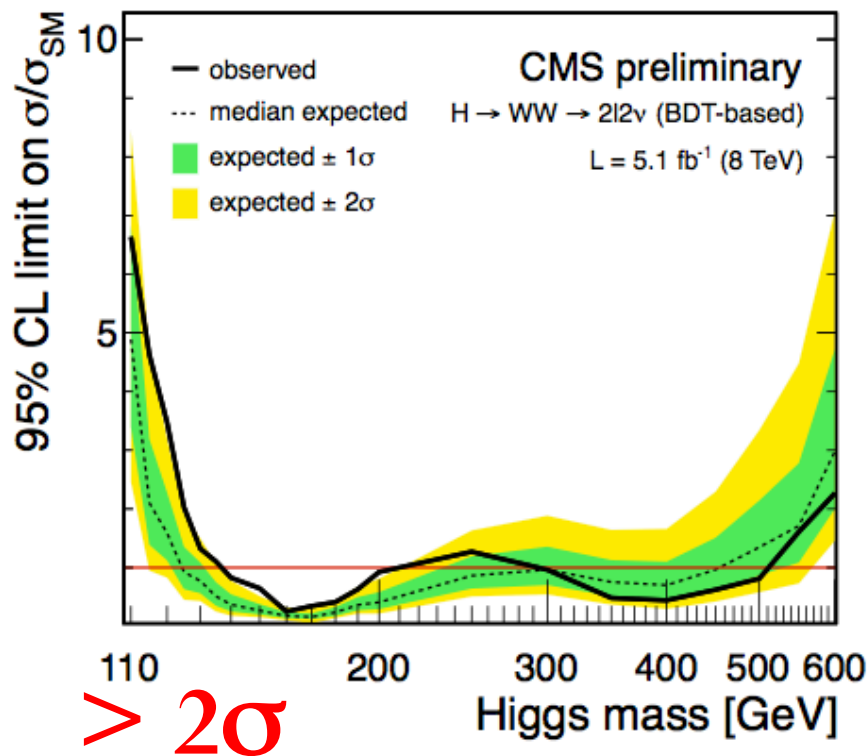
$e^-(Z_2) p_T : 10$
GeV

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

4-lepton Mass : 126.9 GeV



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

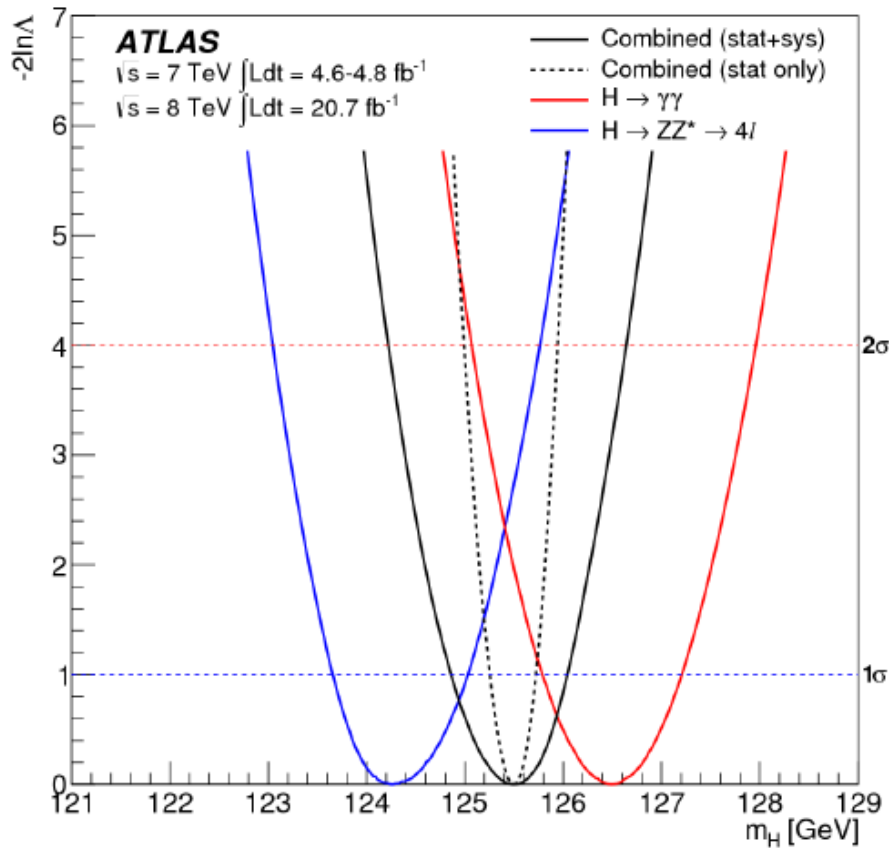


Un eccesso di eventi rispetto a quelli previsti dal fondo, anche se di soli "2 σ " (e quindi statisticamente poco significativi), può contribuire a rafforzare il significato statistico dei segnali misurati in altri canali.

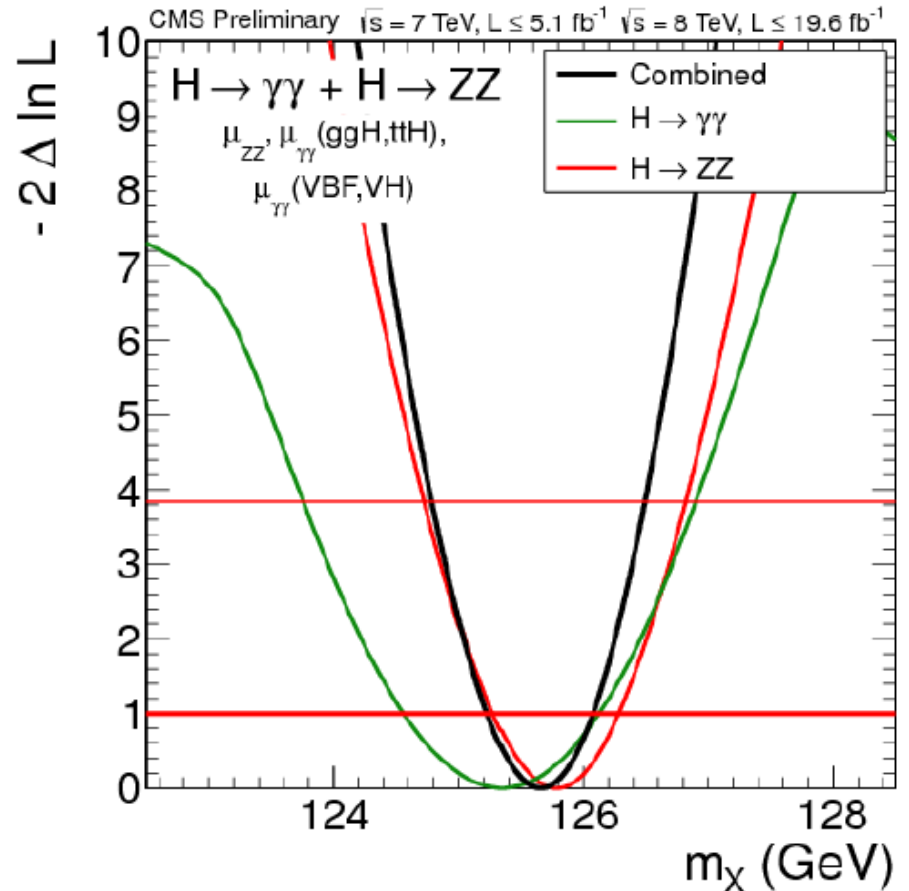
Higgs Mass measurement

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

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



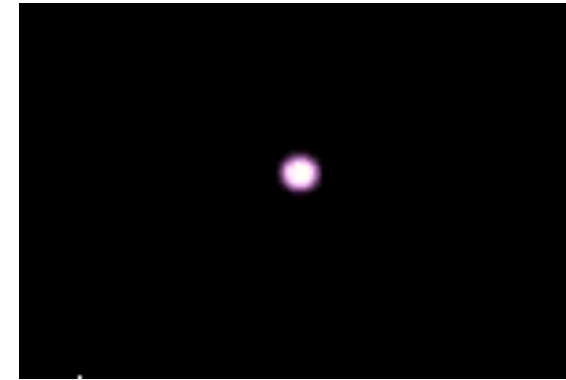
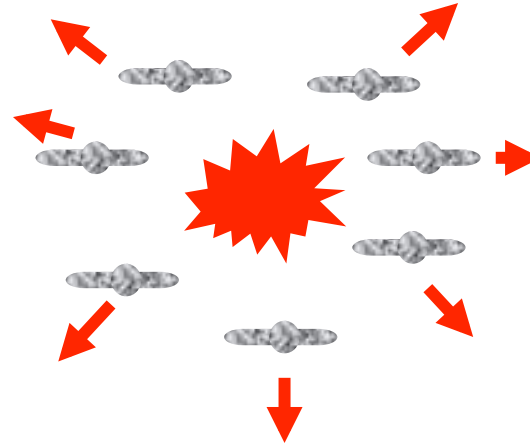
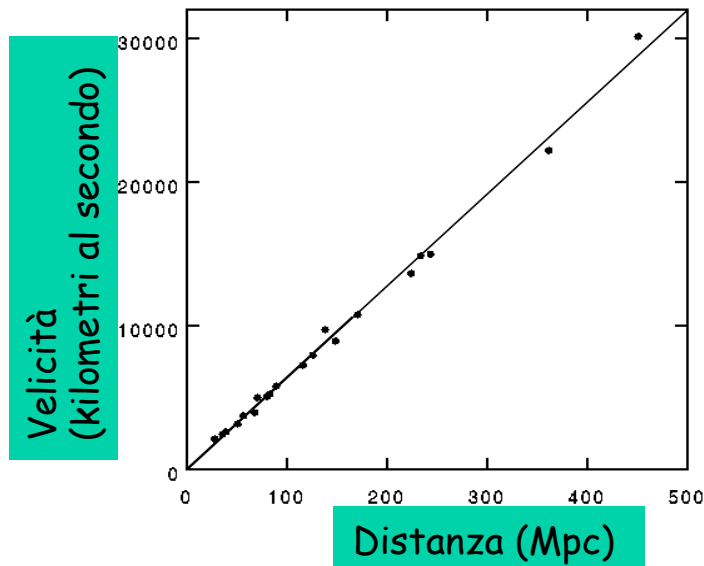
$m_H = 125.5 \pm 0.2_{\text{stat}} \pm 0.5^{+0.5}_{-0.6 \text{ sys}} \text{ GeV}$



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

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!**

Il Modello Standard

	Fermioni			Bosoni	
Quarks	u up	c charm	t top	g gluone	Meidatori di Forze
	d down	s strange	b bottom	γ fotone	
	ν_e e-neutrino	ν_μ μ -neutrino	ν_τ τ -neutrino	W bosone	
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tau	Z bosone	Bosone di Higgs
	I Famiglie di materia	II	III		

esistono in natura, oltre alle 4 dimensioni del nostro spazio tempo, altre dimensioni nascoste accessibili solo alla gravità ?



Camere per muoni

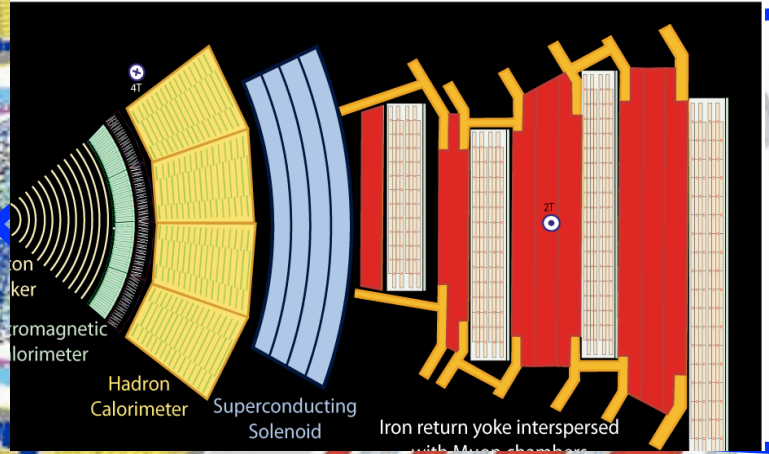
Ferro di ritorno del flusso

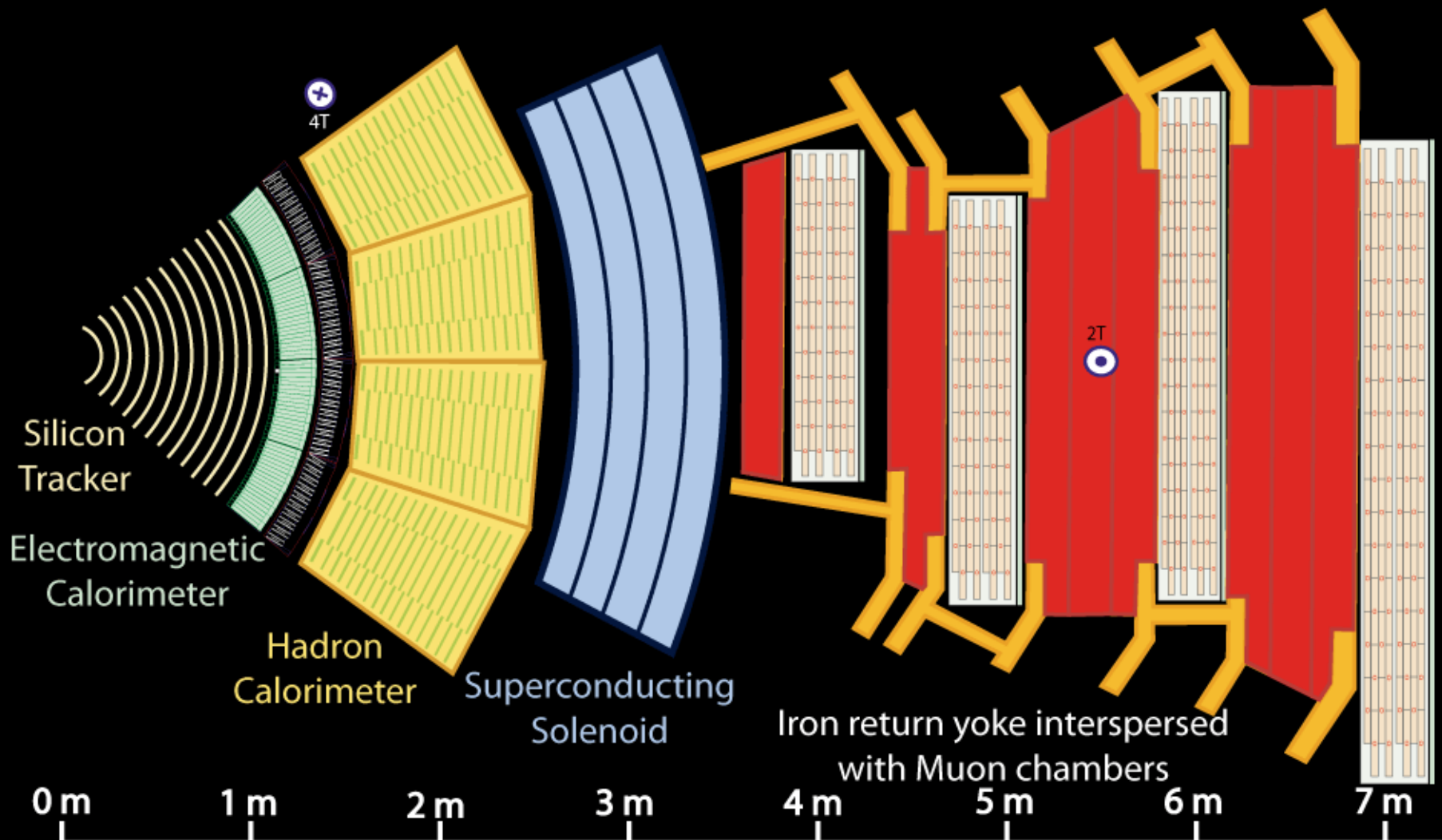
Solenioide

Calorimetro adronico

Calorimetro Elettromagnetico

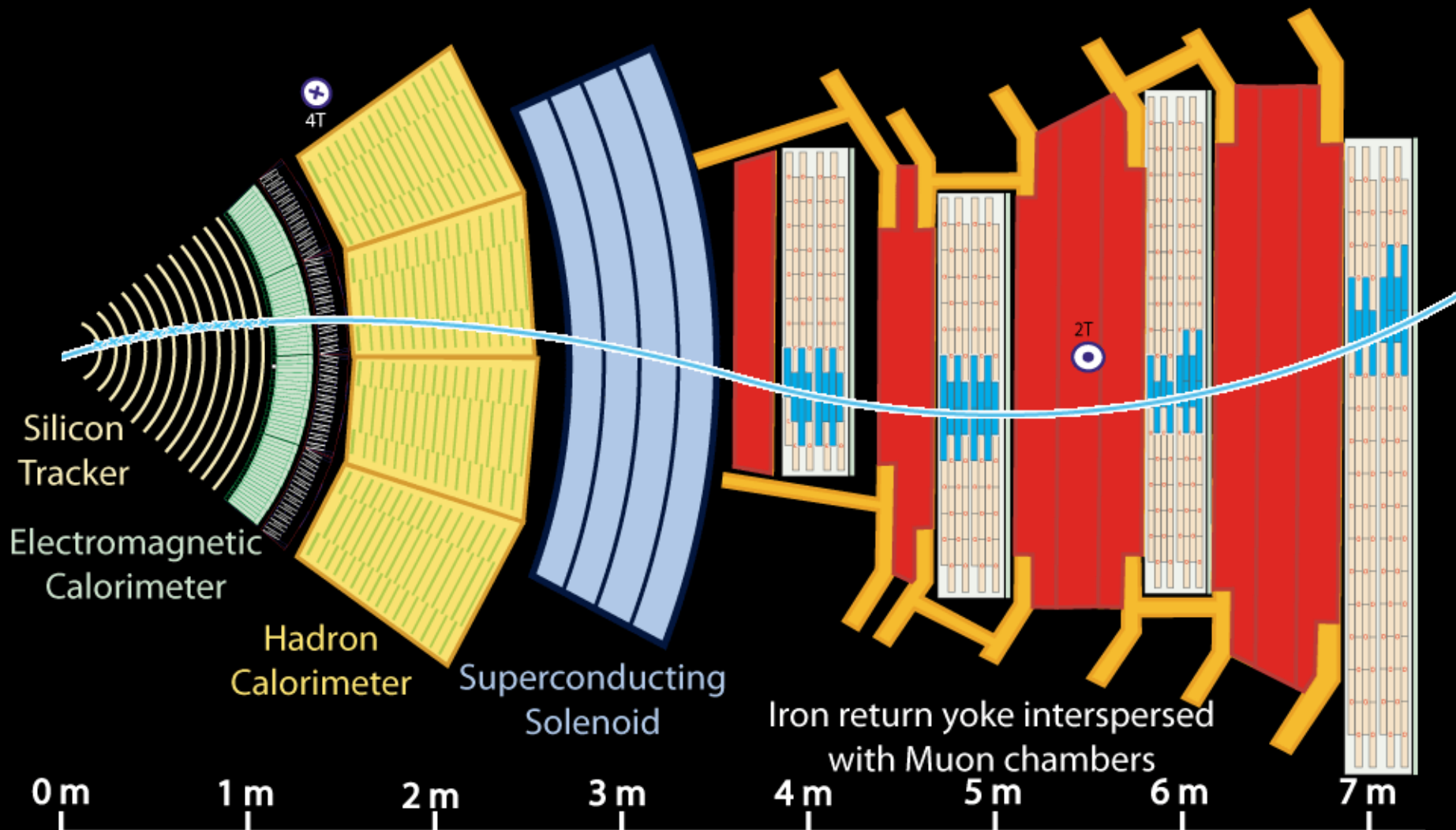
Tracciatore al silicio





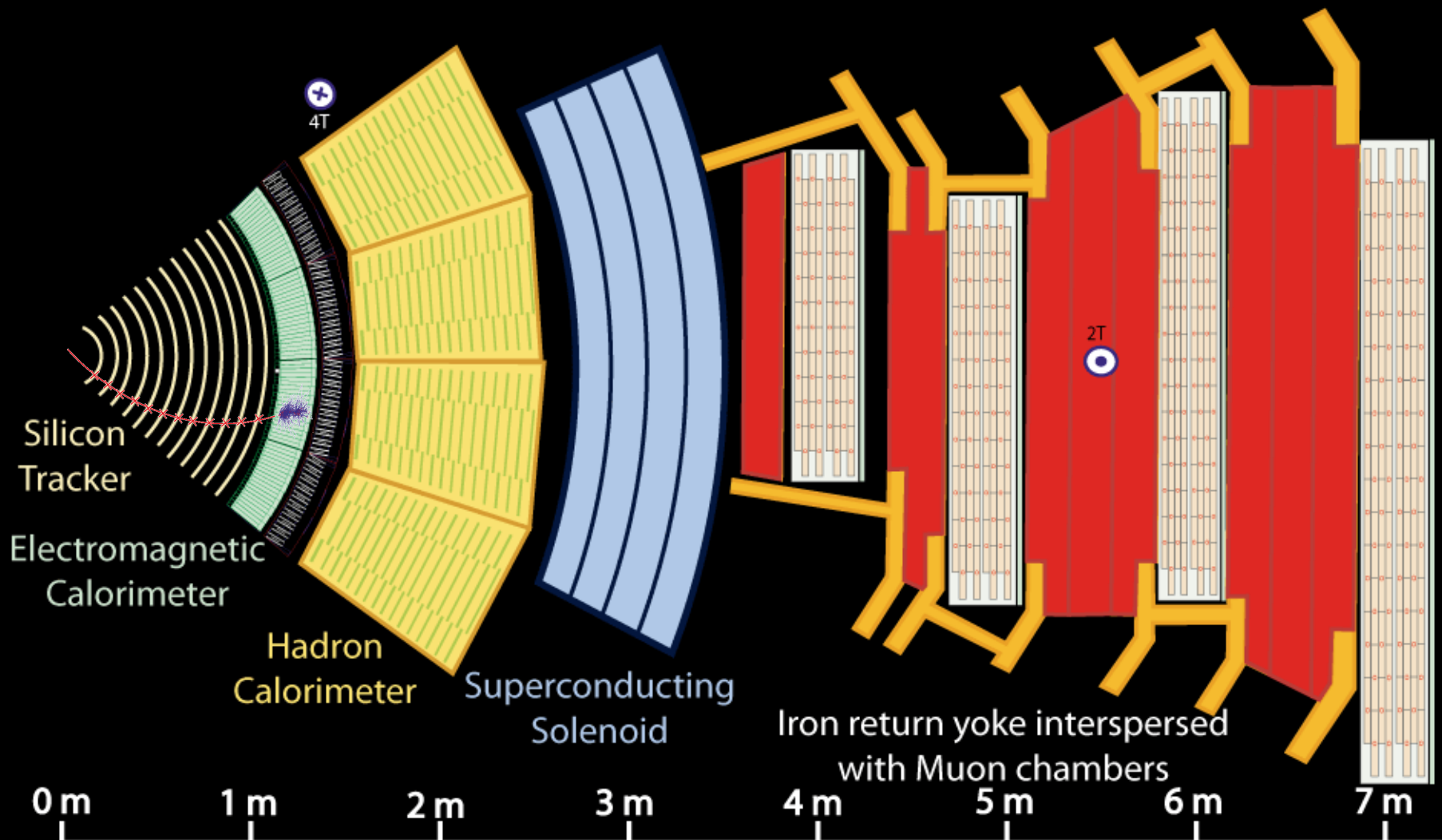
Key:

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



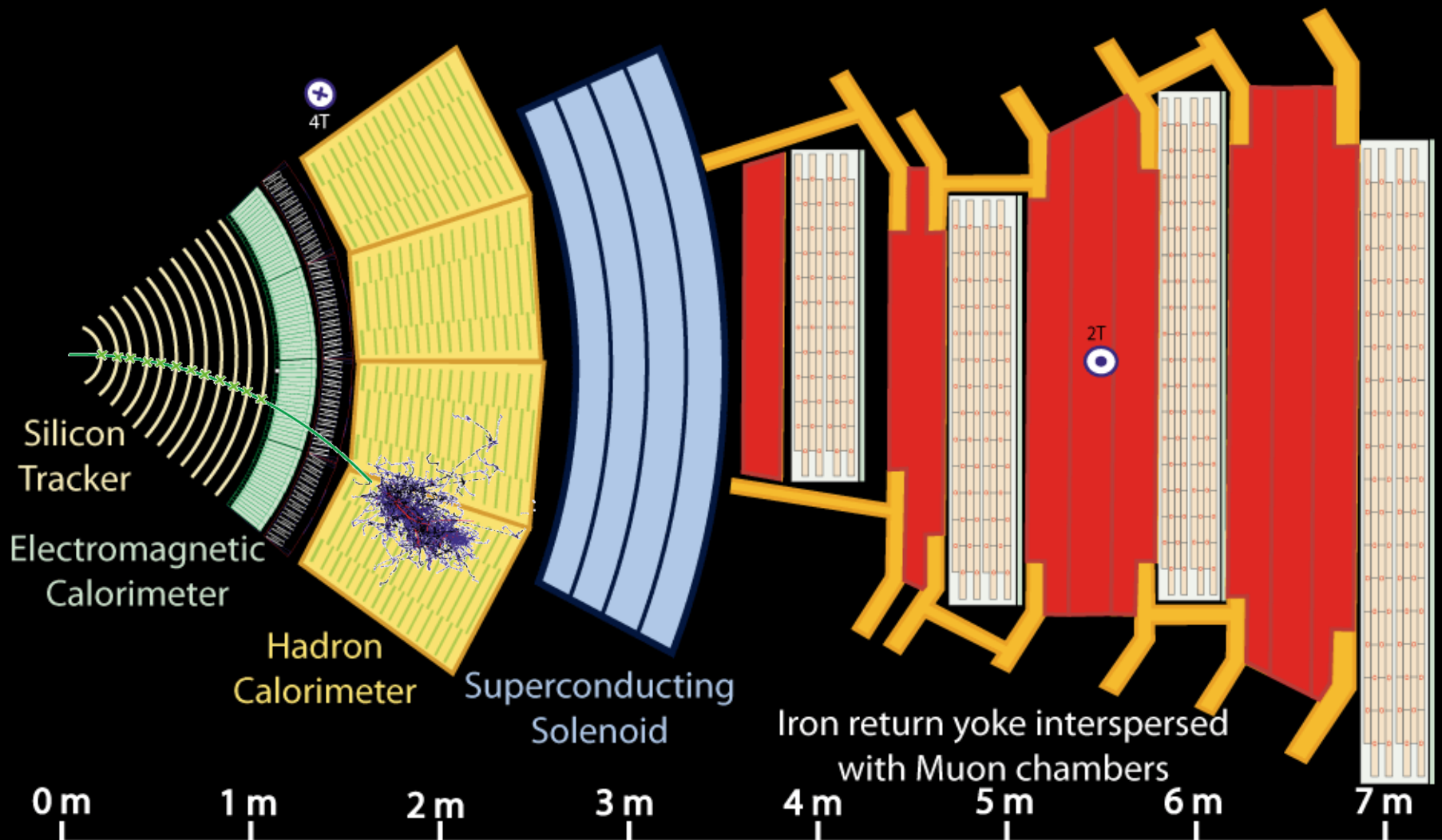
Key:

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



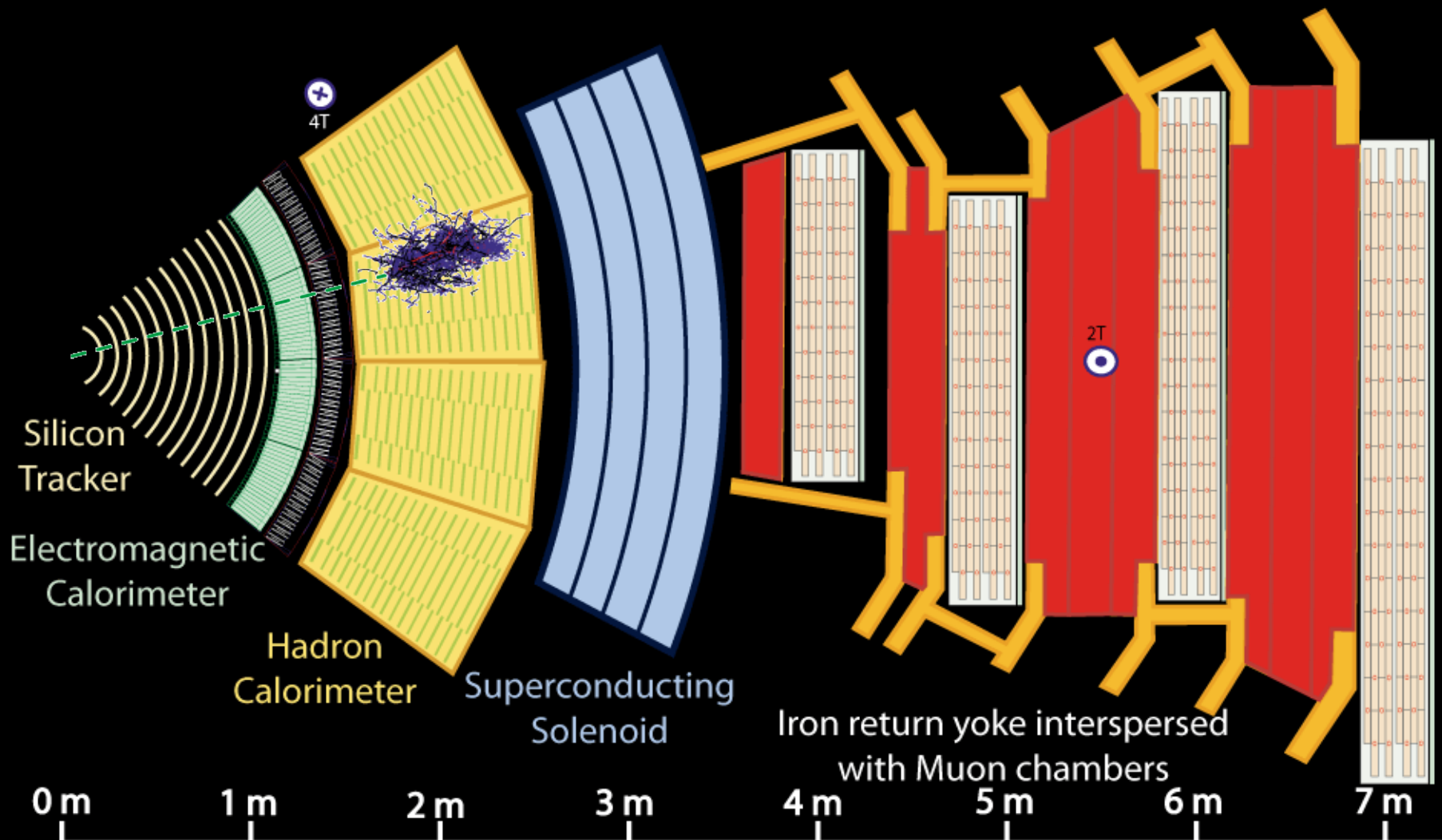
Key:

- 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:

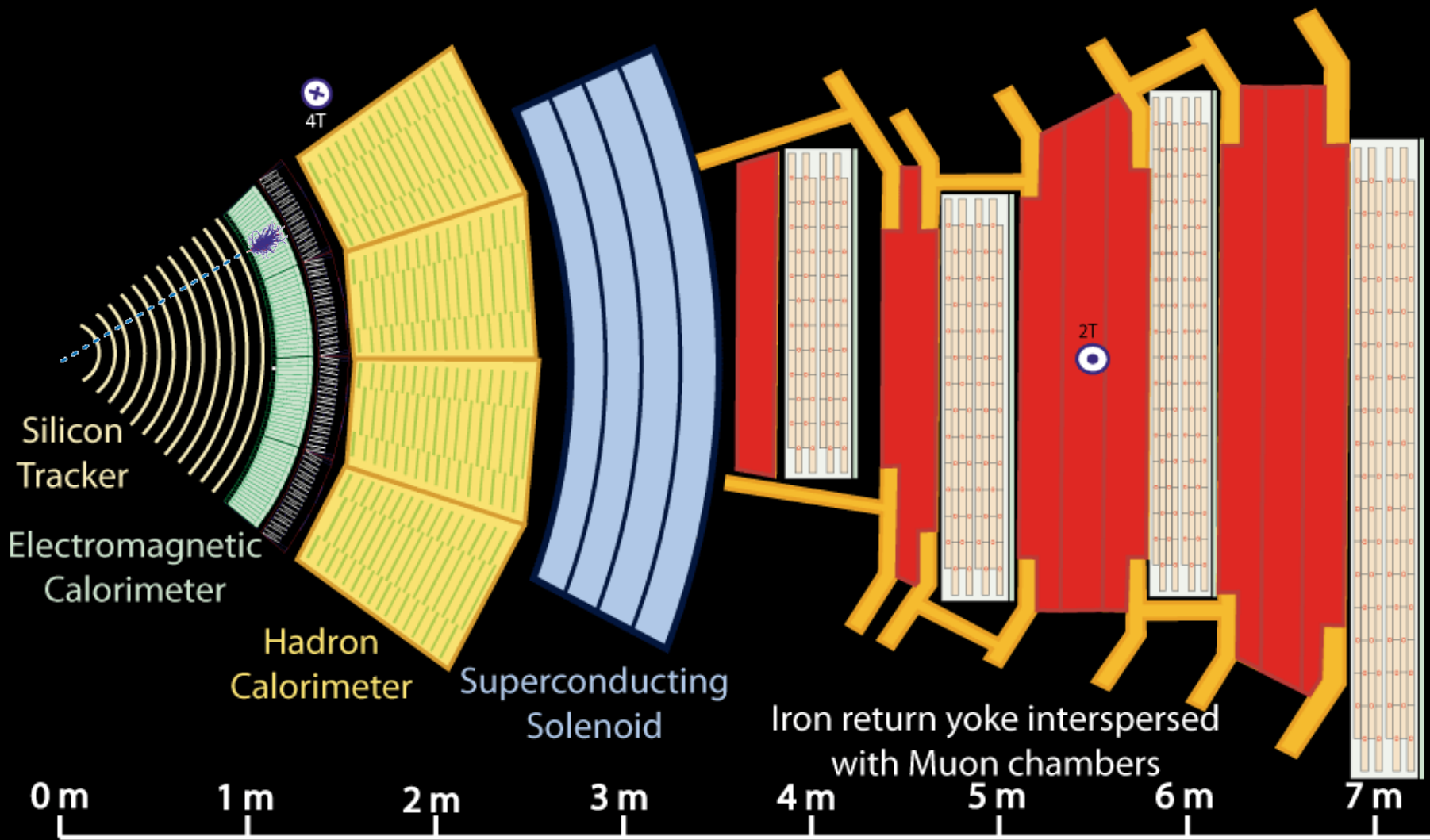
— Muon

— Electron

— Charged Hadron (e.g. Pion)

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

- - - Photon

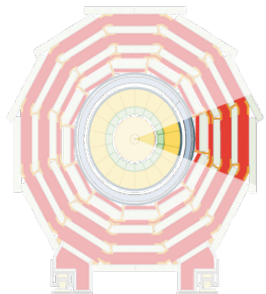


Key:

- 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

Solenoido superconduttore

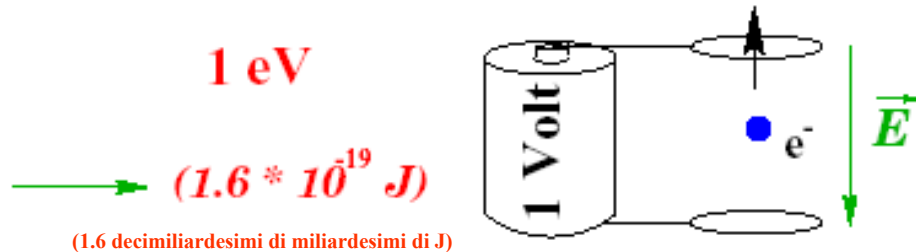
Ferro
Camere per muoni

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 MeV

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

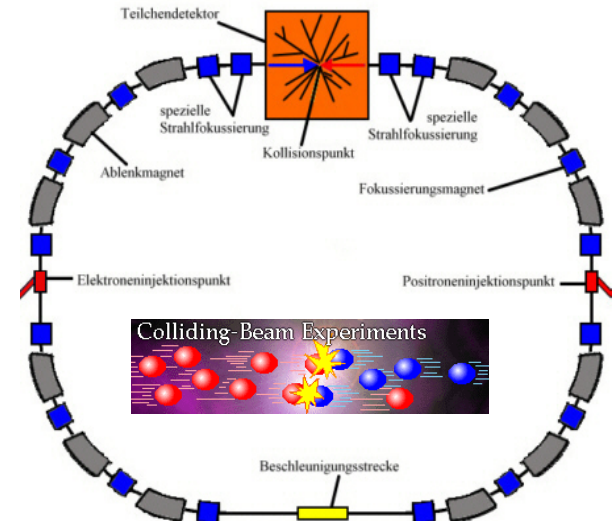
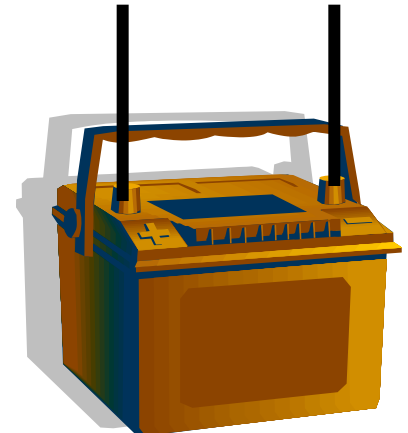
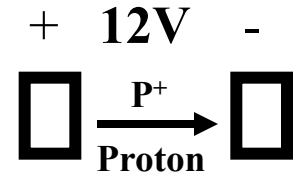
$$E = q \cdot \Delta V = 1 \cdot 12 = 12 \text{ eV}$$

Abbiamo visto che

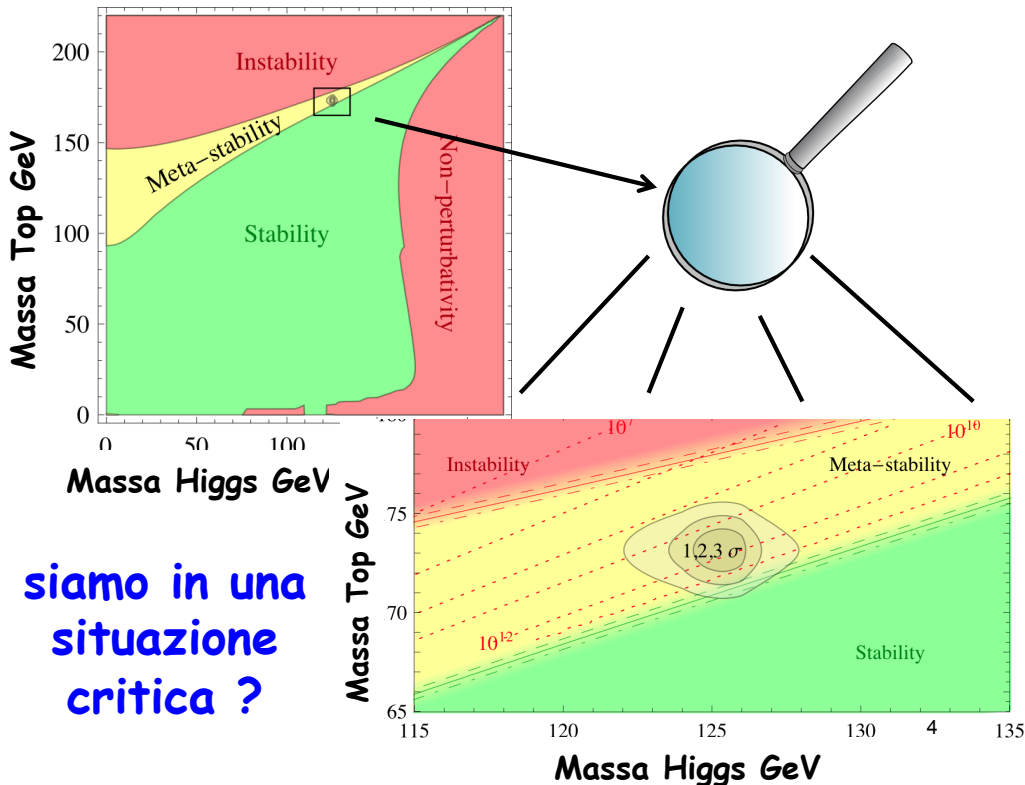
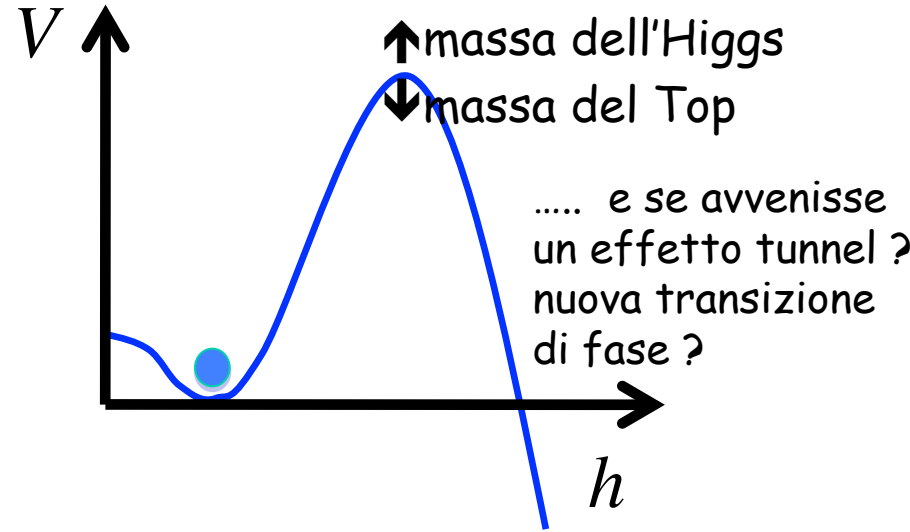
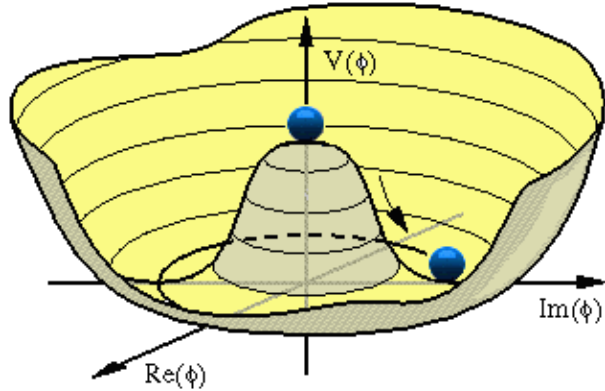
1 TeV = 10^{12} eV = mille miliardi di electron volts

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



$M_H \approx 125/126$ GeV: Vuoto metastabile ?

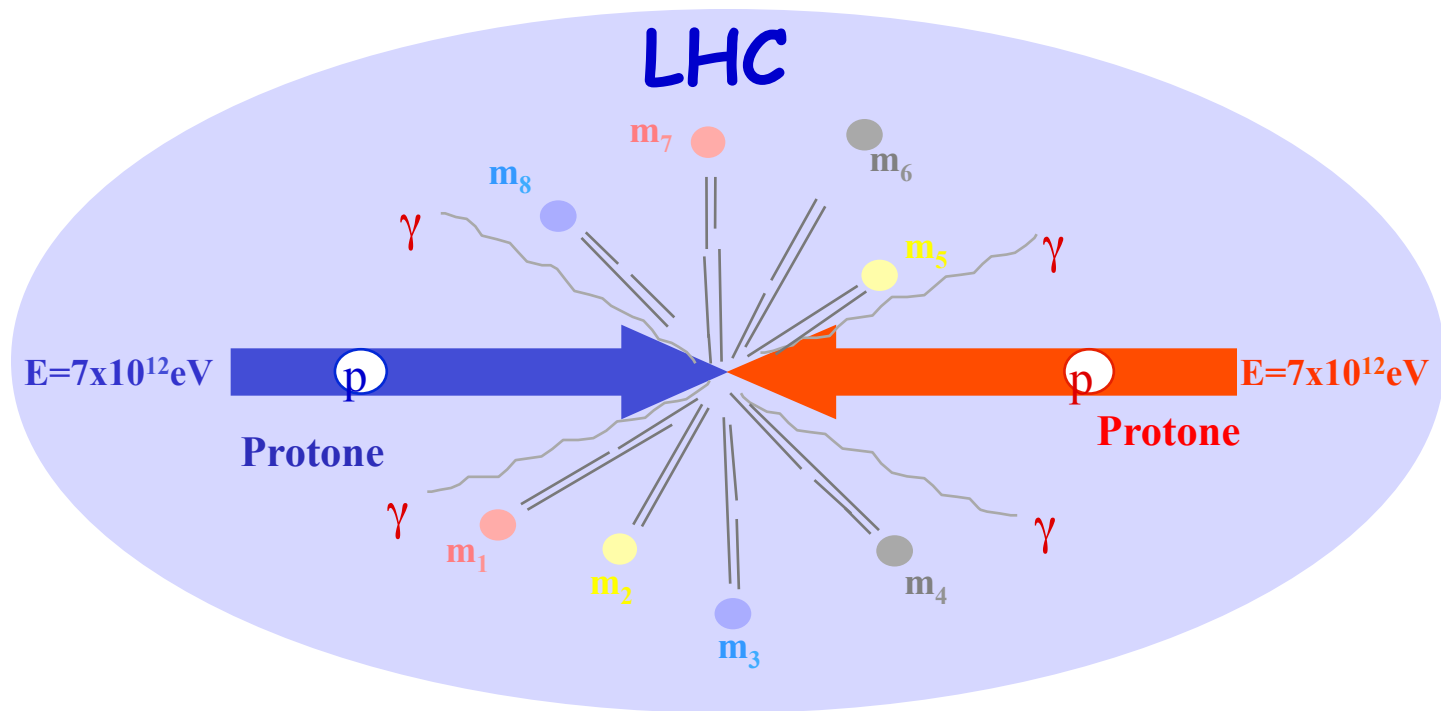


siamo in una situazione critica ?

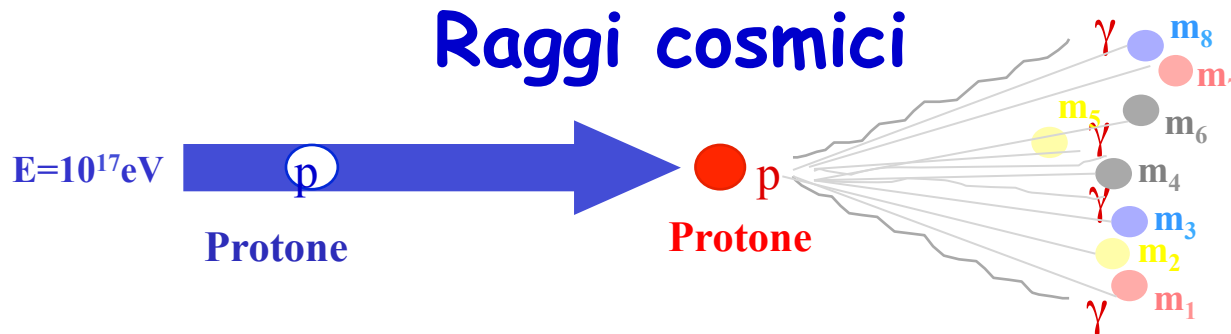


Slide da G. Giudice

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



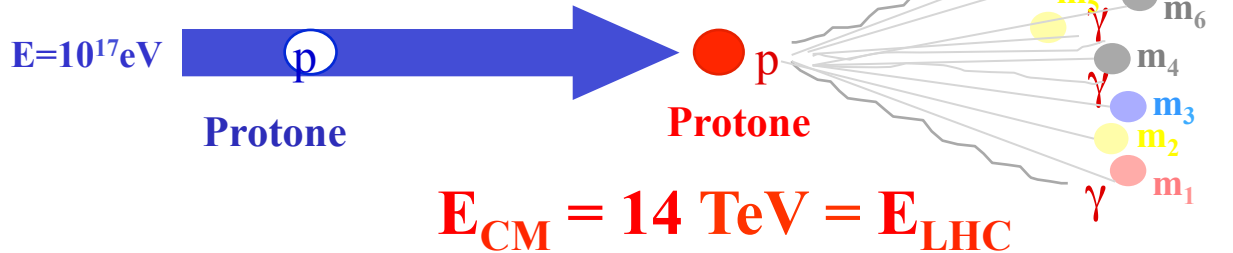
$E_{\text{CM}} = 14 \text{ TeV}$



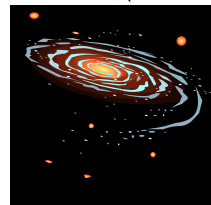
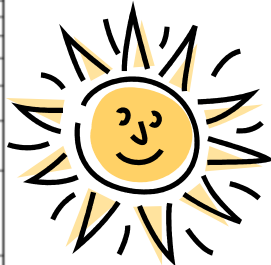
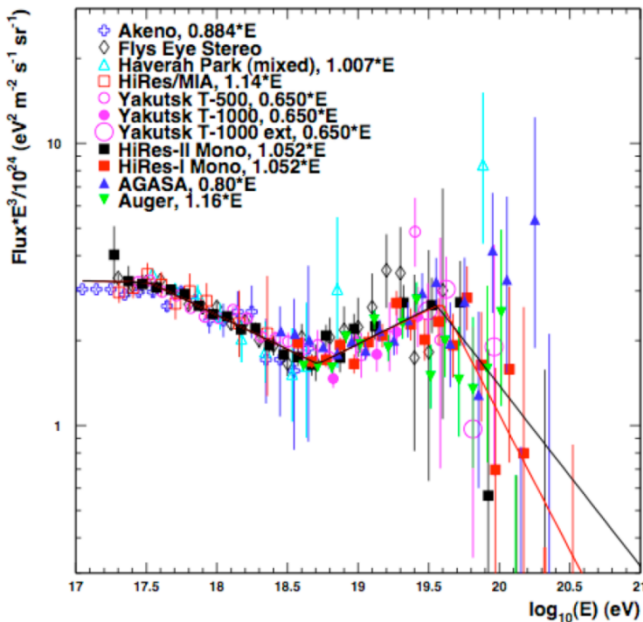
Nelle due collisioni vengono prodotti gli stessi tipi di eventi

Comitato LSAG

(LHC Safety Assessment Group)



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



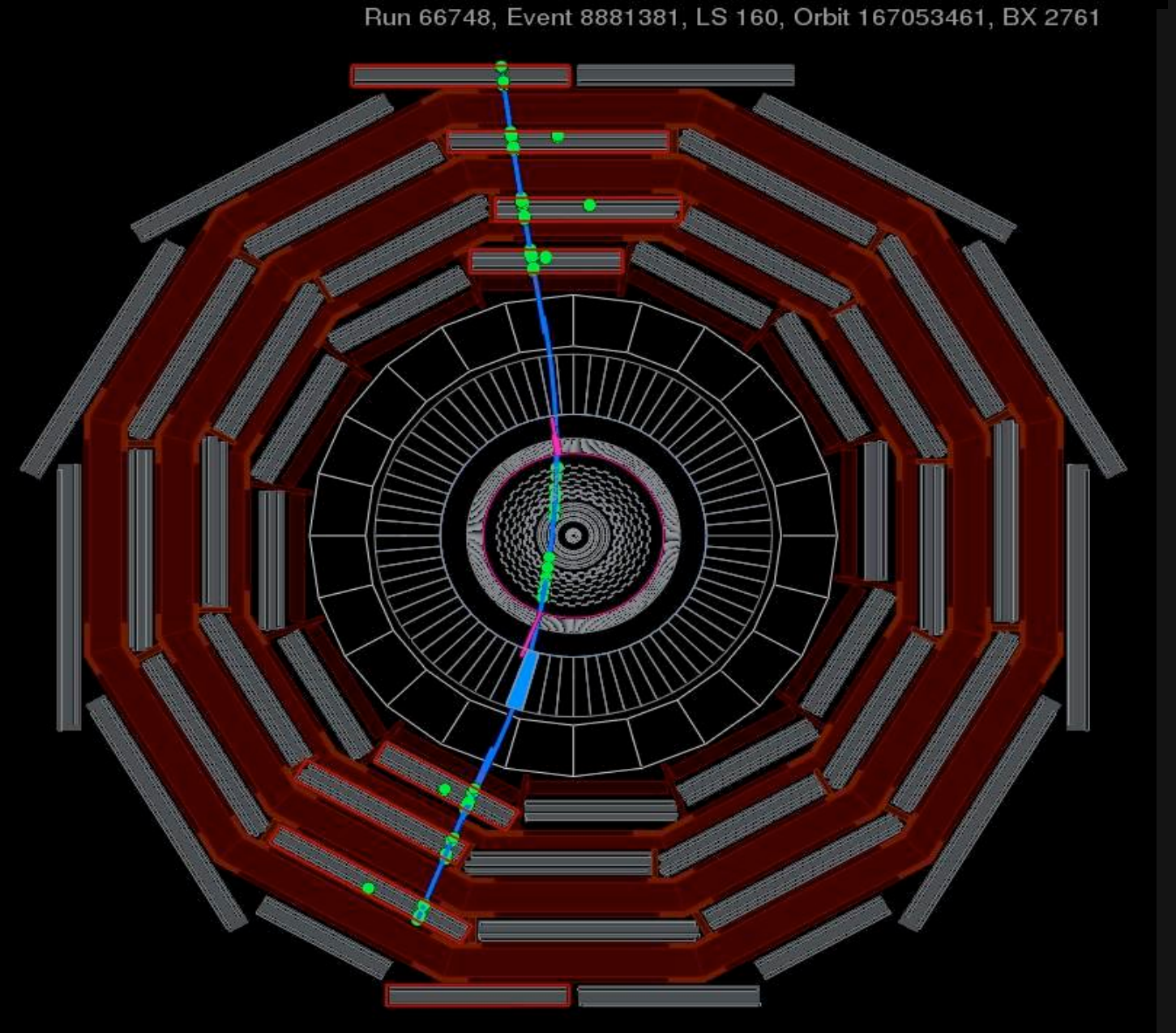
1. Superficie della Terra è circa $5 \times 10^{18} \text{ cm}^2$
2. La Terra esiste da 4.5 miliardi di anni quindi più di 3×10^{22} raggi cosmici con $E \geq 10^{17} \text{ eV}$ hanno colpito la Terra e quindi **sono già stati fatti più di centomila esperimenti come LHC**

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!!**

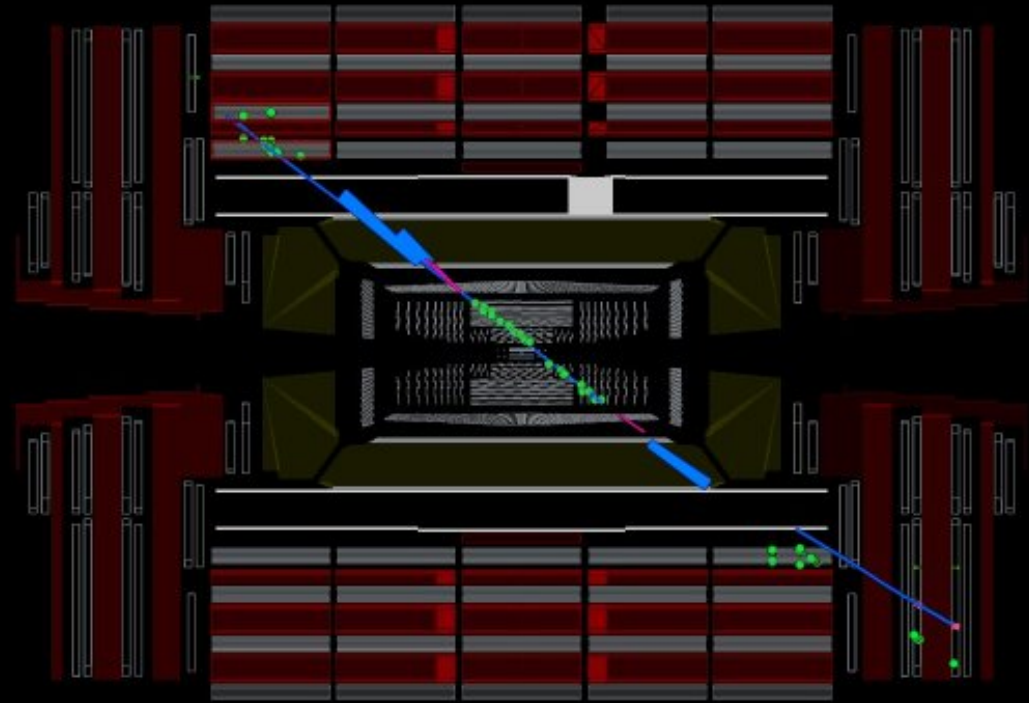
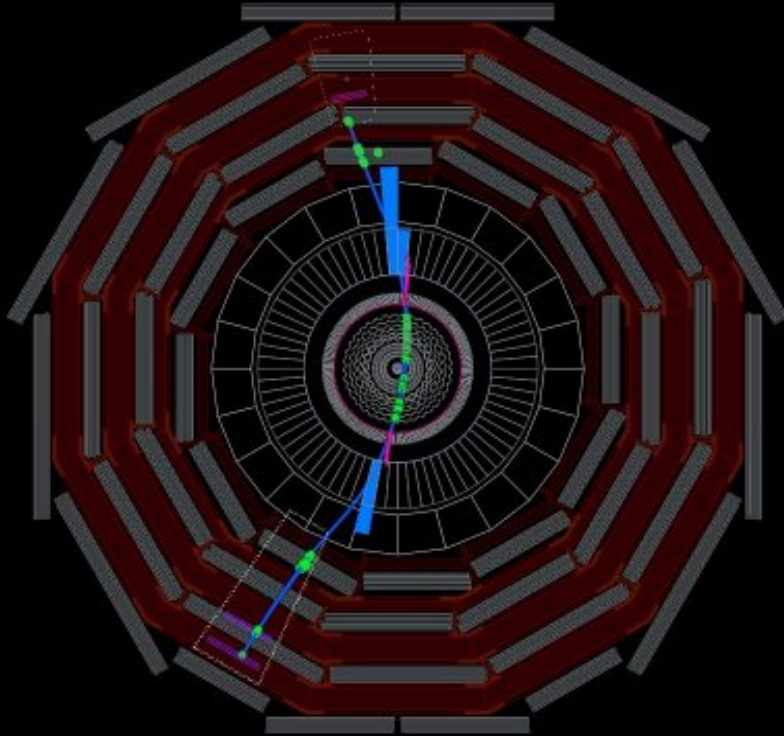
**e la Terra, il Sole e le Stelle continuano ad esistere da miliardi di anni !
LHC non produrrà eventi pericolosi né per l'umanità né per la terra...**

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



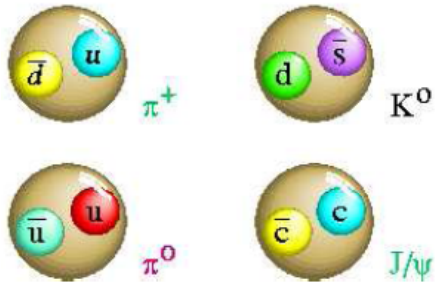
Raggio cosmico (μ^+) come ricostruito da CMS nelle due viste trasversale e longitudinale

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

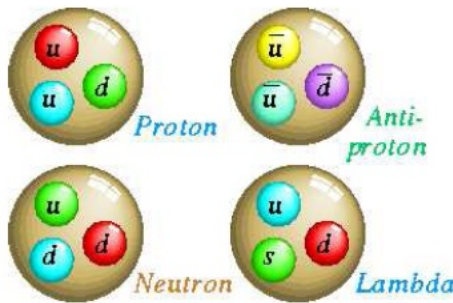


Lo zoo delle particelle

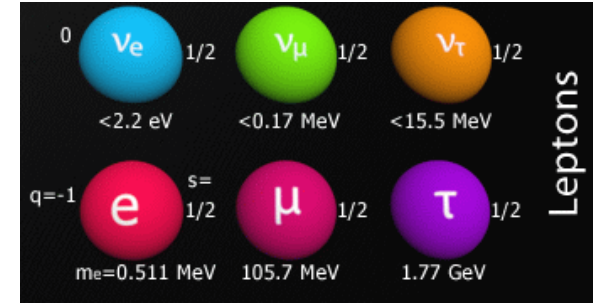
Mesoni ($q_1 q_2^{\text{bar}}$)



Barioni ($q_1 q_2 q_3$)



Leptoni



Leptons

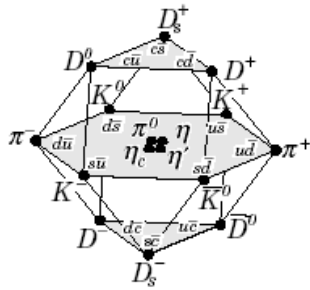
SU(4): u, d, s, c

($L=0$)

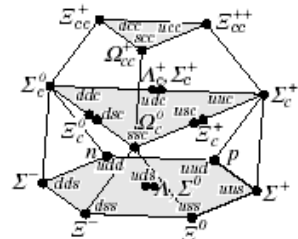
SU(4): u, d, s, c

($L=0$)

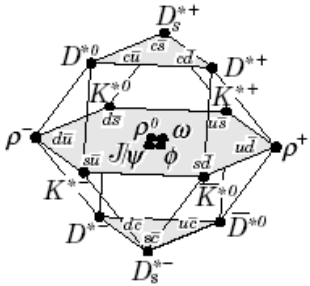
$J=0$



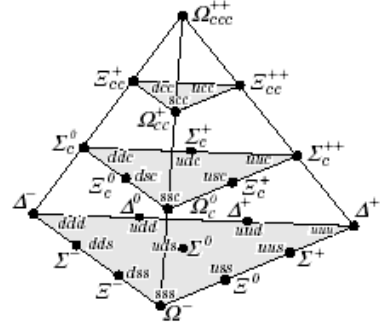
$J=1/2$



$J=1$

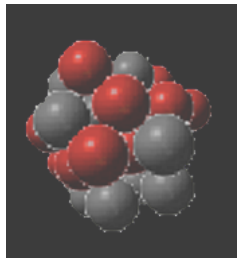


$J=3/2$



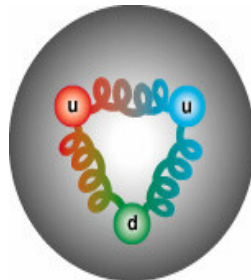
Si conoscono più di 200 particelle, la stragrande maggioranza sono instabili e decadono in tempi brevissimi, altre vivono abbastanza a lungo da poter essere rivelate direttamente.

Le interazioni fondamentali tra particelle



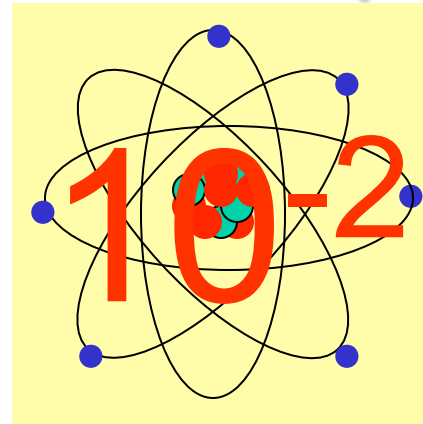
nucleo

1



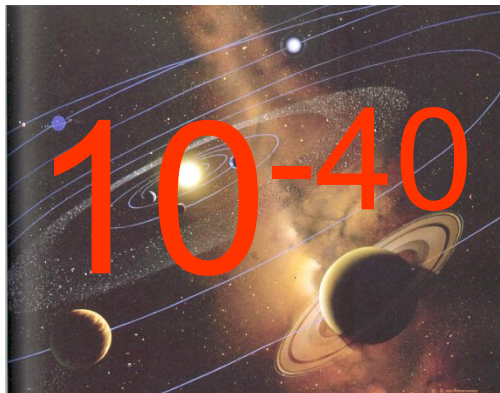
protone

Forza forte
g (Gluone)



atomo

Forza elettromagnetica
 γ (Fotone)



Forza gravitazionale
(Gravitone)

Radioattività Beta

nucleo

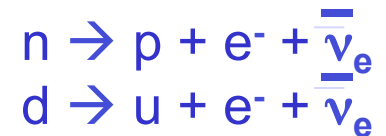


10^{-5}

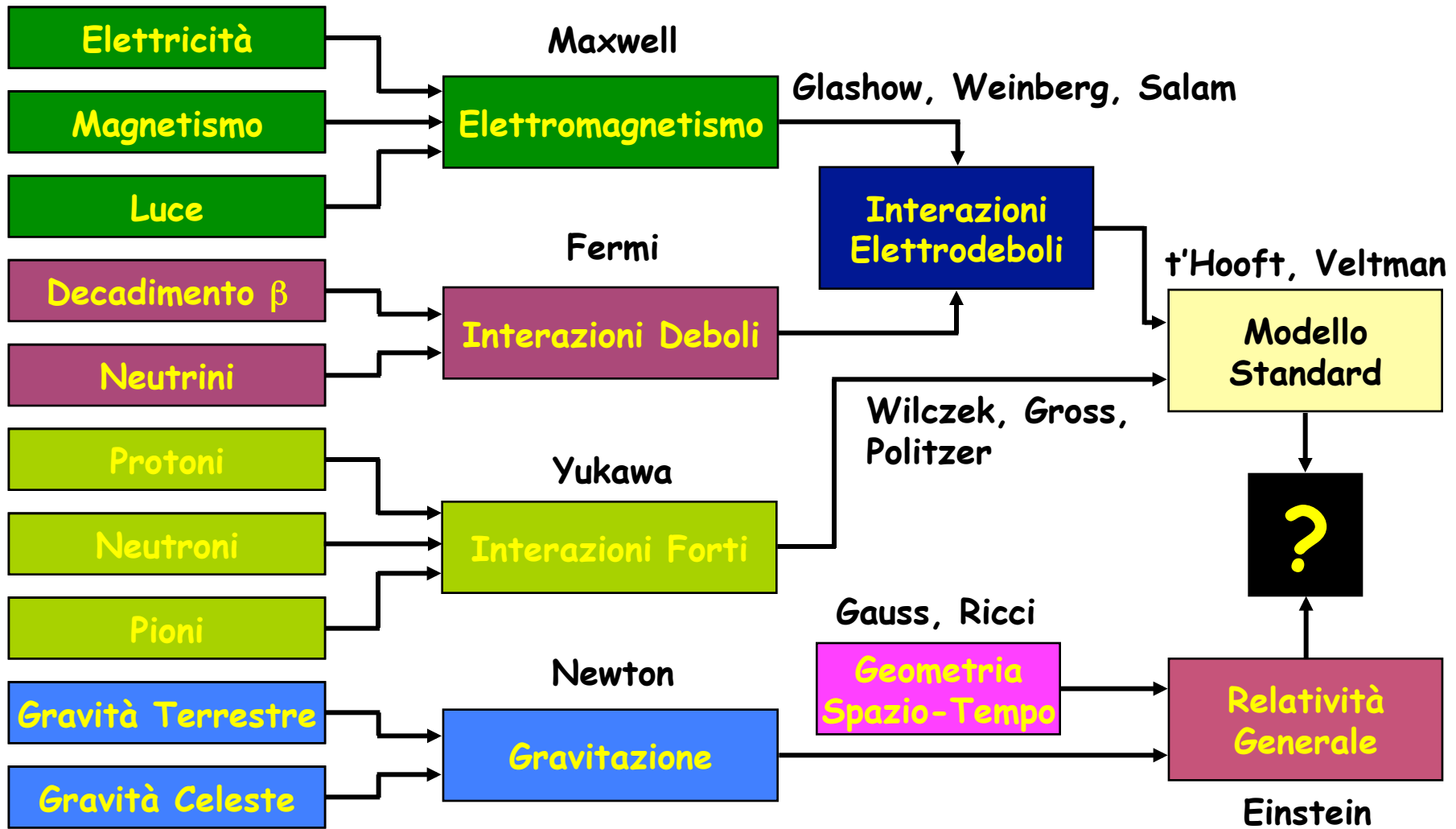
elettrone

$\bar{\nu}_e$

Forza debole
Z, W^\pm (Bosoni)



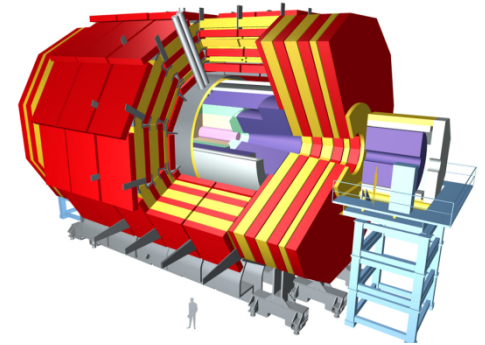
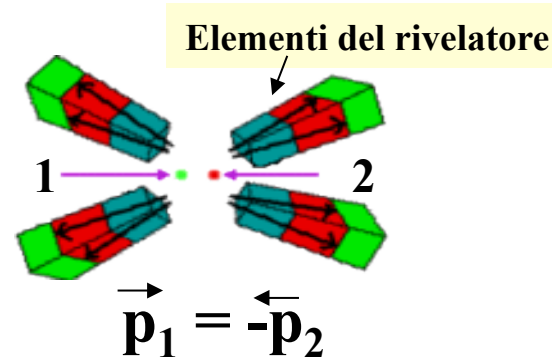
L'Unificazione delle Forze



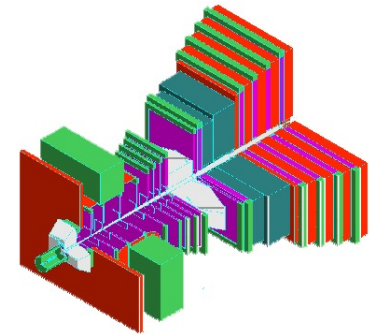
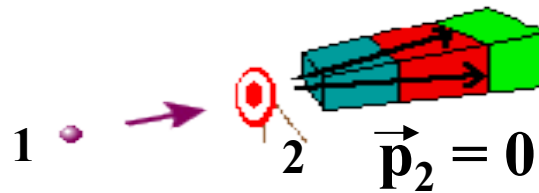
Rivelare le particelle



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



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

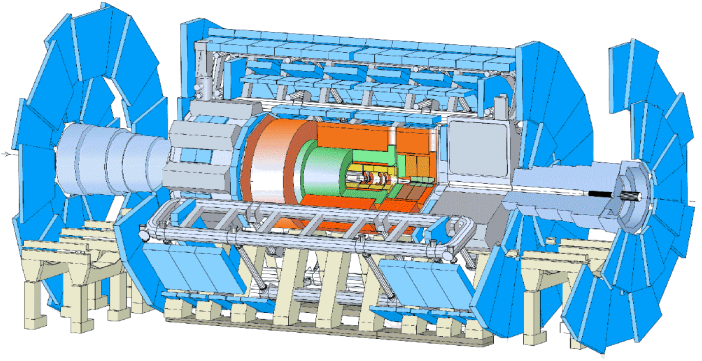


Goal : misurare tutte le particelle prodotte nello scontro

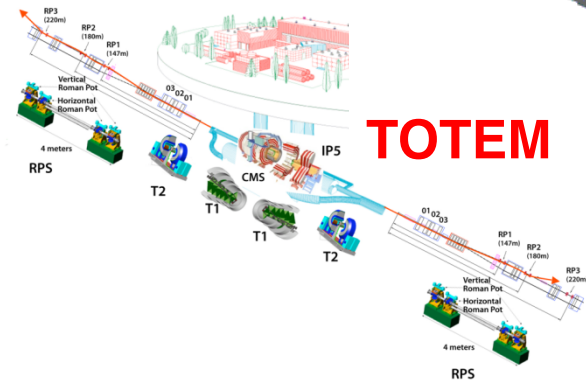
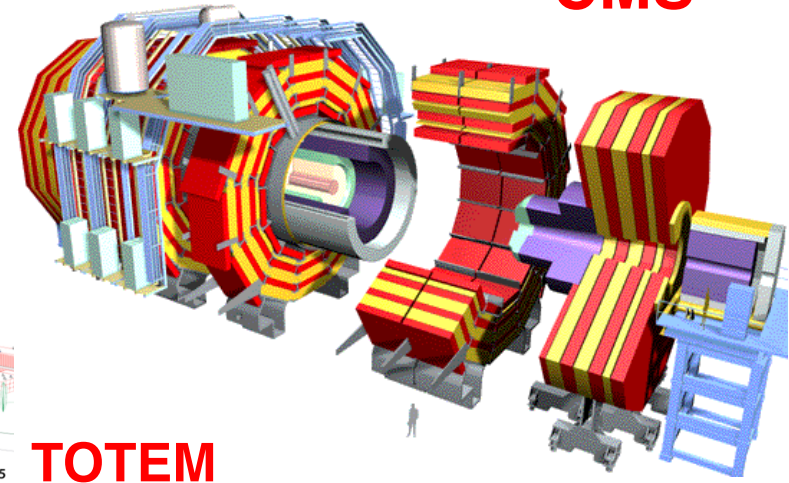
⇒ Circondare il punto di interazione con rivelatori di particelle

I Rivelatori di LHC

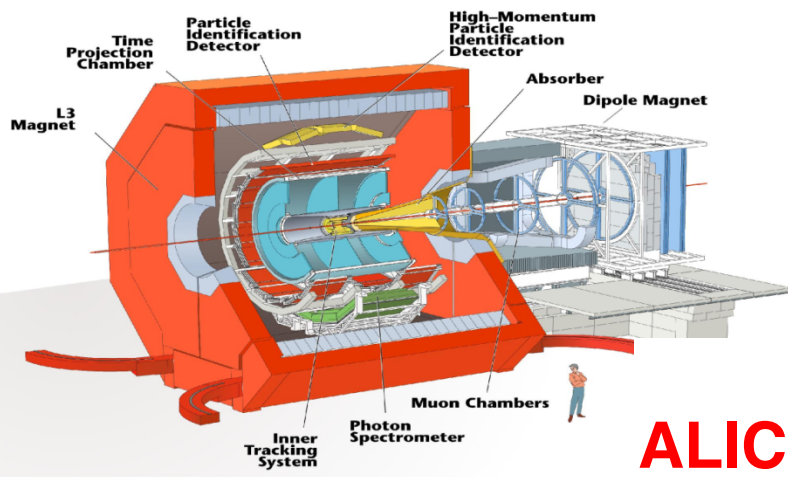
ATLAS



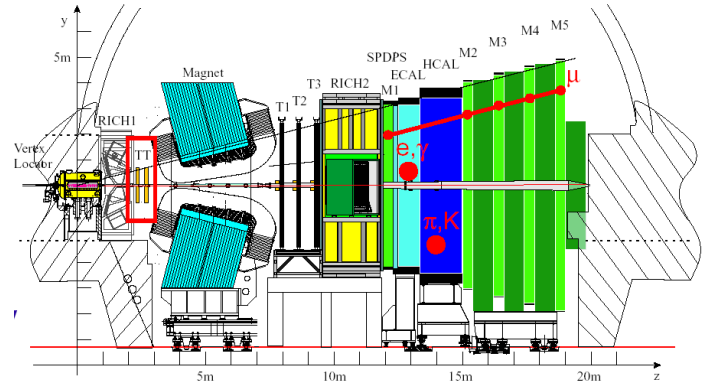
CMS



TOTEM



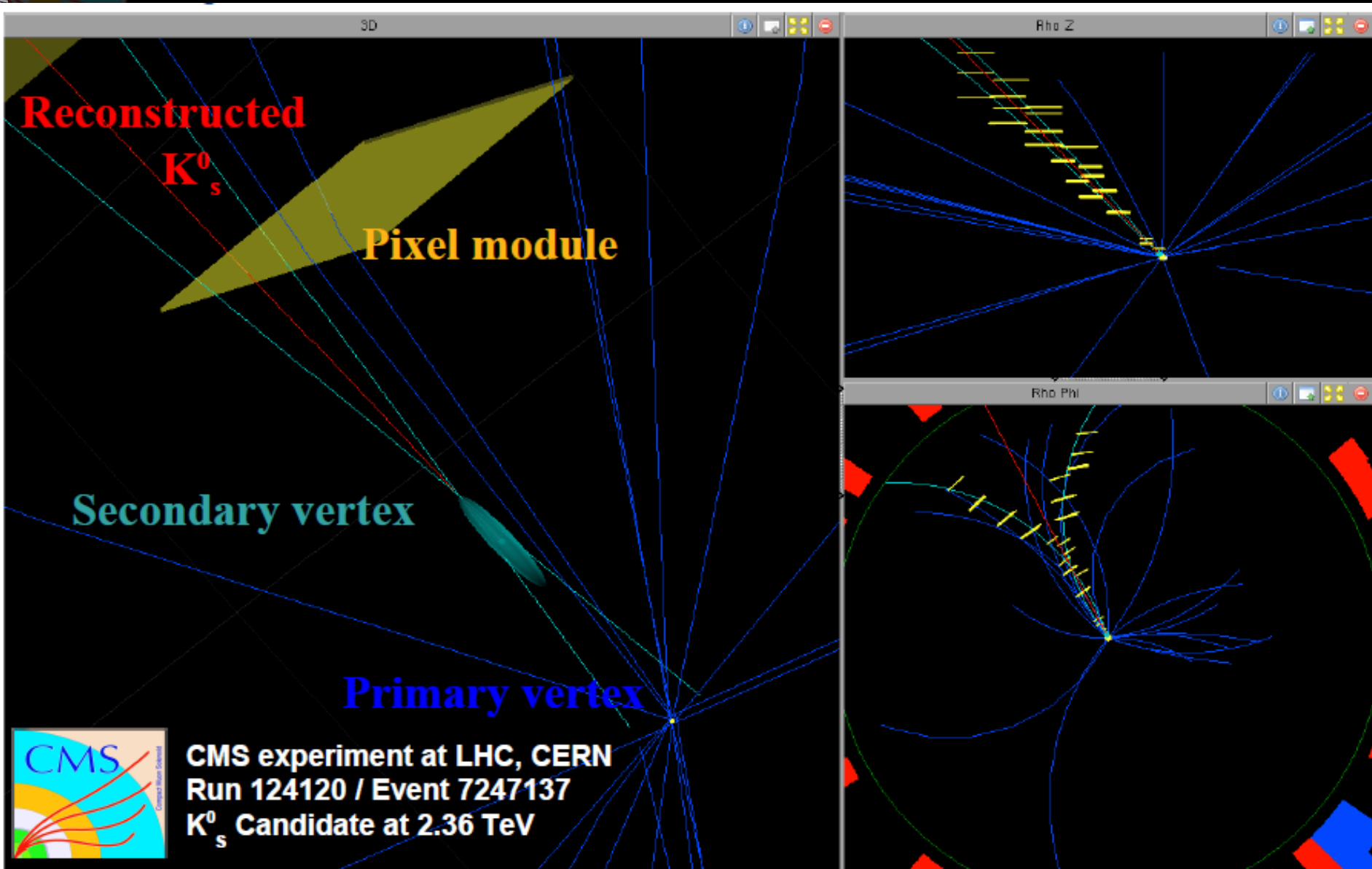
ALICE



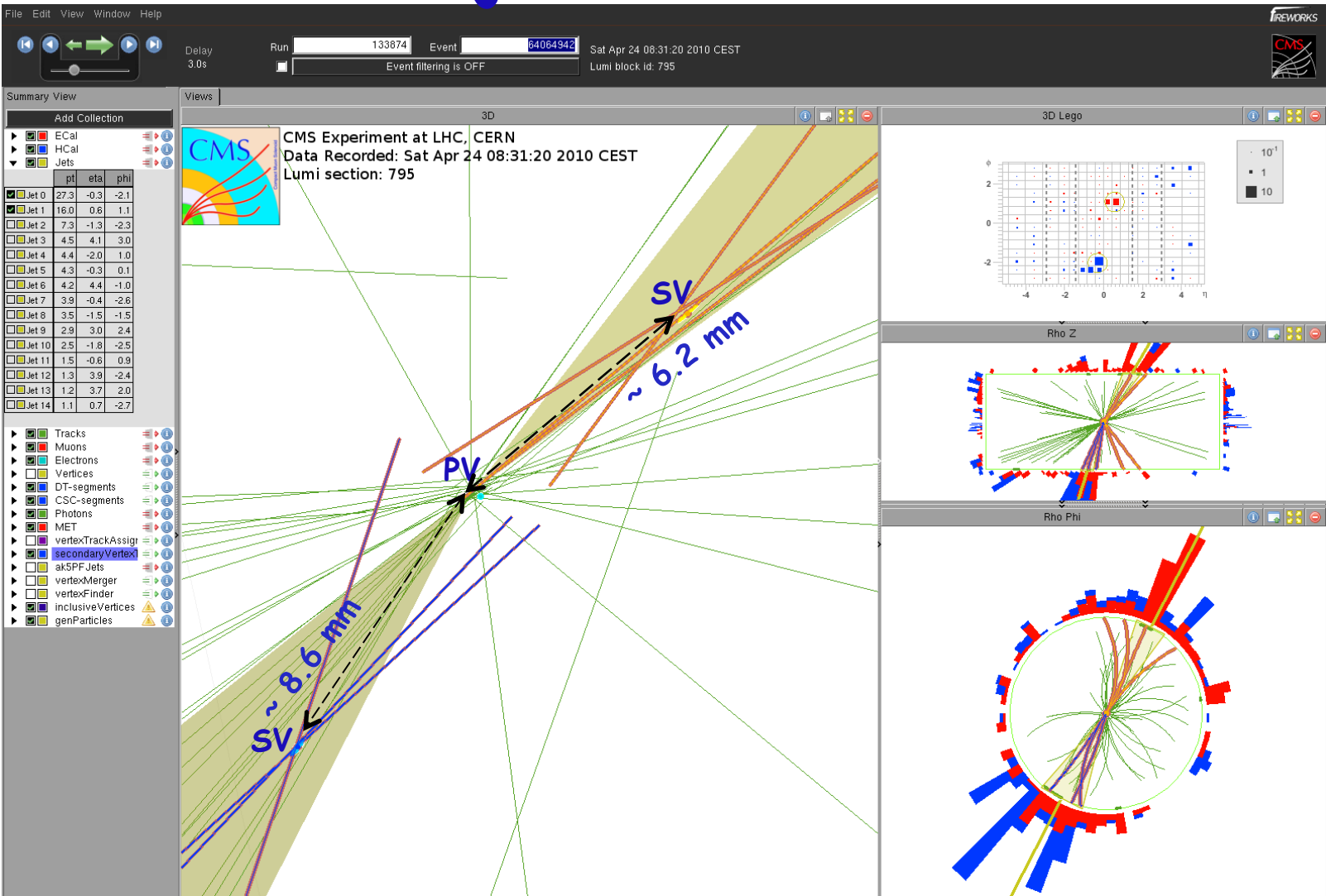
LHCb



K^0_s candidate event in CMS



double b-jet candidate



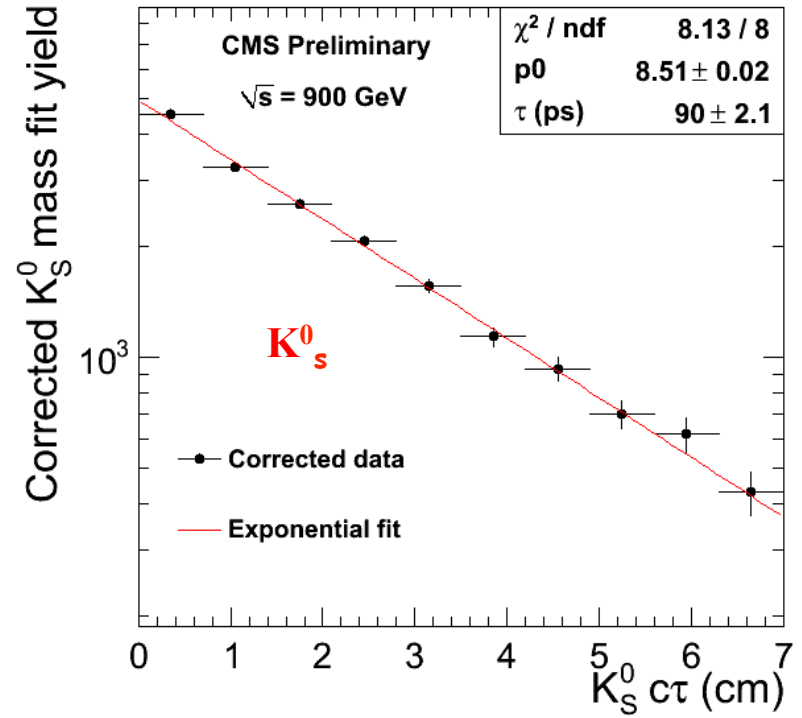
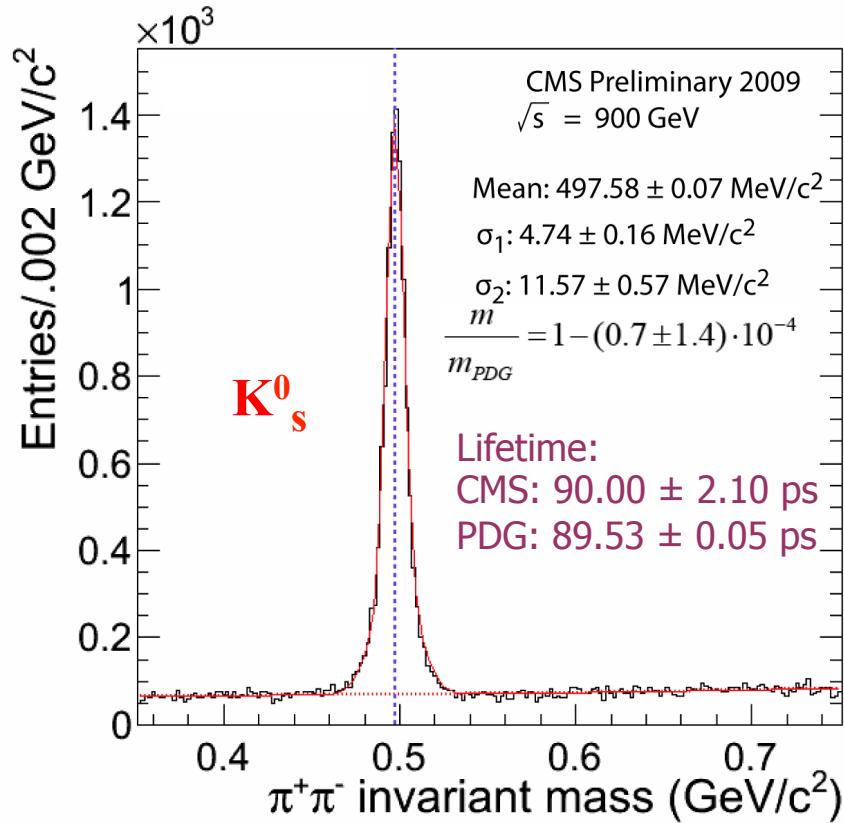
Jets: $p_T = 43.7 \text{ GeV}$ (top right) / 40.3 GeV (bottom left)

Secondary vertices

top-right: 3D flight distance (value/ significance) = $6.2 \text{ mm} / 43 m_{SV} = 2.9 \text{ GeV}$, $p_T = 25.7 \text{ GeV}$
 bottom left: 3D flight distance (value / significance) = $8.6 \text{ mm} / 55 m_{SV} = 3.1 \text{ GeV}$, $p_T = 17.2 \text{ GeV}$



Resonances @ $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$

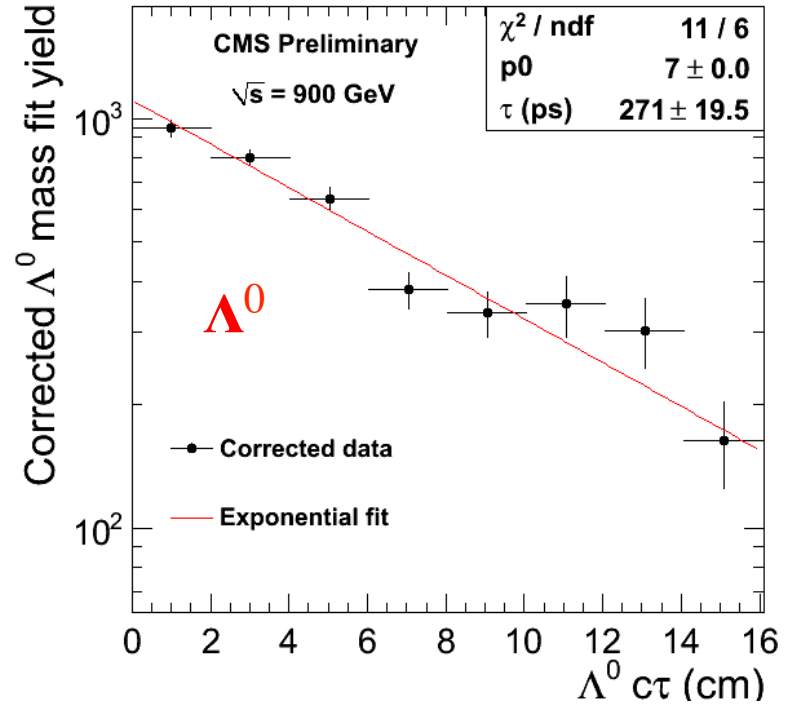
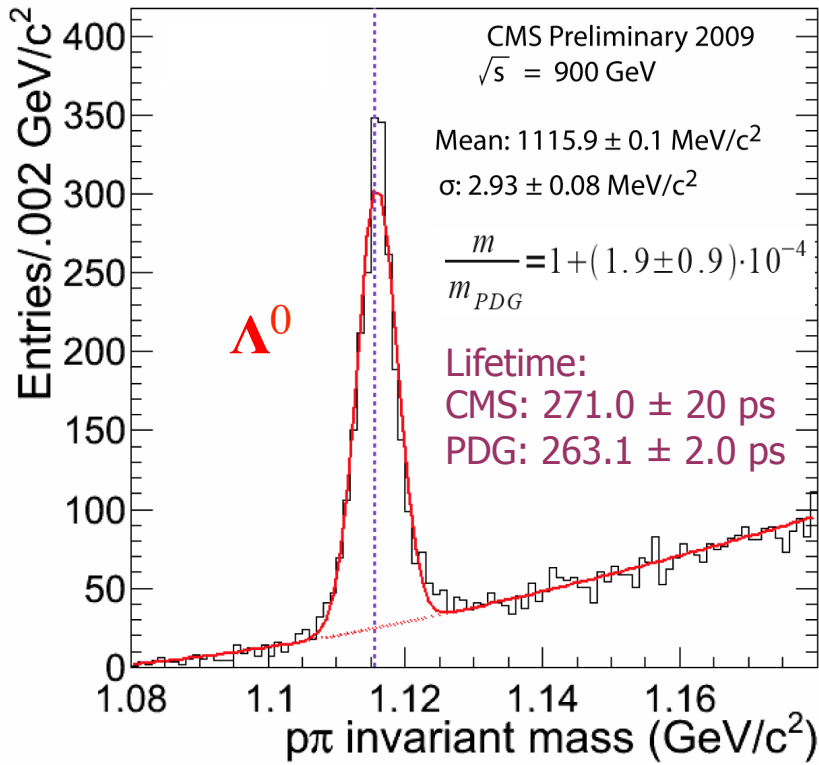


Excellent understanding of the momentum scale for low mass resonances

⇒ Accurate tracking, vertexing, alignment, magnetic field, ...



Resonances @ $\sqrt{s} = 900 \text{ GeV}$

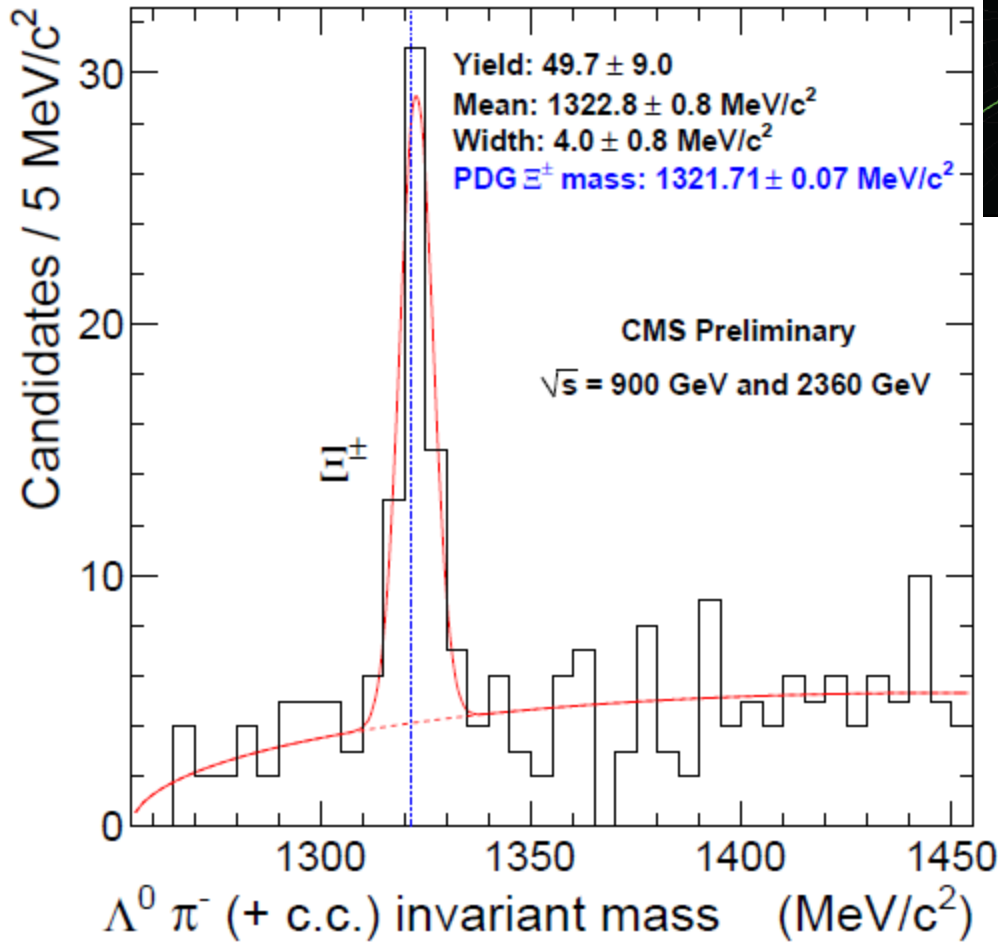
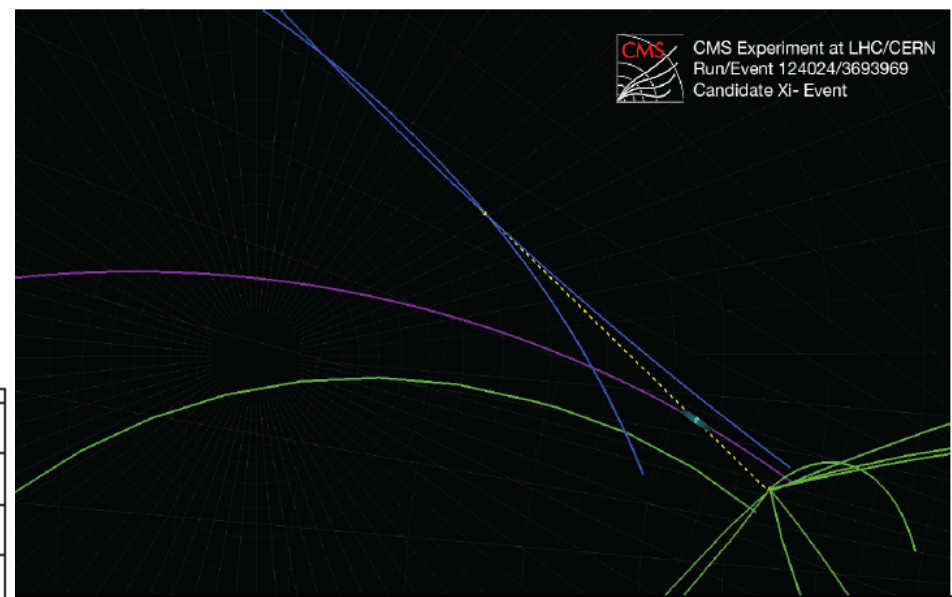


Excellent understanding of the momentum scale for low mass resonances

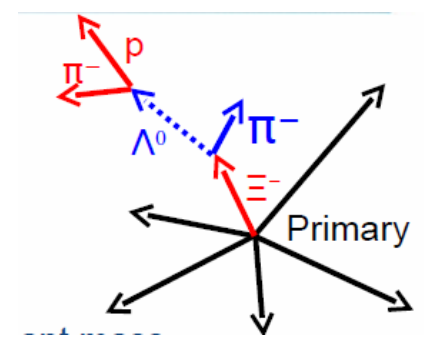
⇒ Accurate tracking, vertexing, alignment, magnetic field, ...



... and the Ξ^\pm



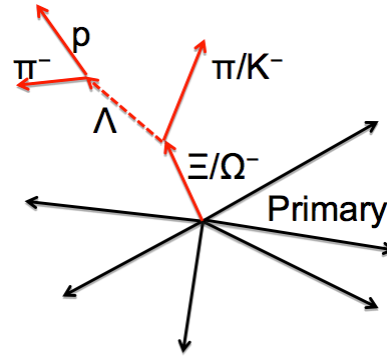
$\Xi^\pm \rightarrow \Lambda \pi^\pm$



- $\Lambda \pi$ Invariant mass
- tracks displaced from primary vertex ($d_{3D} > 3\sigma$)
- constrain Λ mass to PDG world average value in Ξ fit
- require same sign π 's



7 TeV Data: Resonances

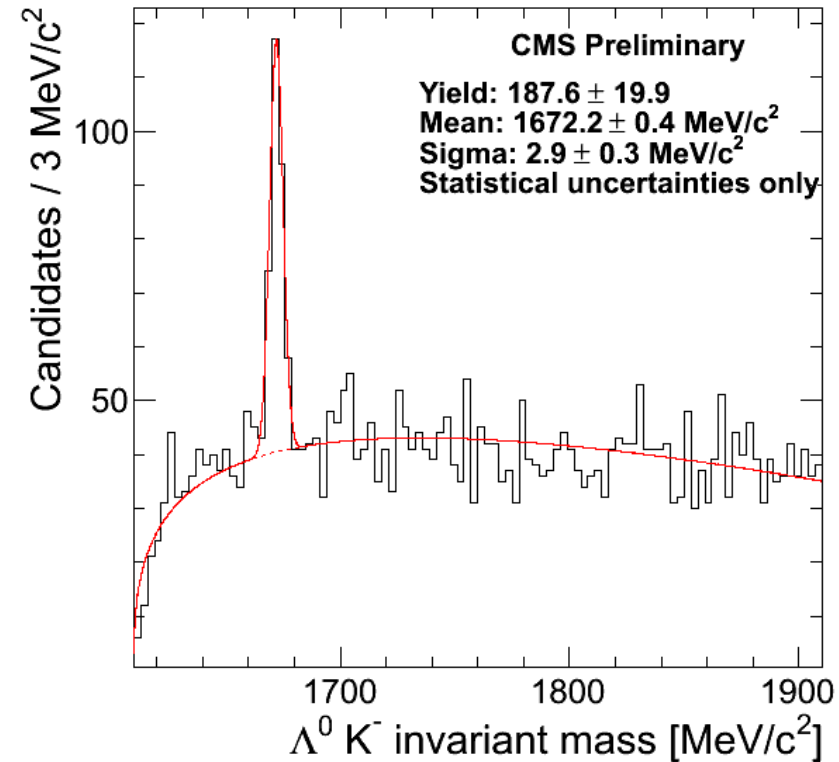
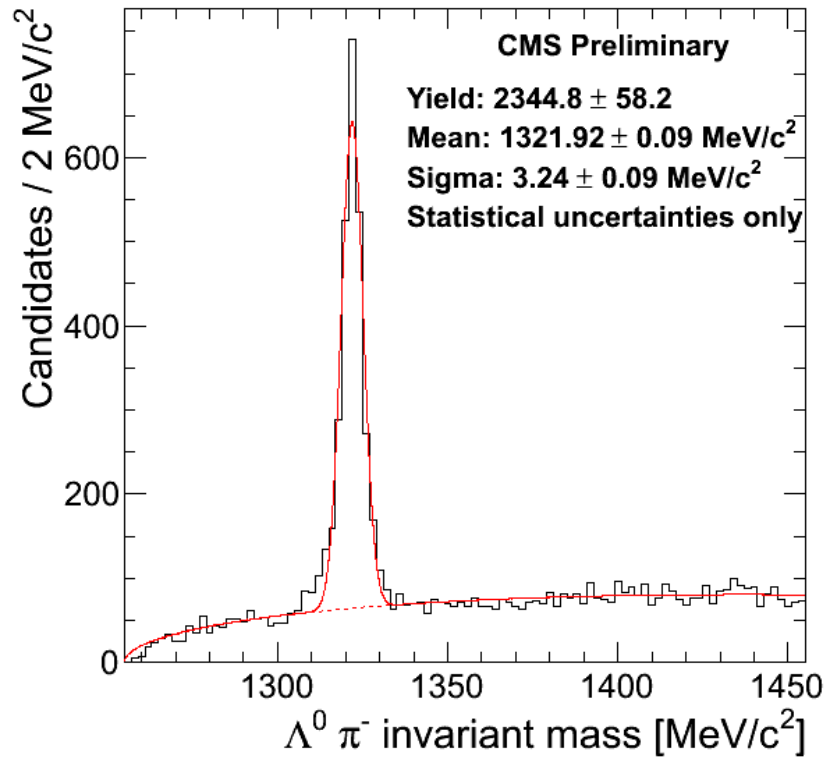


$$\Xi^\pm \rightarrow \Lambda \pi^\pm$$

$\Lambda \pi^-$ or anti- $\Lambda \pi^+$ invariant mass

$$\Omega^\pm \rightarrow \Lambda K^\pm$$

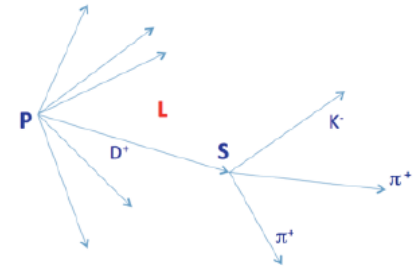
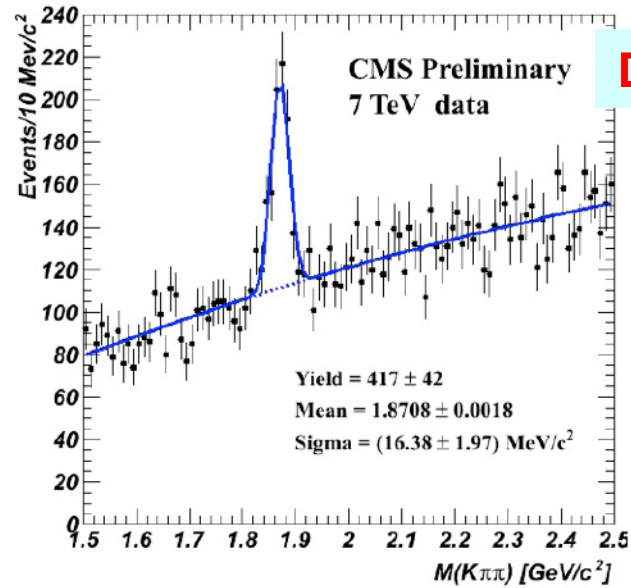
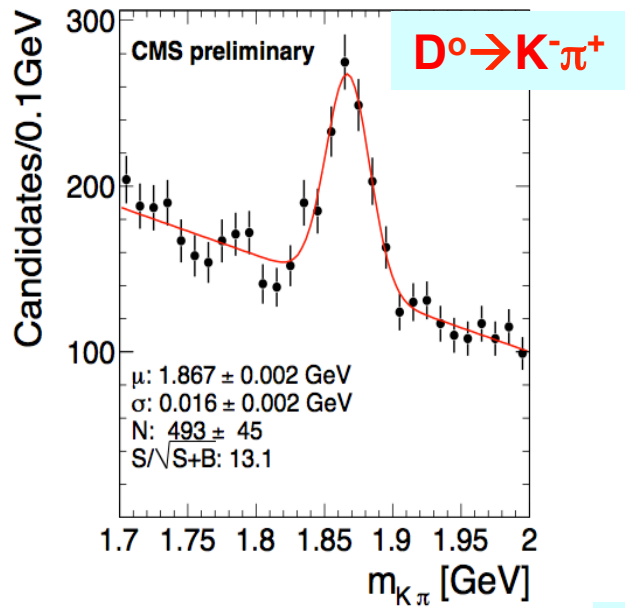
ΛK^- or anti- ΛK^+ invariant mass



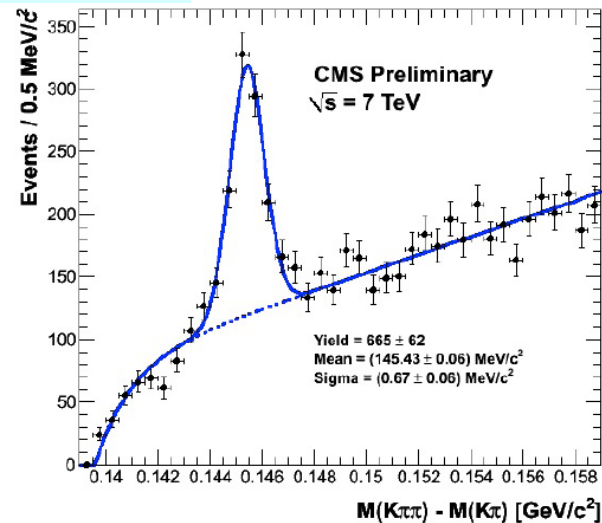
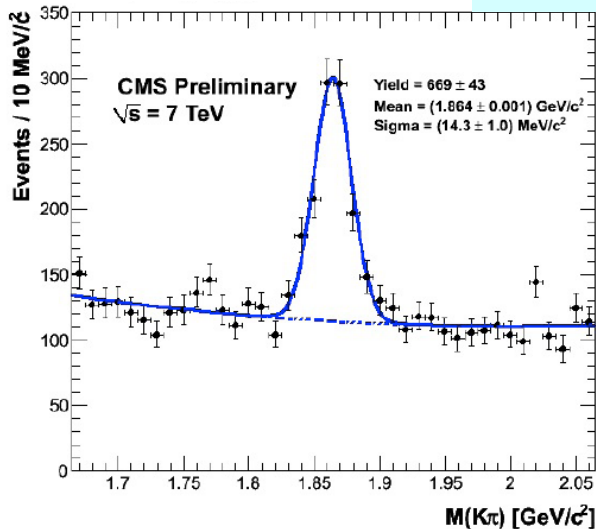


Charm Production

7 TeV DATA



$D^{*+} \rightarrow D^0(K^- \pi^+) \pi^+$





Different Strategies...

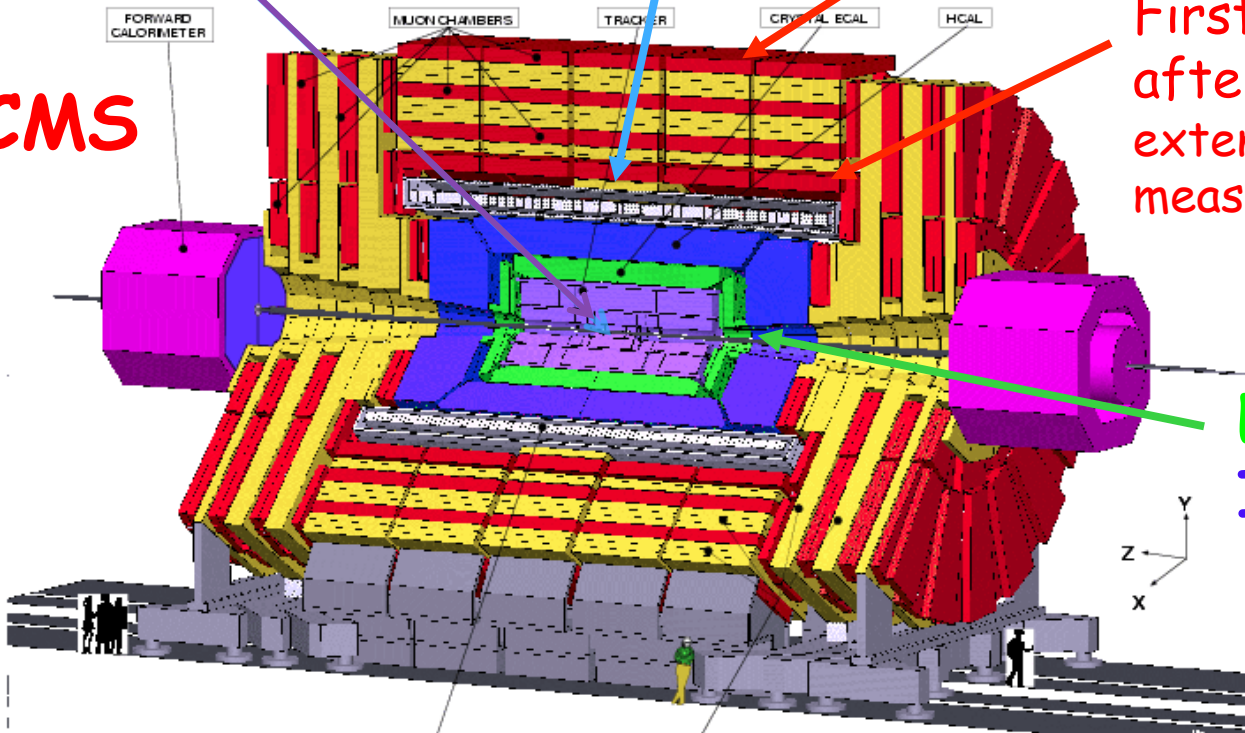
13m x 6m Solenoid: 4 Tesla Field

Tracking up to $\eta \sim 2.4$

Muon system in return yoke

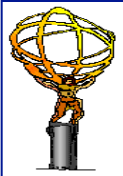
First muon chamber just after solenoid \rightarrow extended lever arm for p_T measurement

CMS



ECAL & HCAL
Inside solenoid

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



Different Strategies....

2.3m x 5.3m Solenoid ~ 2 Tesla Field

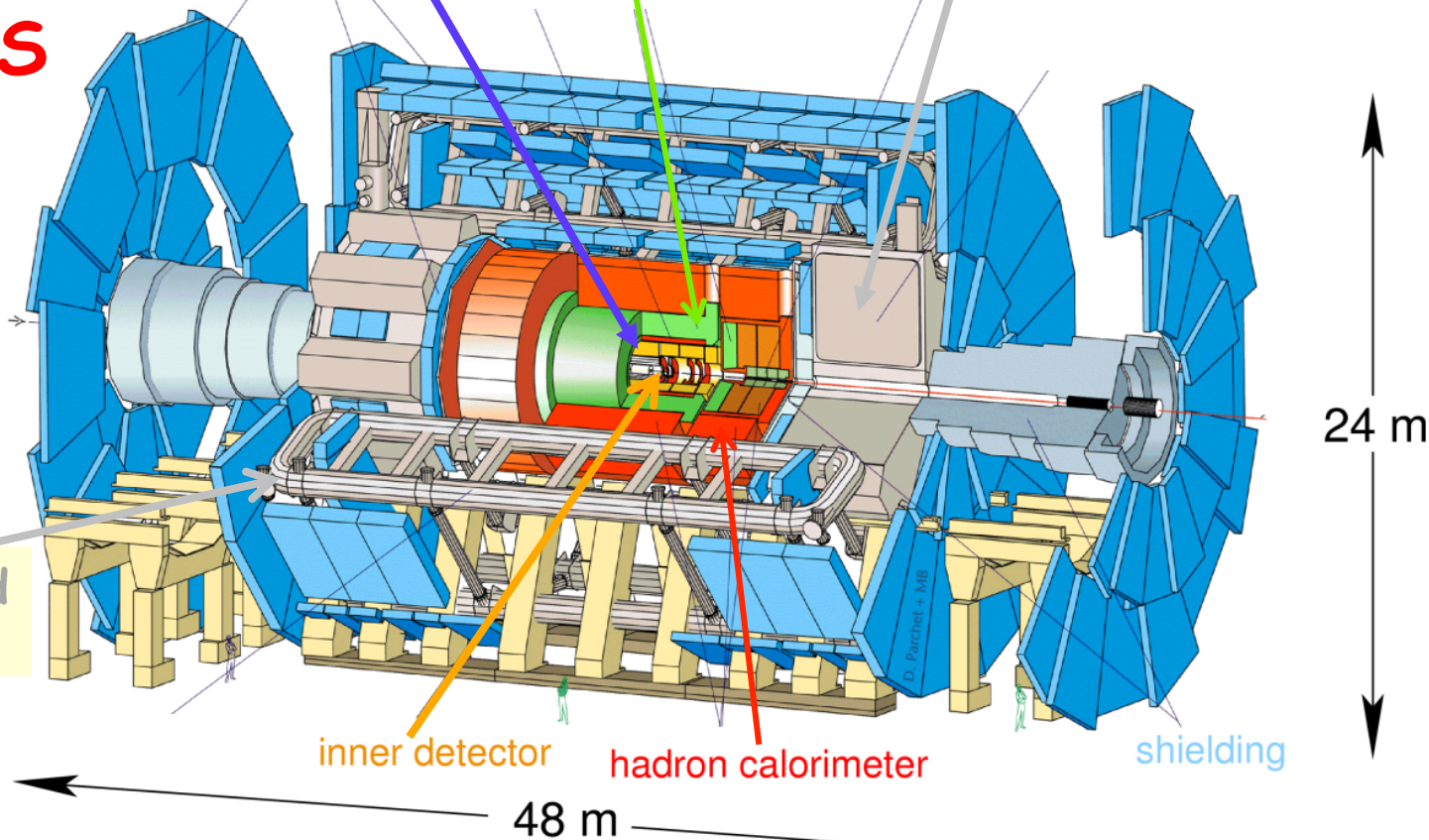
End Cap Toroid

muon detectors

electromagnetic calorimeters

forward calorimeters

ATLAS



24 m

Barrel Toroid
 = 0.4 T

inner detector

hadron calorimeter

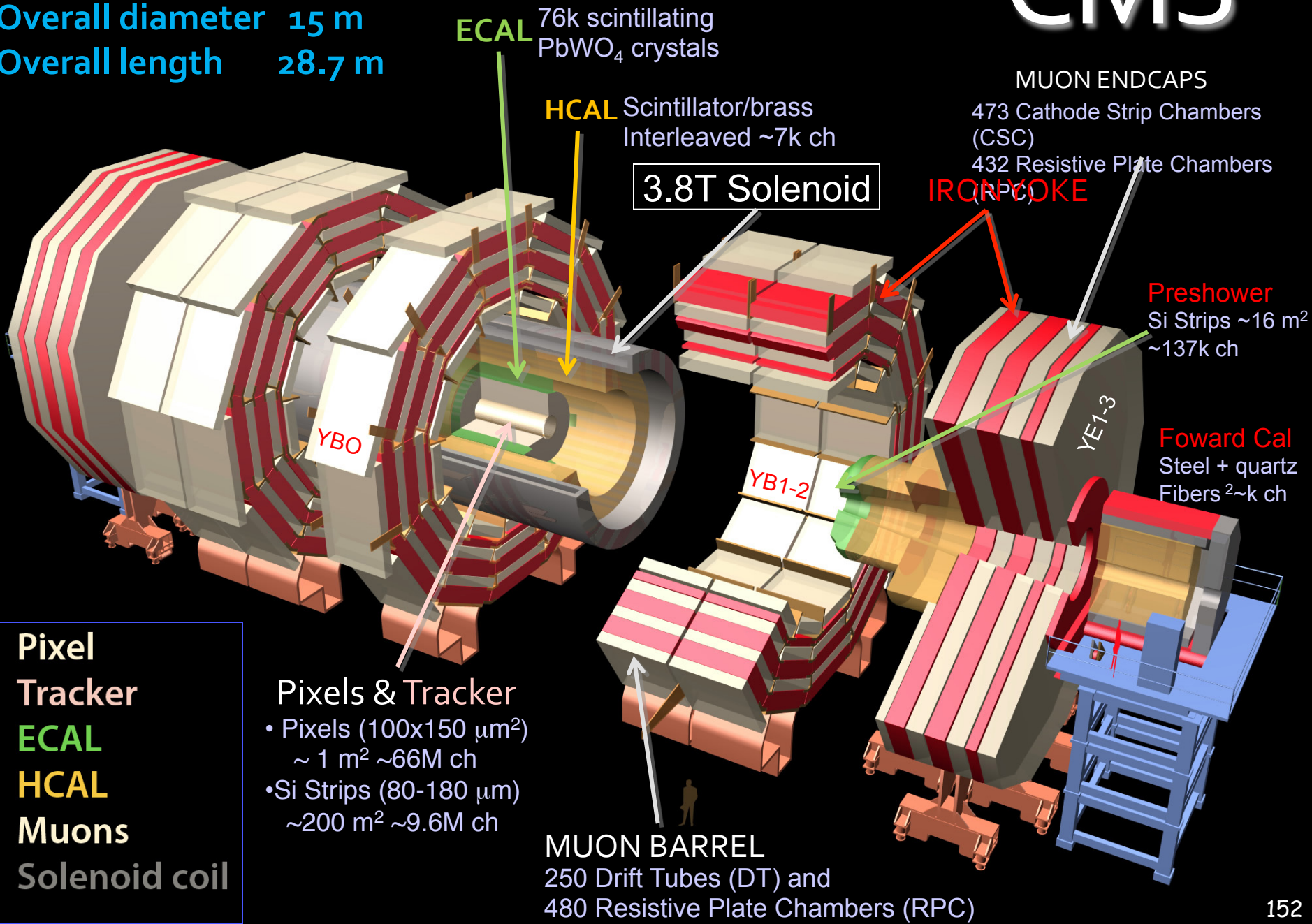
shielding

48 m

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

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

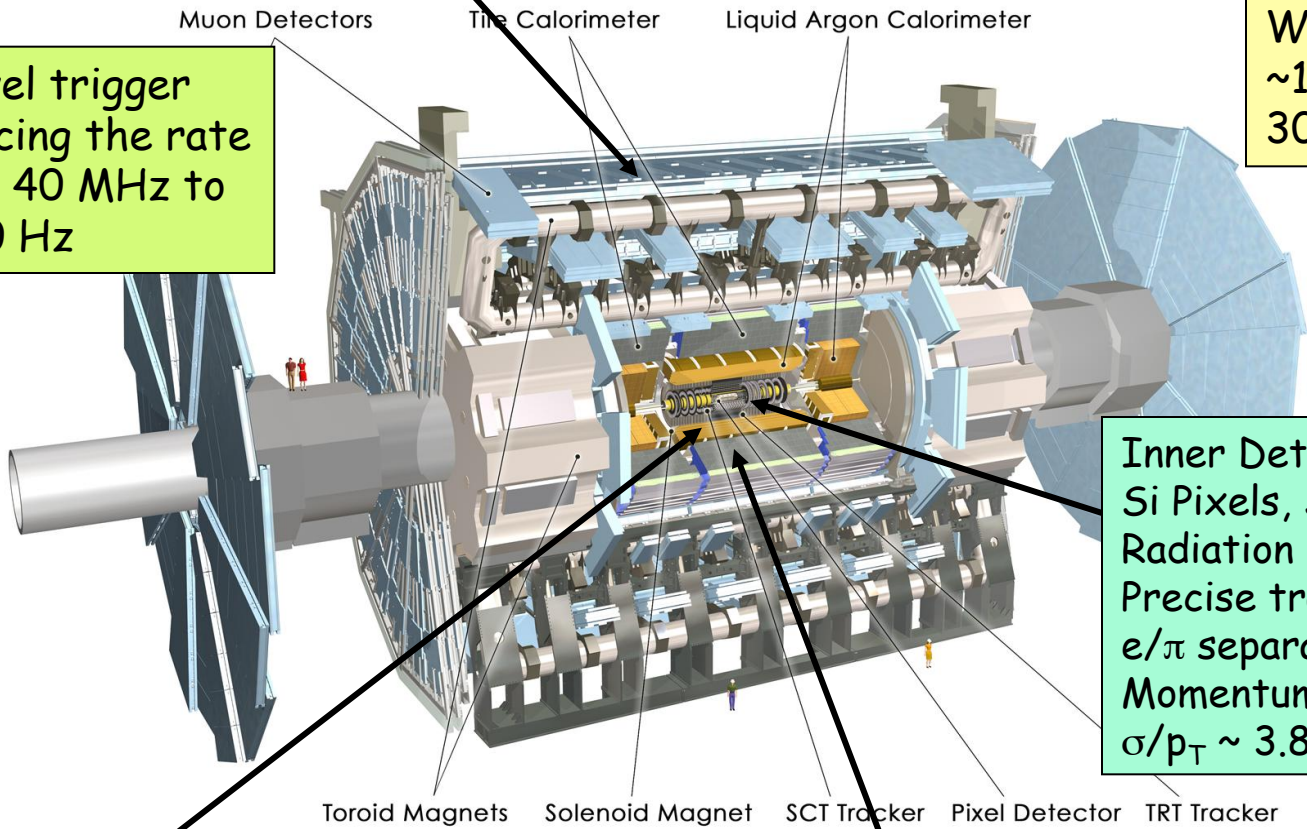
Length : ~ 46 m
 Radius : ~ 12 m
 Weight : ~ 7000 tons
 $\sim 10^8$ electronic channels
 3000 km of cables

3-level trigger
 reducing the rate
 from 40 MHz to
 ~ 200 Hz

Inner Detector ($|\eta| < 2.5, B=2T$):
 Si Pixels, Si strips, Transition
 Radiation detector (straws)
 Precise tracking and vertexing,
 e/π 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/γ 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: $\sigma/E \sim 50\%/\sqrt{E} \oplus 0.03$



Muon Detectors

Tile Calorimeter

Liquid Argon Calorimeter

Toroid Magnets

Solenoid Magnet

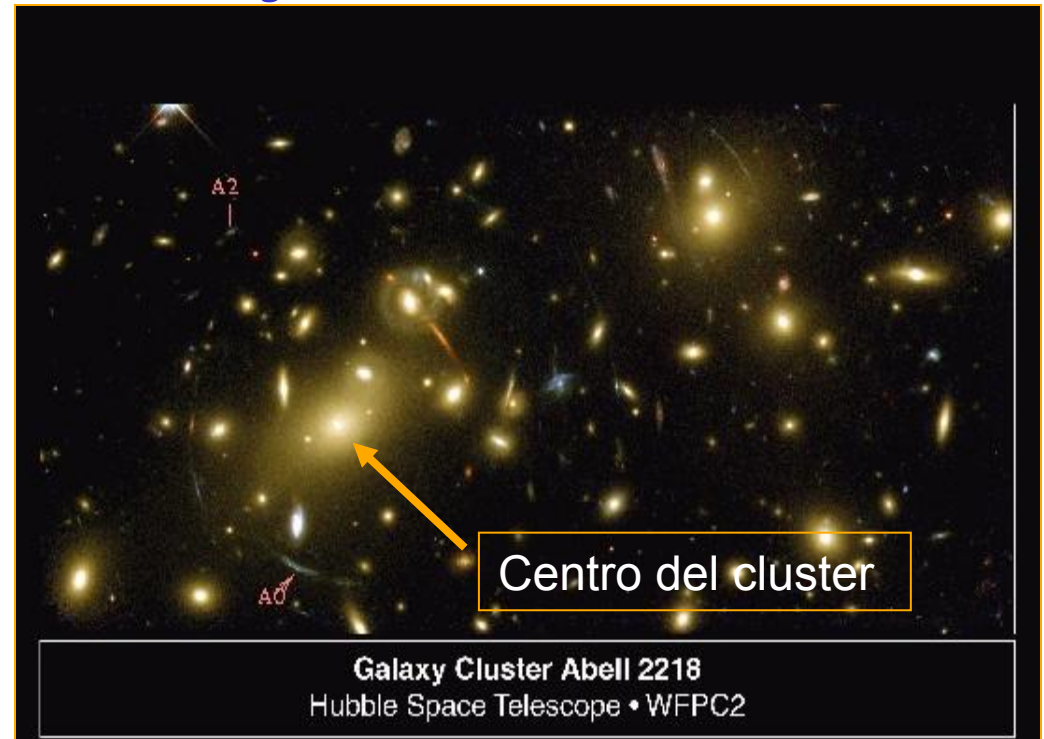
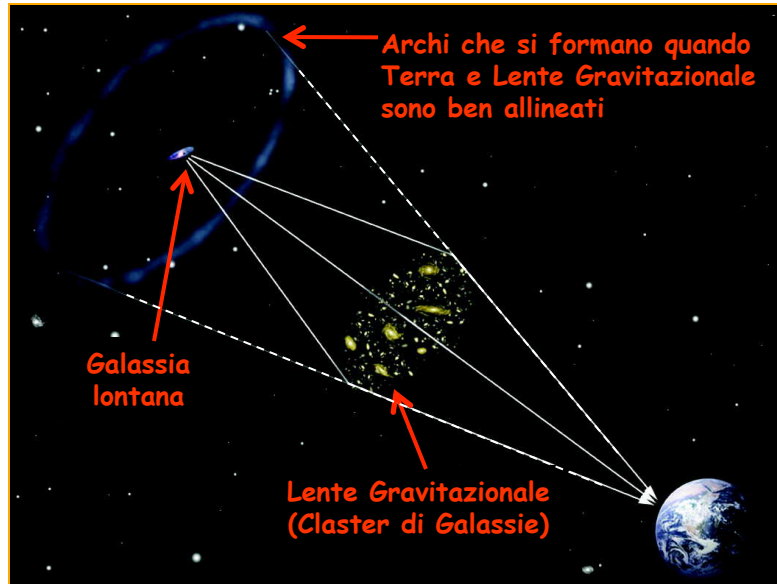
SCT Tracker

Pixel Detector

TRT Tracker

La Materia come Lente Gravitazionale

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



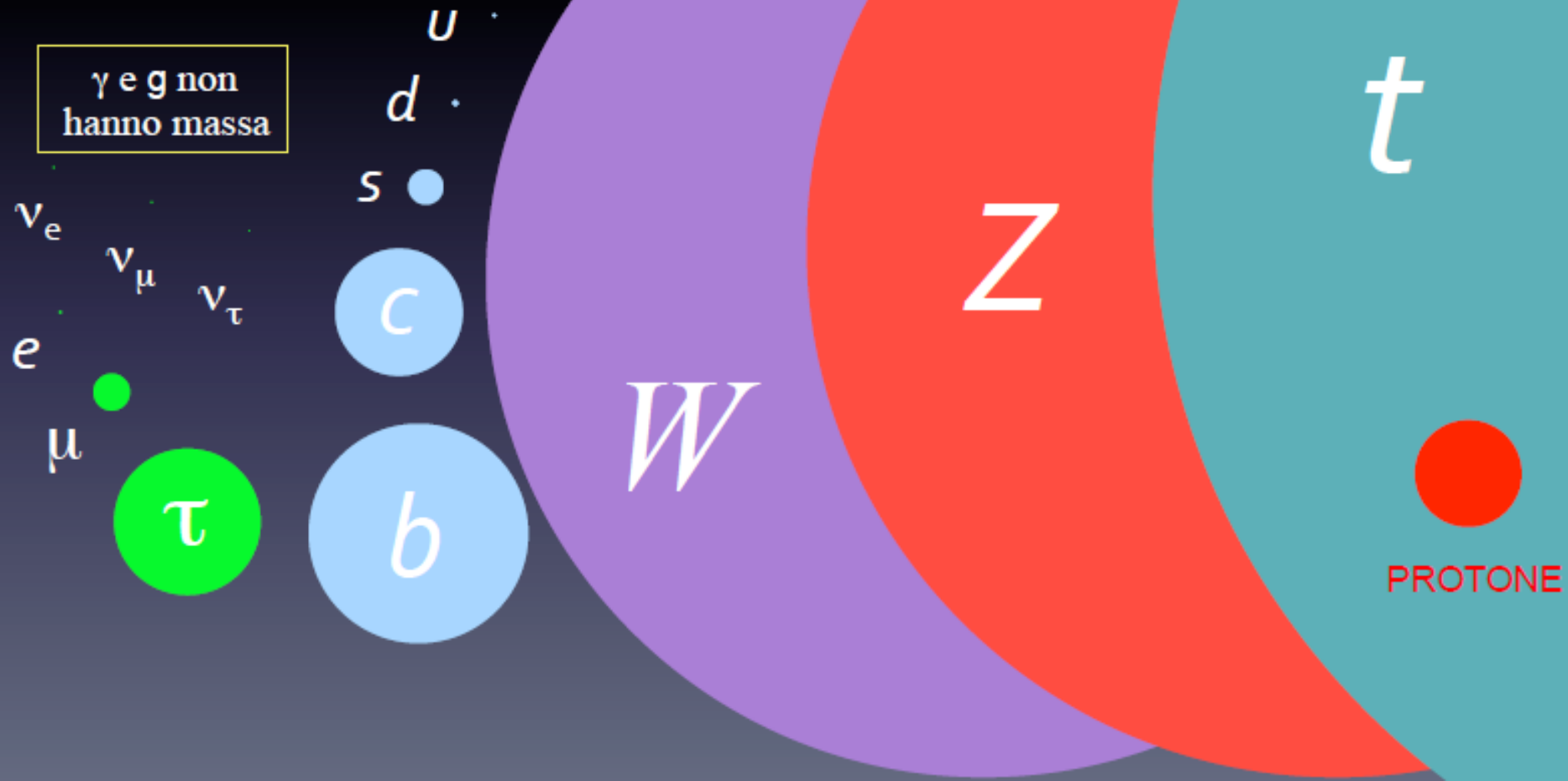
Le immagini multiple di una stessa galassia (per es. A0 e A2) vengono identificate confrontando gli spettri di luce dei diversi archi. Con così tante immagini è possibile fare un modello preciso della distribuzione di masse del cluster della lente gravitazionale.

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

Il problema della massa

Non c'è una spiegazione della massa delle particelle.

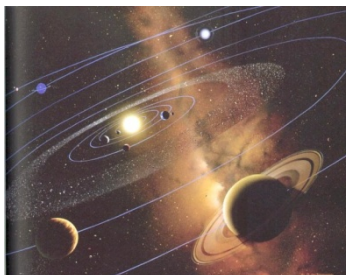
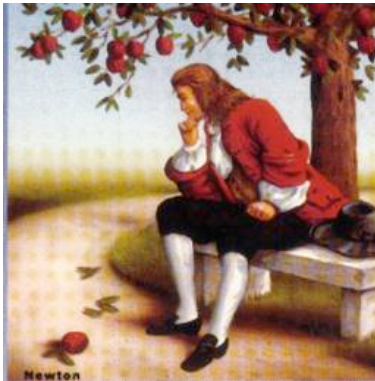
Eppure le particelle hanno una massa, che è enormemente diversa fra loro!



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

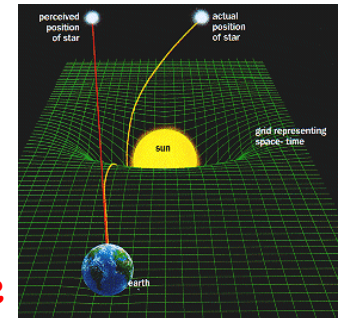
Geometria Spazio-Tempo

Einstein

Relatività Generale

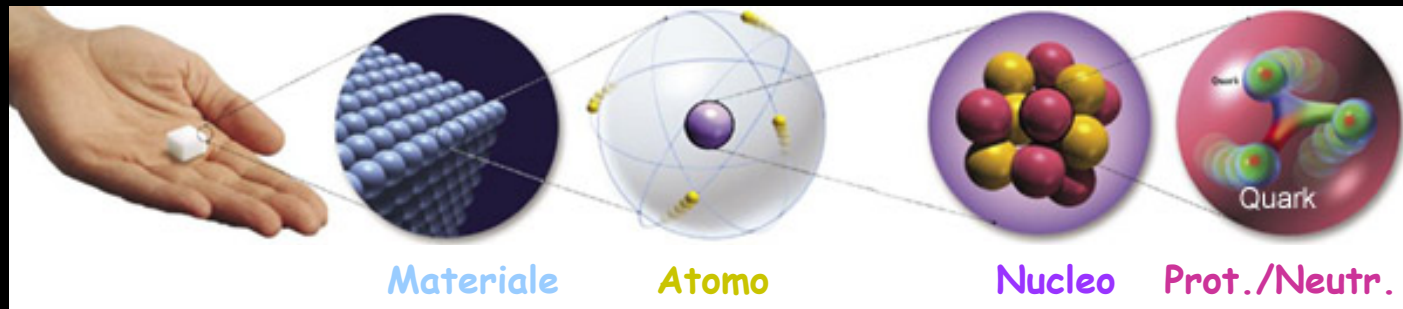
- Non è stata ancora trovata una descrizione soddisfacente a livello quantistico della interazione gravitazionale.

Nelle interazioni tra particelle è trascurabile

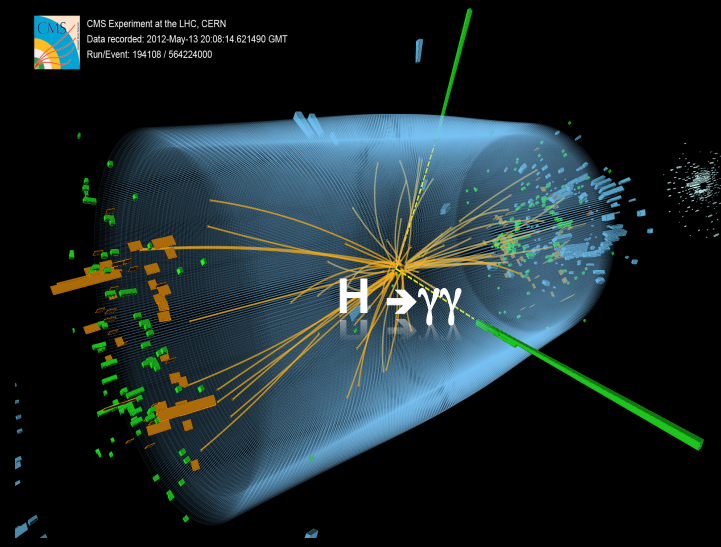


1934 - 2014

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



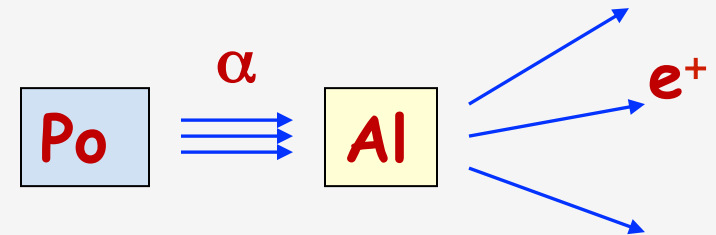
CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



Parigi, 15 gennaio 1934



Irène Curie, Frédéric Joliot



${}_{15}\text{P}^{31}$: isotopo stabile

${}_{15}\text{P}^{30}$: isotopo radioattivo β^+
non esistente in natura

I coniugi Joliot riuscirono ad isolare delle sostanze radioattive artificiali, dimostrando quindi che la radioattività non è una prerogativa di determinati elementi ma può essere indotta artificialmente.