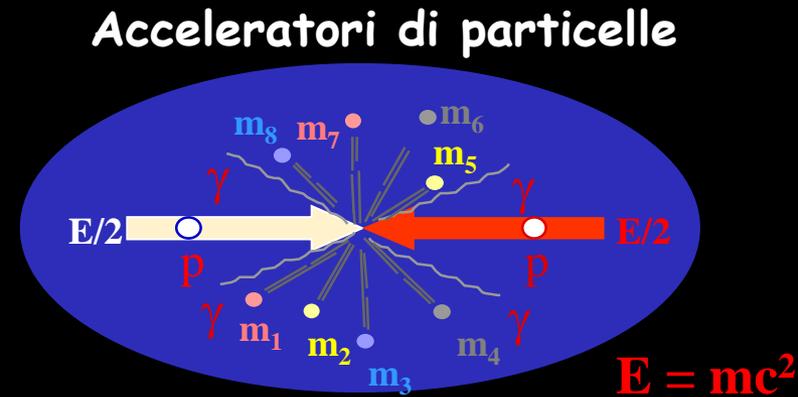
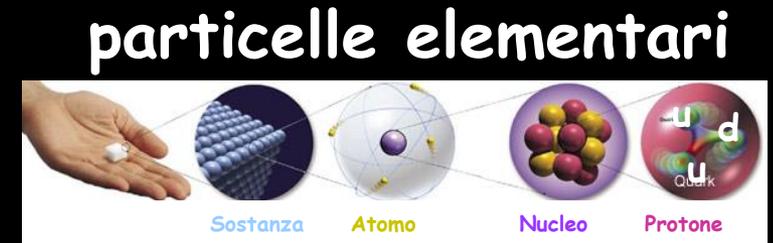


Far luce sulle leggi dell' Universo

Dall'infinitamente grande all'infinitamente piccolo



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

Ciclo di seminari al Caffè della Scienza

Far luce sulle leggi dell' Universo

Il 'Large Hadron Collider'



LHC

SPS

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

Caffè Della Scienza
Livorno, 29/09/2017



Caffè della Scienza
 "Nicola Badaloni" Livorno
www.caffescienza-livorno.org/

La Nuova Limonaia
 Associazione per la diffusione della cultura scientifica
 tecnologica e dei vari rami del sapere - Pisa
<http://www.lanuovalimonaia.it/>

Dalla rivoluzionaria teoria di Einstein alla verifica sperimentale delle onde gravitazionali

Mercoledì 30 Marzo 2016, Ore 17.00
Auditorium del Museo Storia Naturale del Mediterraneo
Via Roma230

Per gentile concessione della Provincia di Livorno

Presenta **Prof. Rino Castaldi** già Direttore della Sezione INFN di Pisa
 Introduce **Ing. Massimiliano Bitossi** – Laboratorio EGO, associato INFN Pisa

Prof. **Federico Ferrini**
 Direttore European Gravitational Observatory

- 100 anni fa: Le intuizioni e la previsione di A. Einstein
- 50 anni fa: La concezione degli strumenti
- Dal 1995: La costruzione dei giganteschi interferometri
- 14 Settembre 2015: La osservazione delle onde gravitazionali

NETWORK

LIGO - WA



GEO600 - D

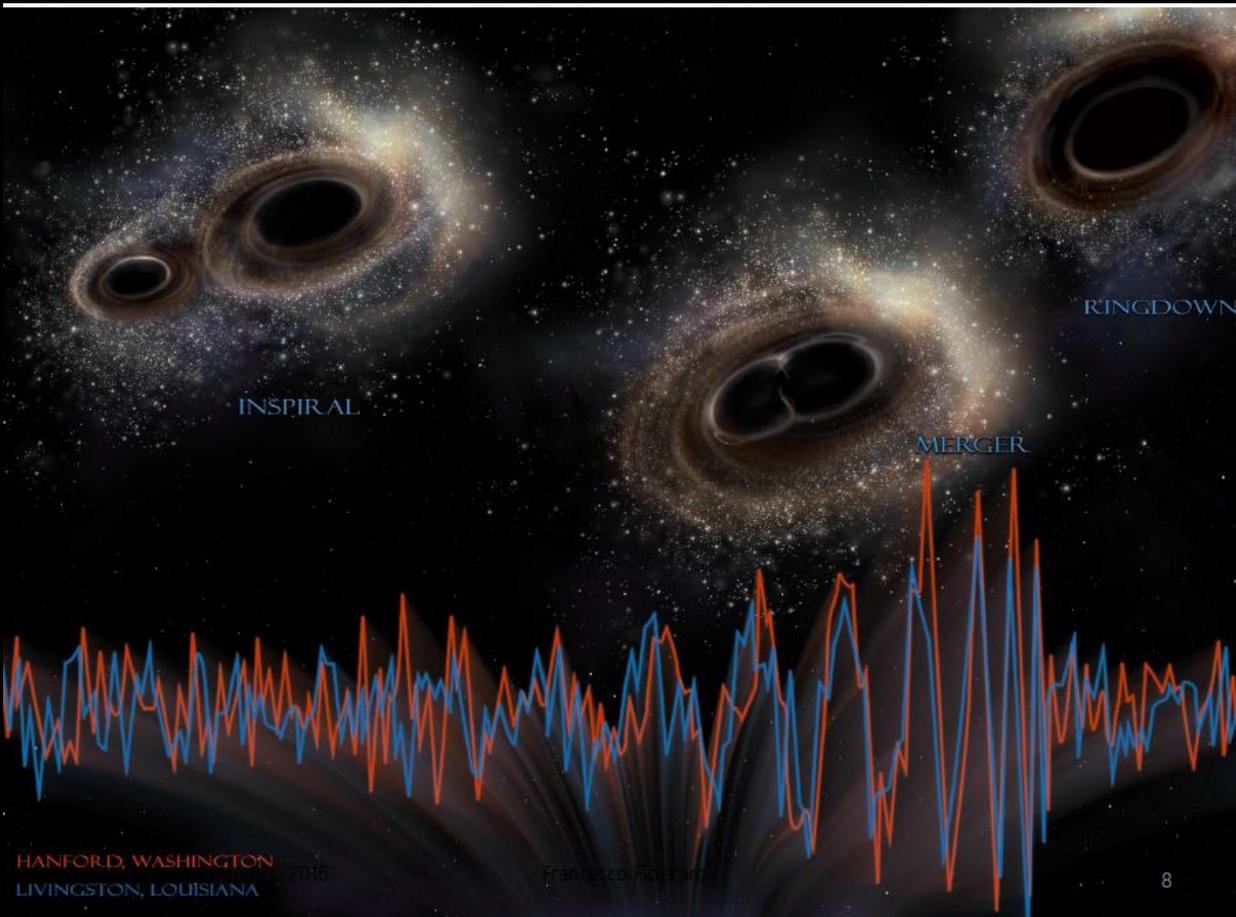


LIGO - LA



Virgo - I

14 settembre 2015 alle 11:45:50 (1,3 miliardi di anni fa)



Primary black hole mass

$$36^{+5}_{-4} M_{\odot}$$

Secondary black hole mass

$$29^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

Final black hole mass

$$62^{+4}_{-4} M_{\odot}$$

[LIGO'S **GRAVITATIONAL-WAVE** DETECTIONS]

36+29 in 62 S.M.

GW150914

DISCOVERED:

14.09.2015

1.3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY

62 SOLAR MASSES

366 KILOMETRES IN DIAMETER

14+8 in 21 S.M.

GW151226

DISCOVERED:

26.12.2015

1.4 BILLION LIGHT-YEARS AWAY

21 SOLAR MASSES

124 KILOMETRES IN DIAMETER

32+19 in 49 S.M.

GW170104

DISCOVERED:

04.01.2017

3 BILLION LIGHT-YEARS AWAY

49 SOLAR MASSES

289 KILOMETRES IN DIAMETER

1 BILLION LIGHT YEARS

2 BILLION LIGHT YEARS

3 BILLION LIGHT YEARS

4 BILLION LIGHT YEARS

YOU ARE
HERE

DID YOU KNOW ?

THE SOLAR MASS IS A STANDARD UNIT OF MASS IN ASTRONOMY
IT IS EQUAL TO THE MASS OF THE SUN
EQUAL TO APPROXIMATELY
 1.99×10^{30} KG



Laser Interferometer
Gravitational-Wave Observatory
Supported by the National Science Foundation
Operated by Caltech and MIT



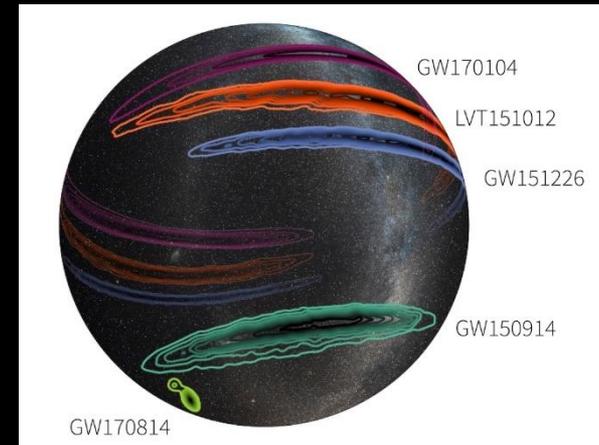
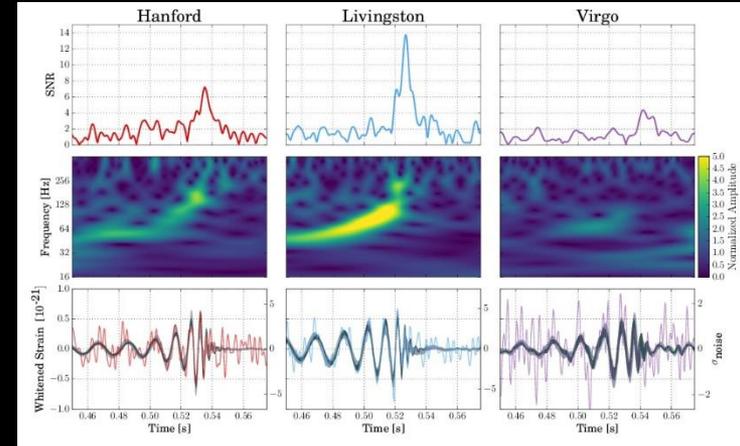
ARC Centre of Excellence for Gravitational Wave Discovery

Interferometro Virgo a Cascina

https://www.ego-gw.it/public/about/visits/ego_IT.aspx



interferenza di luce laser su una lunghezza di 120 km



Il 1 agosto 2017 finalmente Virgo entra in presa dati con LIGO, e purtroppo la presa dati è terminata il 25 agosto !!!
Avanti ieri è stato annunciato che il 14 agosto alle ore 10:30:43 è stato rivelato dai tre interferometri contemporaneamente un segnale di coalescenza di due buchi neri di 31 e 25 masse solari in un buco nero di 53 masse solari a una distanza di 1.8 miliardi di anni luce.



Caffè della Scienza
"Nicola Badaloni" Livorno
www.caffescienza-livorno.org/



La Nuova Limonaia
Associazione per la diffusione della
cultura scientifica tecnologica
ed i vari rami del sapere - Pisa
<http://www.lanuovalimonaia.it/>

Mercoledì 25 Maggio 2016, Ore 17.00
Auditorium del Museo Storia Naturale del Mediterraneo
Via Roma 230, Livorno
Per gentile concessione della Provincia di Livorno

La pioggia di raggi cosmici sulla Terra: rivelazione con l'esperimento EEE

Presenta Prof. **Rino Castaldi** Direttore della Sezione INFN di Pisa
Introduce Ing. **Massimiliano Bitossi** - Laboratorio EGO, associato INFN Pisa

Prof. **Giovanni Batignani** Università di Pisa, INFN e Centro Enrico Fermi

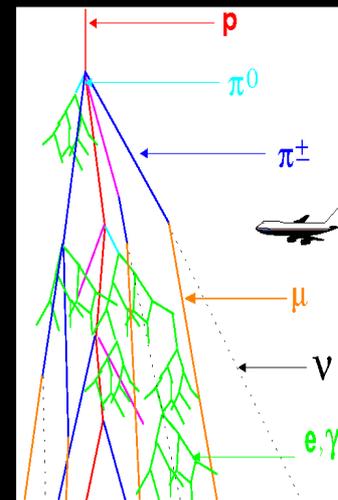
Nel colloquio verranno introdotti i raggi cosmici, particelle di alta energia che provengono da sorgenti interne o esterne alla nostra galassia e che colpiscono incessantemente la Terra e noi stessi. Scoperti da Pacini ed Hess agli inizi del secolo scorso, i loro effetti consistono in una ionizzazione dei materiali su cui incidono ed anche in una limitata produzione di particelle radioattive, come per esempio il nucleo del Carbonio 14 su cui si basa la datazione di reperti oppure il muone, misterioso oggetto che ha le stesse identiche proprietà elettriche dell'elettrone ma che possiede una massa 200 volte maggiore.

Nel corso degli anni, i raggi cosmici sono stati studiati in modo sempre più approfondito. Essi ci permettono di avere una visione del cosmo che è complementare a quella ottenuta con osservazioni ottiche e aprono una finestra su fenomeni nuovi, come per esempio la scoperta dell'antimateria. L'Italia contribuisce oggi con molti esperimenti, basati su apparati alla superficie terrestre o su satelliti artificiali, per lo studio di raggi cosmici. In questo panorama una posizione particolare è rivestita dall'esperimento EEE (Extreme Energy Events), progetto del "Museo Storico della Fisica e Centro Studi e Ricerche Enrico Fermi". EEE rivela le particelle cariche prodotte dai raggi cosmici tramite dispositivi, denominati "telescopi", realizzati con la stessa tecnologia sviluppata per gli esperimenti ad LHC, ed installati in oltre 50 scuole medie superiori italiane distribuite su tutto il territorio nazionale. I rivelatori sono stati costruiti al CERN da studenti delle scuole, dove gruppi di studenti ed insegnanti hanno il compito di operare i telescopi durante il periodo di presa dati. A livello centrale, un gruppo di ricercatori del Centro Fermi, dell'INFN ed universitari coordina le acquisizioni e l'analisi dei dati. Oltre alla fortissima valenza didattica e divulgativa dell'iniziativa, la mole e la qualità dei dati raccolti hanno permesso di realizzare significative misure di fisica e numerose pubblicazioni su rivista. In questo colloquio saranno descritti alcuni risultati scientifici ottenuti ed il modus operandi di una collaborazione che fonde la comunità scientifica accademica e degli enti di ricerca con la scuola e la società.

I raggi cosmici primari producono sciame di particelle nell'atmosfera



Sulla superficie della Terra: $\sim 1/\text{sec}/\text{dm}^2$



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 %



BANCA
DI CREDITO COOPERATIVO
DI CASTAGNETO CARDUCCI



www.bccastagneto.it



Caffè della Scienza
"Nicola Badaloni" Livorno
www.caffescienza-livorno.org/

La Nuova Limonaia
Associazione per la diffusione della cultura scientifica
tecnologica e dei vari rami del sapere - Pisa
<http://www.lanuovalimonaia.it/>

Primavera della Scienza

Seminario

L'Universo in una luce diversa

Giovedì 14 Aprile 2016, Ore 17.00

Museo Storia Naturale del Mediterraneo

Sala del Mare, Via Roma 230

Per gentile concessione della Provincia di Livorno

Presenta

Prof. Rino Castaldi, Caffè della Scienza, già Direttore della Sezione INFN di Pisa

Introduce

Ing. Massimiliano Bitossi – Laboratorio EGO, associato INFN Pisa

Prof. [Alessandro De Angelis](#)

Presidente della collaborazione internazionale MAGIC

Quattrocento anni dopo le prime osservazioni dei corpi celesti con il cannocchiale, lo studio dei fenomeni cosmici viene effettuato solo in piccola parte mediante l'osservazione della luce visibile. Gran parte dei misteriosi processi che sono alla base dell'energia del cosmo trova spiegazione attraverso l'esame di radiazioni elettromagnetiche invisibili (dalle onde radio ai raggi gamma di altissima energia), e perfino attraverso l'osservazione di particelle diverse dalla radiazione elettromagnetica. Così i telescopi che fotografano l'universo sono radicalmente differenti dai vecchi telescopi ottici, e forniscono immagini nuove e affascinanti di un cosmo diverso da quello che i nostri occhi possono vedere. E questa ricerca è solo all'inizio, dato che oggi sappiamo di conoscere solo una piccola parte della materia che ci circonda. Siamo di fronte a una nuova rivoluzione copernicana: noi esseri umani non siamo fatti della materia di cui è fatta la maggior parte dell'universo stesso.



Daniel López / IAC

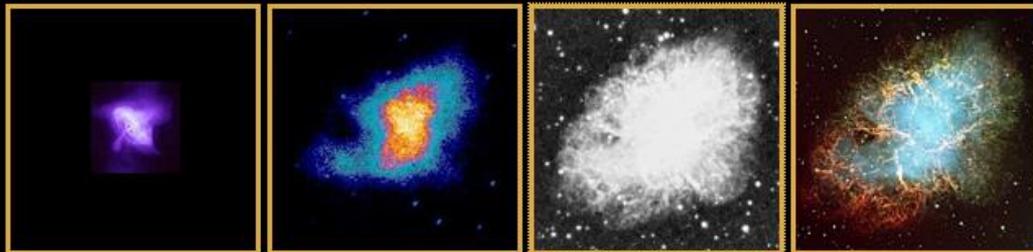
L'Universo non visto dai nostri occhi

Guardando a frequenze (energie) diverse si vedono immagini molto diverse che dipendono dai processi di emissione a quelle frequenze

Distance: 6300 light-years (1.9 kpc)

Image Size = 6.5 x 6.5 arcmin

Visual Magnitude = 8.4

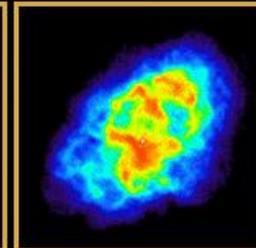
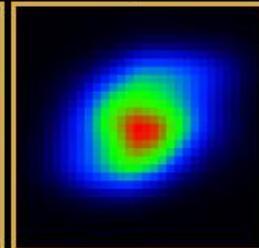


X-Ray: Chandra

Ultraviolet: ASTRO-1

Visible: DSS

Visible: Color VLT



Near-Infrared: 2MASS

Mid-Infrared: Spitzer

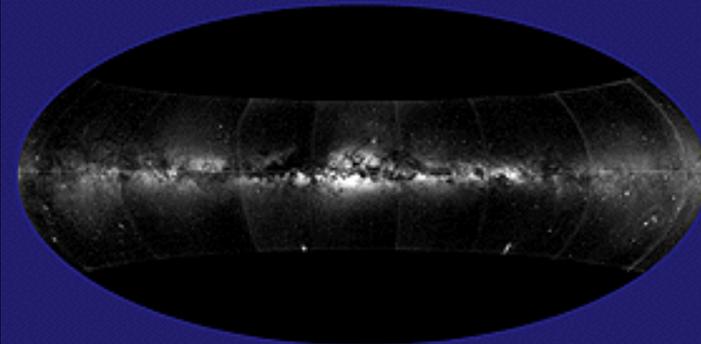
Far-Infrared: IRAS

Radio: NRAO

The Crab Nebula is the remnant of a supernova explosion that was seen on Earth in 1054 AD. It is 6000 light years from Earth. At the center of the bright nebula is a rapidly spinning neutron star, or pulsar that emits pulses of radiation 30 times a second.

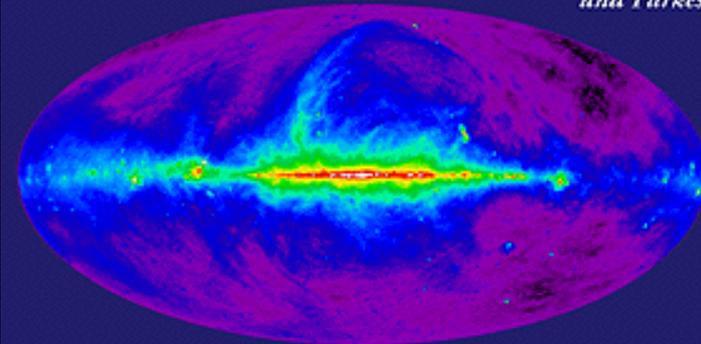
Optical

Laustsen et al. Photomosaic



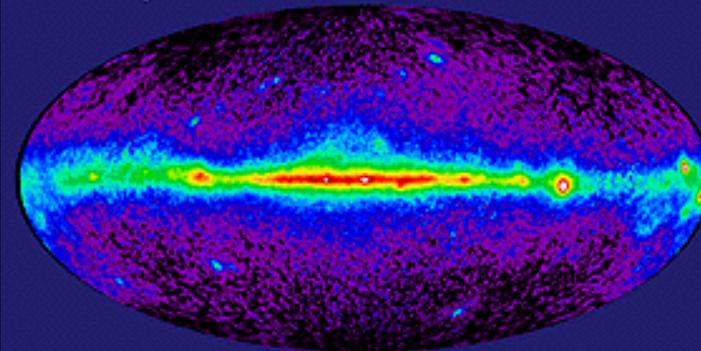
Radio Continuum (408 MHz)

Bonn, Jodrell Bank, and Parkes

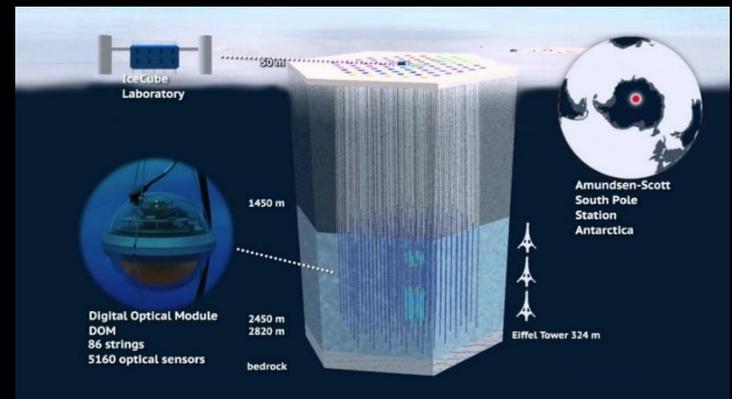
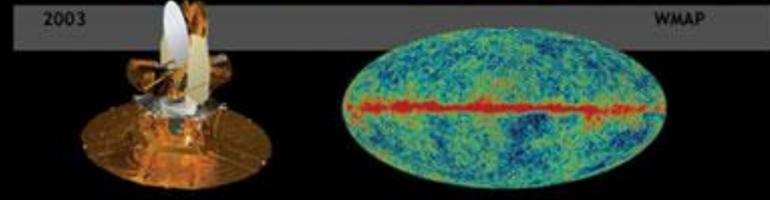
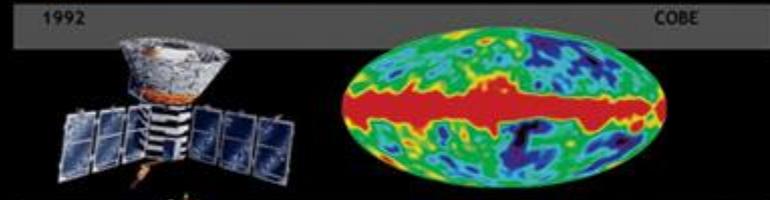
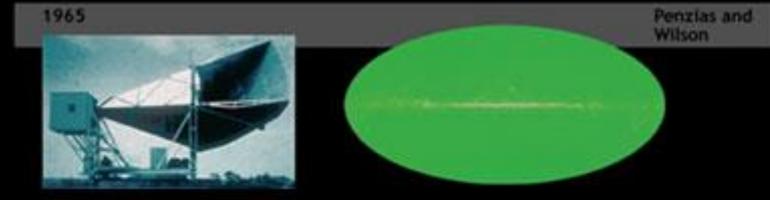


Gamma Ray

>100MeV CGRO/EGRET

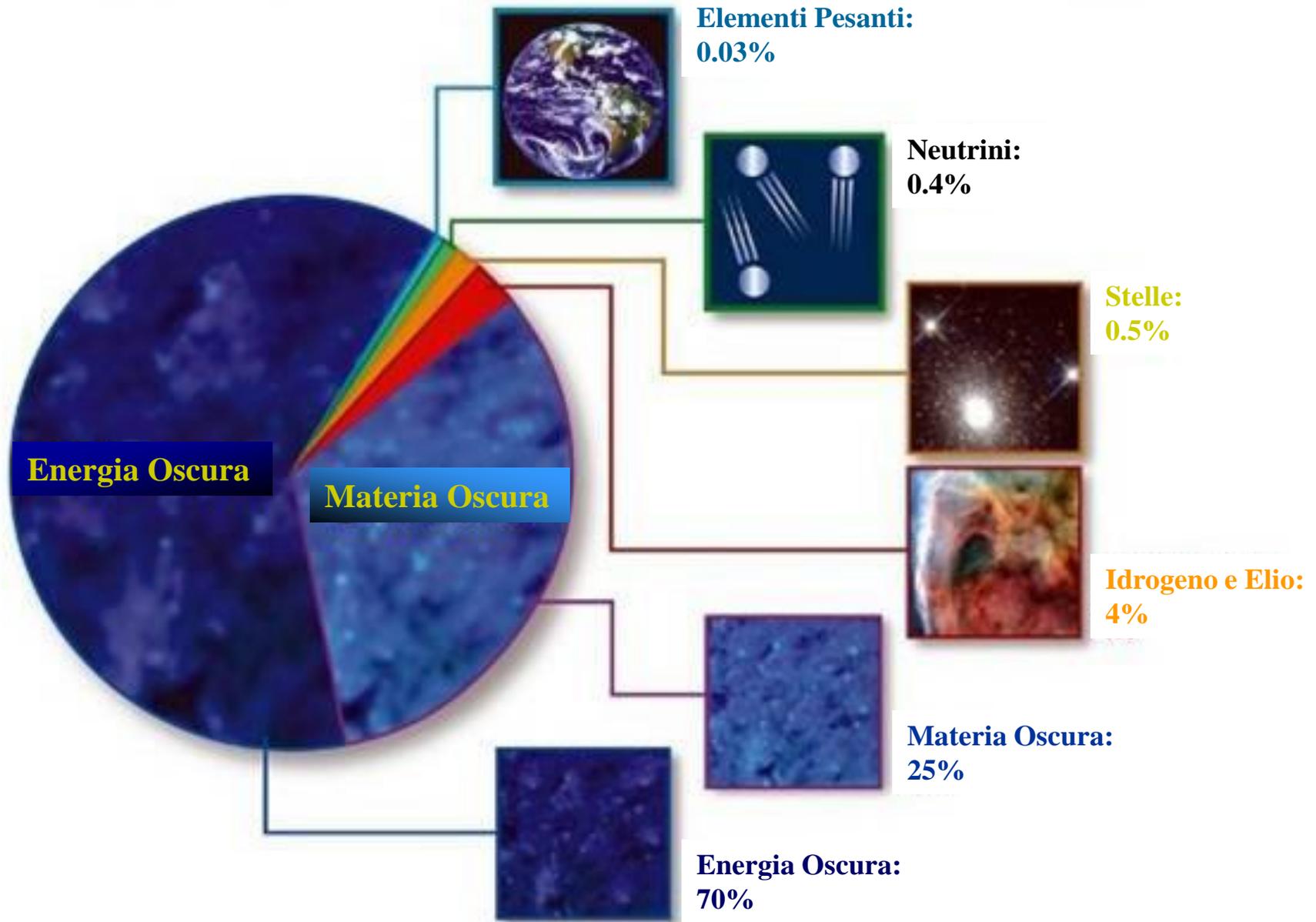


L'Universo in una luce diversa



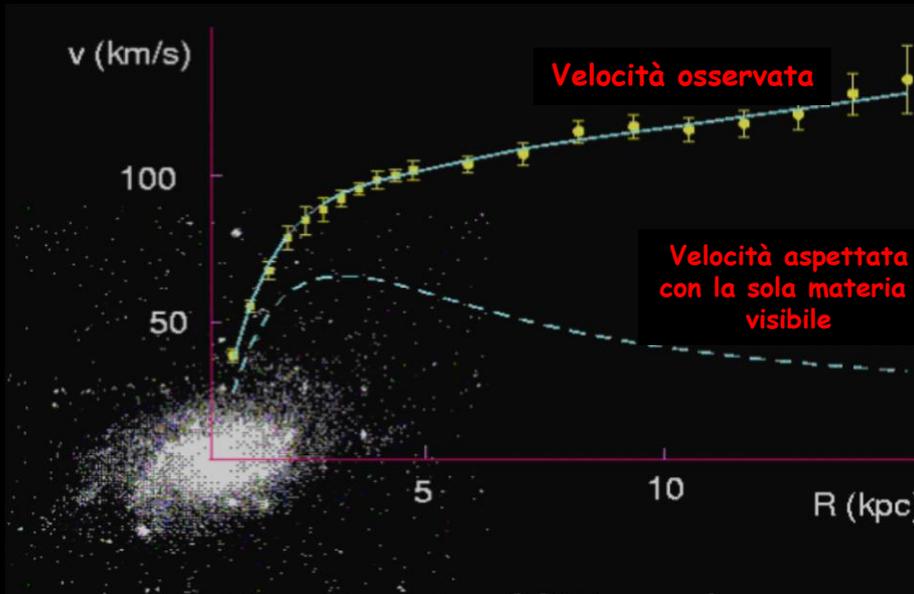
Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)



Manifestazioni della Materia Oscura

Galassia M33 Velocità di rotazione



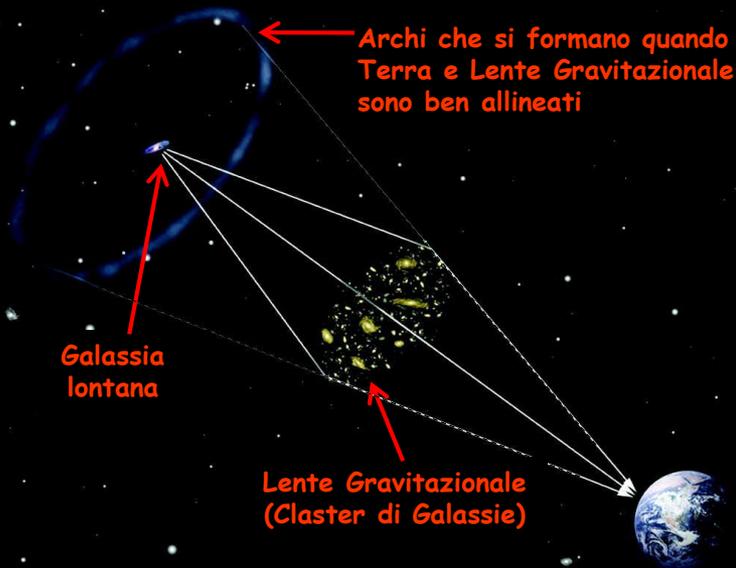
La velocità di rotazione delle stelle nelle galassie è molto più grande di quella che dovrebbe essere se ci fossero solo le masse della Materia Visibile

Il Sole si trova a una distanza di 8.5 kpc, ha una velocità circolare di 220 km/sec, anziché 150-160 km/sec se la rotazione della galassia seguisse l'andamento atteso, e impiega circa 240 milioni di anni a compiere un'orbita completa attorno al centro della Galassia.

La Materia Oscura sembra essere costituita da particelle di grande massa che sembrano interagire solo con l'interazione gravitazionale

La Materia come Lente Gravitazionale

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

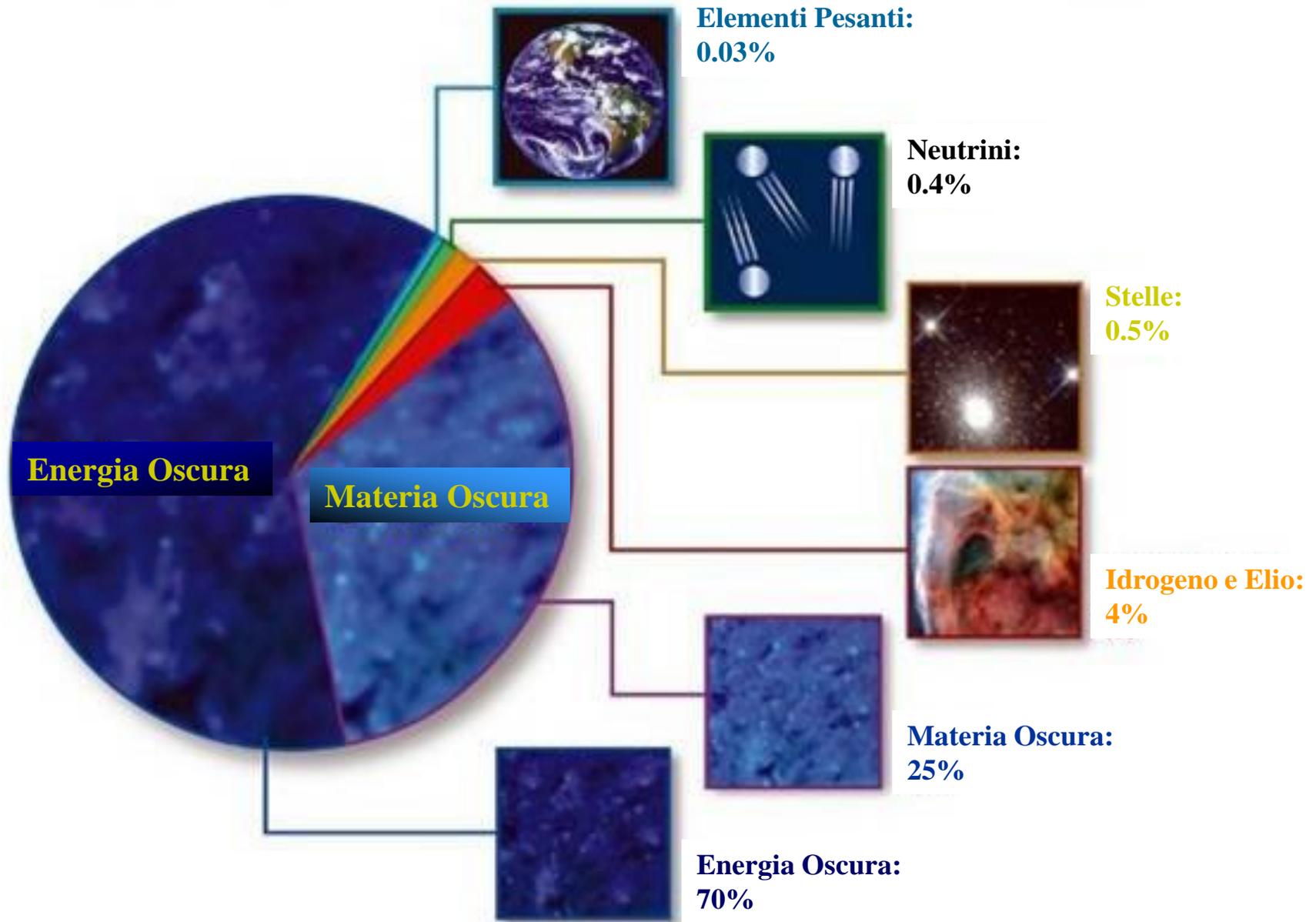


Le immagini multiple di una stessa galassia vengono identificate confrontando gli spettri di luce dei diversi archi. Con così tante immagini è possibile fare un modello preciso della distribuzione di masse del cluster della lente gravitazionale.

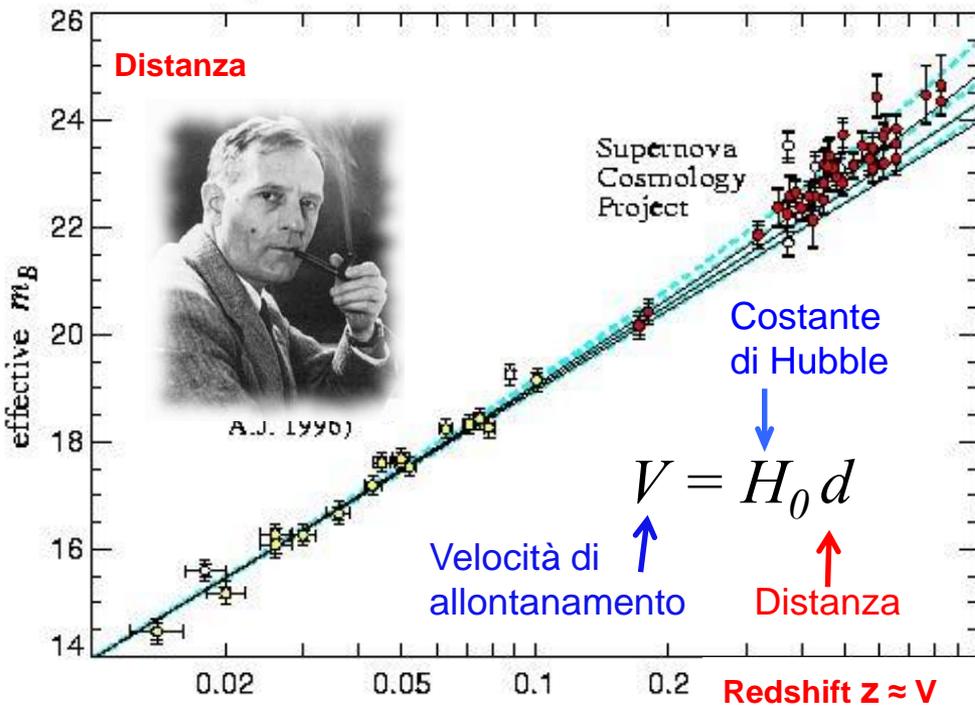
Ma l'effetto e' molto piu' forte di quello spiegabile con la massa della Materia Visibile da cui l'ipotesi dell'esistenza della Materia Oscura (invisibile)

Di cosa e' fatto il nostro Universo

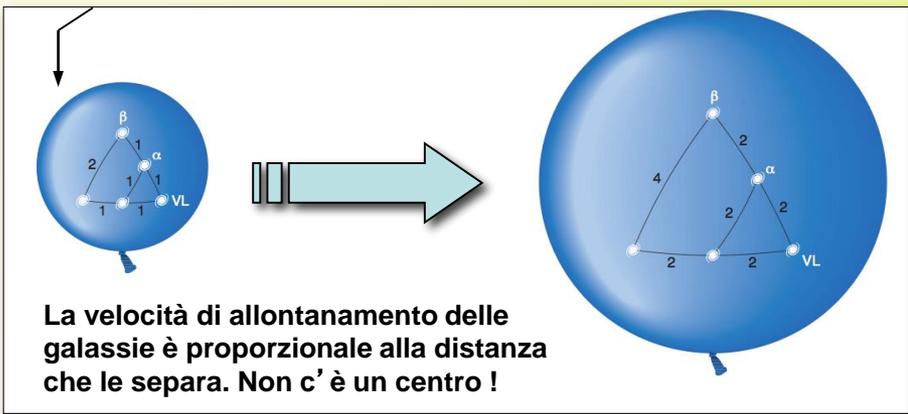
(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)



1929, Legge di Hubble: Espansione dell'Universo



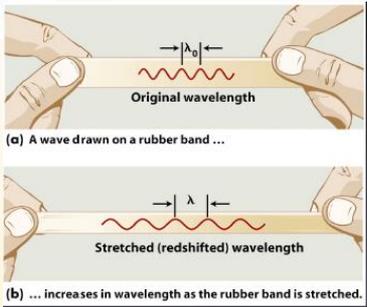
lo spazio (qui rappresentato in solo due dimensioni) è la superficie del palloncino, non tutto il palloncino.



La velocità di allontanamento delle galassie è proporzionale alla distanza che le separa. Non c'è un centro!

La distanza delle supernovae di tipo Ia viene ottenuta dalla misura della loro luminosità apparente

La velocità di allontanamento è misurata dal redshift cosmologico causato dall'espansione dello spazio (simile all'effetto Doppler).

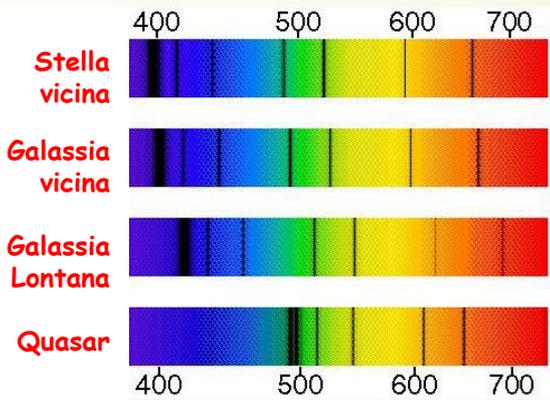


$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$$

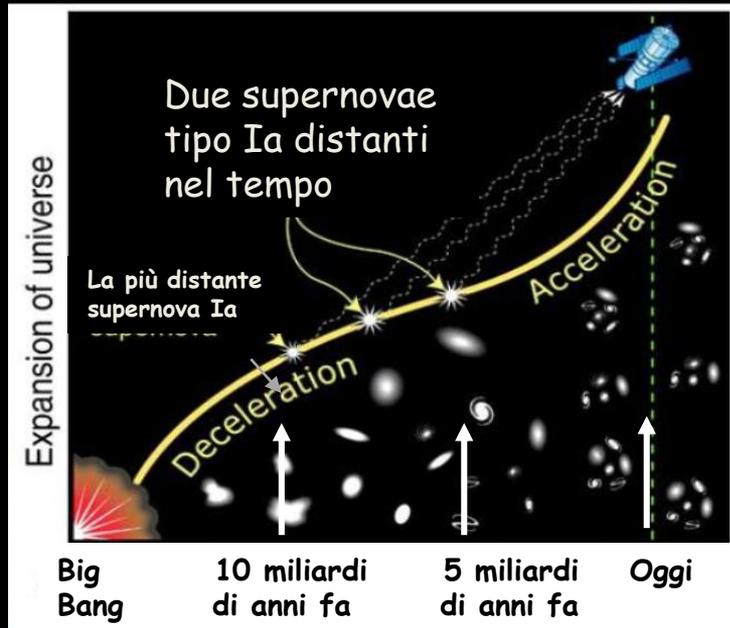
$$V_r = H_0 d$$

$$V_r = cz$$

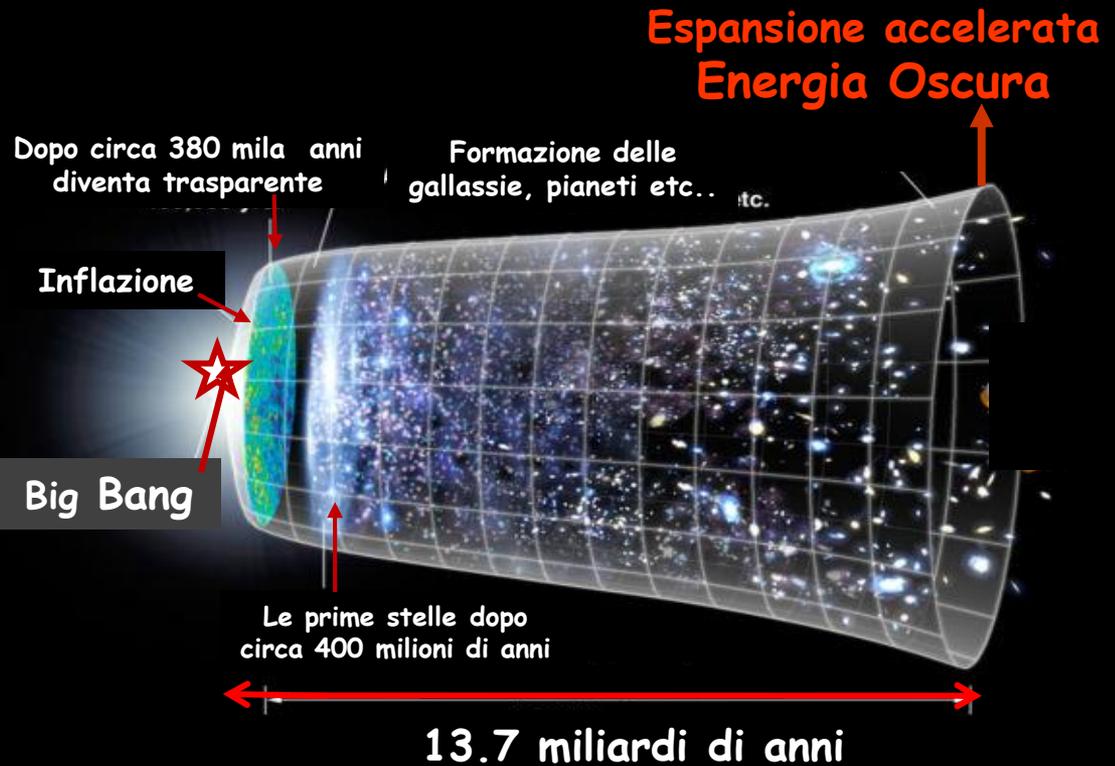
$$d = \frac{c}{H_0} z \propto z$$



L'espansione dell'Universo dal Big Bang ad Oggi

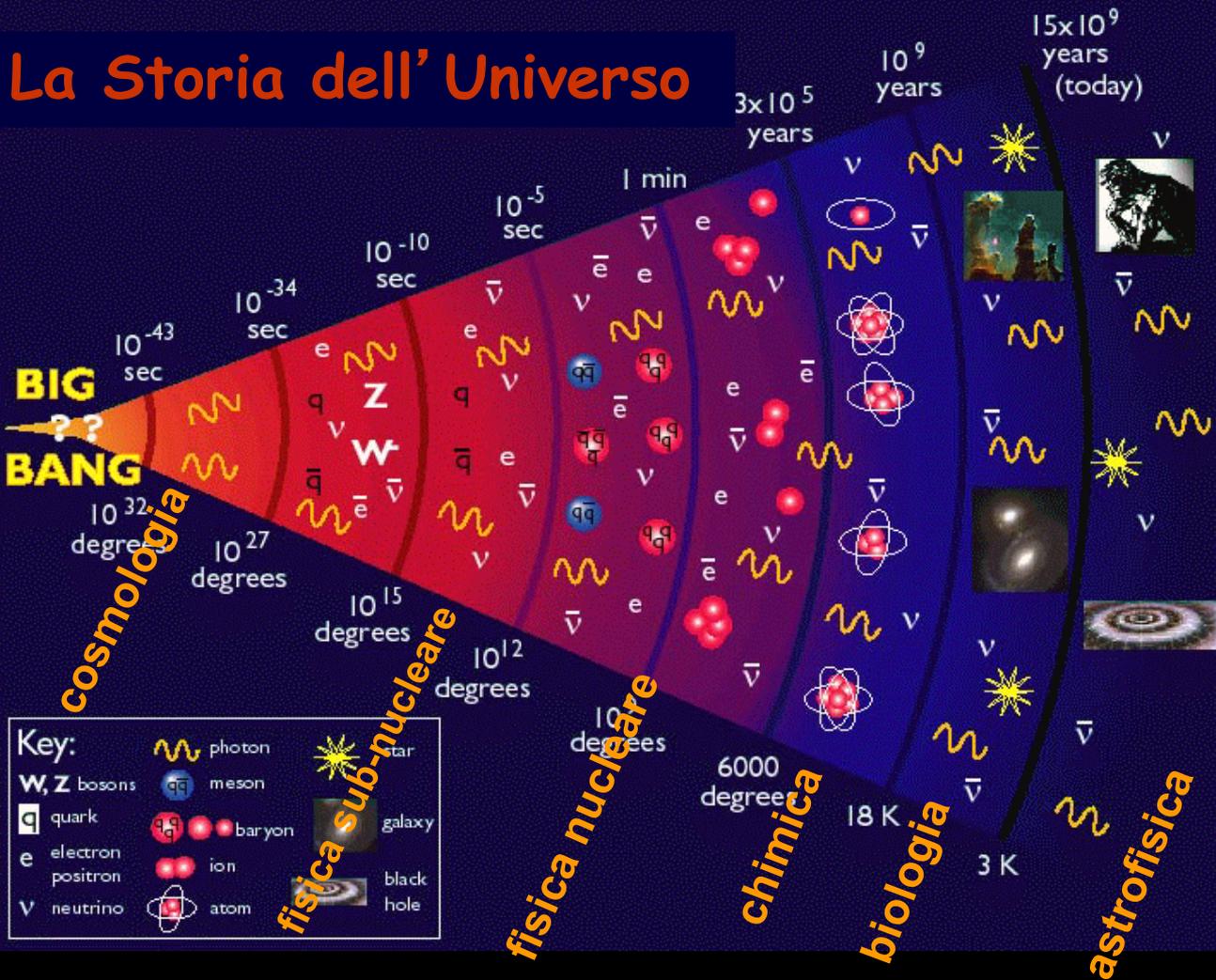


Dalle misure della luminosità apparente di supernovae di tipo Ia distanti nel tempo \Rightarrow a partire da 5 miliardi di anni fa l'espansione dell'Universo ha iniziato ad accelerare

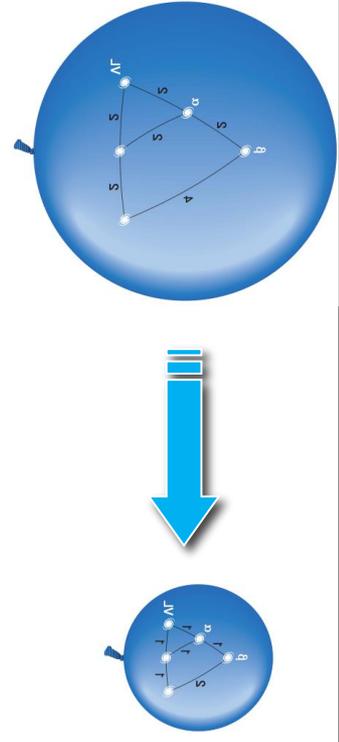


Si ritiene che l'Universo sia iniziato con una singolarità chiamata Big Bang, un evento iniziale che dette origine al tutto: allo spazio, al tempo e all'energia (materia e radiazione). Il modello descrive l'evoluzione dell'Universo da uno stato primordiale denso, caldo e uniforme a quello presente lungo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

La Storia dell' Universo



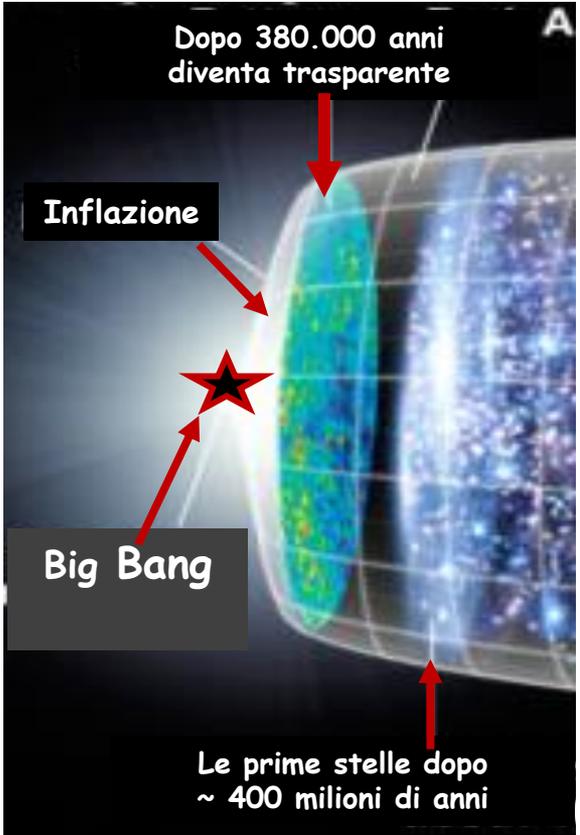
Andando indietro nel tempo (sgonfiando il palloncino) lo spazio in cui è confinato l'Universo diminuisce e quindi la temperatura aumenta.



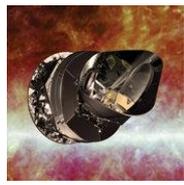
Il Big Bang segna l'istante in cui spazio e tempo hanno iniziato ad esistere. Secondo la teoria, da uno stato iniziale in cui materia e radiazione erano mescolati in una forma molto calda e densa, e le 4 forze fondamentali della natura (gravità, elettromagnetismo, forza nucleare debole e forte) erano unificate, l'Universo ha cominciato ad espandersi e la materia a raffreddarsi.

Durante il primo secondo si sono formati protoni, neutroni ed elettroni, quando i fotoni si scontravano e convertivano la loro energia in massa, e le 4 forze si sono separate. La temperatura dell'Universo passò da circa 10³² gradi a 10 miliardi di gradi. Approssimativamente 3 minuti dopo il Big Bang essa scese a 1 miliardo di gradi e protoni and neutroni si unirono a formare i nuclei degli atomi. **Circa 380 000 anni dopo il Big Bang, l'Universo raggiunse la temperatura di 3000 gradi, e gli elettroni poterono combinarsi con i nuclei a formare atomi neutri (epoca della ricombinazione).** Senza più elettroni liberi in grado di diffondere i fotoni, l'Universo divenne trasparente alla radiazione (epoca del disaccoppiamento), ed è questa luce che oggi chiamiamo radiazione di fondo cosmico. Circa 1 miliardo di anni dopo il Big Bang cominciarono a formarsi le stelle e le galassie, e da questa fase in poi l'Universo ha continuato a espandersi e a raffreddarsi sempre più.

Dopo 380000 anni ($T \sim 3000 \text{ }^\circ\text{K}$) la radiazione si disaccoppia dalla materia e la luce si può liberare. L'universo, visto dall'esterno, in quel momento brillerebbe come un unico grande sole...ma l'espansione continua per i successivi ~13 miliardi di anni e a causa dello "stiramento" dello spazio la lunghezza d'onda della radiazione aumenta (l'energia diminuisce) cioè si raffredda...e oggi si trova a soli $T = 2.73 \text{ }^\circ\text{K}$ ($E \sim 2.5 \cdot 10^{-4} \text{ eV}$). Questa radiazione (400 fotoni/cm^3) permea oggi tutto l'universo in modo omogeneo e isotropo ($\Delta T/T \sim 10^{-5}$).



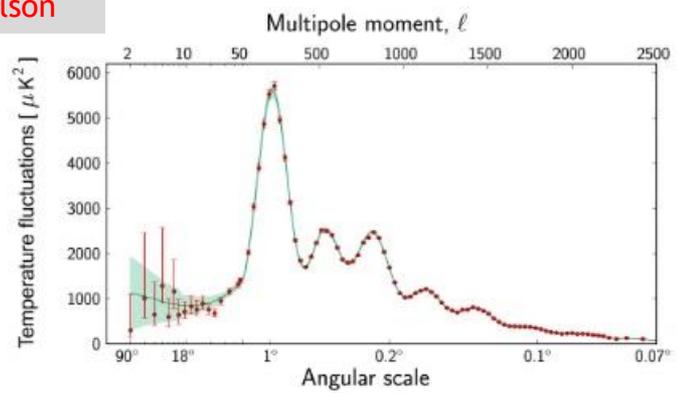
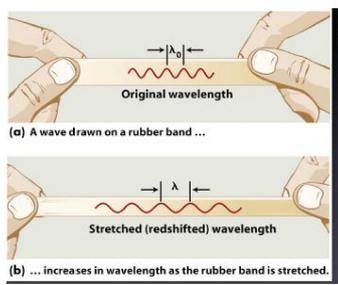
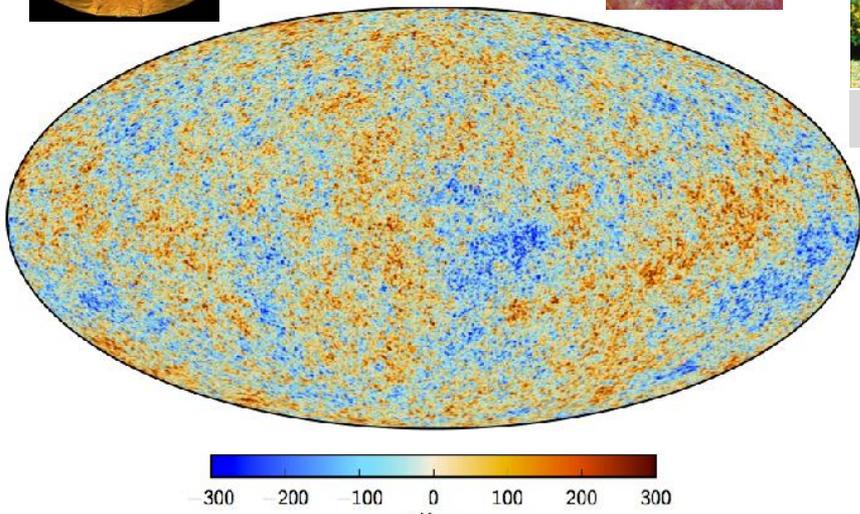
WMAP
2003



PLANCK
2013



1967: A. Penzias e R. Wilson

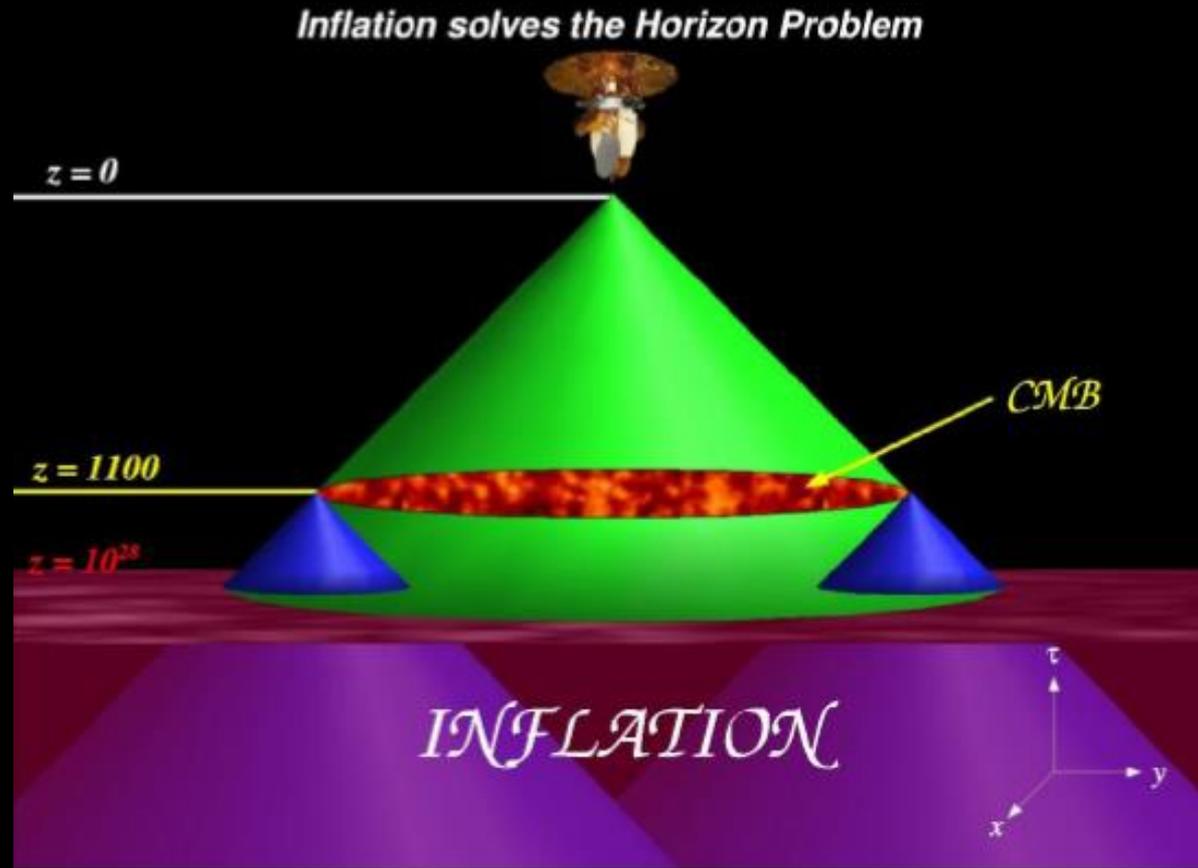


Questa è la più vecchia fotografia del nostro Universo.

Problema dell'orizzonte

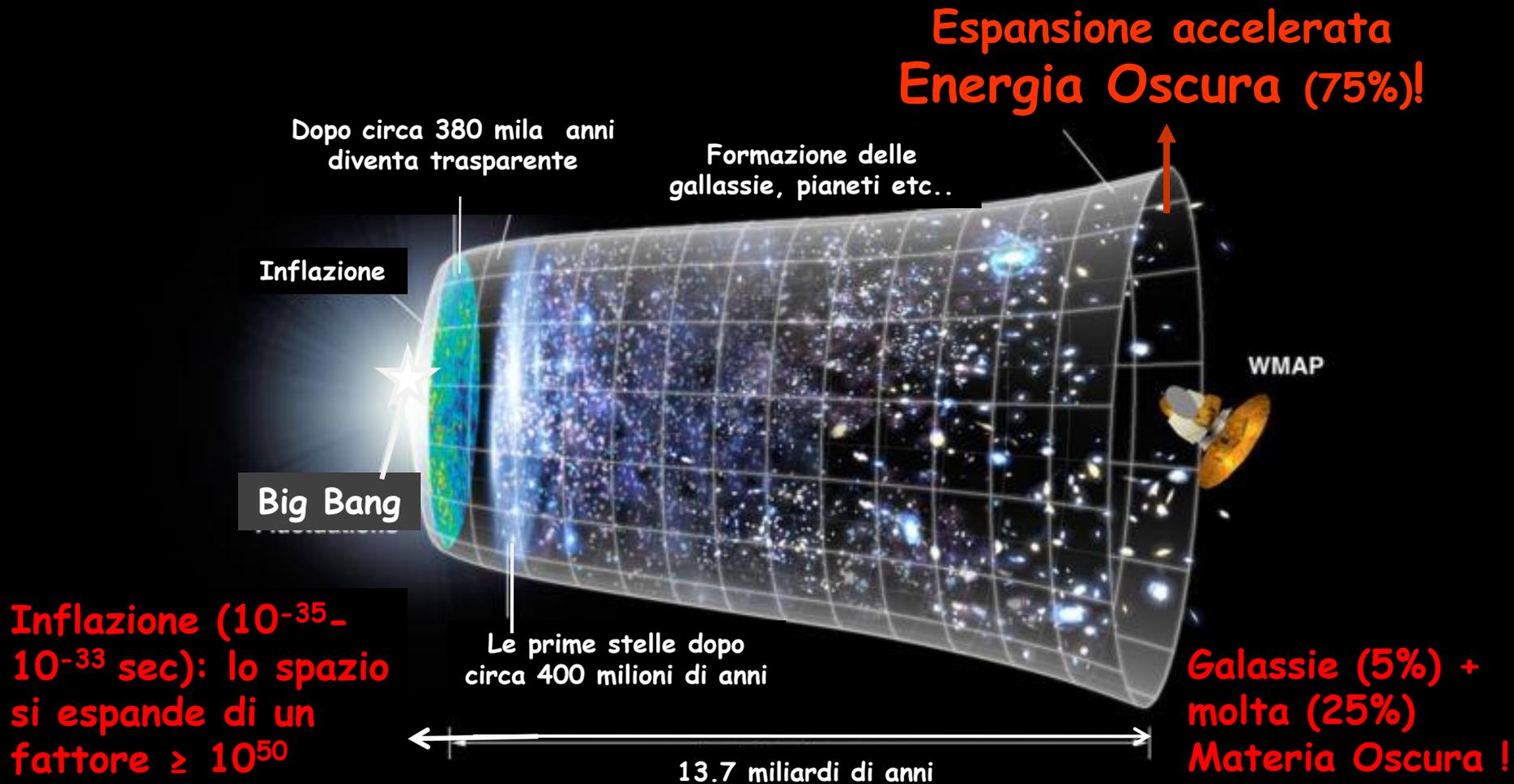
Se due punti da cui proviene il CMB che osserviamo sono troppo distanti perché neppure la luce abbia il tempo sufficiente dopo il Big Bang per connetterli, evidentemente non possono scambiarsi l'informazione per potersi termalizzare

Una violenta espansione accelerata dello spazio (Inflazione) risolve il problema dilatando punti sufficientemente vicini da potersi termalizzare



I coni che si vedono sono i percorsi dei raggi di luce

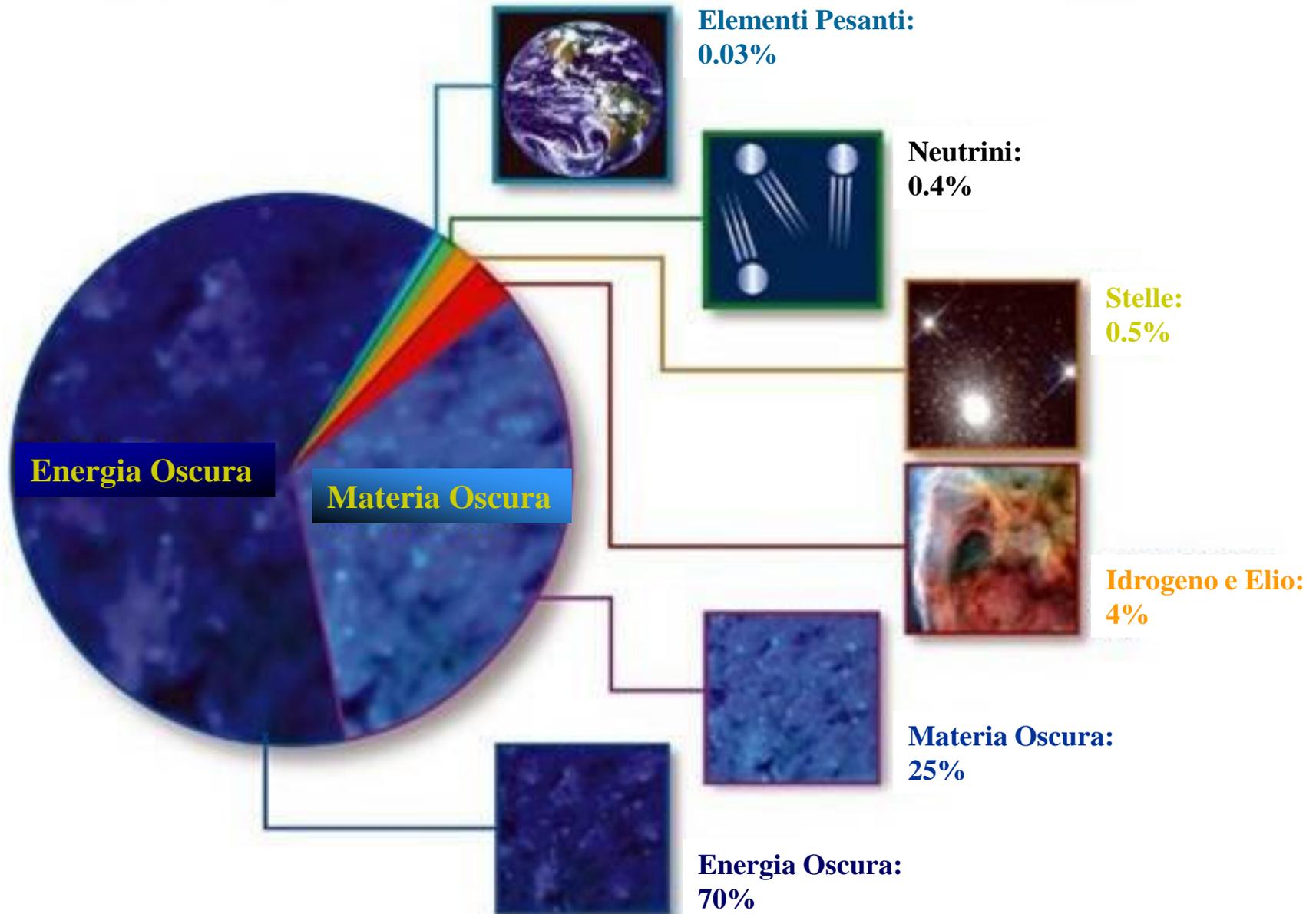
L'espansione dell'Universo dal Big Bang ad Oggi



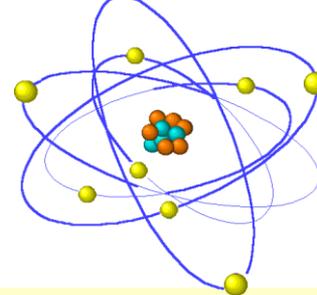
Si ritiene che l'Universo sia iniziato con una singolarità chiamata Big Bang, un evento iniziale che dette origine al tutto: allo spazio, al tempo e all'energia (materia e radiazione). Il modello descrive l'evoluzione dell'Universo da uno stato primordiale denso, caldo e uniforme a quello presente lungo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

Di cosa e' fatto il nostro Universo

(stelle e pianeti sono solo una piccola parte !)



L'atomo



- 1896: Scoperta della radioattività, H. Becquerel, P. Curie, M. Curie
- 1897: Scoperta dell'elettrone, J.J.Thomson
- 1911: Scoperta del nucleo, E. Rutherford
- 1919: Scoperta del protone - E. Rutherford (W. Crokes)
- 1932: Scoperta del neutrone - J. Chadwick.

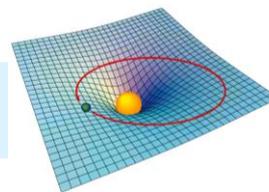
Nel frattempo... molti sono i progressi teorici

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

- La relatività ristretta (1905)

$$E = mc^2$$

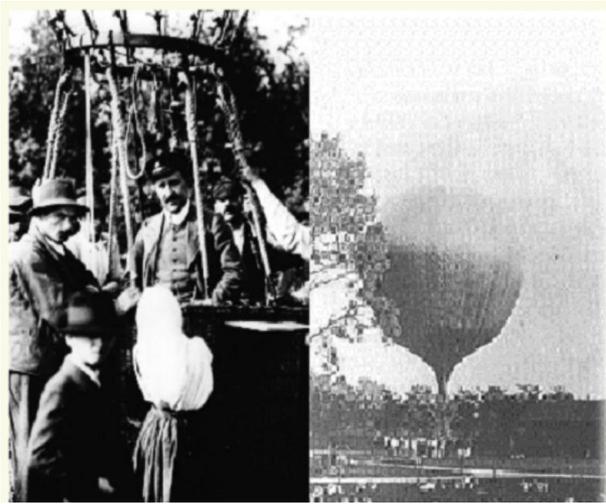
- La relatività generale (1915)



$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = 8\pi G T_{\mu\nu}$$

Oltre la materia ordinaria...

scoperta con i Raggi Cosmici

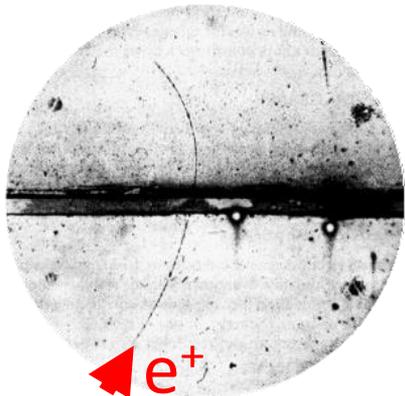


Victor Hess nel 1912 scopre con esperimenti ad alta quota i raggi cosmici

I raggi cosmici primari producono sciame di particelle nell'atmosfera



Sulla superficie della Terra :~ 1/sec/dm²

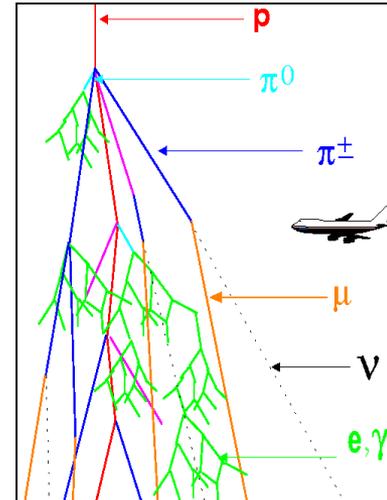


1932- Anderson scopre il positrone



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

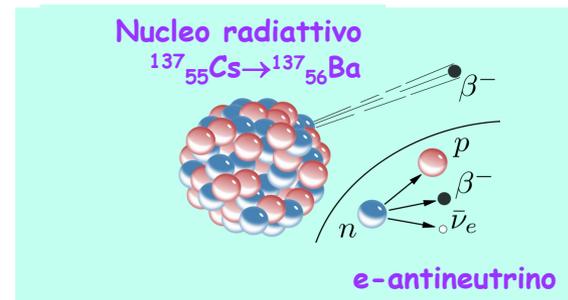
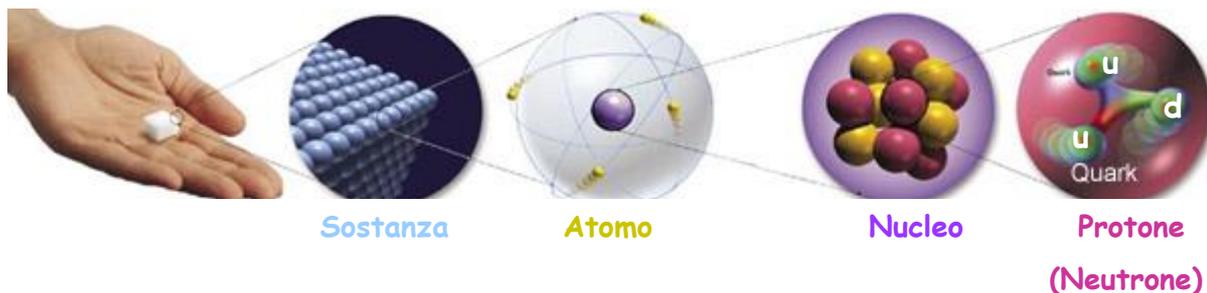
1937-Anderson & Neddermeyer scoprono il mesotrone (muone)



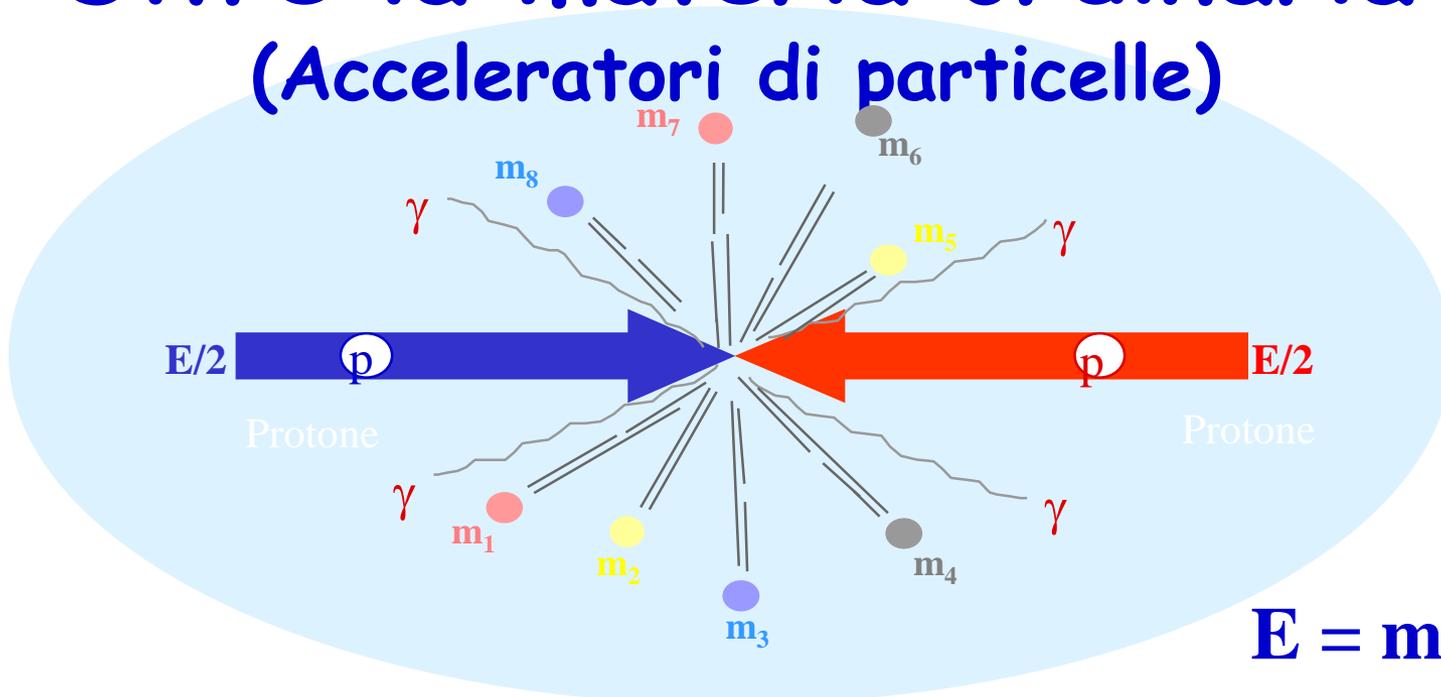
Raggi cosmici primari:
**p 80 %, α 9 %, n 8 %
 e 2 %, nuclei pesanti 1 %
 γ 0.1 %, ν 0.1 %**

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

La materia ordinaria

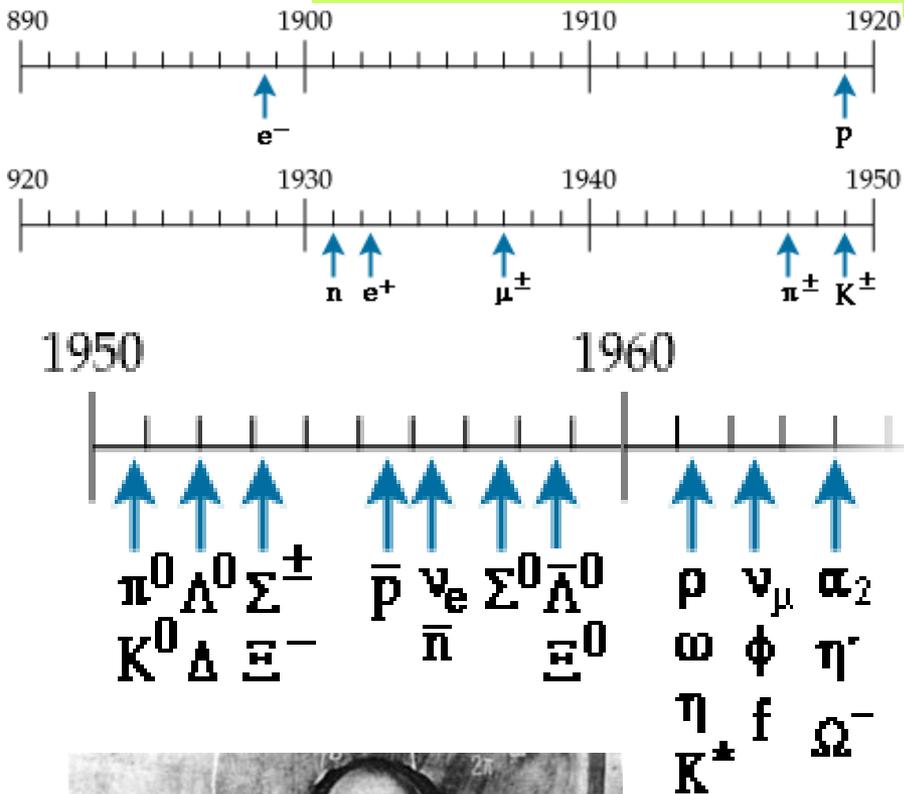


Oltre la materia ordinaria (Acceleratori di particelle)



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,
- 1964, scoperta dello Ω^-
-

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 intuisce l'esistenza di una struttura di simmetria ($SU(3)$), ipotizzando l'esistenza di tre particelle che chiamò quark.

NO! i quark sono sei

... e anche i Leptoni sono sei !



Caffè della Scienza
"Nicola Badaloni"
Livorno
www.caffescienza-livorno.org/



Associazione per la diffusione
della cultura scientifica tecnologica
e dei vari rami del sapere - Pisa
<http://www.lanuovalimonaia.it/>

Alla conquista del "mid"-West: l'esperienza italiana nell'esperimento CDF a Fermilab.

Giovedì 20 Ottobre , Ore 17.15

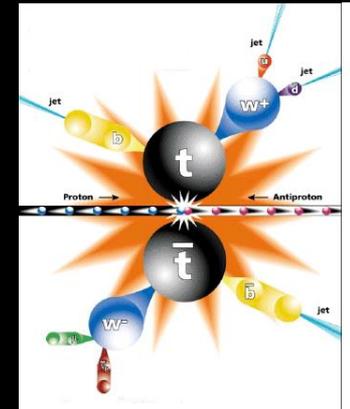
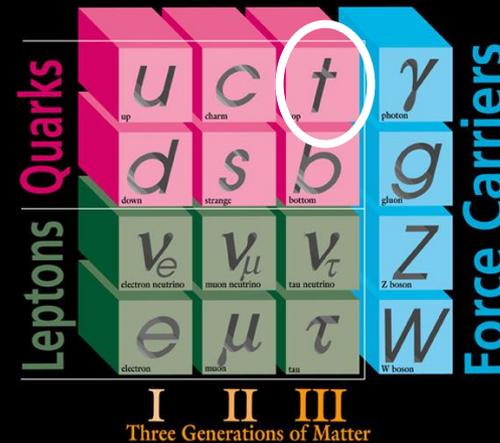
Auditorium Museo Storia Naturale del Mediterraneo, V. Roma N°234, Livorno

Prof. **Franco Bedeschi**, Dirigente di Ricerca nella Sezione INFN di Pisa ,
già Responsabile Nazionale e Internazionale dell'esperimento CDF.

Alla fine degli anni '70 gli americani si sono lanciati nella costruzione del più potente acceleratore di protoni del mondo nelle pianure dell'Illinois vicino a Chicago. Molti fisici italiani si sono uniti a loro per costruire gli strumenti per sfruttare al massimo questa imponente opportunità scientifica.

È l'inizio di un'epopea durata più di trent'anni che ha coinvolto due generazioni di scienziati e ha portato ad importanti scoperte scientifiche; prima fra queste la scoperta del quark "top", che ha completato la lista dei costituenti del modello standard, e lo studio delle sue proprietà.

Il Prof. Bedeschi, racconterà i punti salienti di questa straordinaria avventura che ha lasciato una traccia profonda nella storia della fisica, e di quella italiana in particolare.

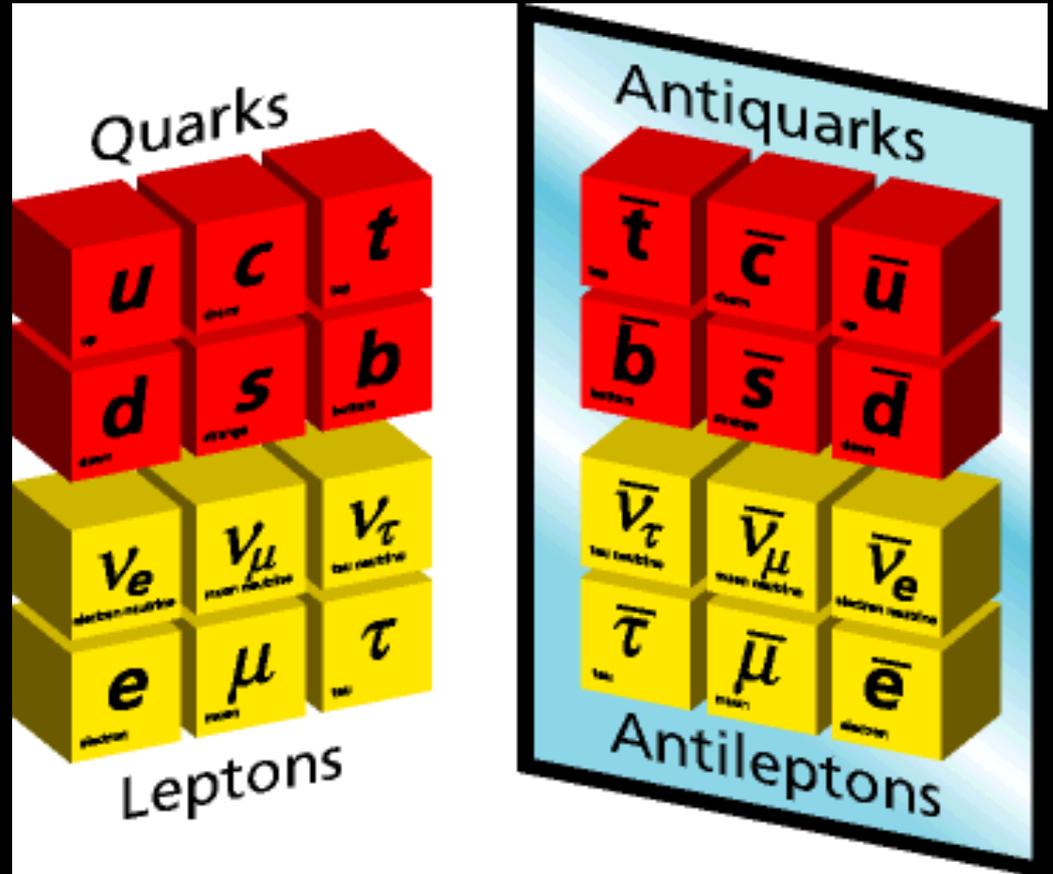


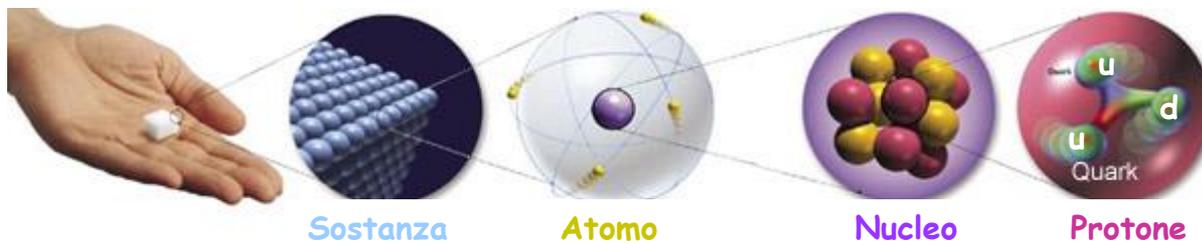
1995 scoperta del sesto quark: il top quark

Materia ed anti-materia

Ogni particella di materia ha la sua anti-particella con carica opposta.

Le particelle forza non hanno le anti-particelle: non esistono gli anti-gluoni o gli anti-fotoni!





Riassumendo:

i costituenti fondamentali della materia sono i fermioni

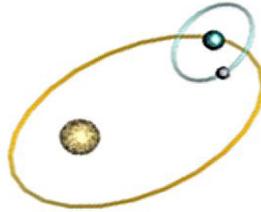
		Quarks		Leptoni	
Le generazioni di materia	I	up	down	e - neutrino	electron
	II	charm	strange	μ - neutrino	muon
	III	top	bottom	τ - neutrino	tau

- Tutta la materia visibile 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 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 $K \rightarrow \pi e\nu$
 - ✓ **Interazione forte:** le particelle decadono in tempi di circa 10^{-20} secondi o inferiori
 - ✧ Esempio: $\Delta^{++} \rightarrow p\pi^+$

Quarks e leptoni interagiscono tra loro scambiandosi dei **messaggeri**, cioè delle particelle specifiche dell'interazione, dette "**particelle forza**".

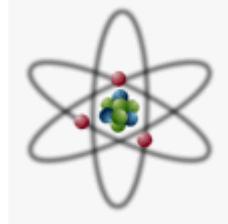
Le forze che conosciamo in natura sono:

Forza gravitazionale:



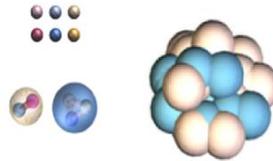
caduta dei corpi, moto stellare...
Il messaggero è il **gravitone**

Forza elettromagnetica:



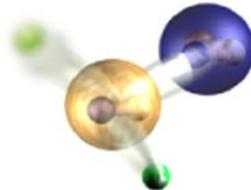
corrente, magneti, atomi, chimica...
Il suo messaggero è il **fotone**

Forza forte:



tiene uniti i protoni e i neutroni
nel nucleo e tiene uniti i quark
Il suo messaggero è il **gluone**

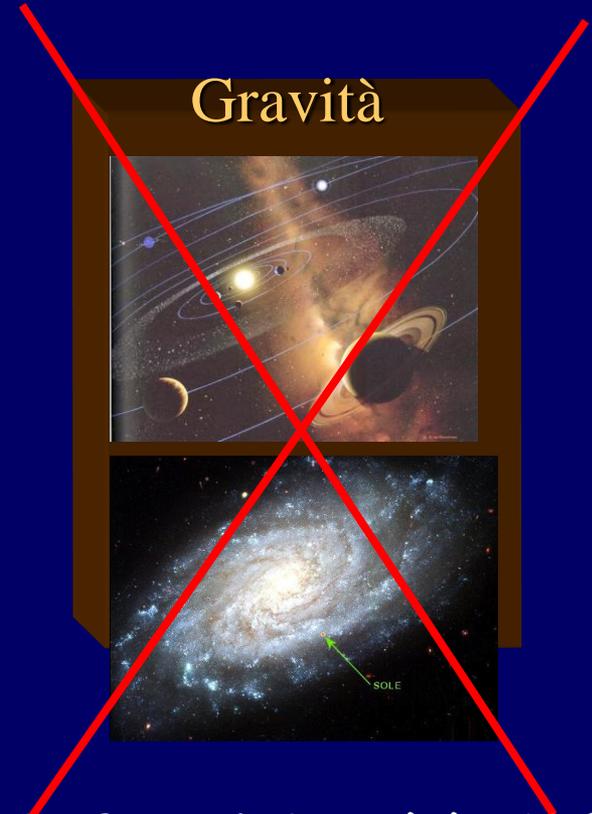
Forza debole



radioattività, attività solare ...
I suoi messaggeri sono i **W^\pm** e la **Z**

Il Modello Standard

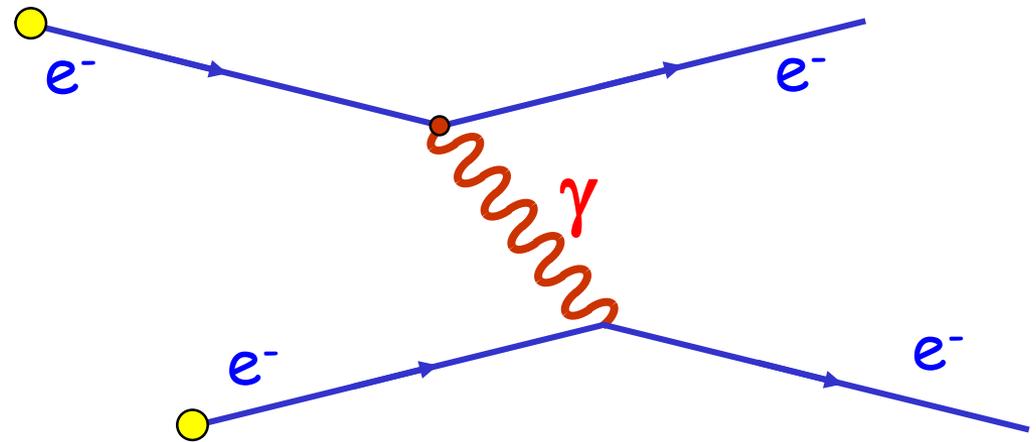
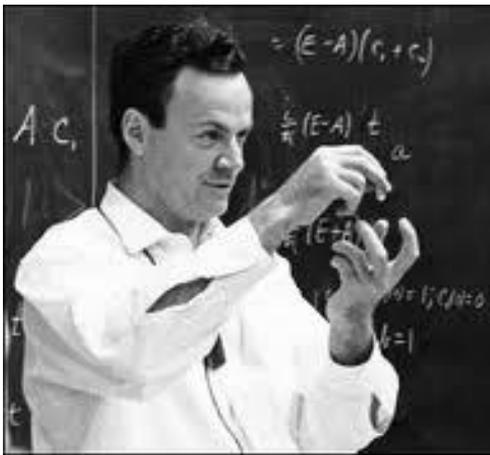
	Fermioni			Bosoni		
Quarks	u up	c charm	t top	g gluone	Meidatori di Forze	
	d down	s strange	b bottom	γ fotone		
	ν_e e-neutrino	ν_μ μ -neutrino	ν_τ τ -neutrino	W bosone		
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tau	Z bosone		
	I	II	III			
Famiglie di materia						



La forza di Gravità è $\sim 10^{-35}$ volte più debole della forza Elettromagnetica e la Relatività Generale non è quantizzabile, cioè non è compatibile con la meccanica quantistica.

La Forza Elettromagnetica: la QED

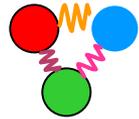
- 1860's: Maxwell, introducendo il concetto di campo, scrive le sue famose equazioni e dimostra che la forza elettrica e quella magnetica sono facce diverse di una stessa interazione, e le unifica nella forza elettromagnetica. Queste equazioni godono di una invarianza sotto una particolare trasformazione (detta di Gauge) corrispondente alla conservazione della carica.
- 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. Nasce la QED !



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.

La Forza Forte: la QCD

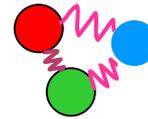
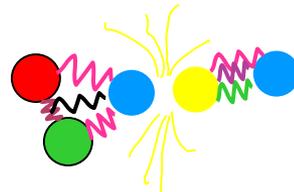
La forza forte fra i quarks decresce con il diminuire della loro distanza e all'interno degli adroni si comportano come se fossero liberi (*libertà asintotica*). Quando si cerca di allontanare i quarks tra loro la forza aumenta e obbliga i quarks a restare *confinati* all'interno degli adroni. Questo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



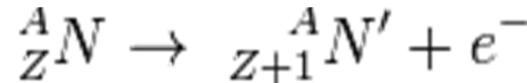
Gross, Wilczek and Politzer, nel 1974 capirono che una **teoria di gauge** era l'unica teoria di campo compatibile con una forza che godesse contemporaneamente della **libertà asintotica** e del **confinamento**:

Nasceva così la QCD !

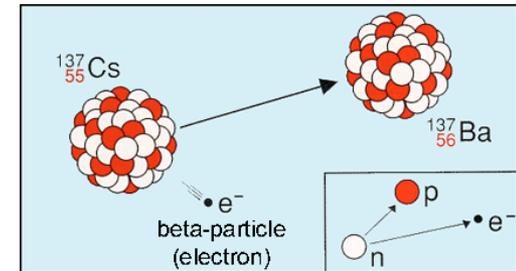
La Forza Debole

(il problema del decadimento β)

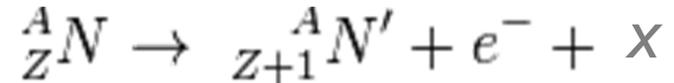
- ✓ 1911-1914: si studia la radioattività: un nucleo si trasforma in un altro emettendo un elettrone (radiazione β):



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

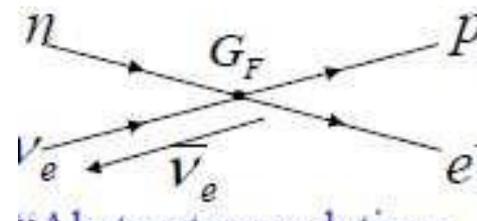
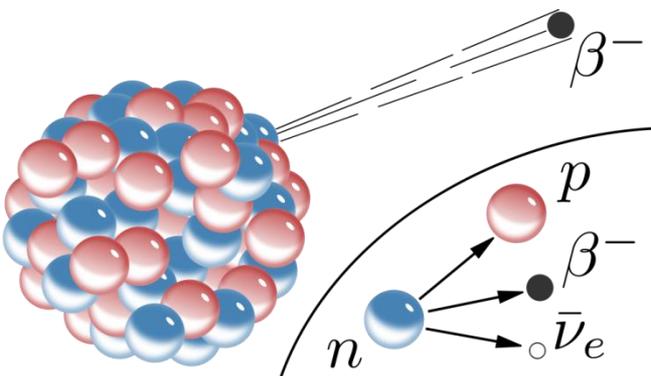


- ✓ 1930: W. Pauli ipotizza che un'altra particella neutra, senza massa e invisibile venga emessa insieme all'elettrone:



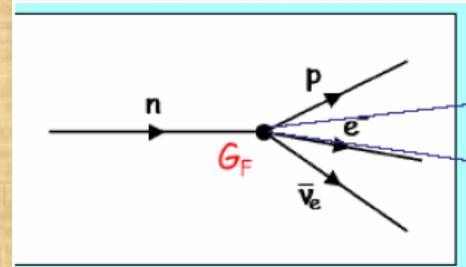
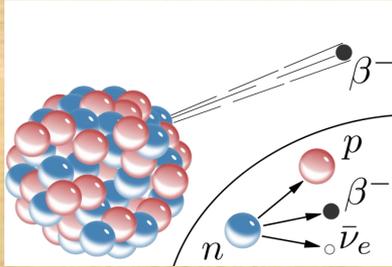
- ✓ 1933: E. Fermi formula teoria del decadimento β e chiama la nuova particella neutrino. Il fenomeno elementare è il decadimento del neutrone. La forza responsabile del decadimento è dovuta a una nuova forma di interazione, molto meno intensa (10^{-5}) della forza elettromagnetica e con un raggio azione molto piccolo (10^{-18} m):

la forza debole.



La Forza Elettrodebole (debole+elettromagnetica)

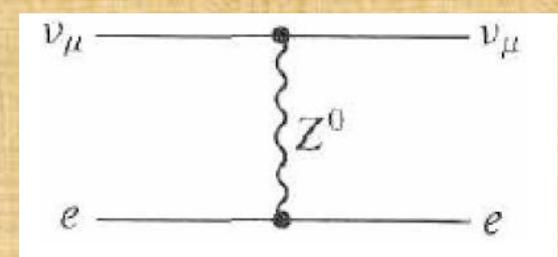
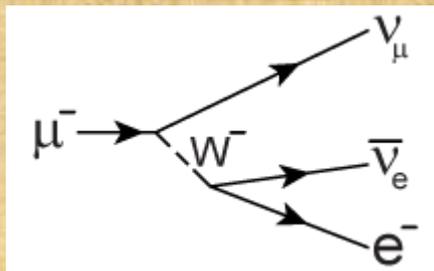
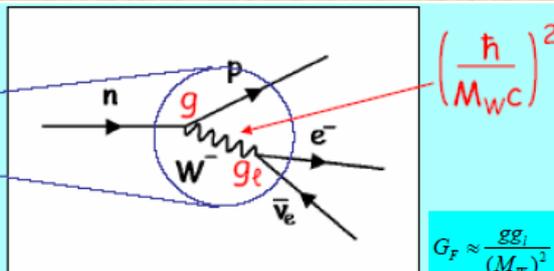
Agli inizi degli anni 60 la teoria di Fermi era ancora considerato il modello migliore per spiegare la fenomenologia delle interazioni deboli, ma non era completamente soddisfacente e ad alte energie violava l'unitarietà.



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

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

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



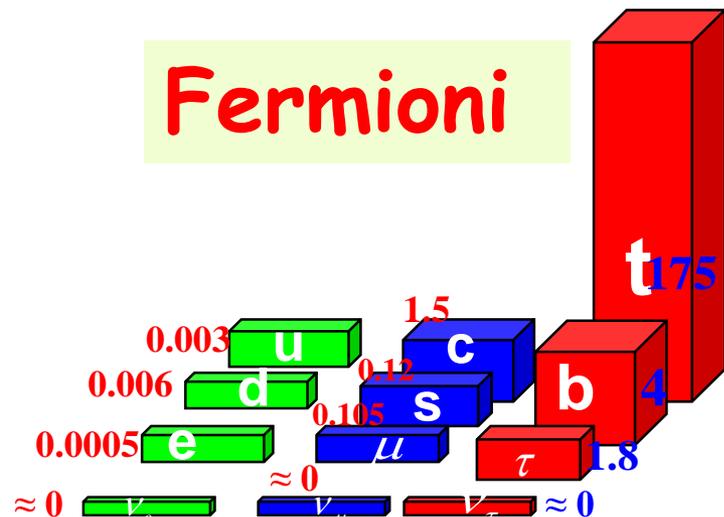
Il modello standard prende forma... ma ci sono difficoltà !

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

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

Le masse (in GeV)

Fermioni



Bosoni



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)

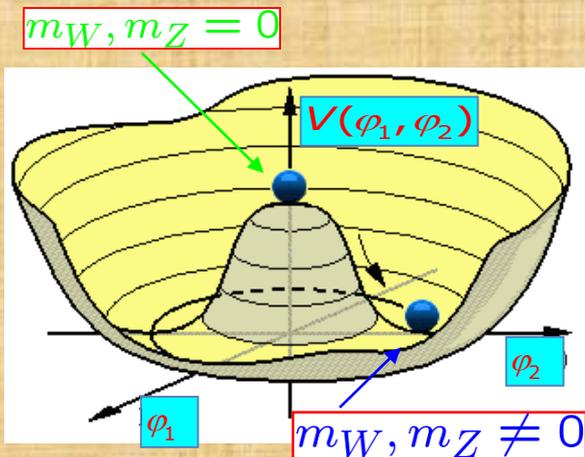
$$\Psi(\mathbf{x}, t) \rightarrow \Psi'(\mathbf{x}, t) = e^{iQ(\mathbf{x}, t)} \cdot \Psi(\mathbf{x}, t)$$

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

Rottura spontanea della simmetria

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

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



Ipotesi:

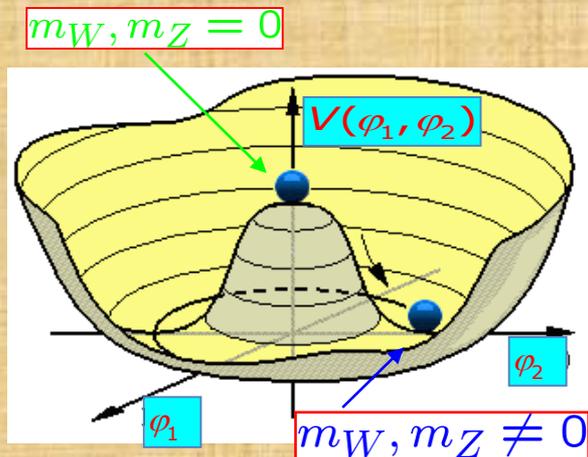
10^{-10} secondi dopo il Big Bang l'Universo raffreddandosi subisce una transizione di fase e il vuoto si porta ad uno stato energetico più basso (rottura spontanea della simmetria) riempiendo lo spazio con il campo di Higgs.

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

Rottura spontanea della simmetria

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

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



Il campo di Higgs

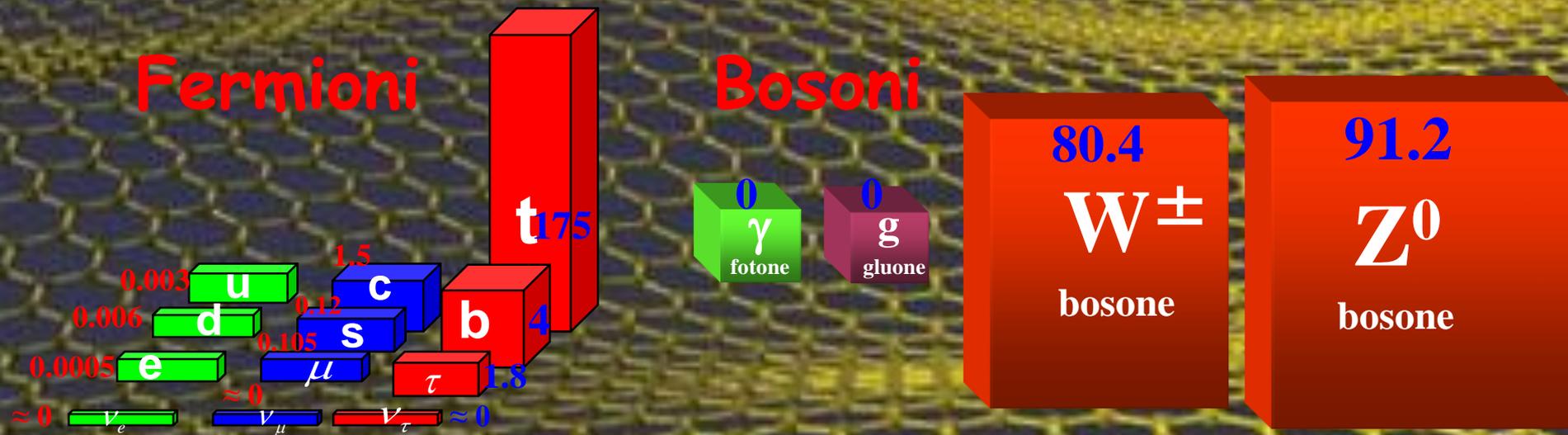
Ipotesi

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

Le masse (in GeV)

Fermioni

Bosoni



Il campo di Higgs

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



top quark



elettrone

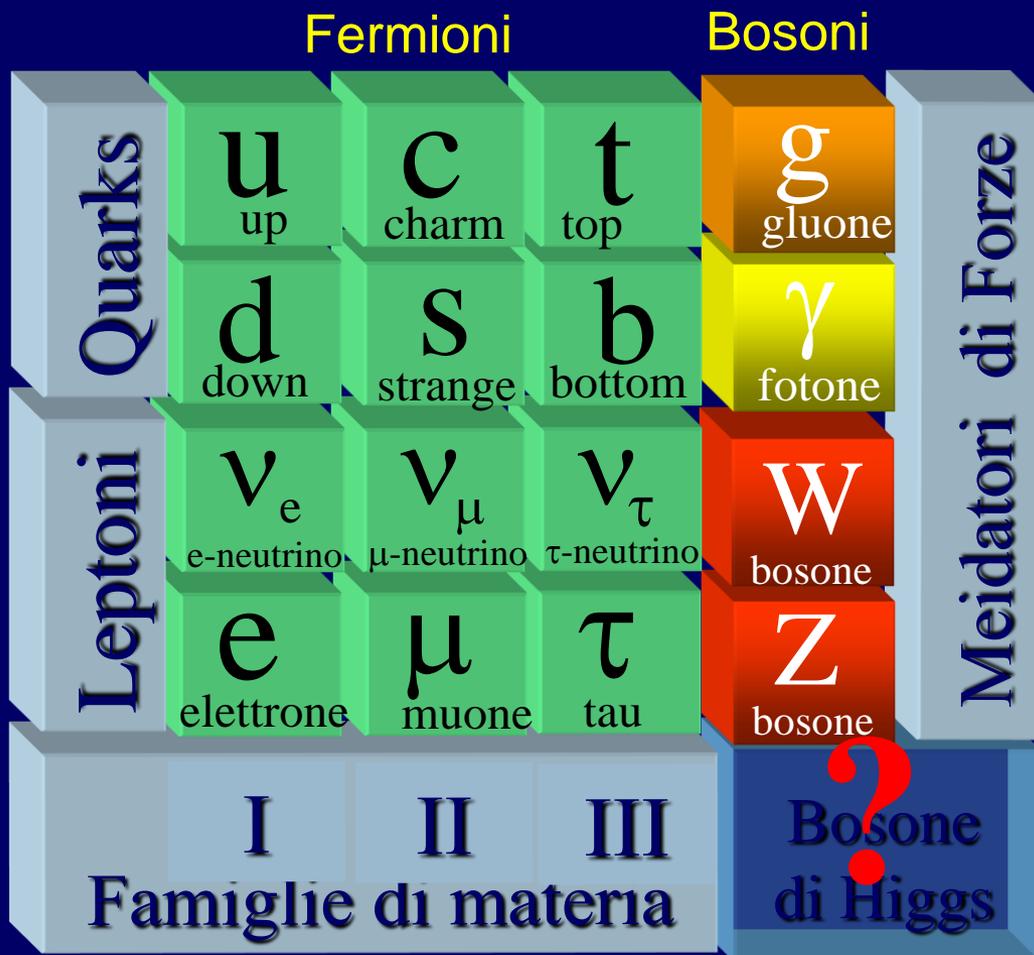
Il campo di Higgs

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

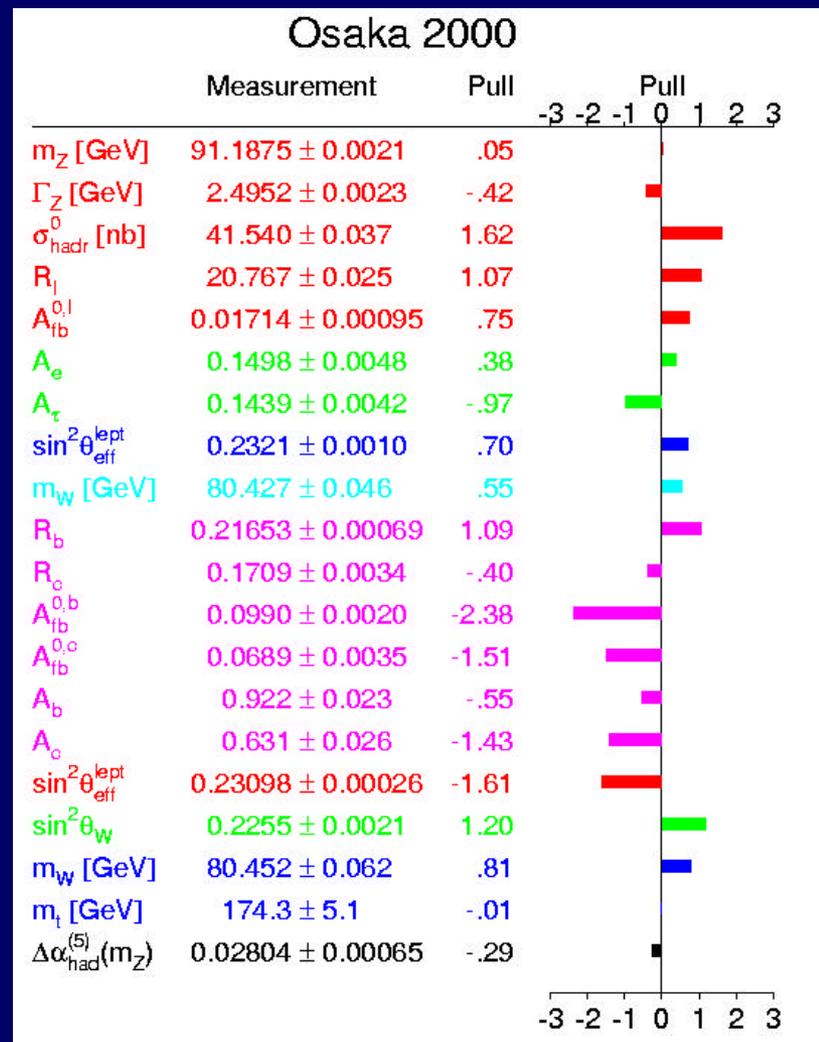
Il Bosone di Higgs !

Il Modello Standard

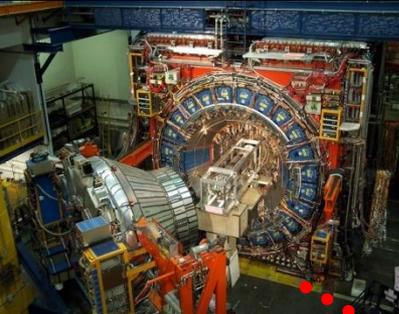
(alla fine del secondo millennio)



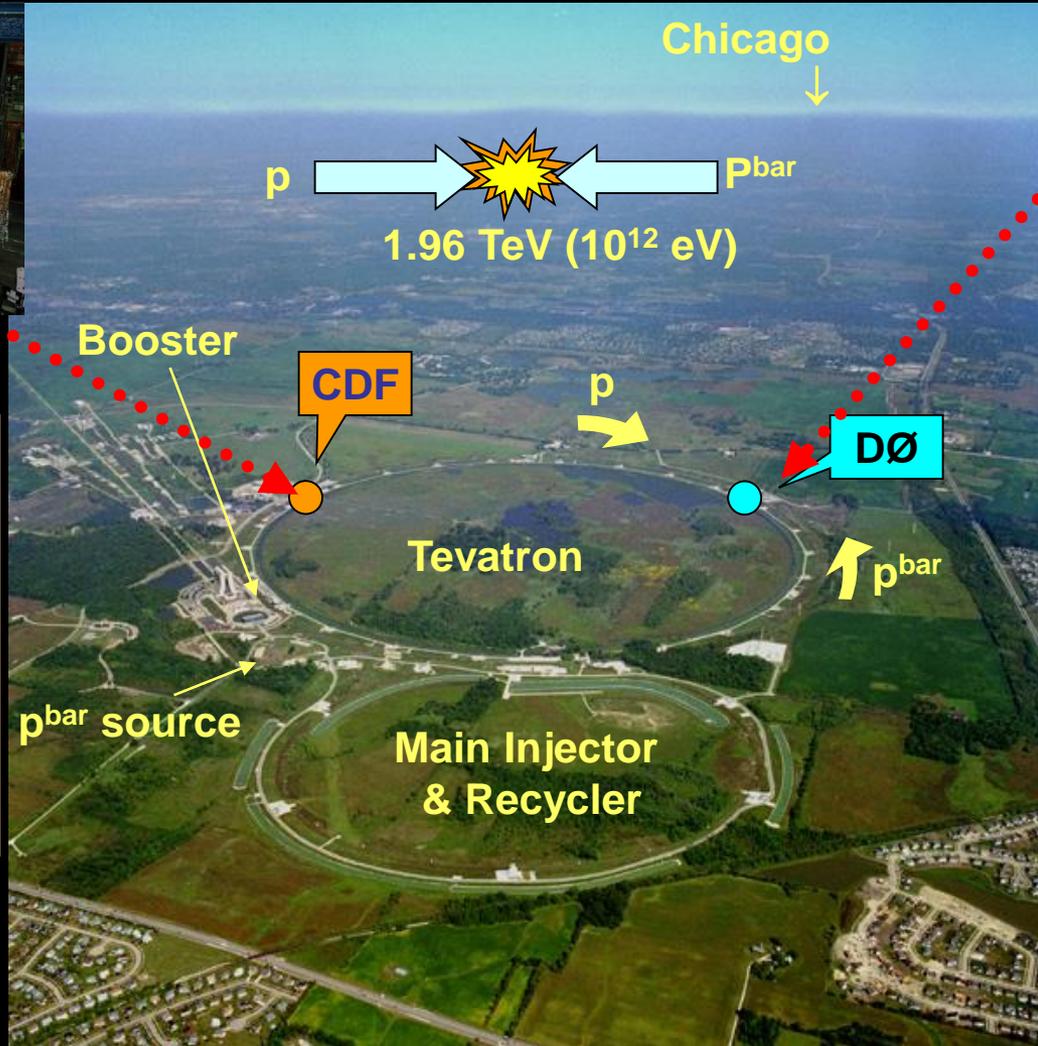
....ma il Bosone di Higgs non si trova !



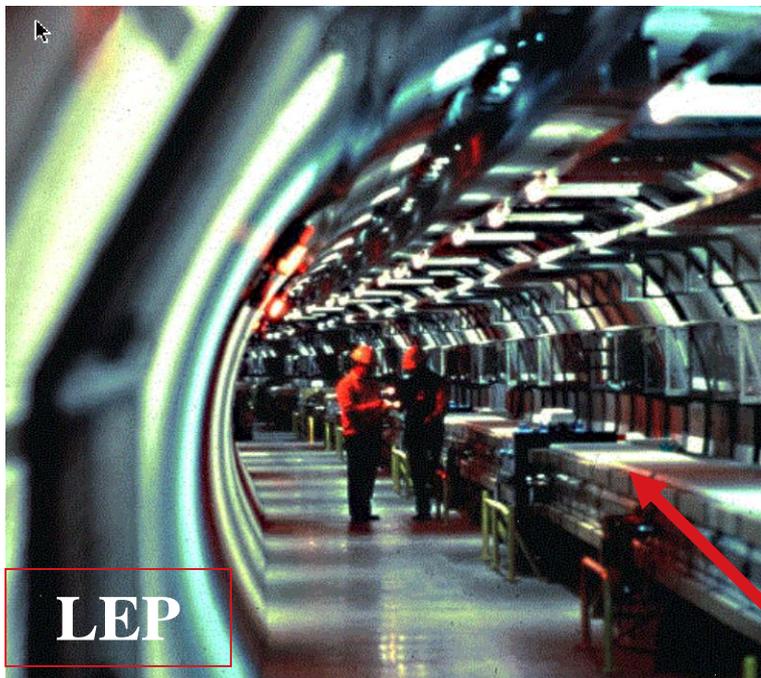
Ricerca dell'Higgs al TeVatron



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



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



LEP



LHC



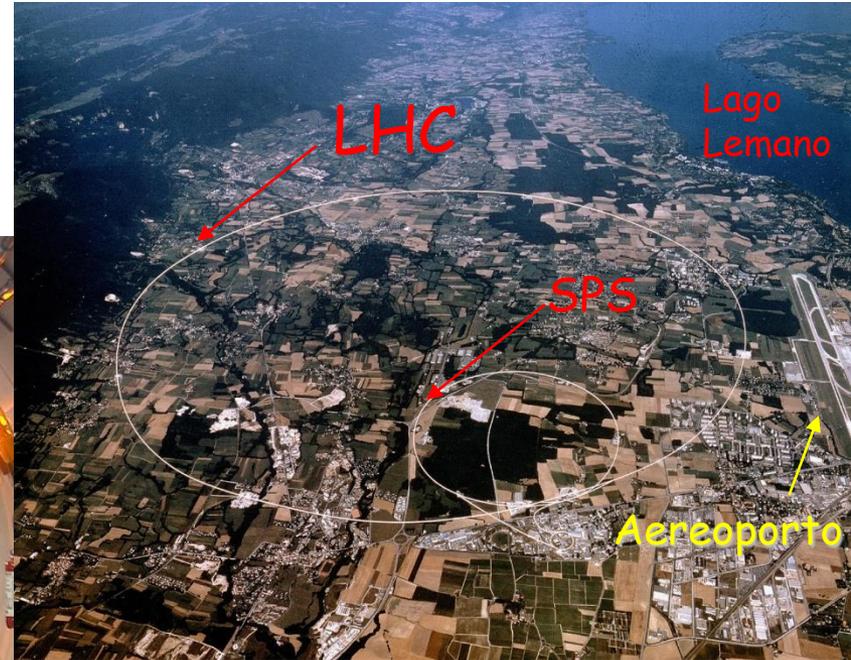
Nel 2000 i magneti di LEP vengono rimossi e inizia l'istallazione di LHC

SPS

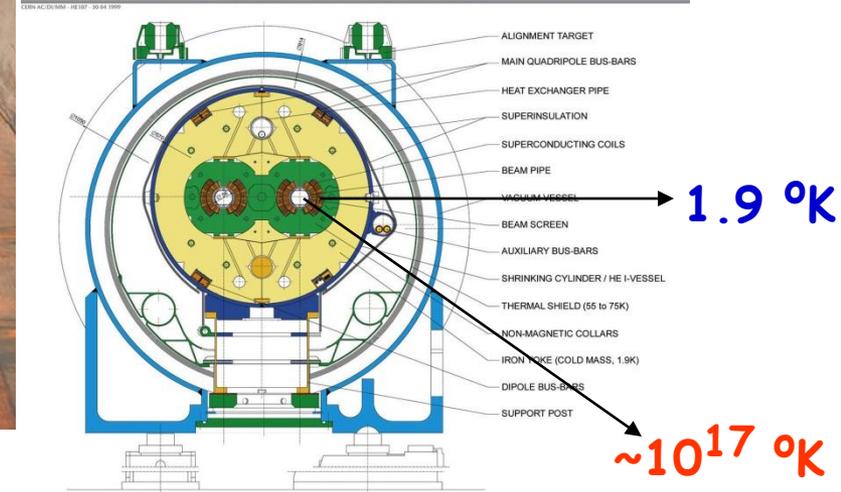
Il Large Hadron Collider del CERN



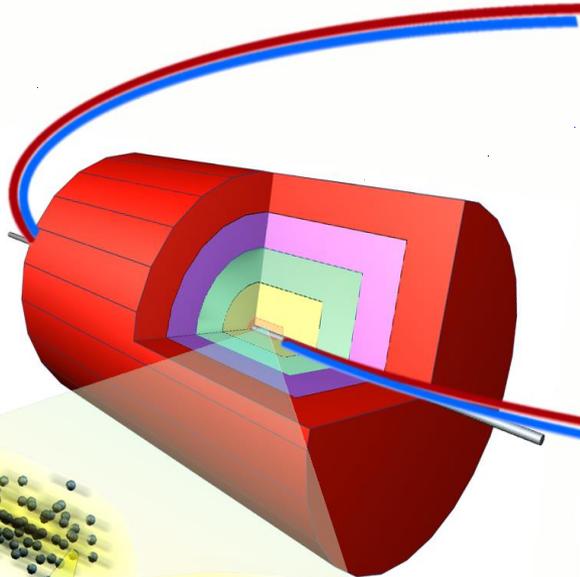
9300 Magneti superconduttori
1232 Dipoli (15m, 1.9 °K) 8.4 tesla 11700 A
448 Main Quads, 6618 Correttori.
Circonferenza 26.7 km



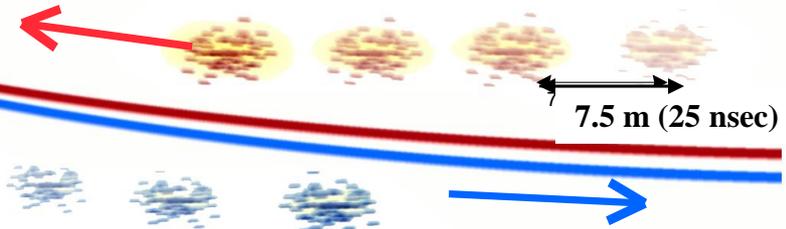
LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION



LHC : collisioni protone-protone fino a 14 TeV



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



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

≈ 600 milioni di collisioni al secondo tra protoni

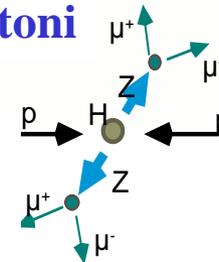
14 TeV

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

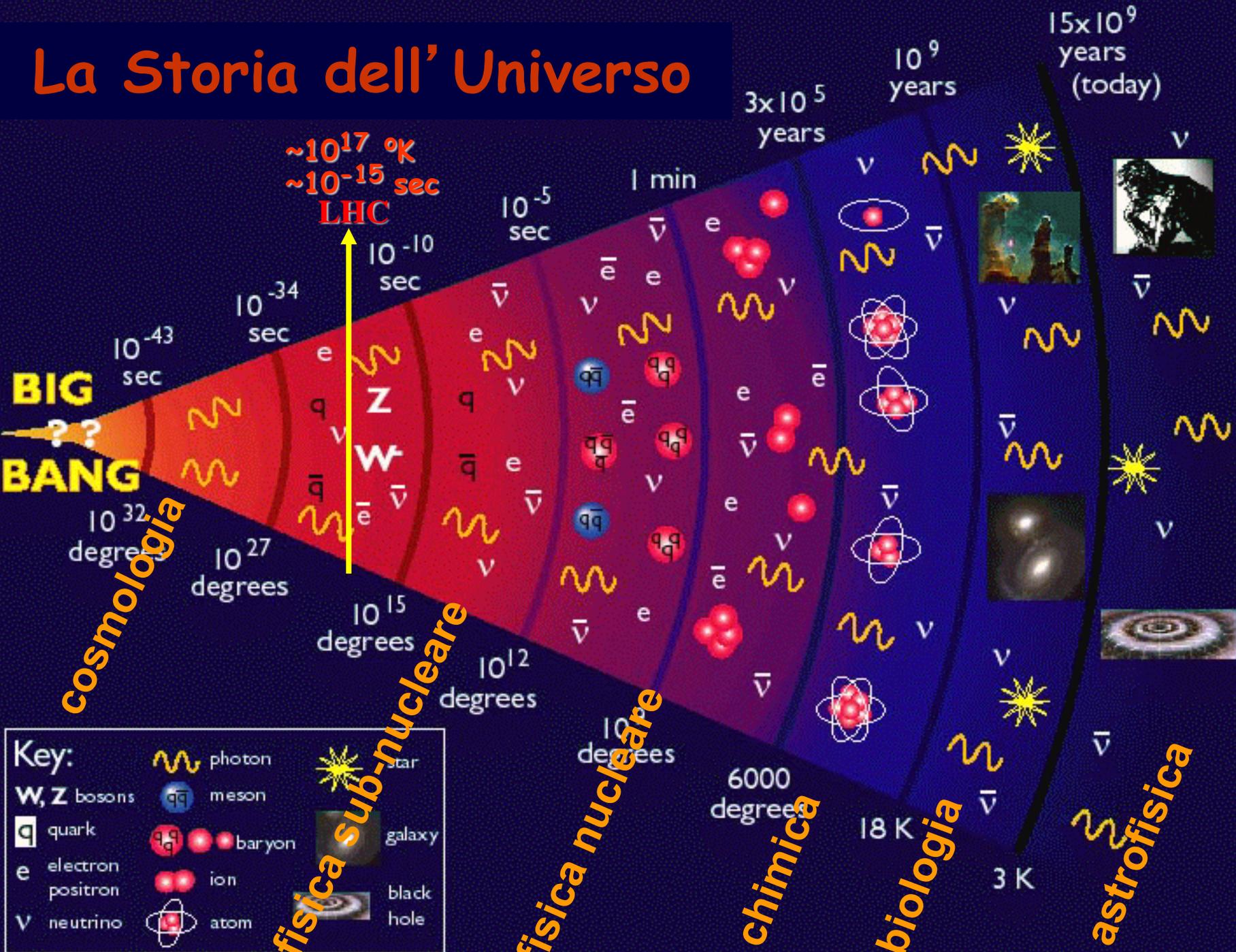
Collisione tra i “partoni” dei due protoni

“quasi” mini-Big Bang

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



La Storia dell' Universo



$\sim 10^{17} \text{ }^\circ\text{K}$
 $\sim 10^{-15} \text{ sec}$
LHC

BIG BANG

cosmologia

fisica sub-nucleare

fisica nucleare

chimica

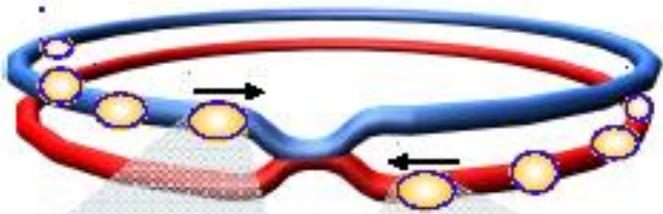
biologia

astrofisica

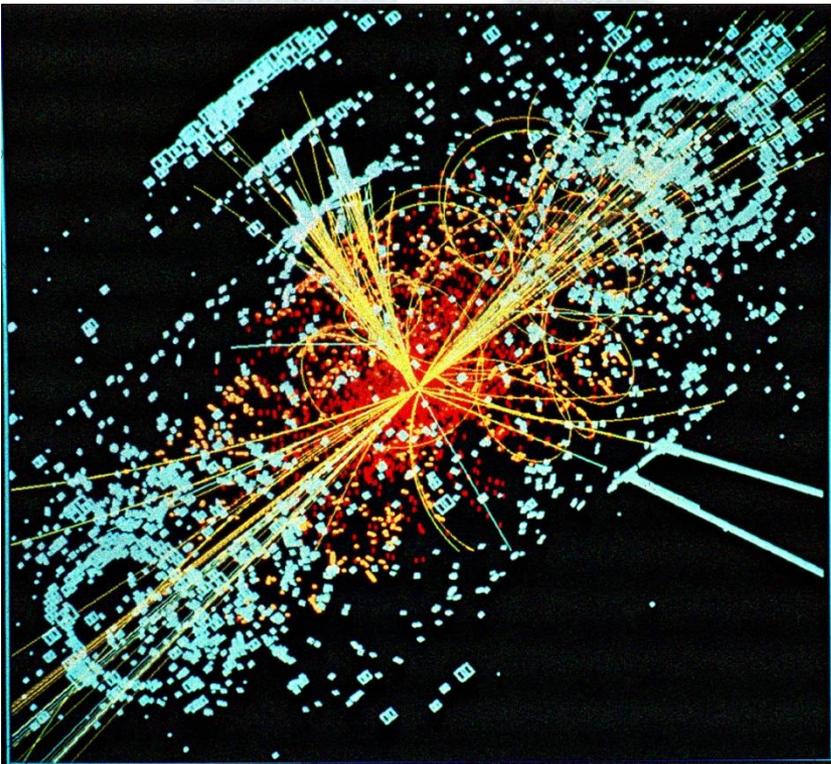
Key:

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

Collisioni protone-protone a LHC



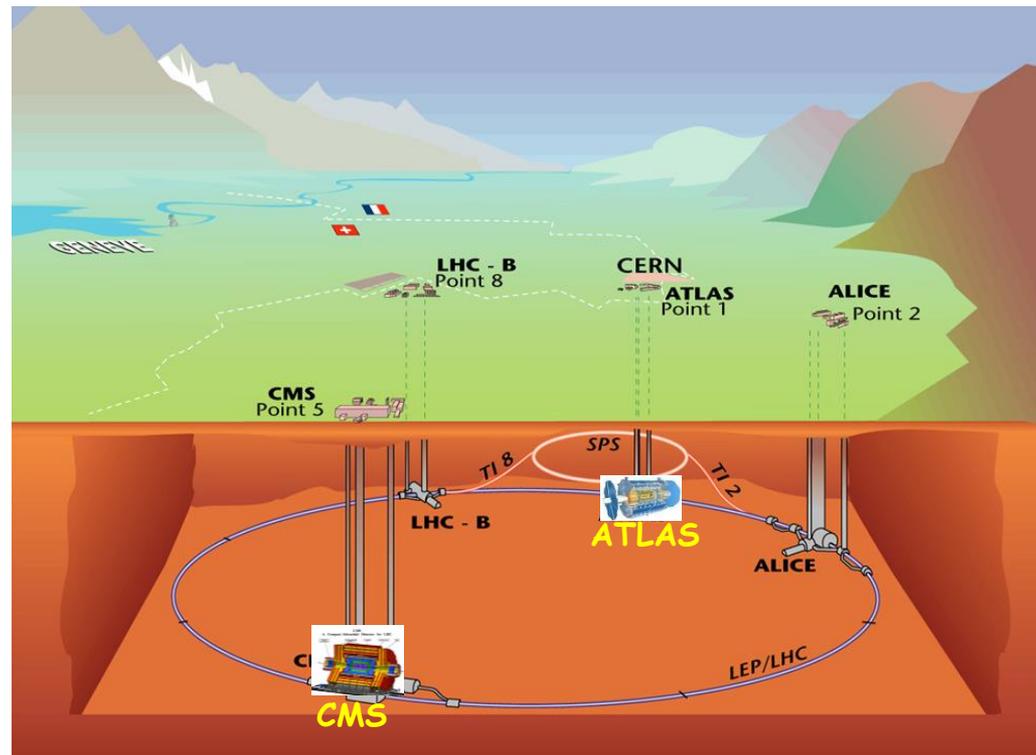
- ~600 milioni di eventi al secondo
- ~40 miliardi di particelle al secondo
- ~1000 particelle ogni 25 ns
- Selezione di 1 evento su diecimila miliardi



“quasi” mini-Big Bang

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

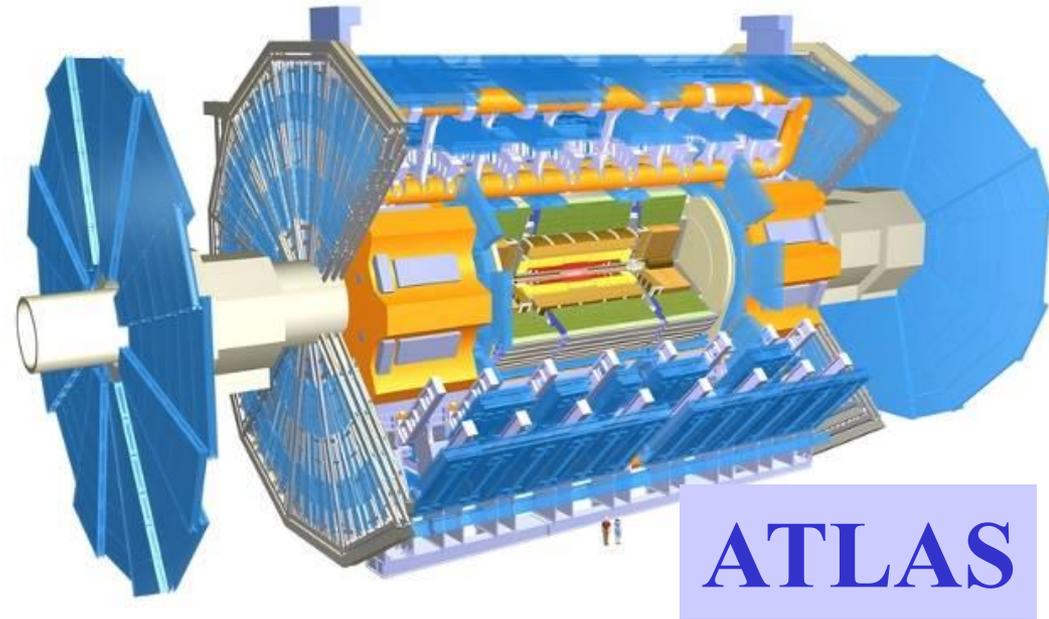
⇒ Rivelatori altamente performanti



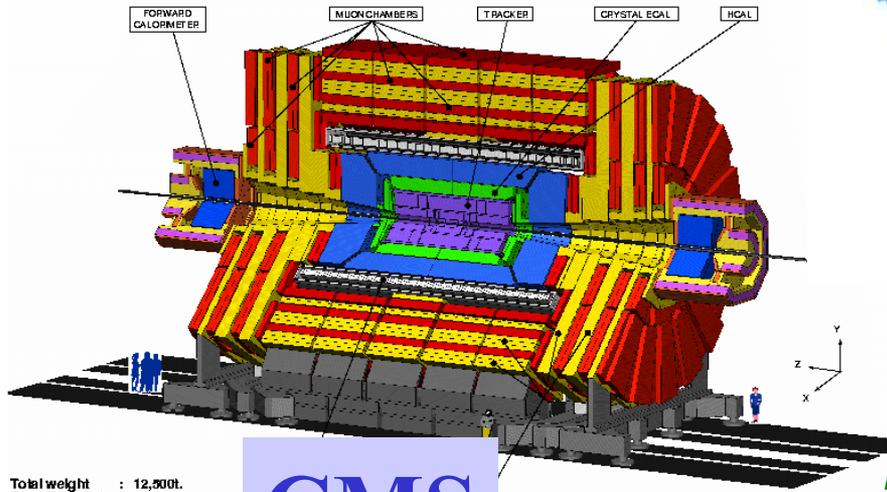
Quanto sono grandi ATLAS e CMS?



ATLAS e CMS accostati ad un edificio di 5 piani



ATLAS



CMS

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

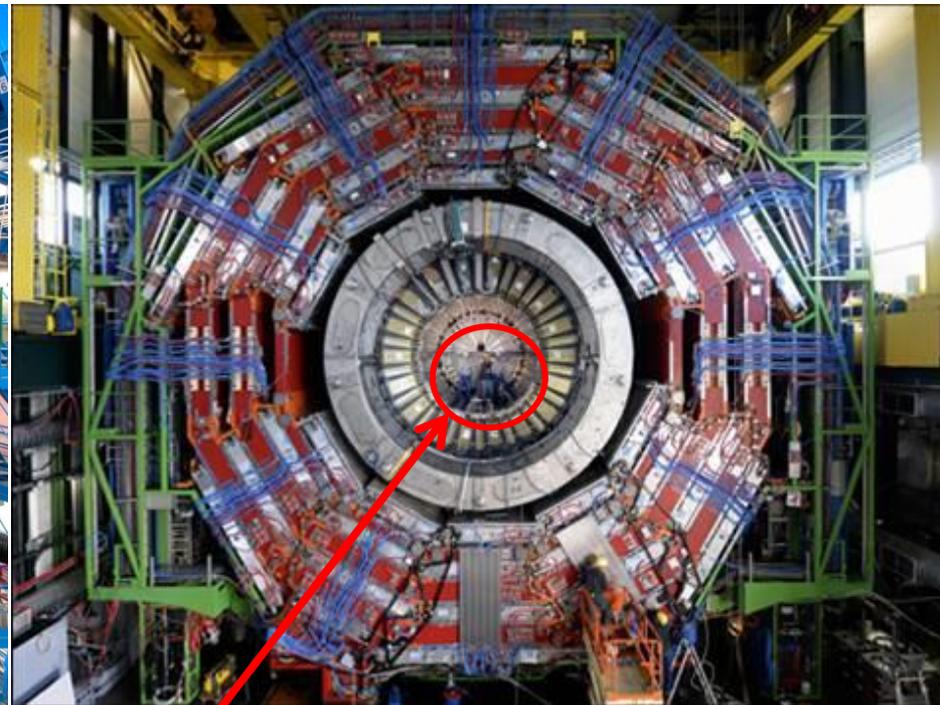
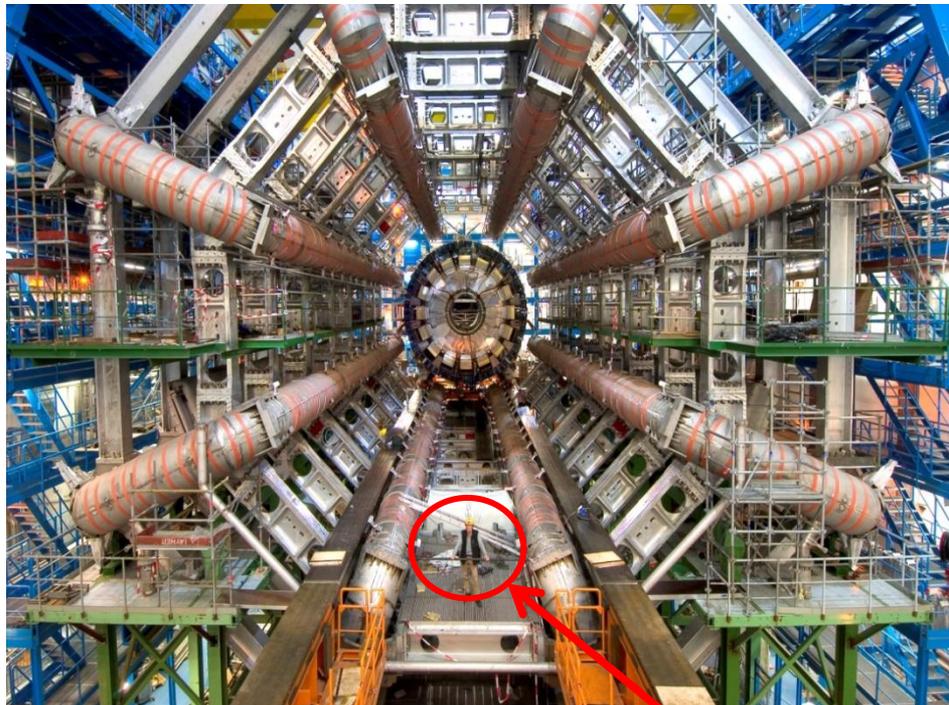
CMS-PARA-001-11/07/97 JLB,PP

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

ATLAS e CMS

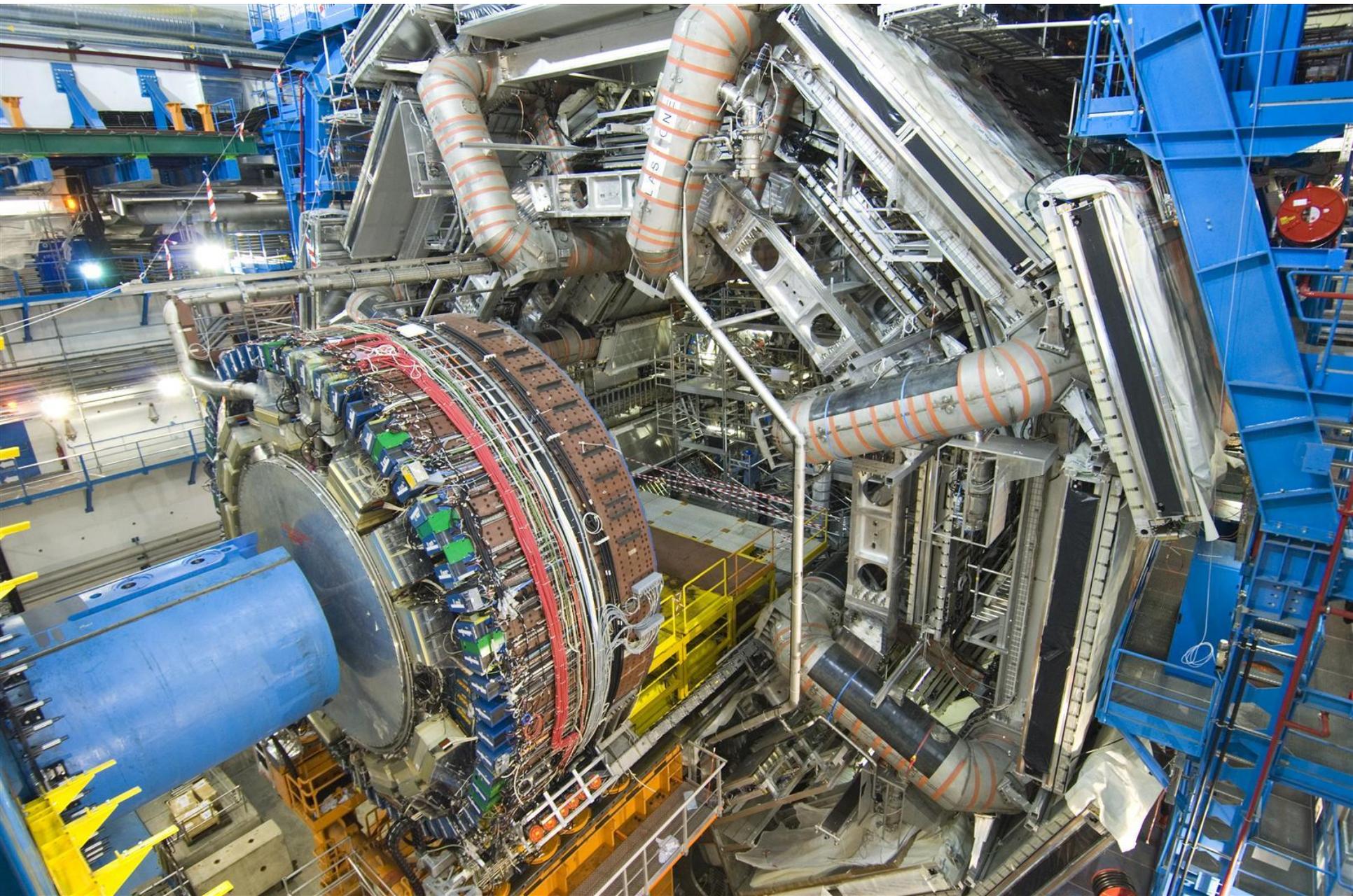
~ 3000 persone tra fisici, ingegneri e studenti lavorano in ciascun dei due esperimenti

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

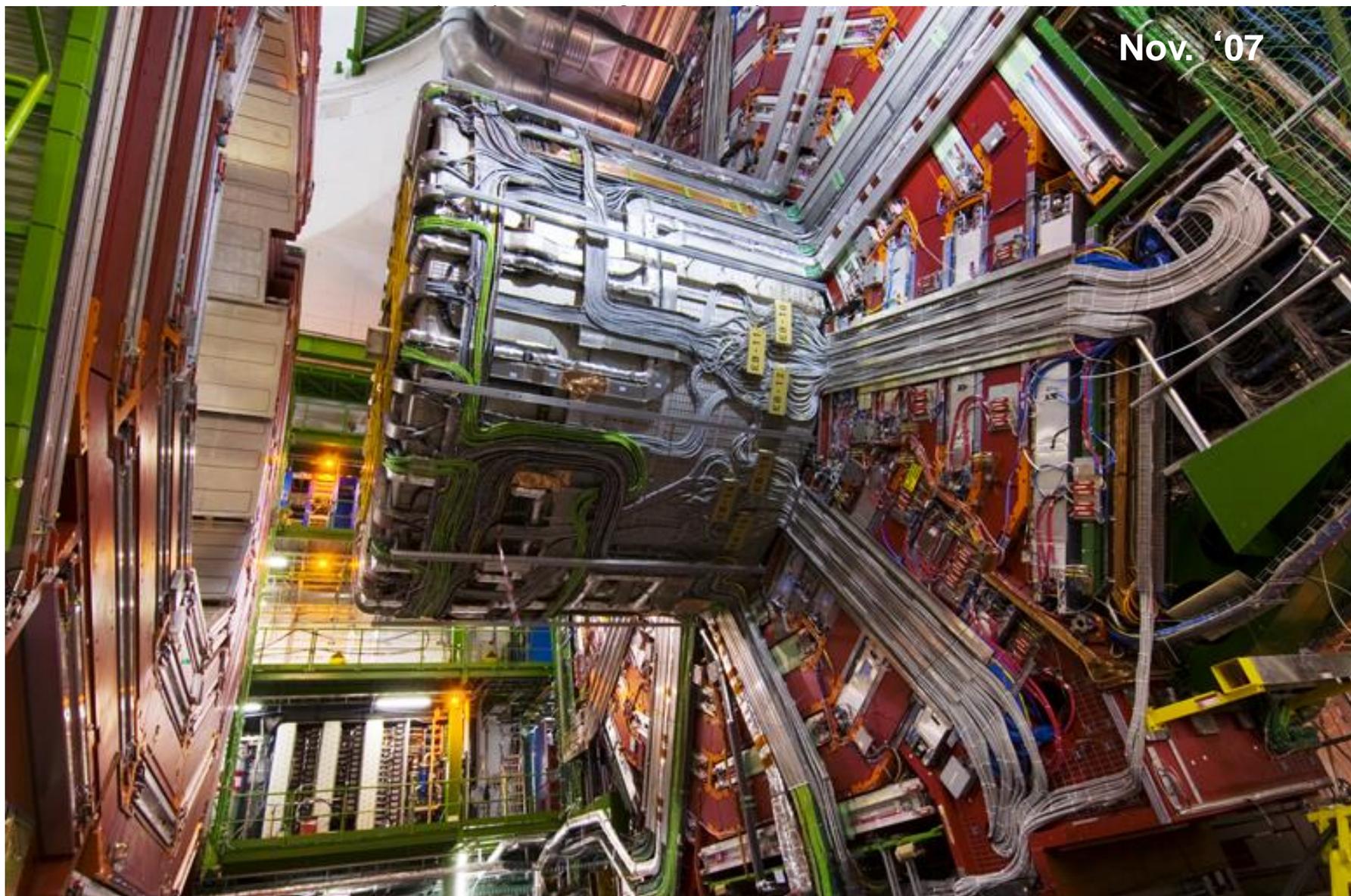


Persone

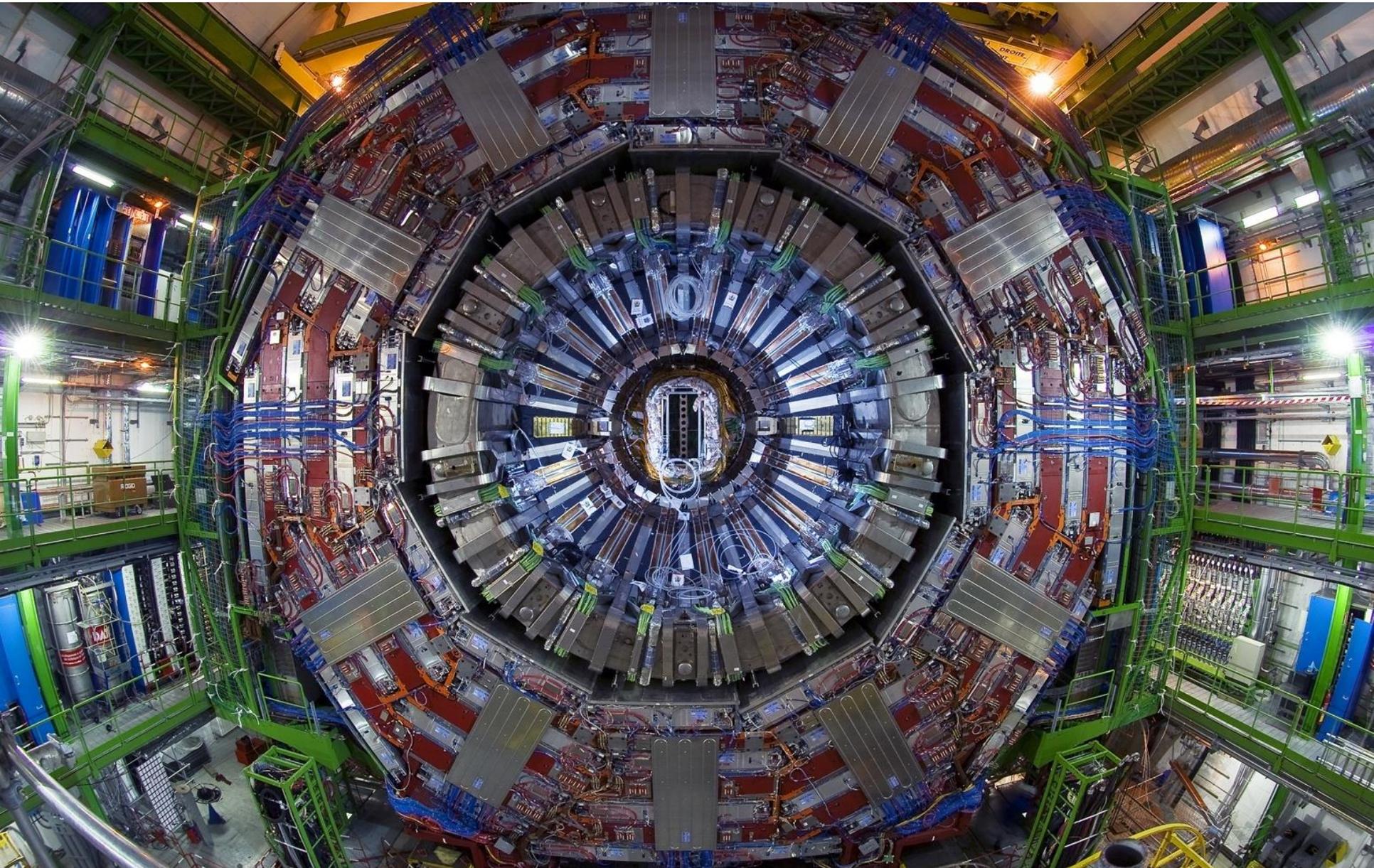
Il rivelatore ATLAS

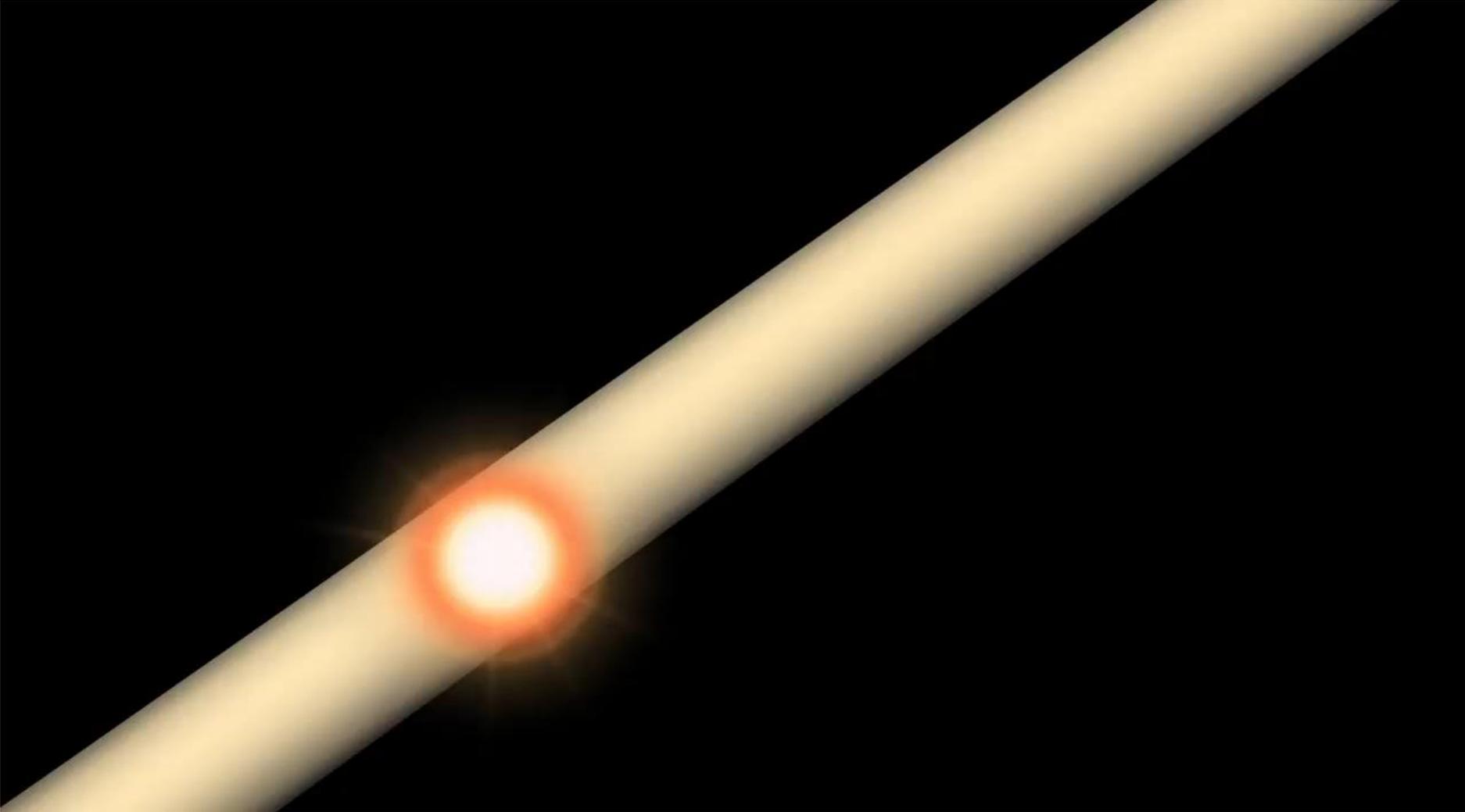


Il rivelatore CMS



Macchina fotografica digitale di 12500 tonnellate con migliaia di milioni di pixels capace di scattare una foto tridimensionale delle collisioni protone-protone a 13 TeV di LHC 40 milioni di volte al secondo.





Ma trovare il Bosone di Higgs è come cercare un ago in un pagliaio !



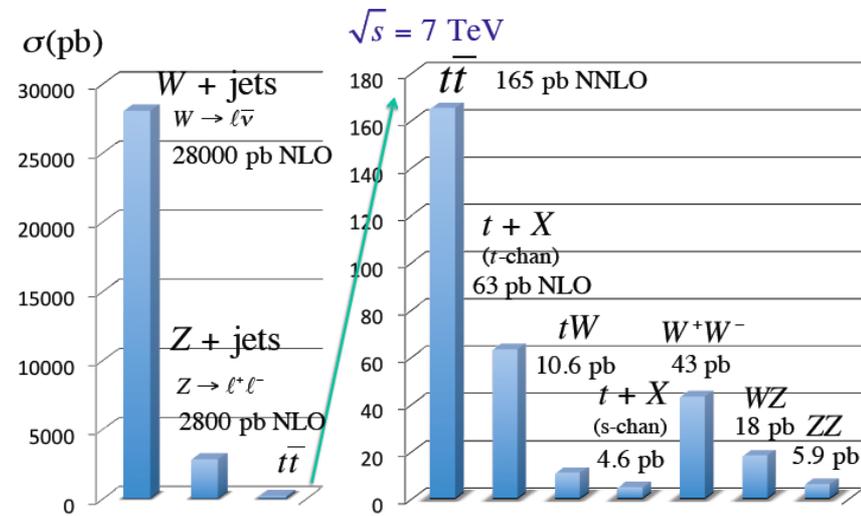
...

... 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 !

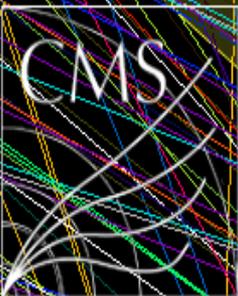
Per ogni evento $pp \rightarrow H \rightarrow b\bar{b}$

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

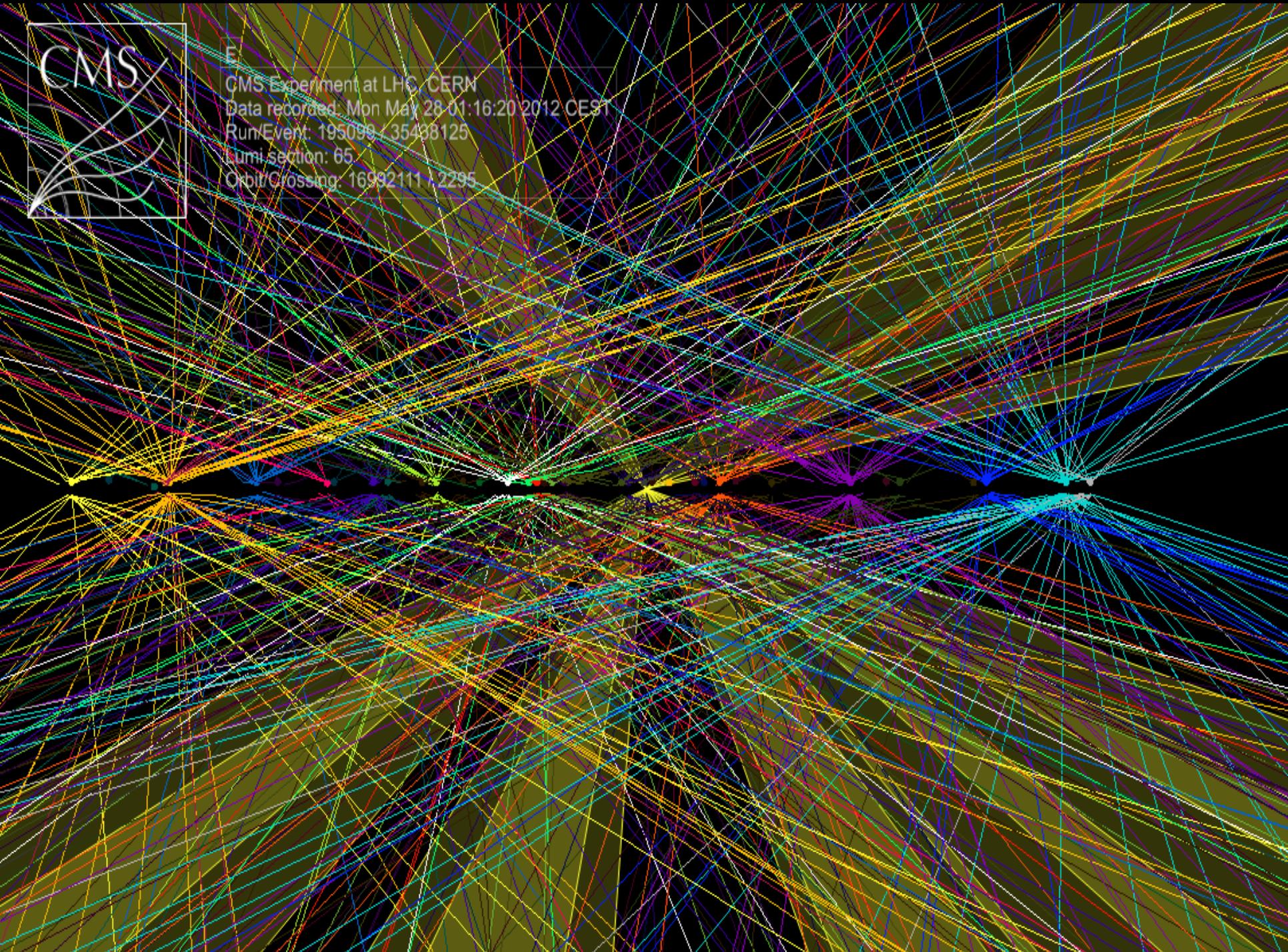
- È necessario scegliere i canali di decadimento con meno fondo dove cercare l'Higgs...

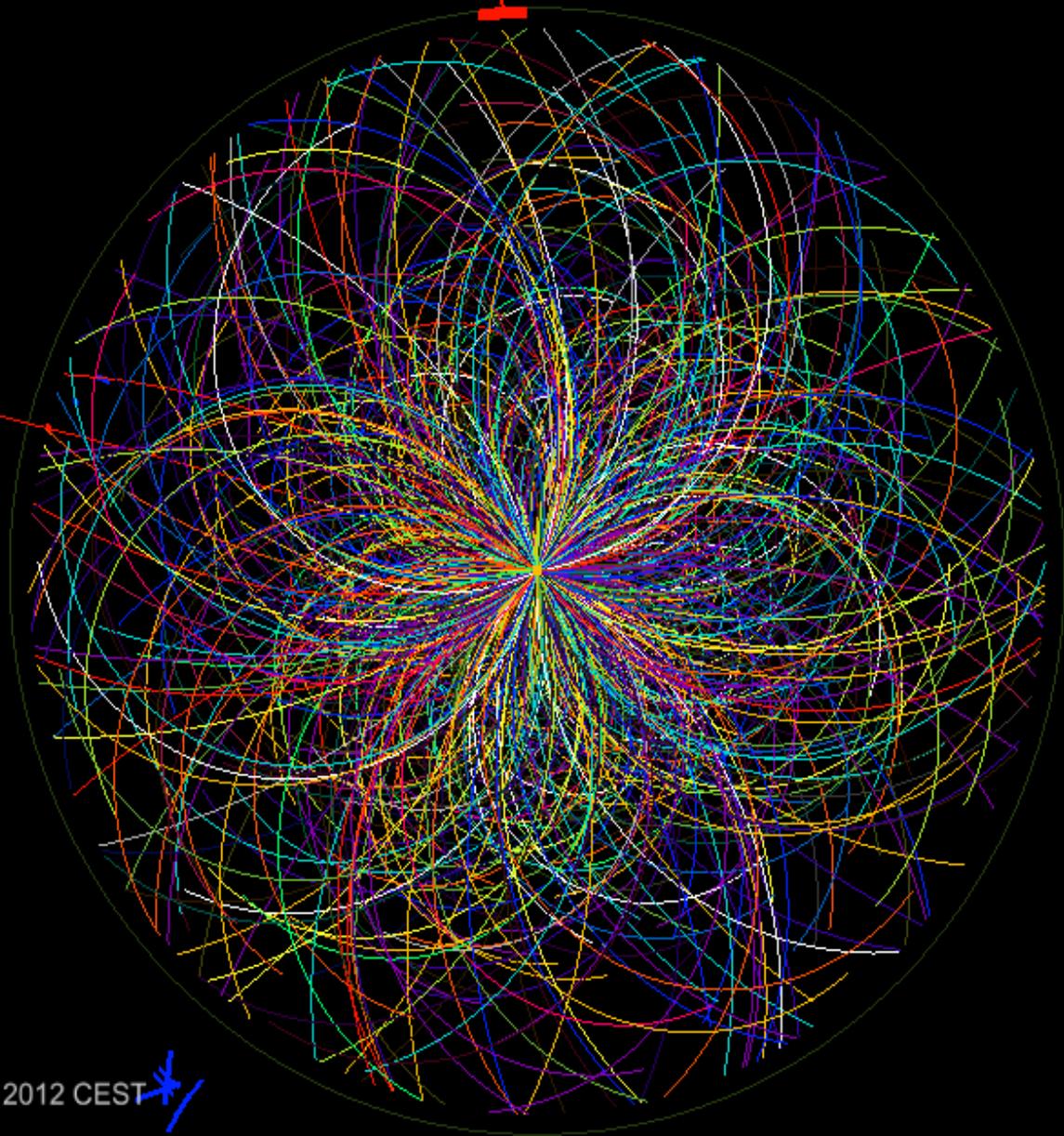


Alcuni esempi di eventi che potrebbero sembrare aghi !!



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





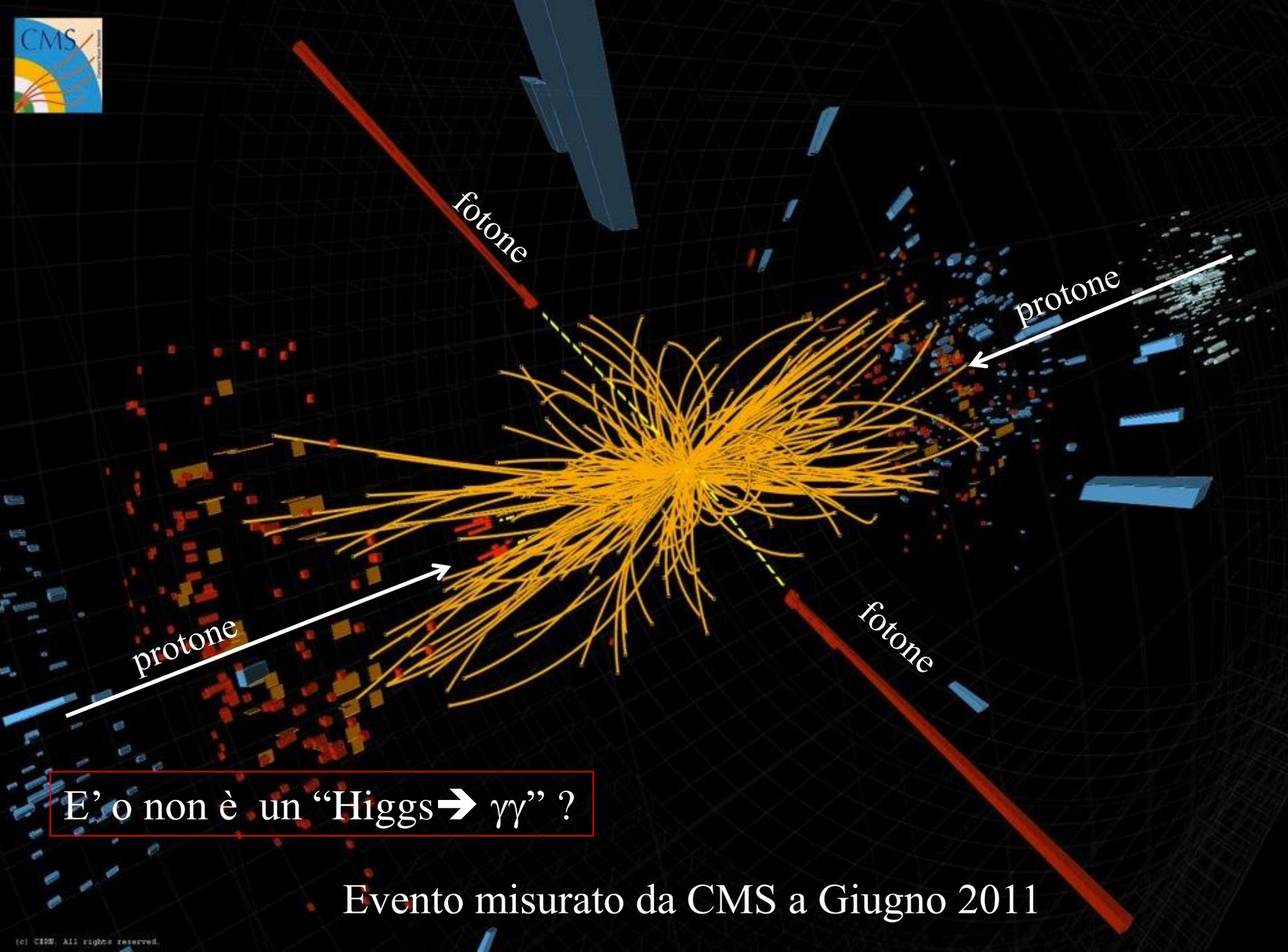
CMS Experiment at LHC, CERN

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

Run/Event: 195099 / 35438125

Lumi section: 65

Orbit/Crossing: 16992111 / 2295

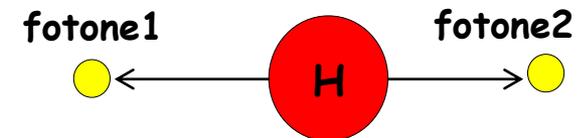
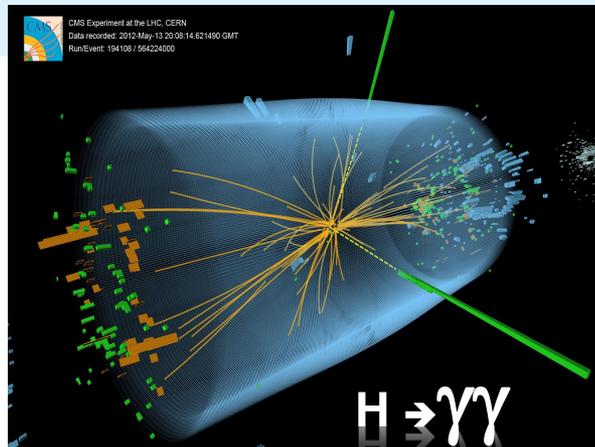
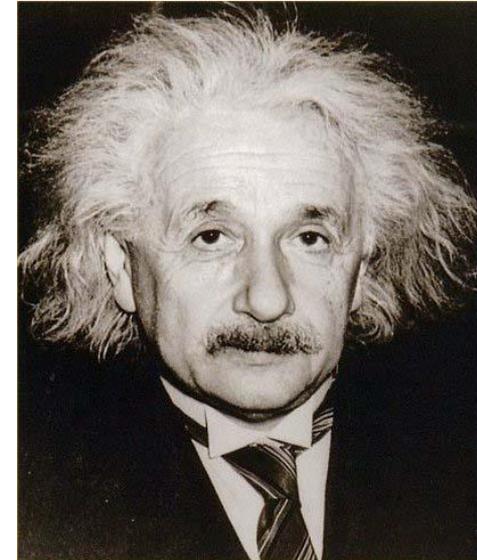


E' o non è un "Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ " ?

Evento misurato da CMS a Giugno 2011

Come si misura la massa ?

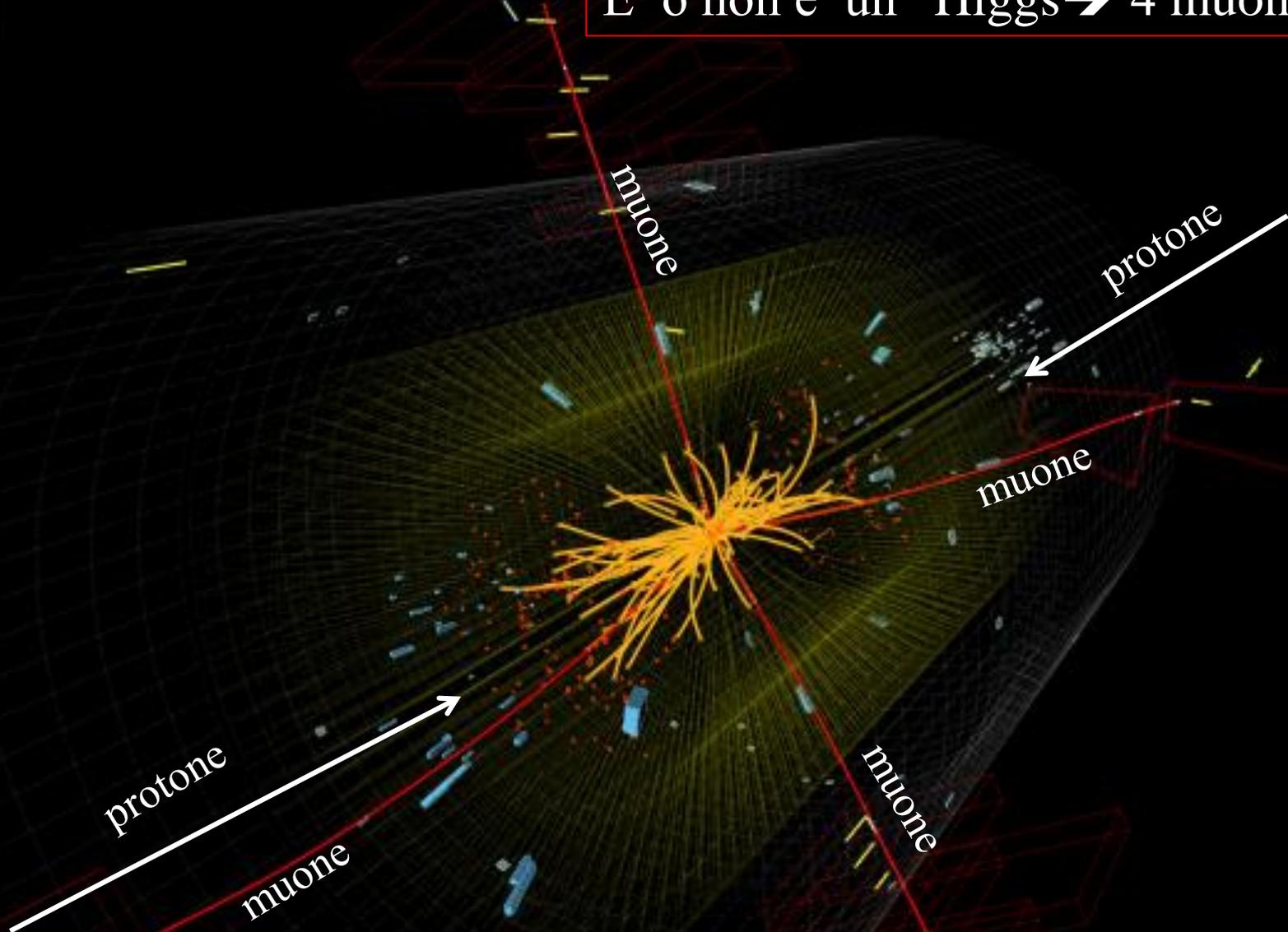
- Come si misura la massa di una particella che decade in un insieme di particelle? Misurando le energie e gli impulsi di tutte le particelle in cui decade.
- Caso semplice: particella (per esempio un bosone di Higgs) ferma che decade in due fotoni. grazie alla conservazione dell'energia sappiamo che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



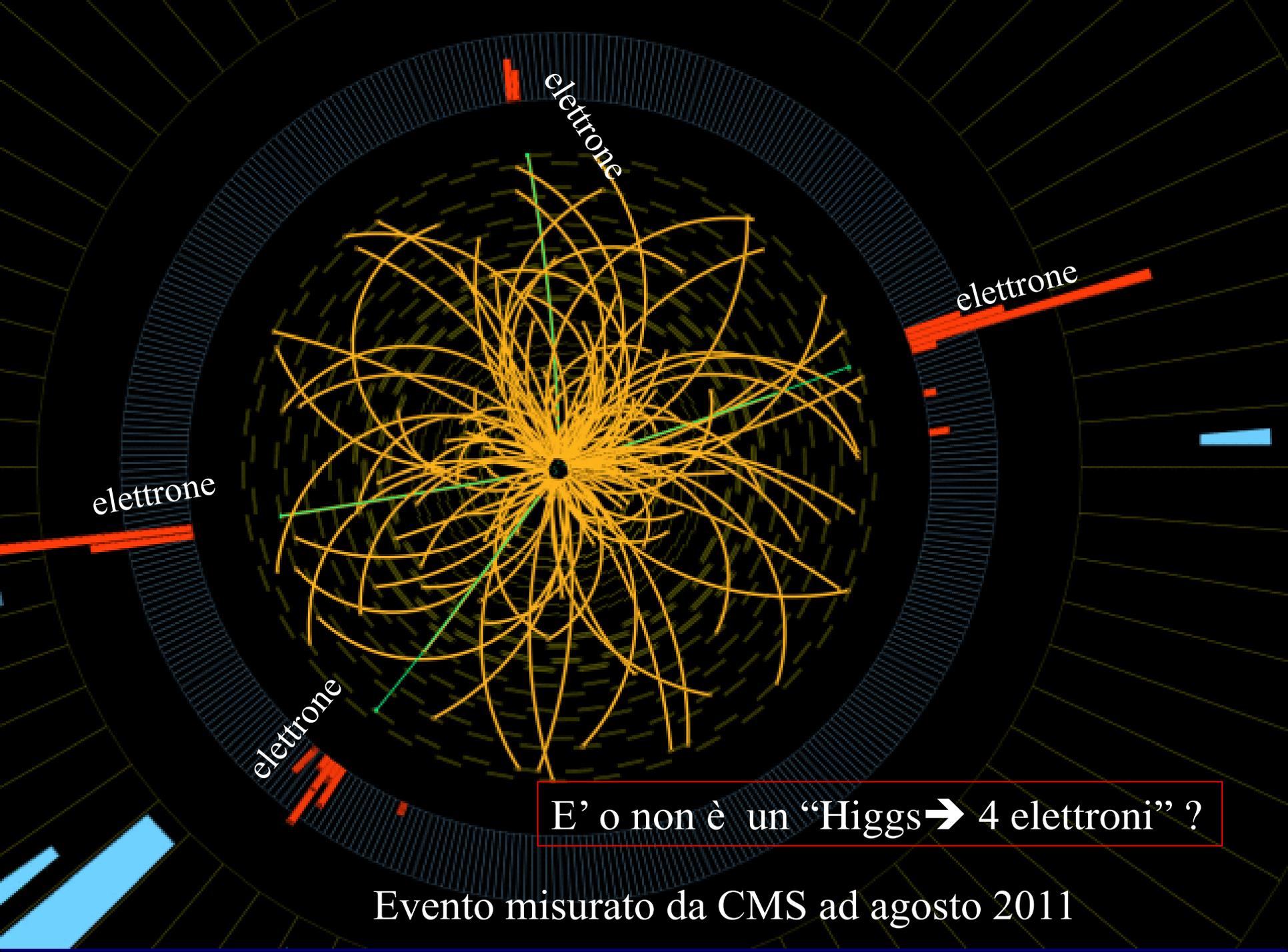
$$M_H c^2 = E_1 + E_2$$



E' o non è un "Higgs \rightarrow 4 muoni" ?



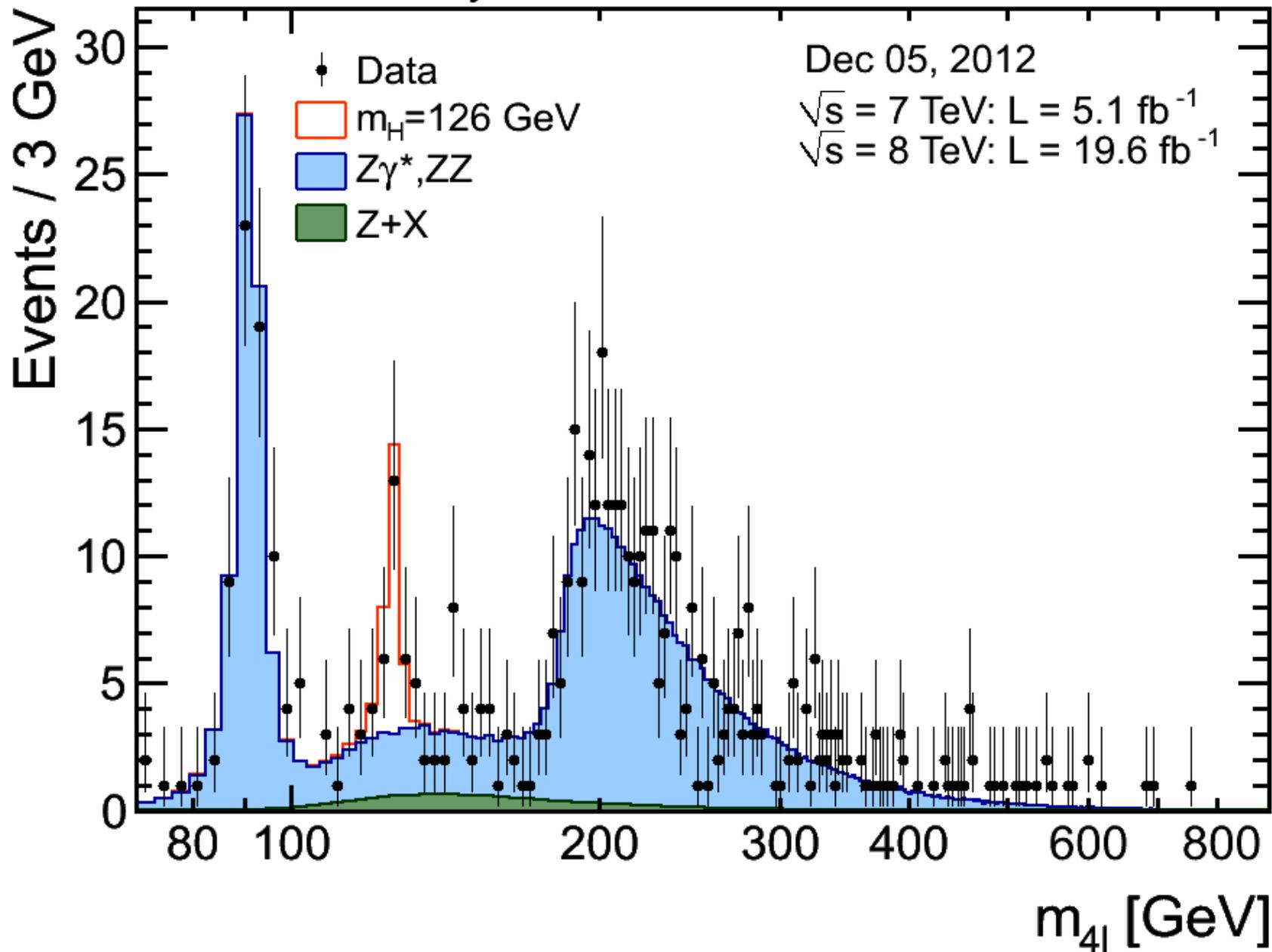
Evento misurato da CMS ad Agosto 2011



E' o non è un "Higgs → 4 elettroni" ?

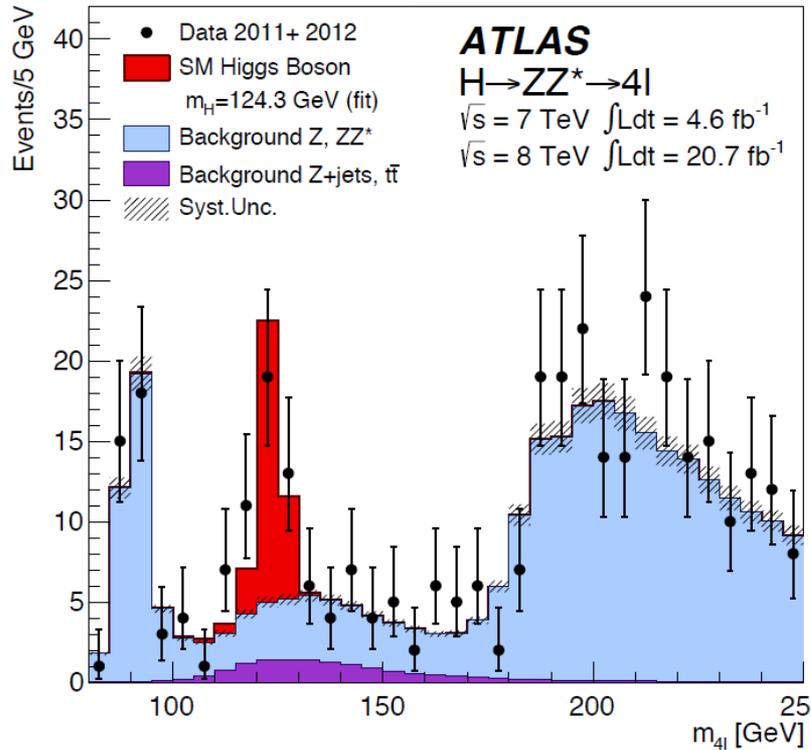
Evento misurato da CMS ad agosto 2011

CMS Preliminary



H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 leptoni

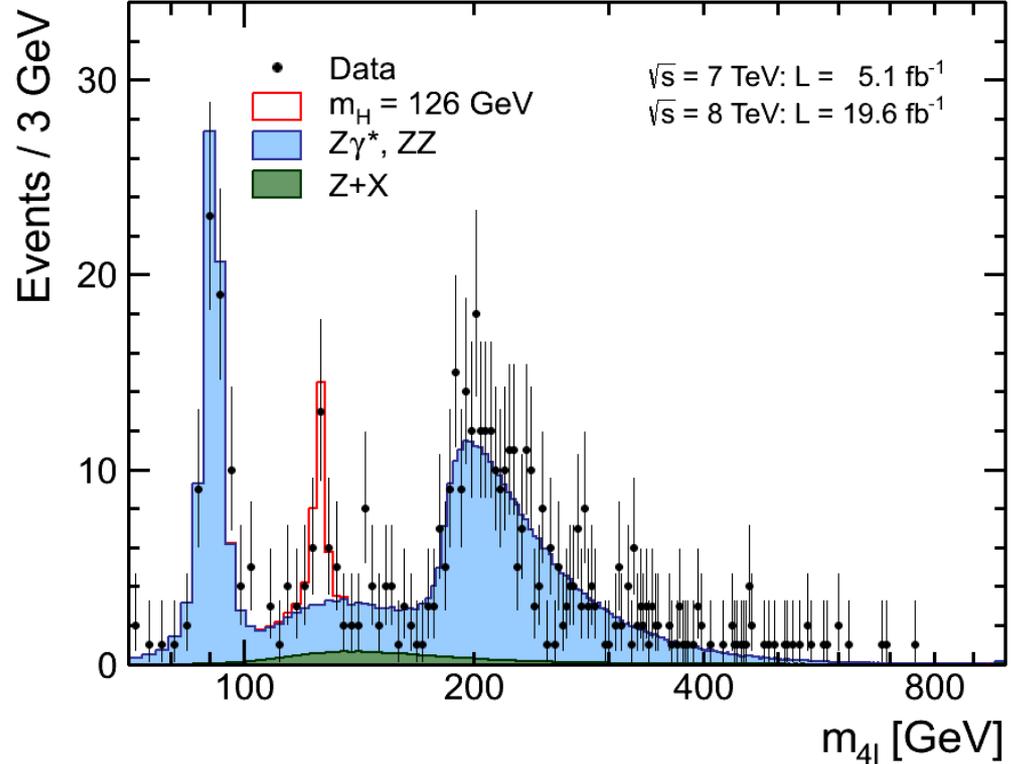
ATLAS



6.6 σ (4.4 σ asp.)

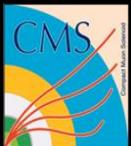
$m_H = 124.3^{+0.6}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.5}_{-0.3}(\text{syst})$ GeV

CMS



6.7 σ (7.1 σ asp.)

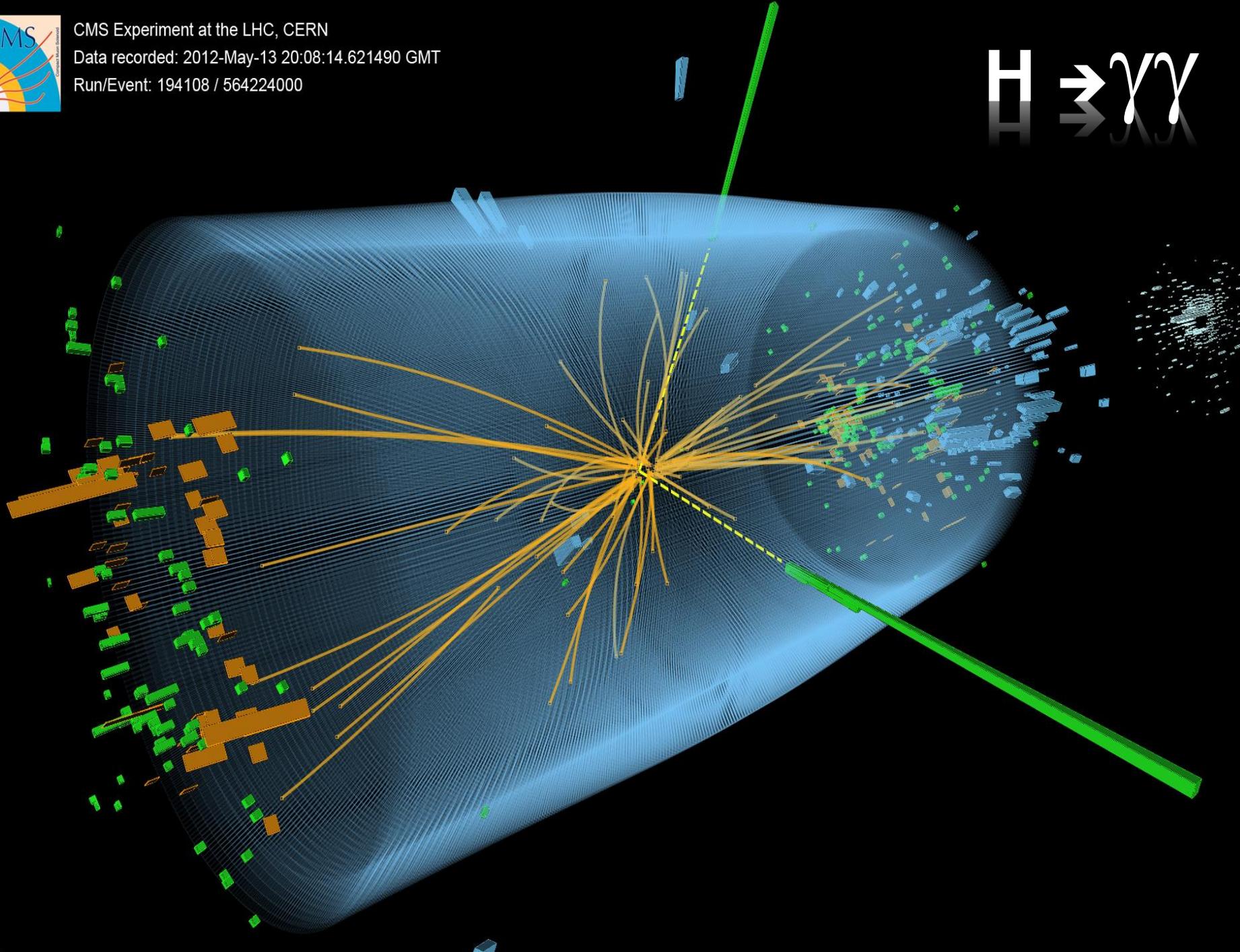
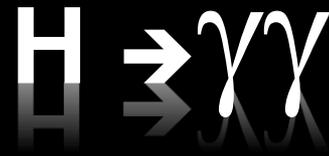
$m_H = 125.8^{+0.5}_{-0.5}(\text{stat})^{+0.2}_{-0.2}(\text{syst})$ GeV



CMS Experiment at the LHC, CERN

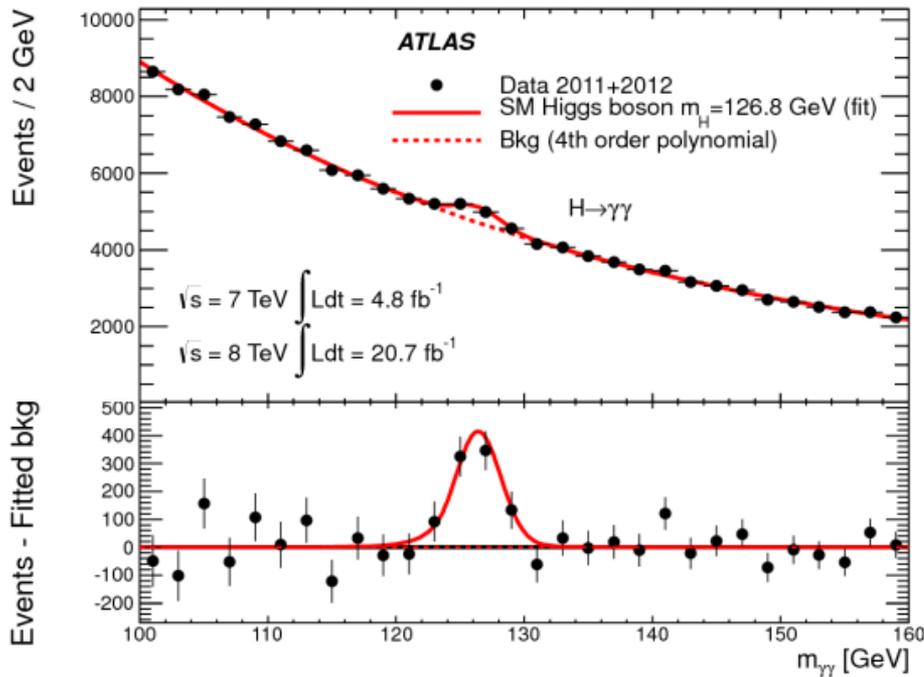
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000



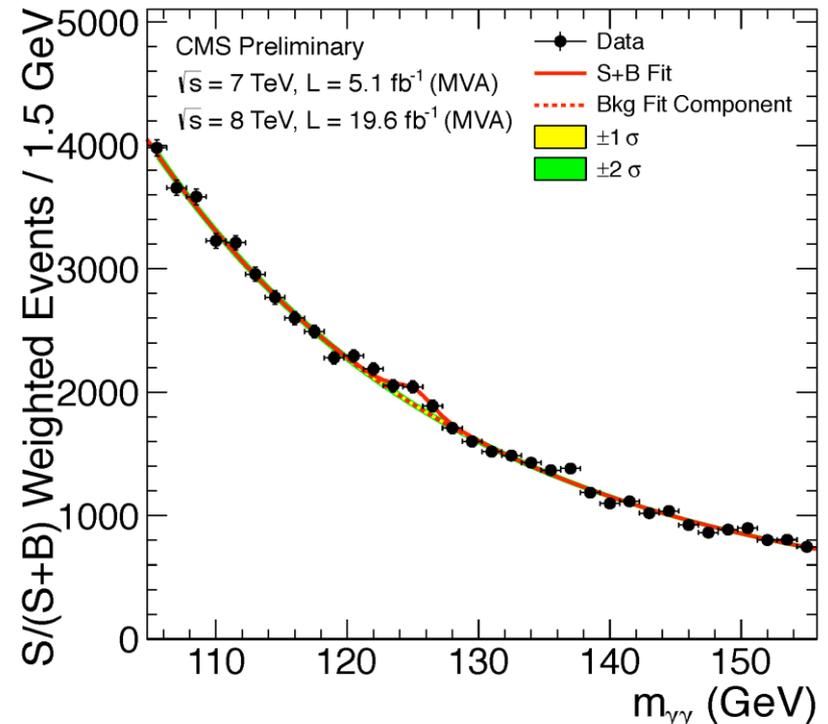
$H \rightarrow \gamma\gamma$

ATLAS



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

CMS

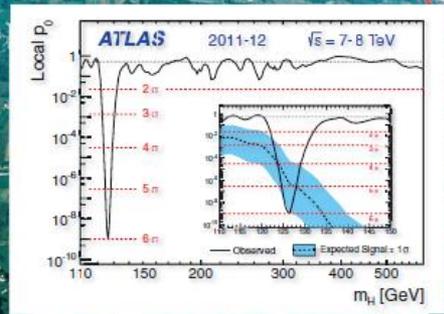
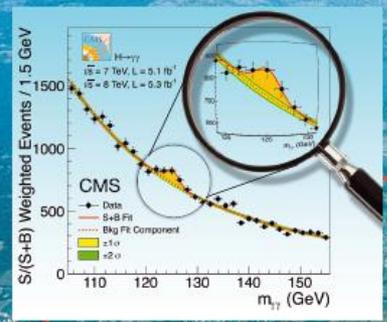


3.2σ (4.2σ asp.)
 $m_H = 125.4 \pm 0.5(\text{stat}) \pm 0.6(\text{syst}) \text{ GeV}$

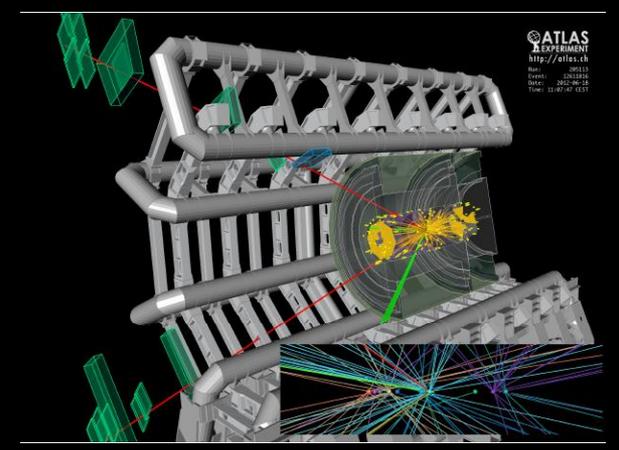
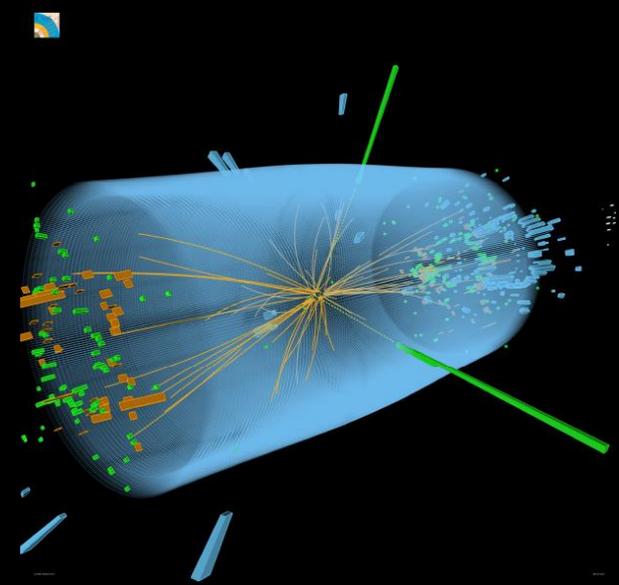
4 luglio 2012



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



www.elsevier.com/locate/physletb



ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.cern>
Pub: 091113
Conf: 1312120
Date: 2012-06-18
Time: 10:07:00 CEST

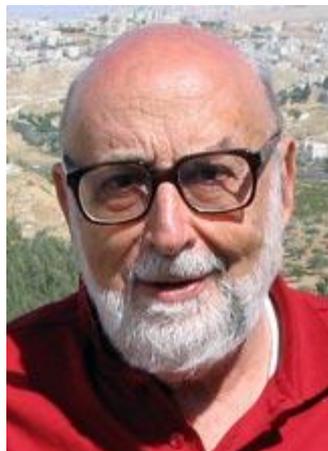
*Congratulations to both
Atlas and CMS Collaborations
and to the builders of the LHC
on a magnificent achievement!*

Peter Higgs

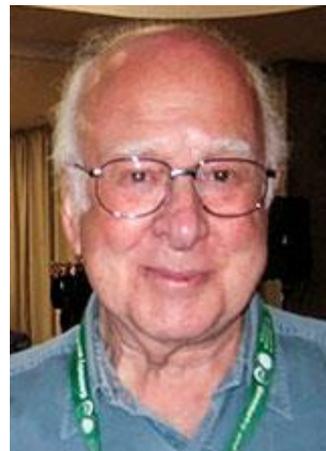
30 August 2012



Premio Nobel per la Fisica 2013



François Englert



Peter W. Higgs

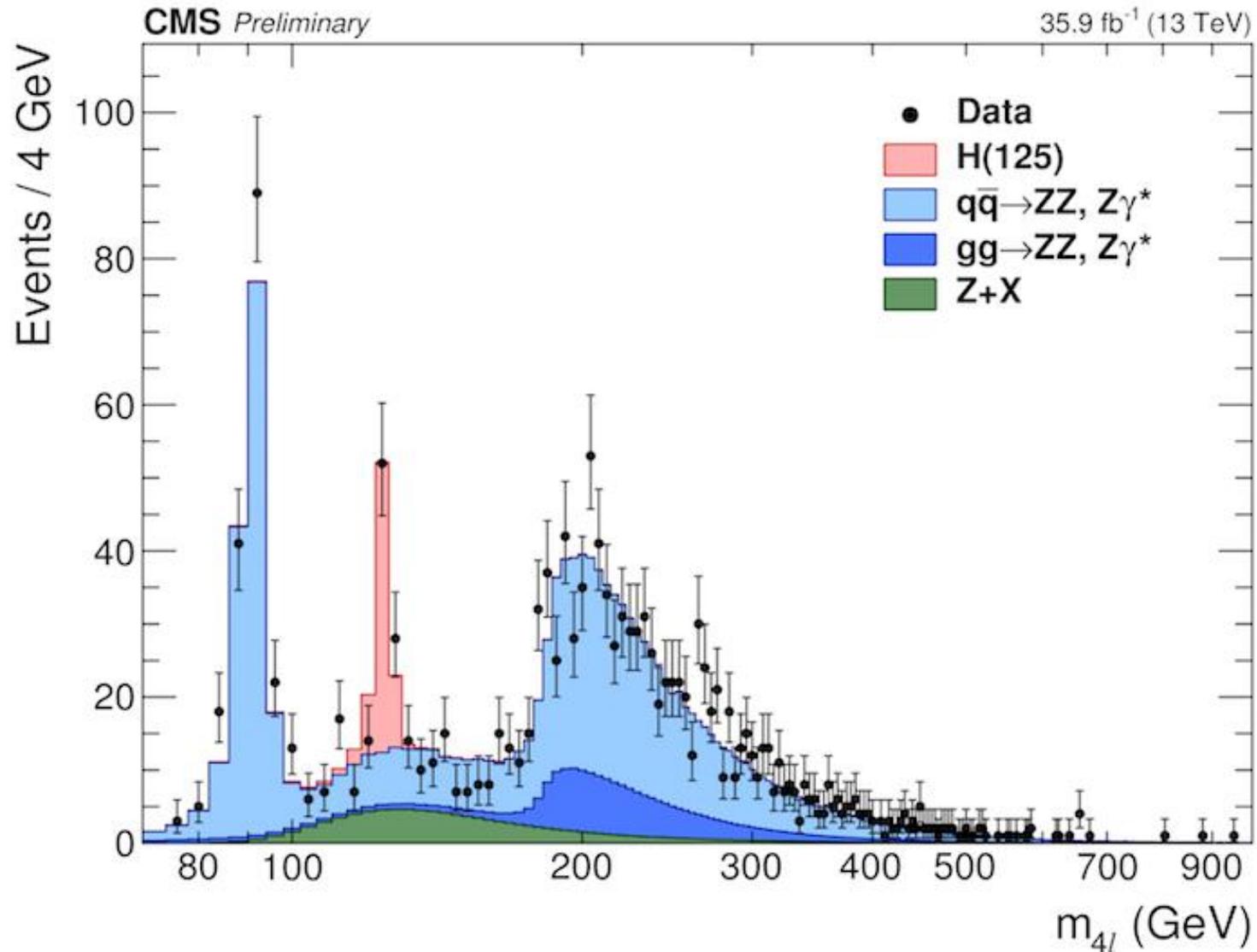
The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental 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.

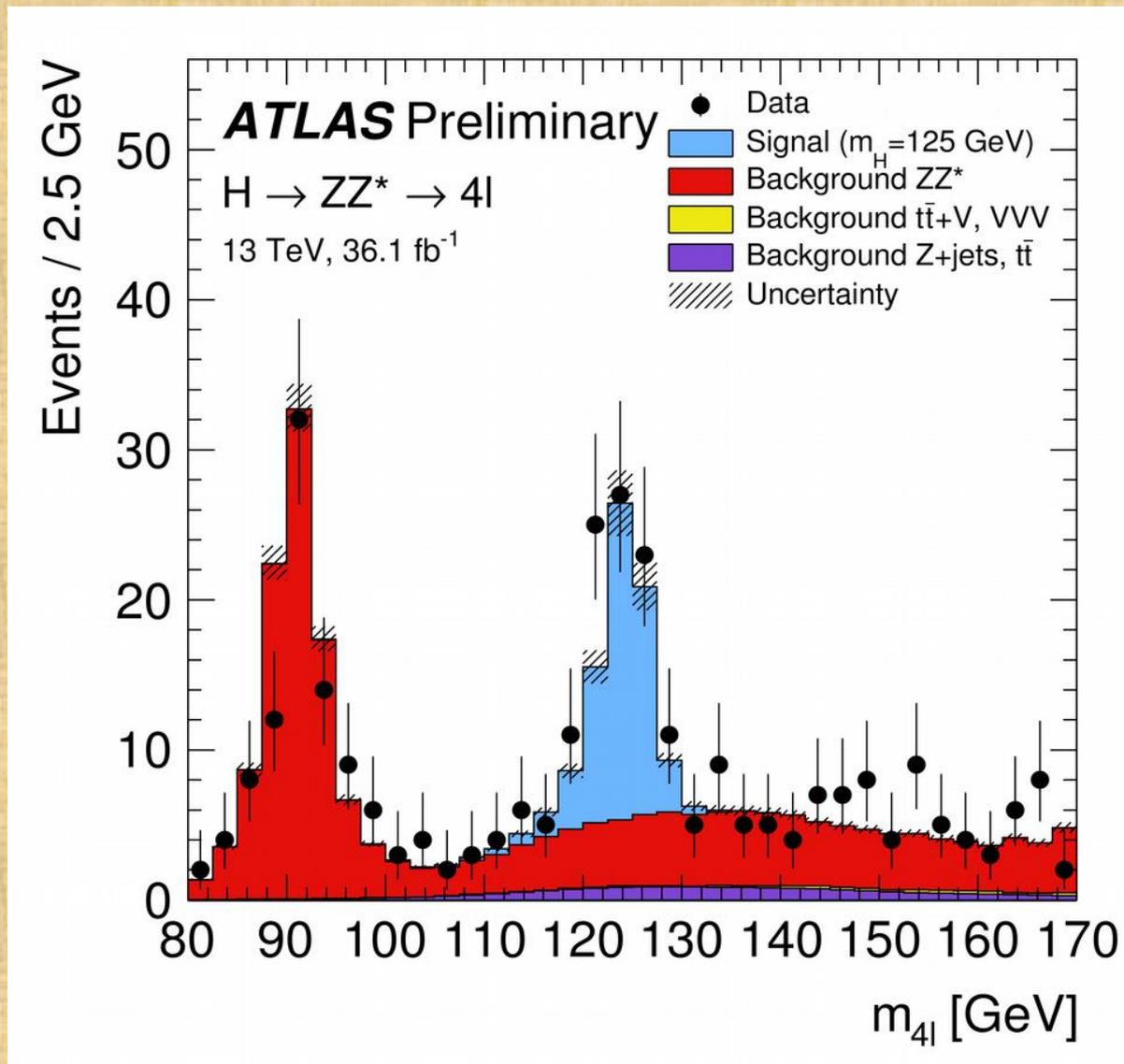


Robert Brout

$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ at 13 TeV CMS (2015-2016)

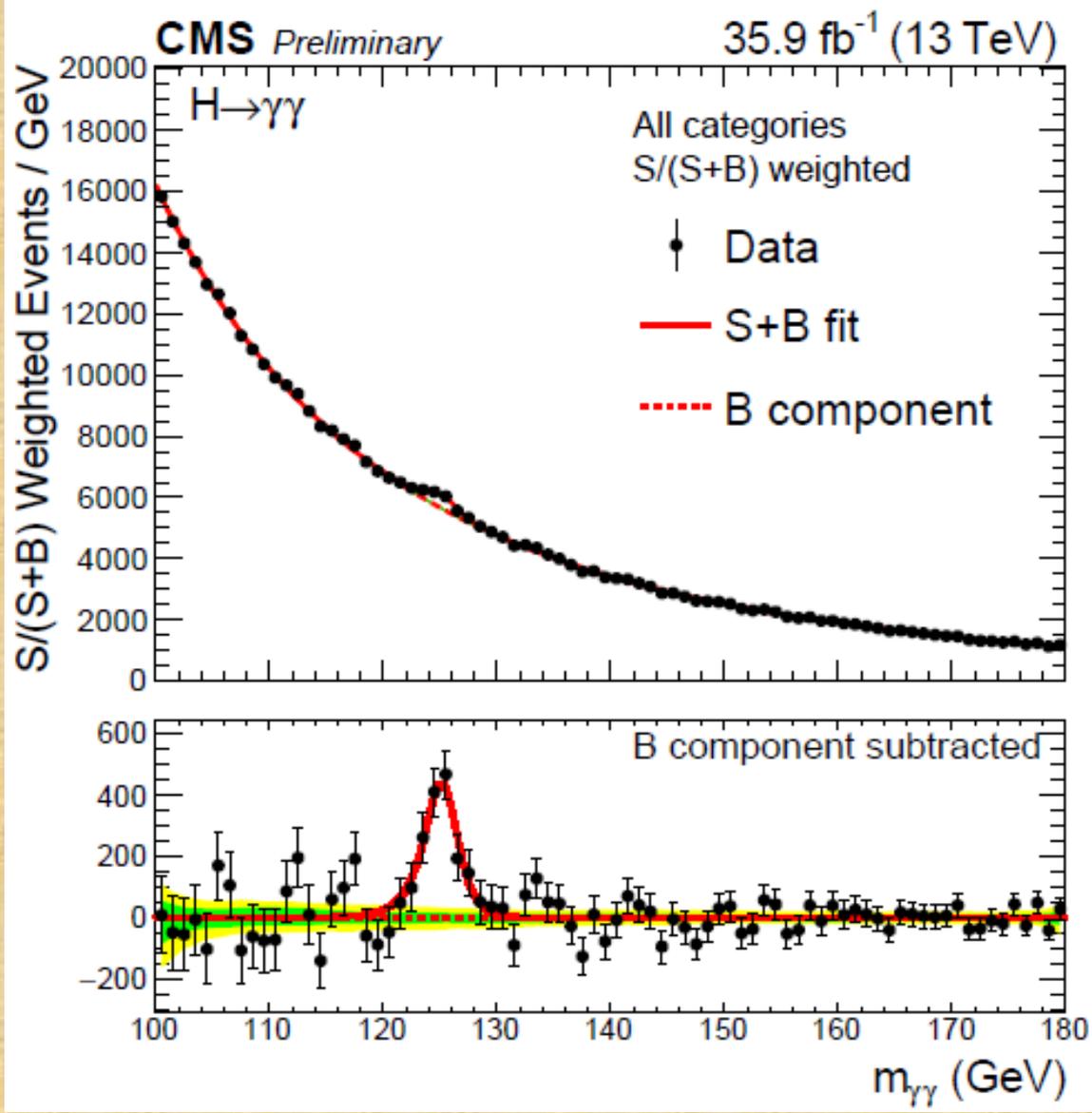


$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ at 13 TeV ATLAS (2015-2016)



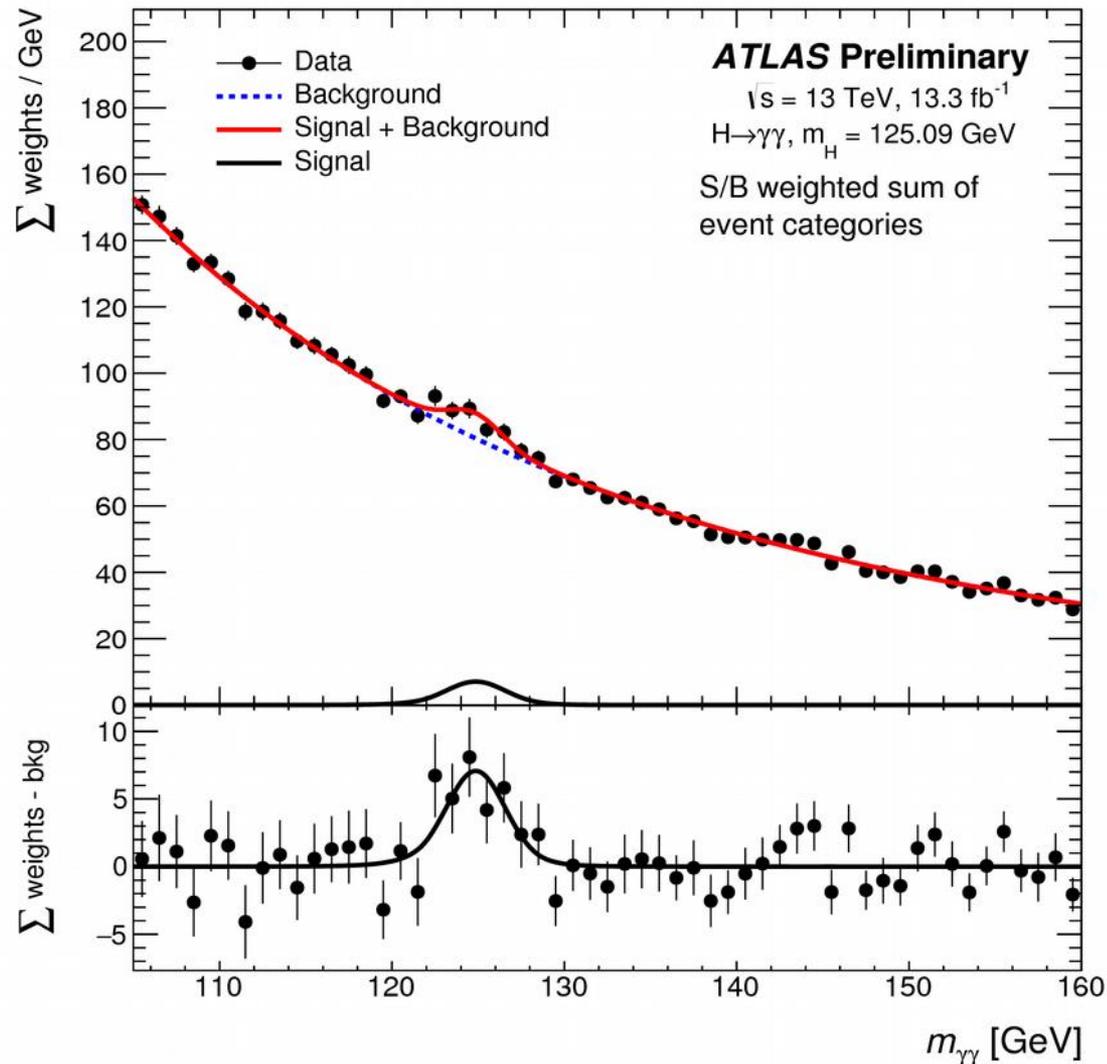
$H \rightarrow \gamma\gamma$ at 13 TeV

CMS (2015-2016)

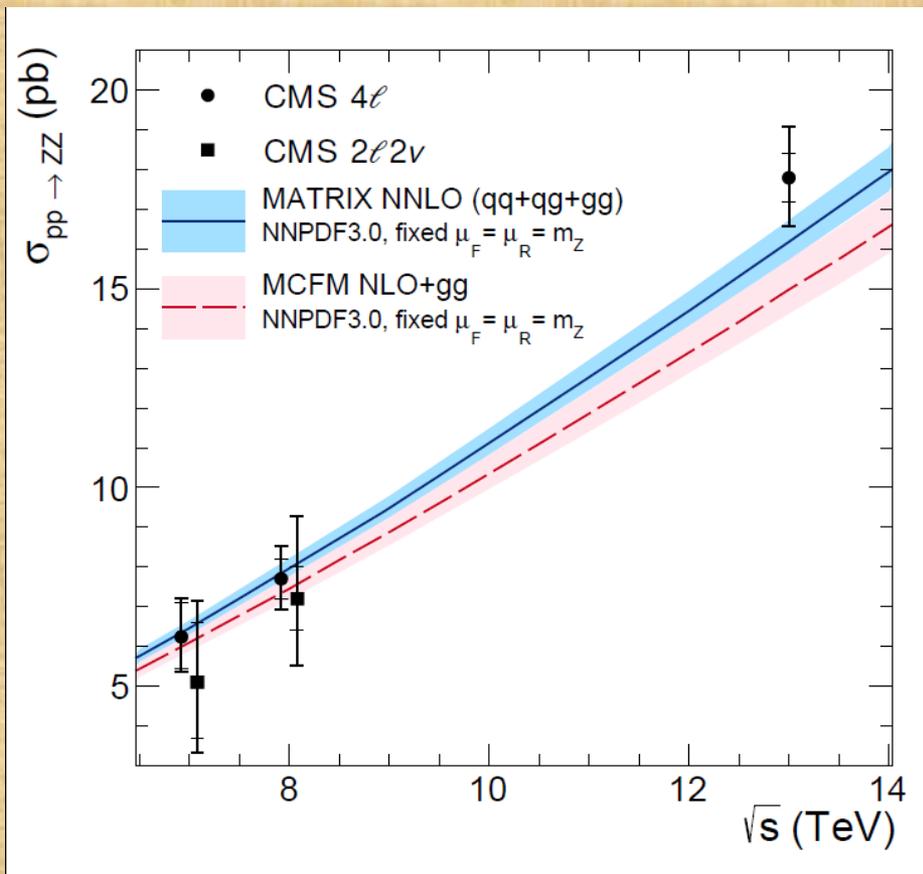
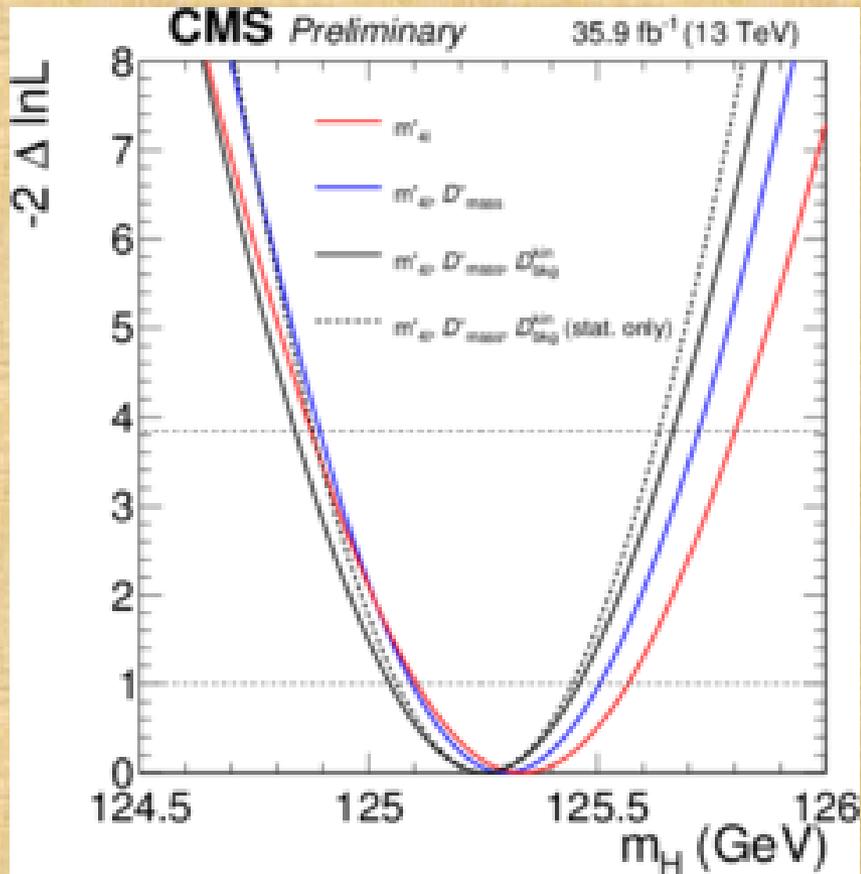


$H \rightarrow \gamma\gamma$ at 13 TeV

ATLAS (2015-2016)



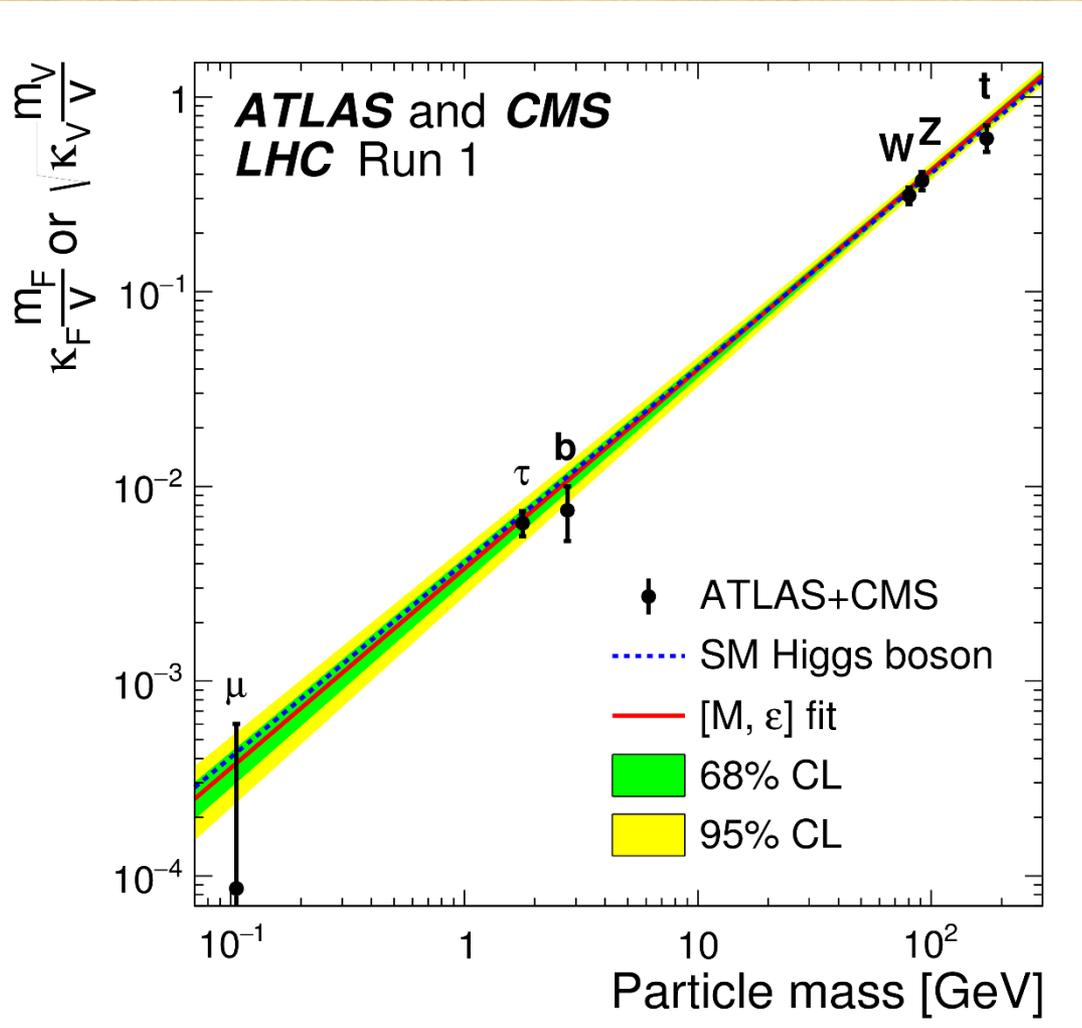
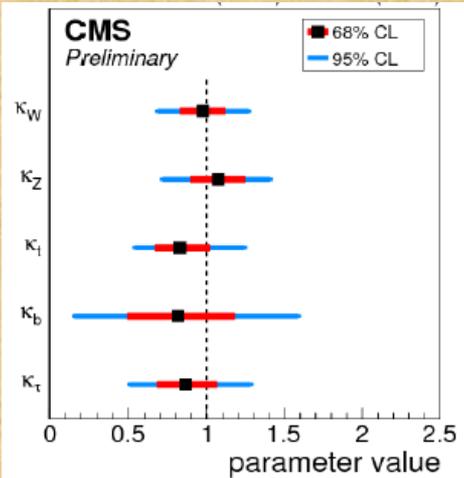
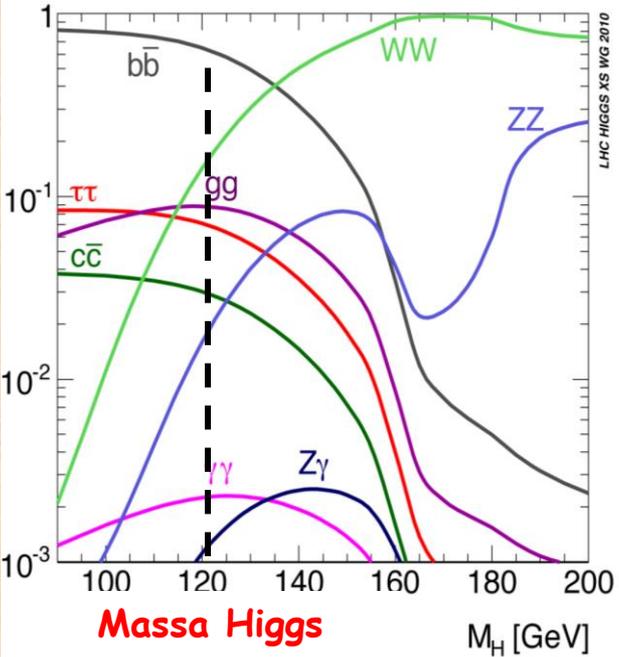
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ lepton}$ at 13 TeV (2015-2016)



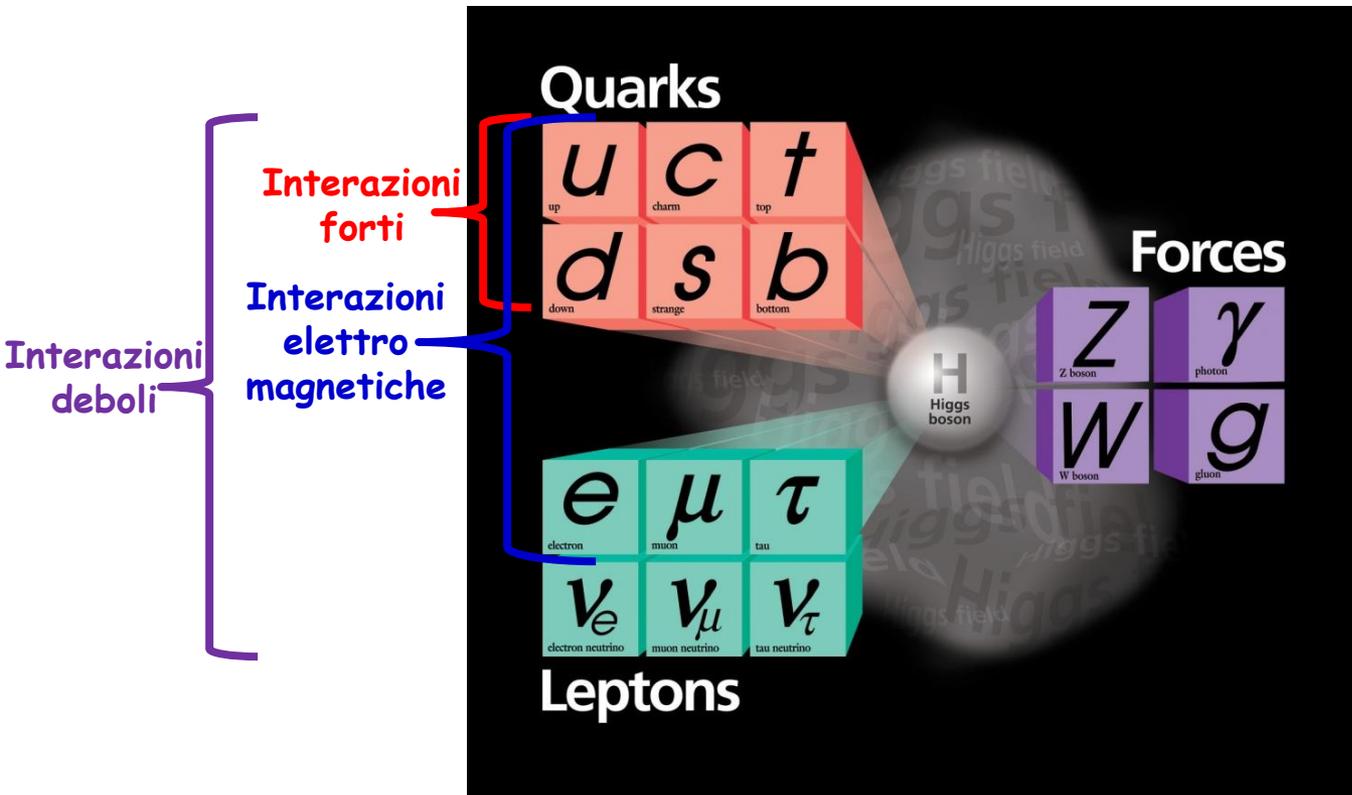
$m_H = 125.26 \pm 0.20(\text{stat.}) \pm 0.08(\text{syst.}) \text{ GeV}$

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

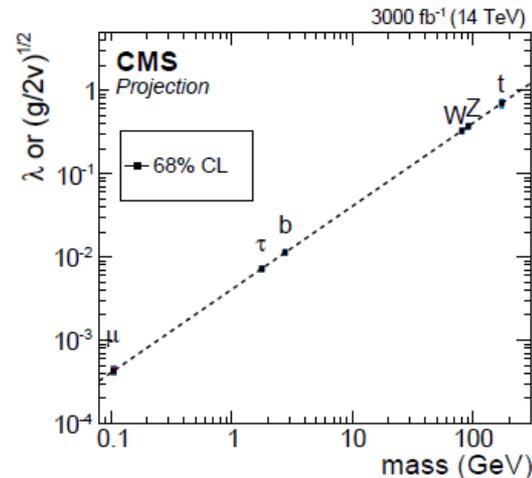
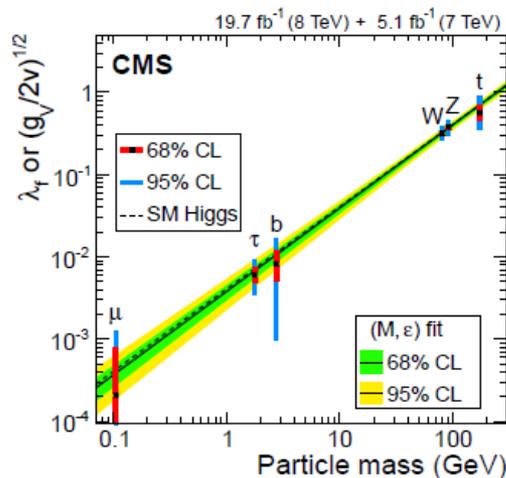
Frazione di decadimento BR



Il Modello Standard



La validità del Modello Standard è dimostrata da moltissime misure sperimentali di alta precisione fatte ai recenti acceleratori (LEP, SLC, Tevatron, B-factories, e LHC)



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

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

- * Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*

Problema con lo Higgs del Modello Standard

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.



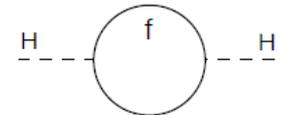
Meccanismo di Higgs

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

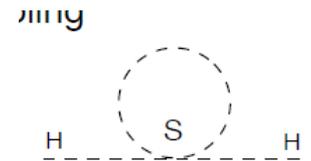
$$= 125 \text{ GeV}$$

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

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

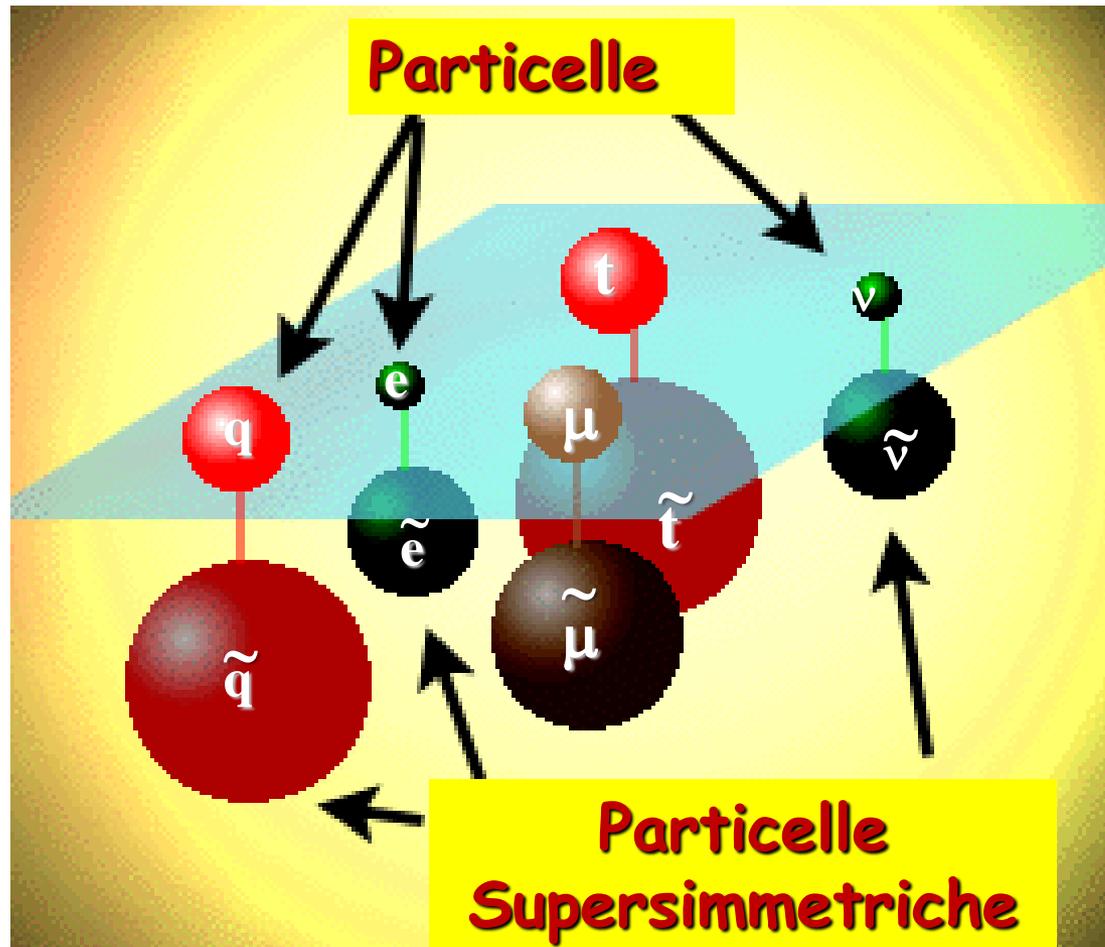


Soluzione: per ogni fermione f introdurre un corrispondente scalare s che cancelli tutti i vari termini di Δm_H



Deve quindi esistere nuova fisica oltre il Modello Standard: Per esempio queste difficoltà possono essere eliminate con la supersimmetria...

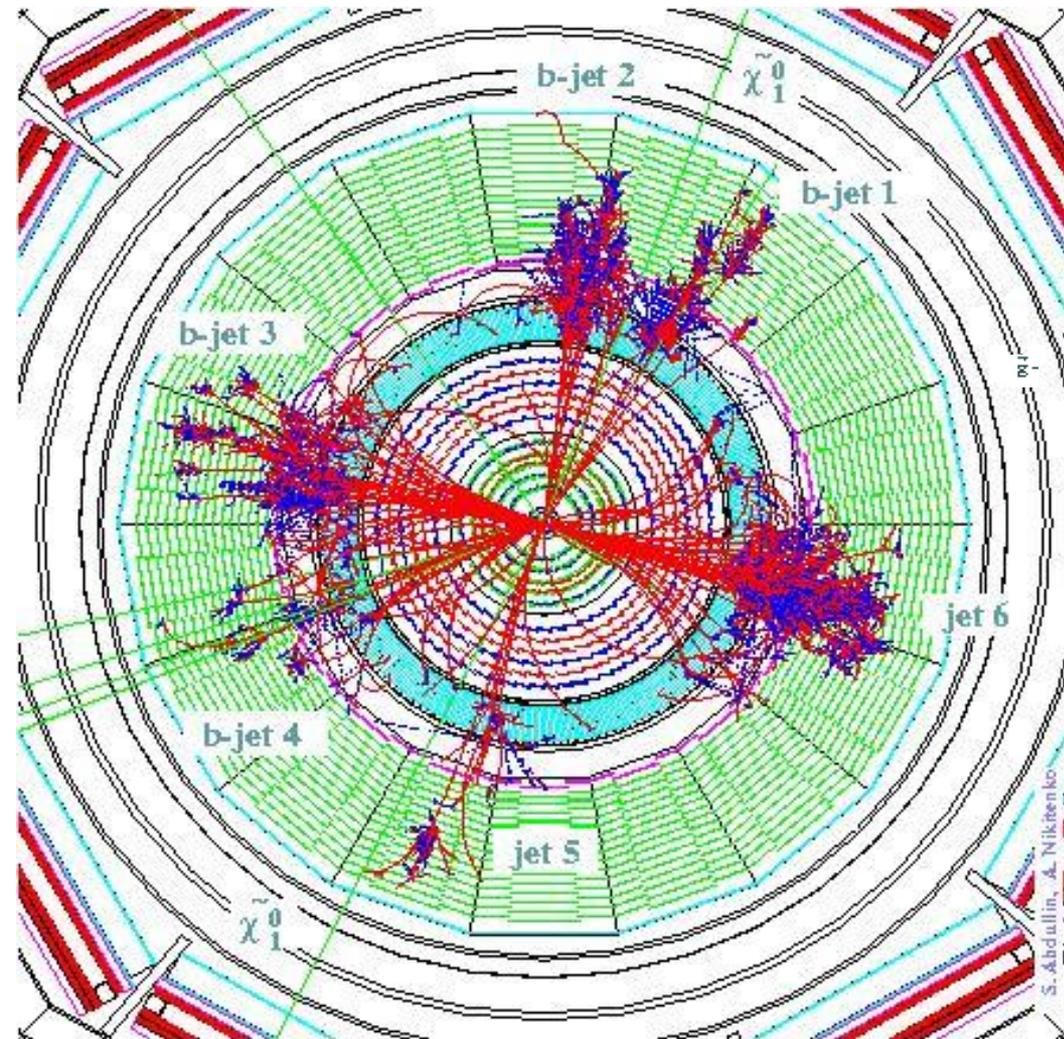
L'inconsistenza del modello potrebbe essere risolta se esistesse un mondo di particelle supersimmetriche corrispondente al mondo delle particelle standard ma con masse molto più grandi (e che per questo motivo non sono ancora state osservate).



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

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

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



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

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

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

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

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

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

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

S. Abdullin, A. Nikitenko

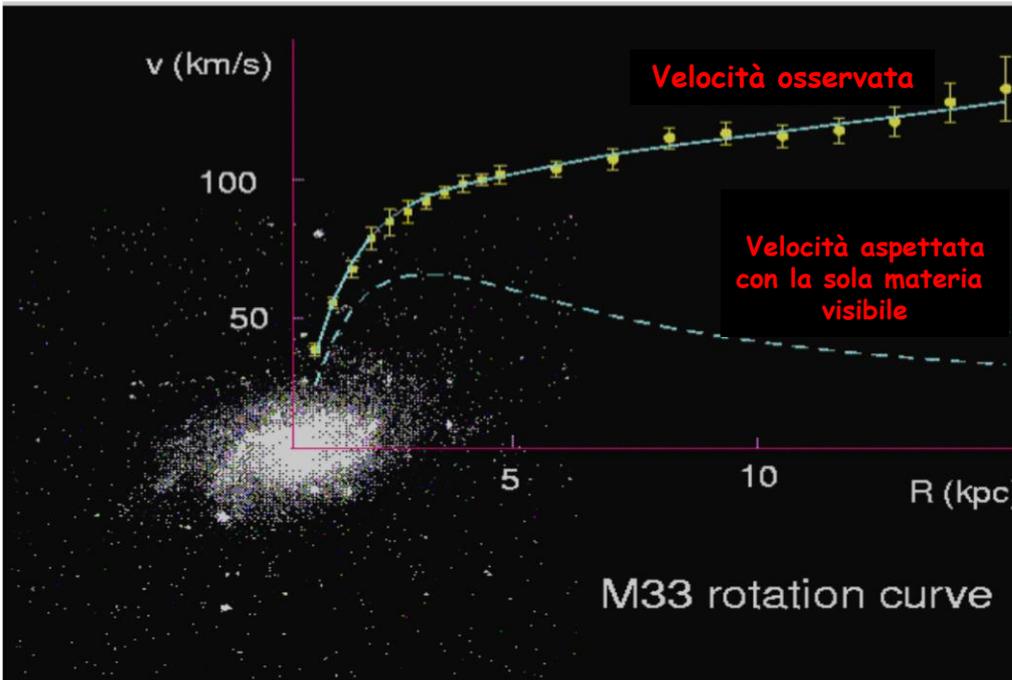
Ora il Modello Standard è completo ! Ma allora abbiamo capito tutto ?

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

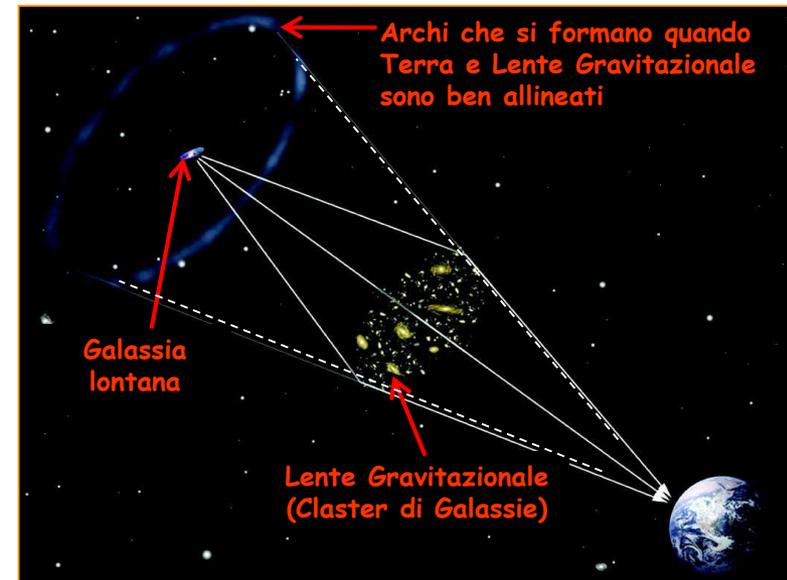
- * Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*
- * Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*

Manifestazioni della Materia Oscura

Galassia M33 Velocità di rotazione



La Materia oscura come Lente Gravitazionale

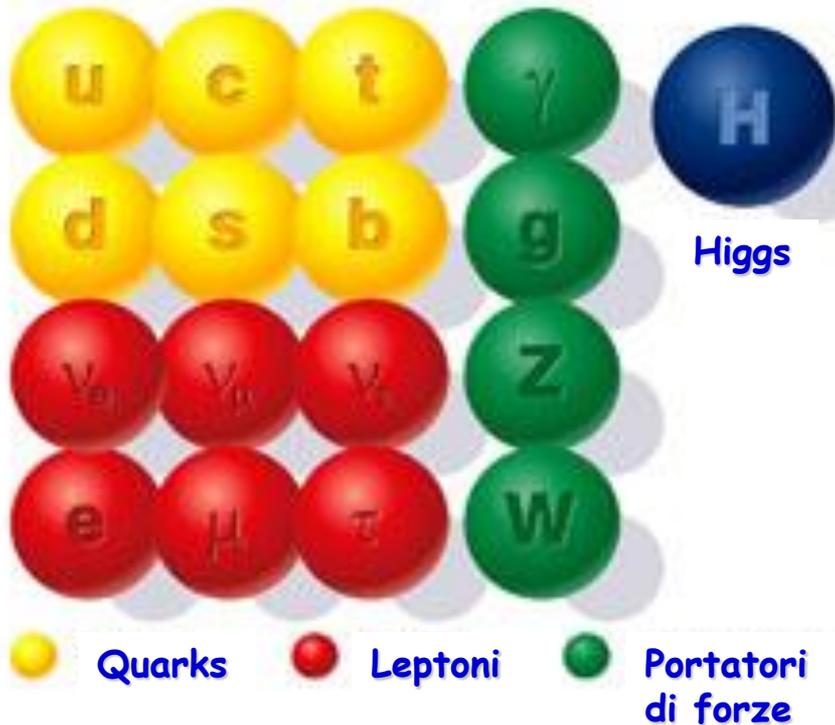


l'effetto e' molto piu' forte di quello spiegabile con la massa della Materia Visibile

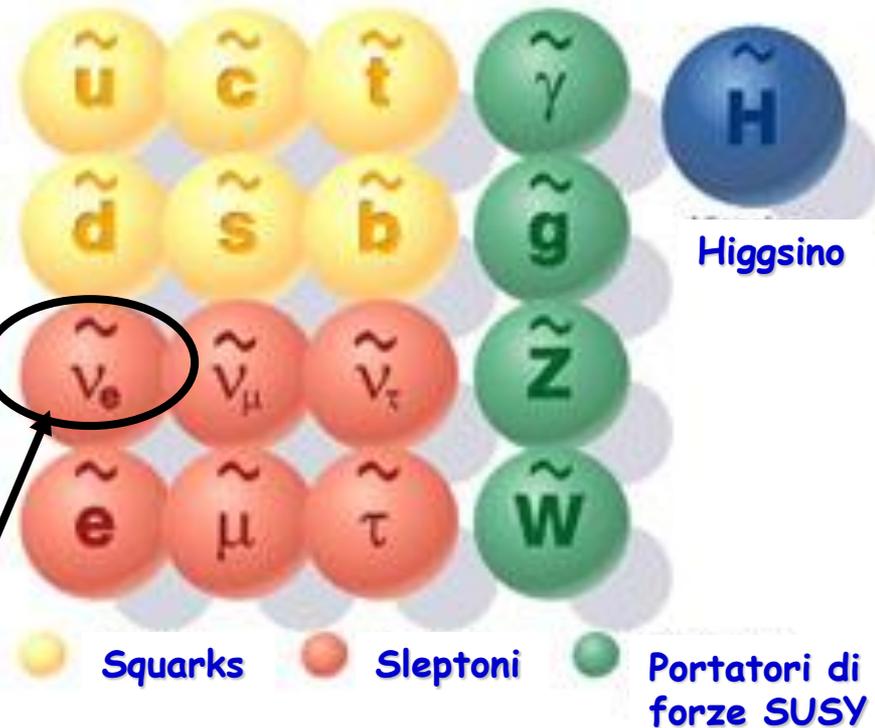
La Materia Oscura sembra essere costituita da particelle di grande massa che interagiscono debolmente

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

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

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

- * Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*
- * Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*
- * Perché il mondo è fatto di materia (che fine ha fatto l'antimateria)?*



Caffè della Scienza
"Nicola Bedaloni"
Livorno



La Nuova Limonaia
Associazione per la diffusione
della cultura scientifica tecnologica
e dei vari rami del sapere - Pisa

Che fine ha fatto l'antimateria?

Fisici in viaggio dalla California al Giappone cercando risposte

Mercoledì 15 Marzo 2017, ore 17.00

Auditorium, Museo Storia Naturale del Mediterraneo
Via Roma 234, Livorno

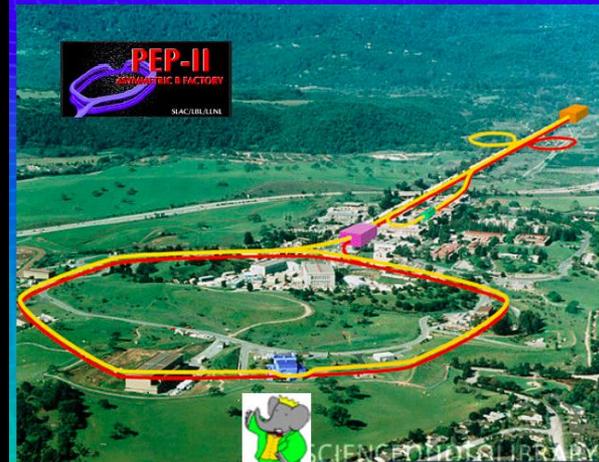
Prof. Francesco Forti
Università di Pisa

Introduce Prof. Rino Castaldi

già Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN) Pisa

Che cosa sono la materia e l'antimateria? Perché il nostro mondo è fatto solo di materia? Che fine ha fatto l'antimateria che si era creata nel Big Bang? La ricerca delle risposte a queste ed altre domande ha portato un gruppo di fisici italiani ai due capi del globo, dove acceleratori molto intensi e rivelatori ad elevata tecnologia (anche italiana) permettono di esplorare la fisica di precisione che ci può aiutare a capire perché il mondo è quello che conosciamo. Un'avventura iniziata più di vent'anni fa a SLAC in California e che prosegue oggi a KEK in Giappone. Raccontata, senza prendersi troppo sul serio, da un livornese trapiantato a Pisa.

PEP-II e Babar



Che fine ha fatto l'antimateria ?

Stanford, California

KEK-B e Belle → Belle-II

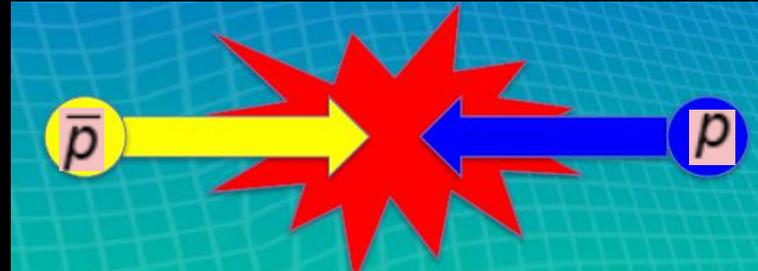
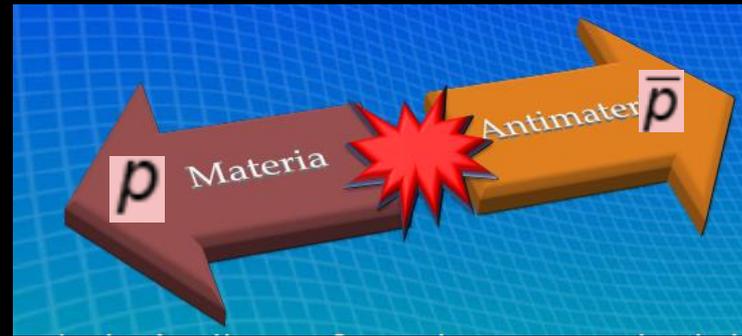
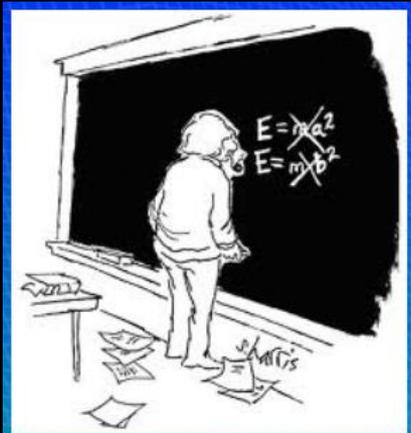
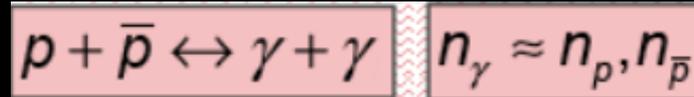


F. Forti - Che fine ha fatto l'antimateria ?

Tsukuba, Giappone

- 35

10^{-32} - 10^{-6} sec : la materia è caldissima ma si sta rapidamente raffreddando, materia, antimateria e radiazione (fotoni) sono in equilibrio



Un meccanismo ignoto crea una leggera asimmetria tra materia e antimateria. Tutta l'antimateria si annichila con la materia e resta una piccola parte di sola materia

Materia
10.000.000.001



Antimateria
10.000.000.000

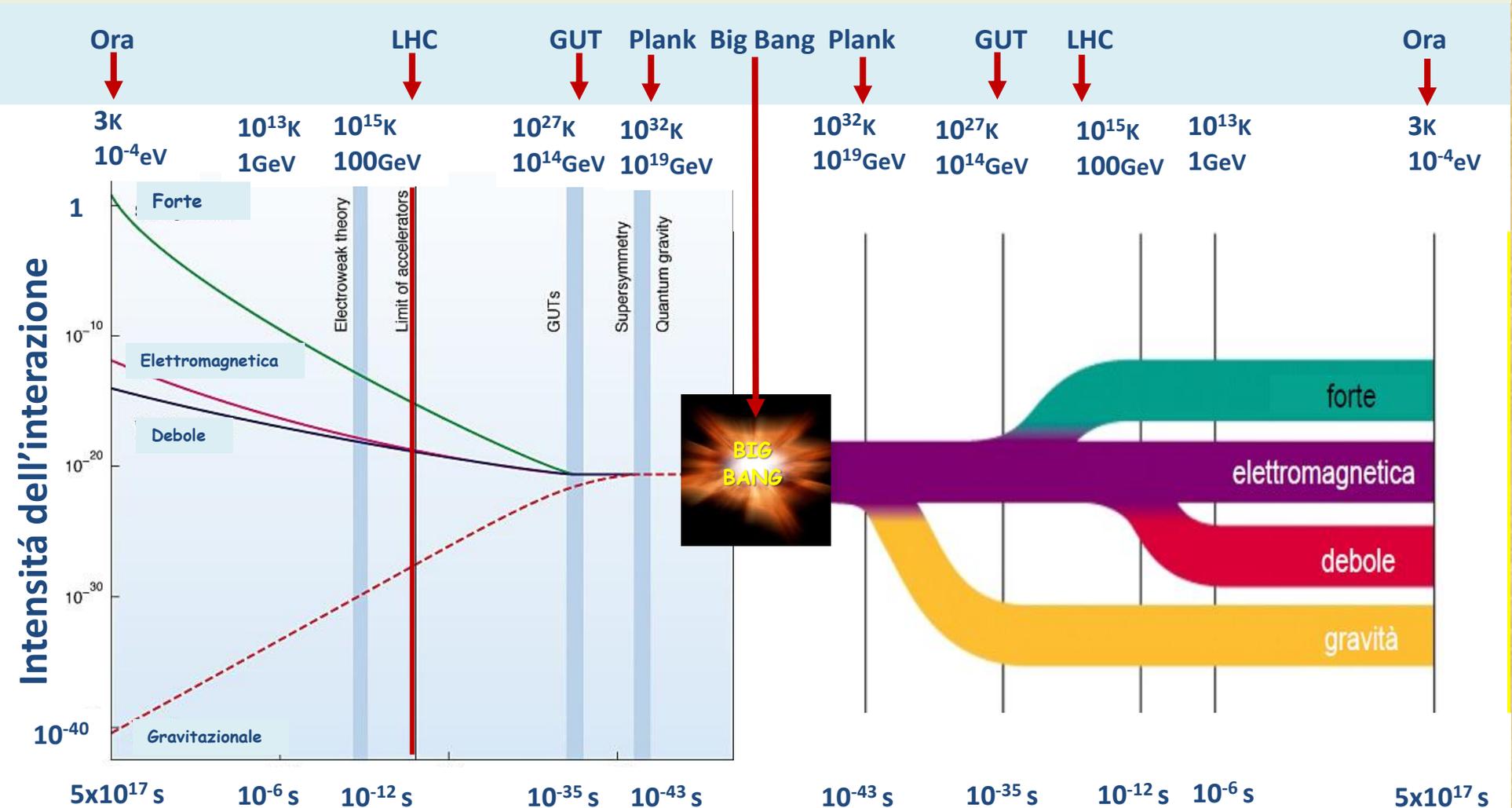
Ora il Modello Standard è completo ! Ma allora abbiamo capito tutto ?

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

- * Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*
- * Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*
- * 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 ?*

L'unificazione delle Forze

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

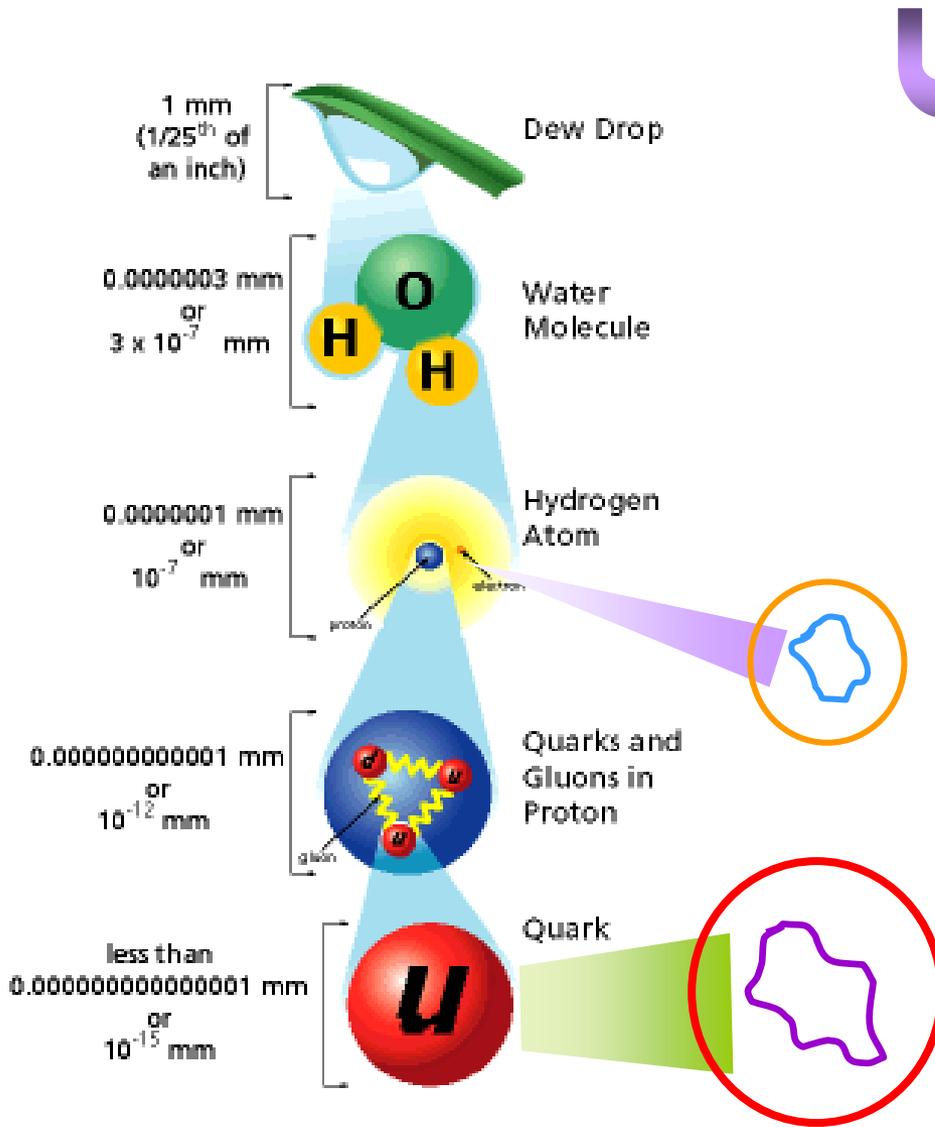


Ora il Modello Standard è completo ! Ma allora abbiamo capito tutto ?

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

- * *Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*
- * *Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*
- * *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?*

Le particelle sono veramente puntiformi ?



Teoria delle Stringhe

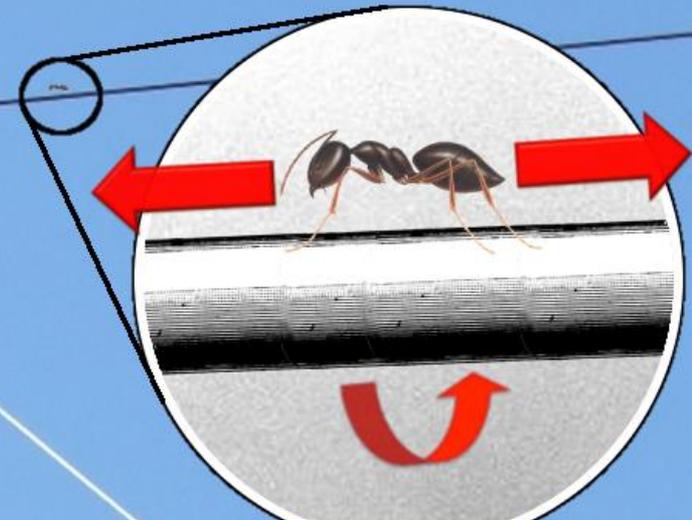
Le particelle non sono puntiformi, ma piccole corde oscillanti

stati diversi di oscillazione della corda → particelle diverse

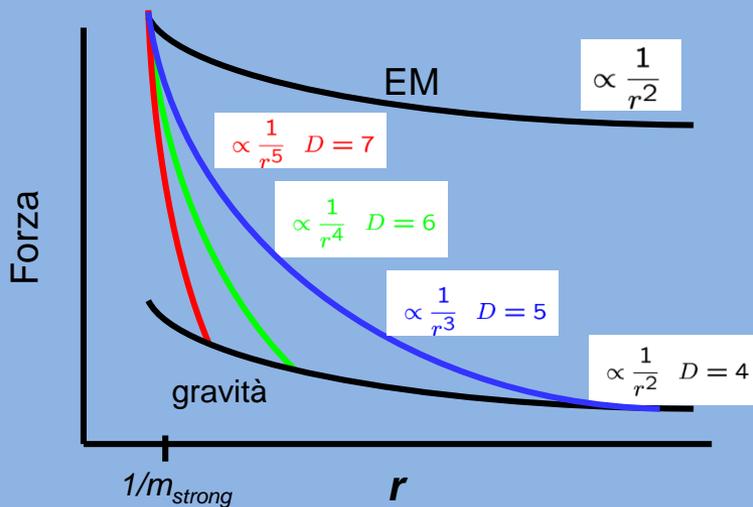
La teoria delle stringhe prevede 10 dimensioni spaziali e una temporale

Dimensioni nascoste

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

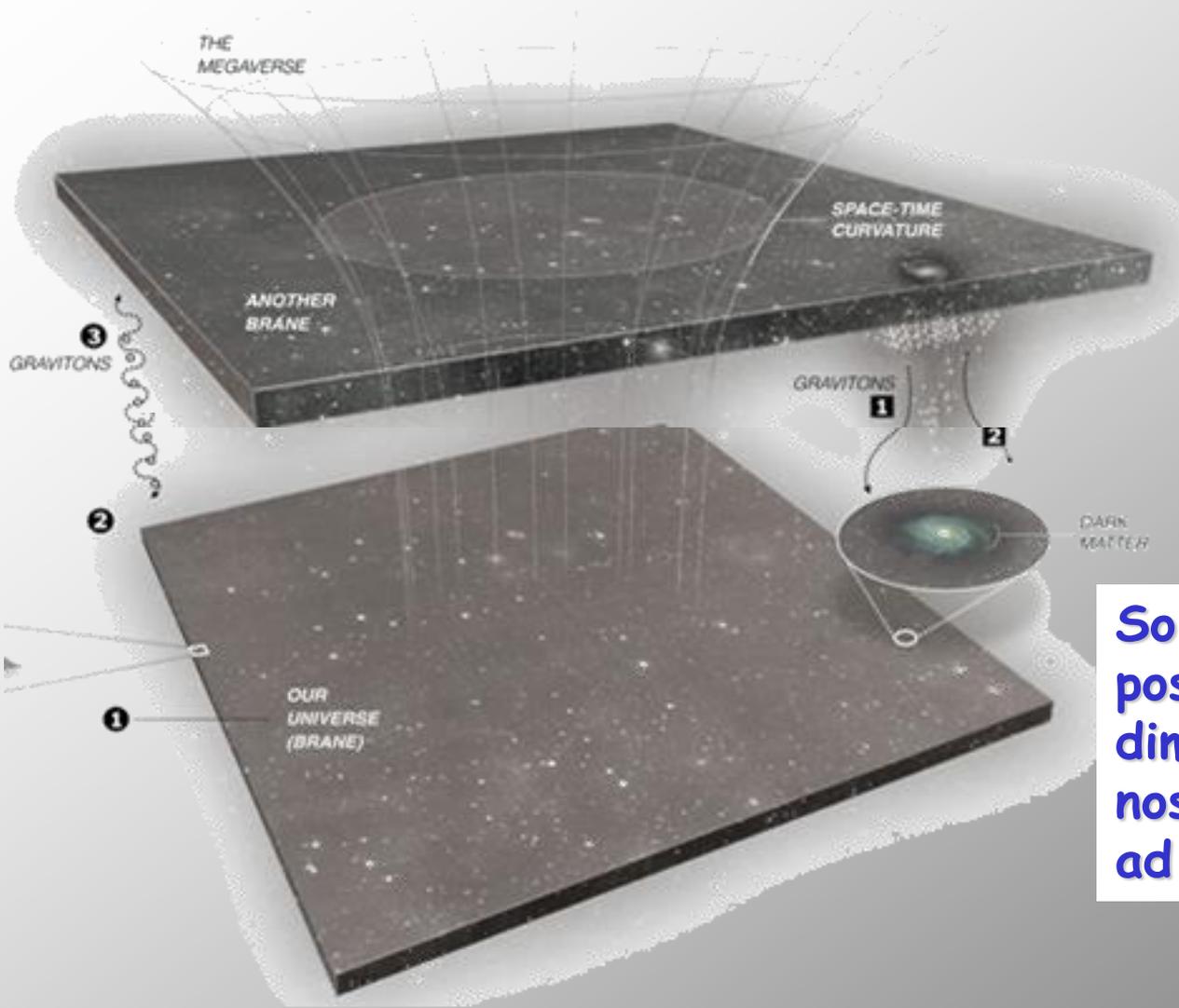


Gravità in n dimensioni nascoste



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

Dimensioni nascoste nella teoria delle stringhe (brane)

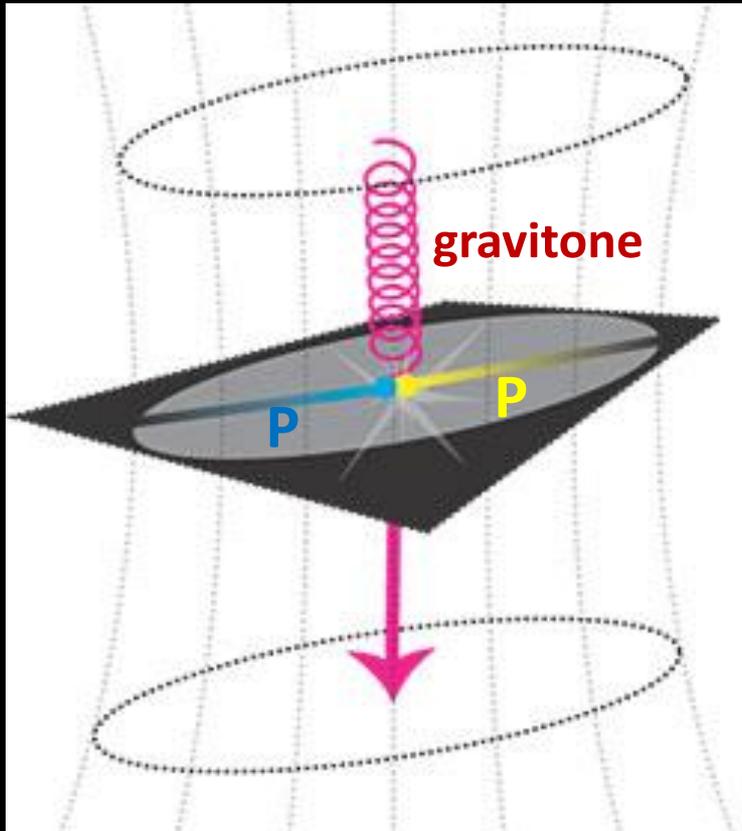


Si suppone che il nostro mondo è solo una fetta (brana) dell'intero Universo

Solo i gravitoni si possono muoversi nelle dimensioni nascoste dal nostro universo (brana) ad un altro universo

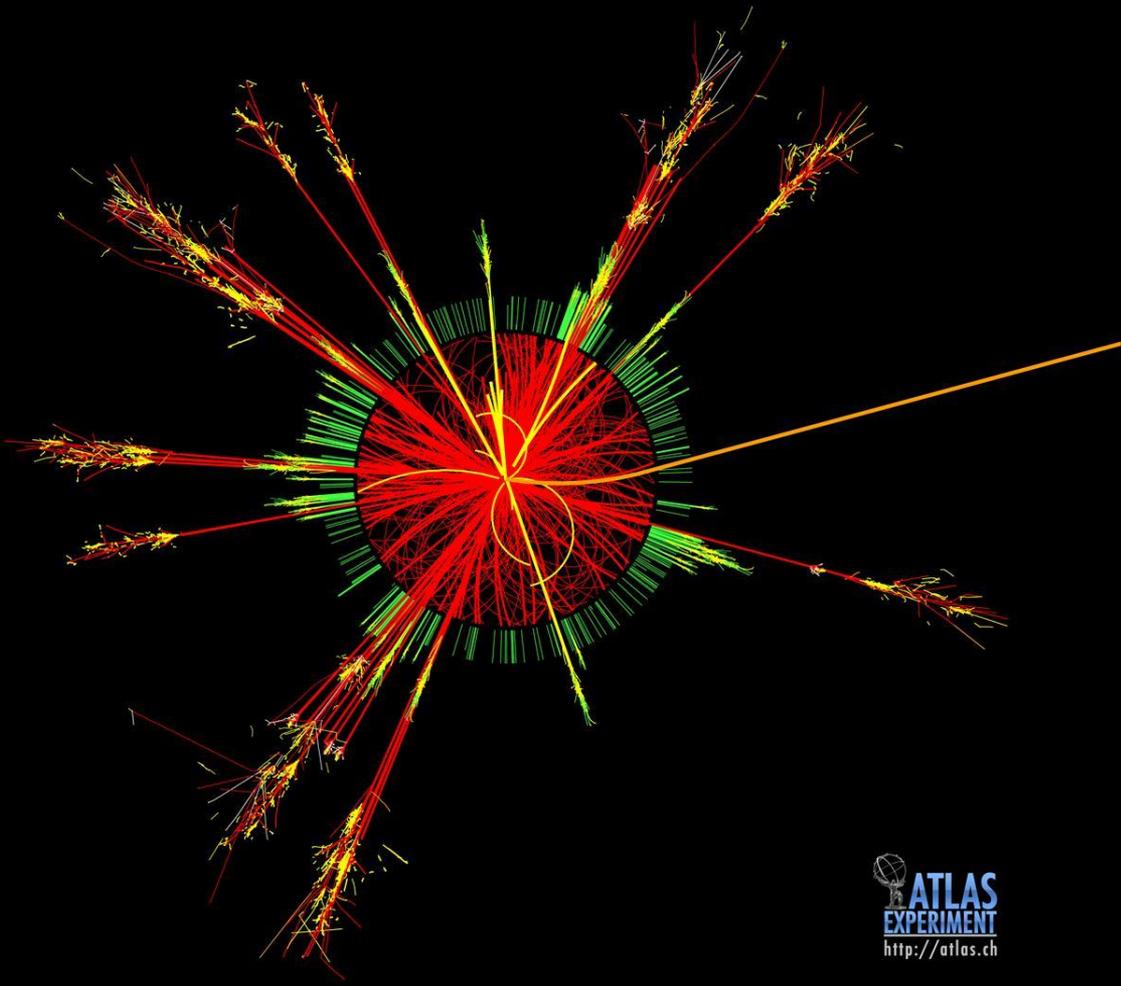
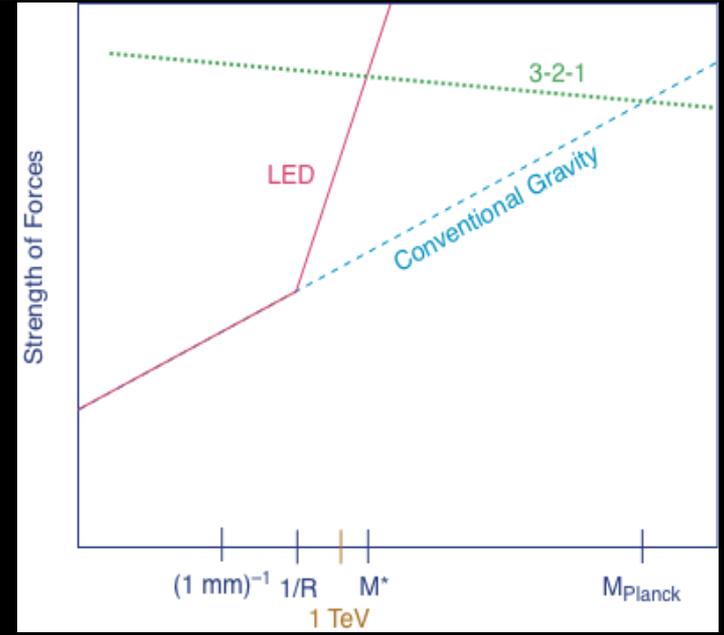
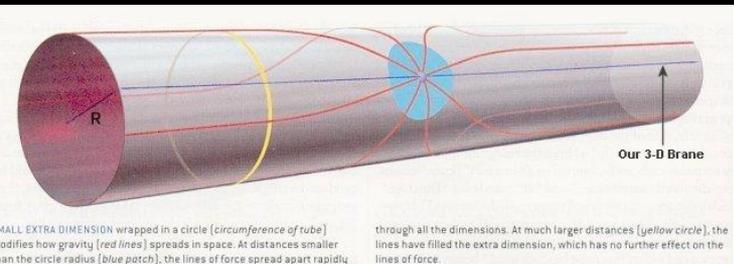
Le particelle del "Modello Standard" del nostro universo sono bloccate nella nostra brana e non possono entrare nelle dimensioni nascoste

Dimensioni nascoste



- Al LHC si potrebbero scoprire le dimensioni nascoste : un eccesso di eventi con una grande "mancanza di energia" in cui la somma dell'energia di tutte le particelle prodotte nell'interazione è molto minore dell'energia della collisione potrebbe essere il segnale che sono stati prodotti dei gravitoni che scompaiono nelle invisibili dimensioni nascoste. Ma tali eventi per ora non sono stati visti

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



ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

Simulazione di un evento di "Black Hole" a LHC

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

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

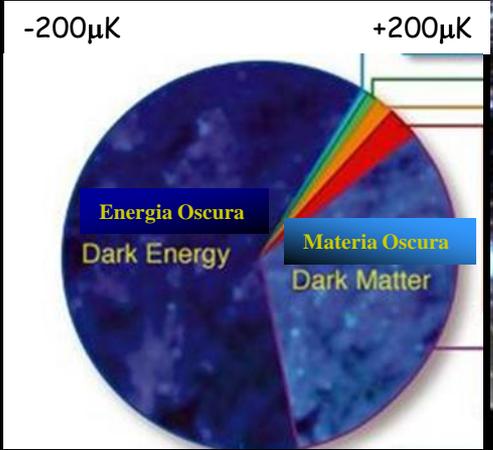
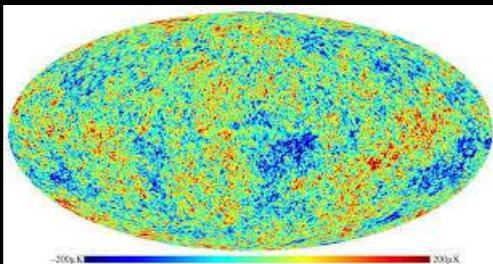
- * Come si supera l'inconsistenza del modello dovuta alle fluttuazioni quantistiche del vuoto che tendono a rendere il campo di Higgs enormemente denso e con esso la massa enormemente elevata?*
- * Che cosa è la Materia Oscura in cui le Galassie sono immerse ?*
- * Perché il mondo è fatto di materia (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?*
- * Il campo di Higgs è il primo campo elementare con spin 0 che permea tutto lo spazio. Esistono altri campi con proprietà simili ?*

Il campo di Higgs permea tutto lo spazio. È il primo campo elementare trovato con spin 0 (scalare). Il campo di Higgs è un nuovo tipo di forza. Fenomeni come l'Inflazione e l'Energia Oscura sono forse fenomeni dovuti a campi scalari simili al campo di Higgs??

Dopo 380 mila anni diventa trasparente

Inflazione

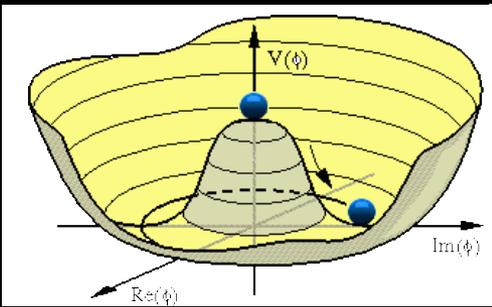
Big Bang



Espansione accelerata
Energia Oscura !



Inflazione/energia oscura con potenziale simile a quello del campo di Higgs ?



← 13.7 miliardi di anni

→

Durante l'inflazione (10^{-35} - 10^{-33} sec) lo spazio si è espanso di un fattore $\geq 10^{50}$

Conclusioni (si fa per dire...)

L'esistenza del Bosone di Higgs è la conseguenza sperimentalmente osservabile dell'esistenza del campo di Higgs ed è la prova della bontà del

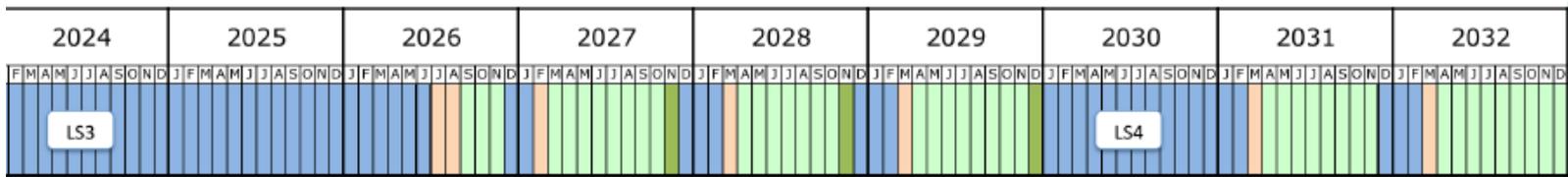
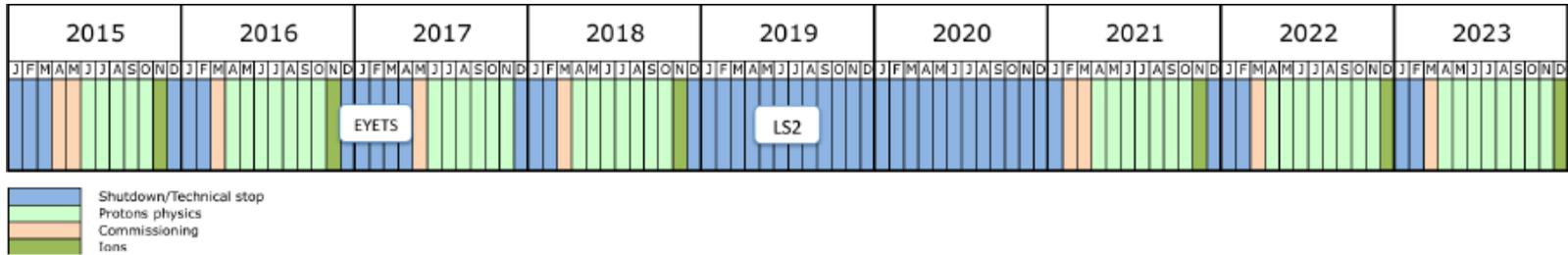
Modello Standard

La sua scoperta è stata un passo fondamentale per la comprensione delle leggi che regolano il nostro Mondo.

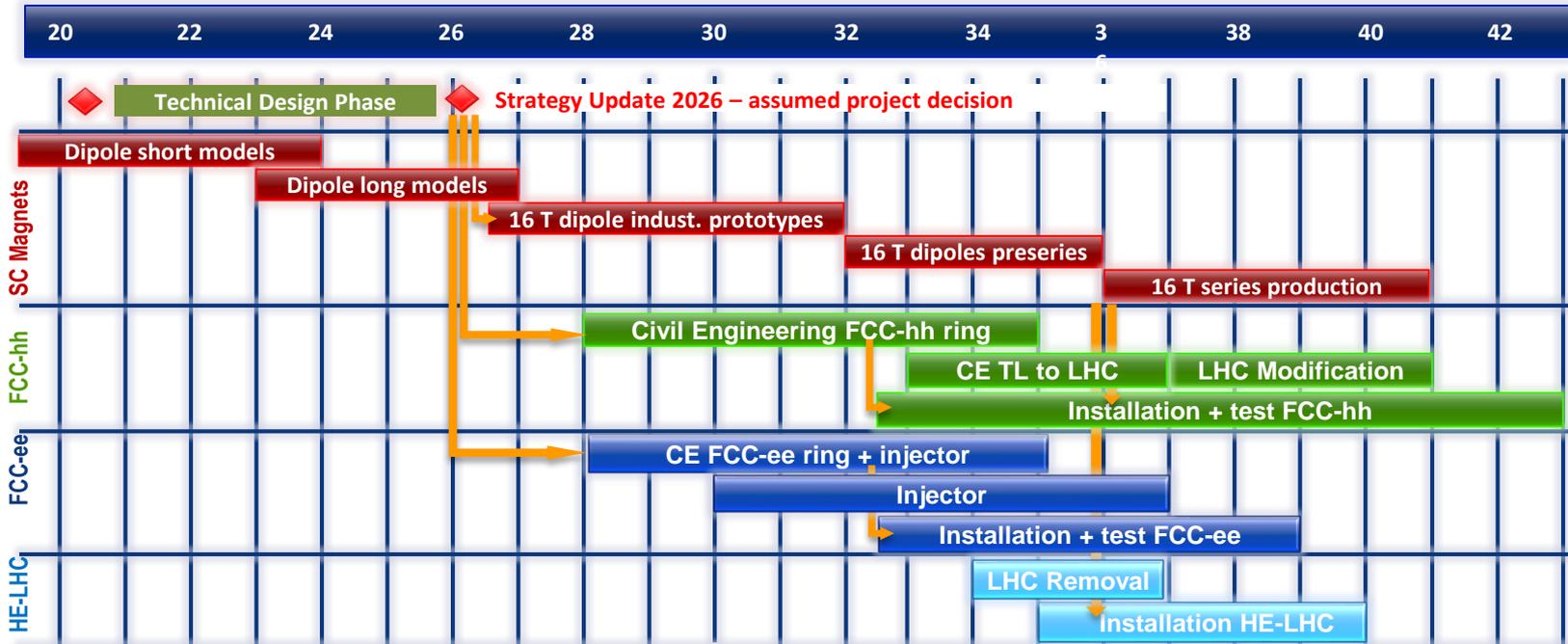
Certamente la storia non finisce qui ! Il 95% dell'Energia di cui è costituito il nostro Universo ci è completamente oscura e molte altre domande aspettano una risposta anche per il solo 5% dell'Energia di cui sono costituite le galassie, le stelle e i pianeti.

Forse si potranno avere delle risposte ad alcune di queste domande acquisendo più dati con LHC fino al 2024 o con HL-LHC a luminosità ancora più alte dal 2026 fino al 2034 !

Programma LHC ⇒ HL-LHC

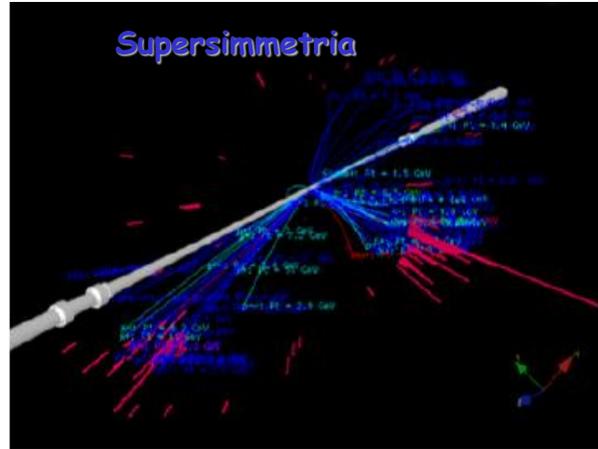


Programmi a lunga scadenza: HE-LHC; FCC-ee; FCC-hh

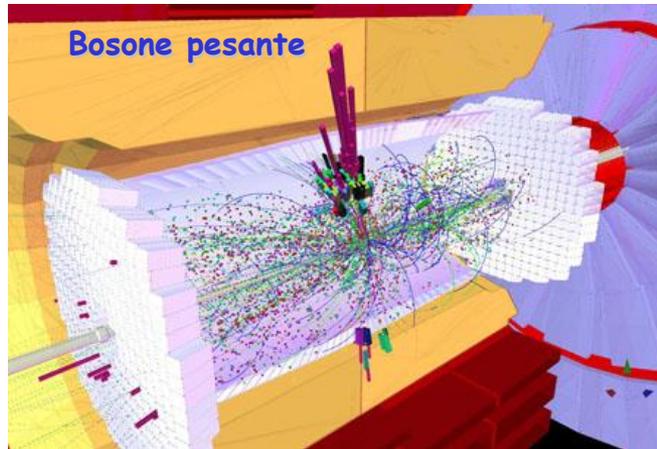


Con LHC a 13 TeV si spera di scoprire nei prossimi anni nuovi fenomeni fisici oltre il Modello Standard

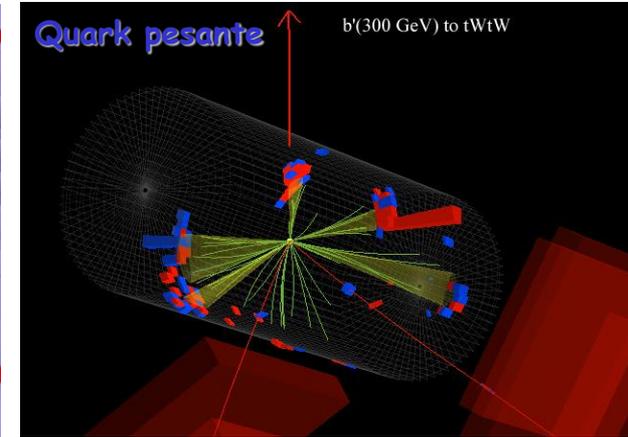
Supersimmetria



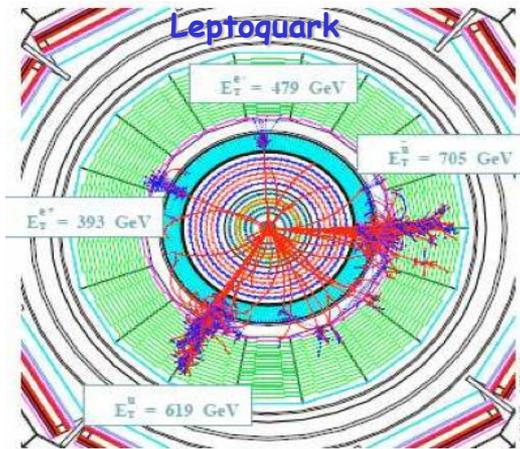
Bosone pesante



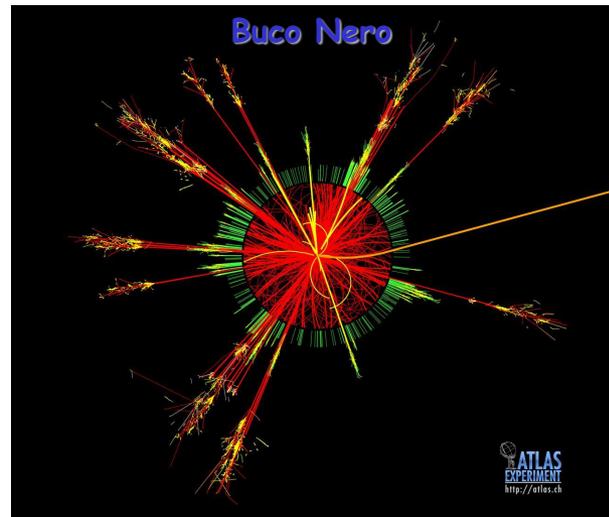
Quark pesante



Leptoquark



Buco Nero

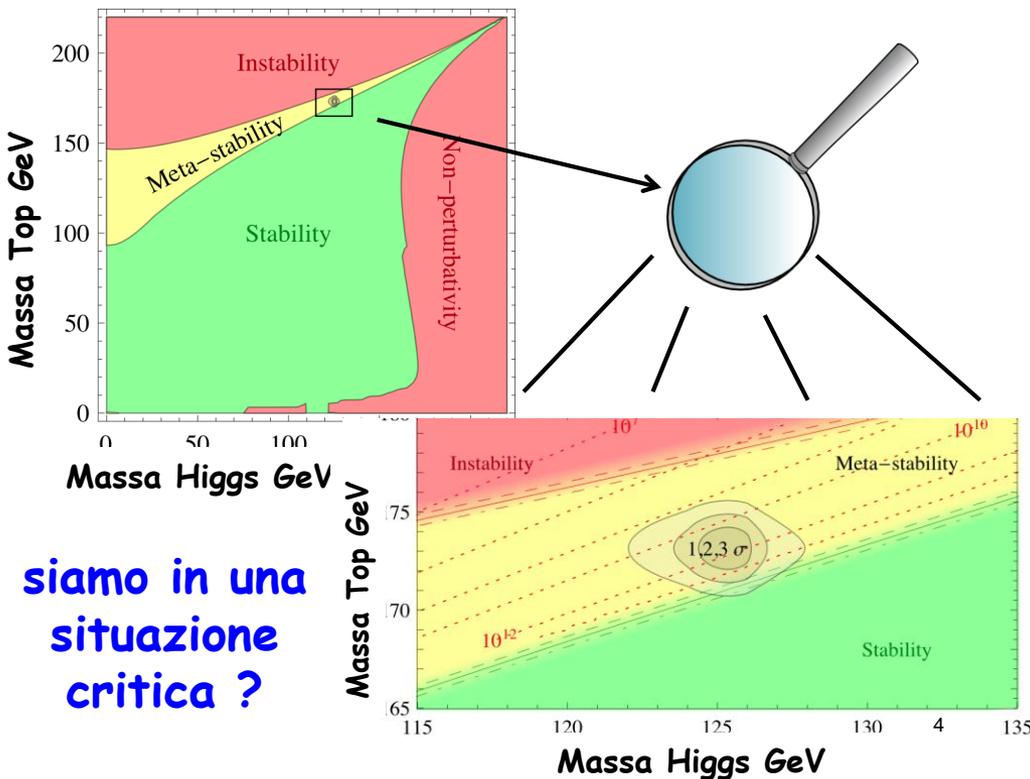
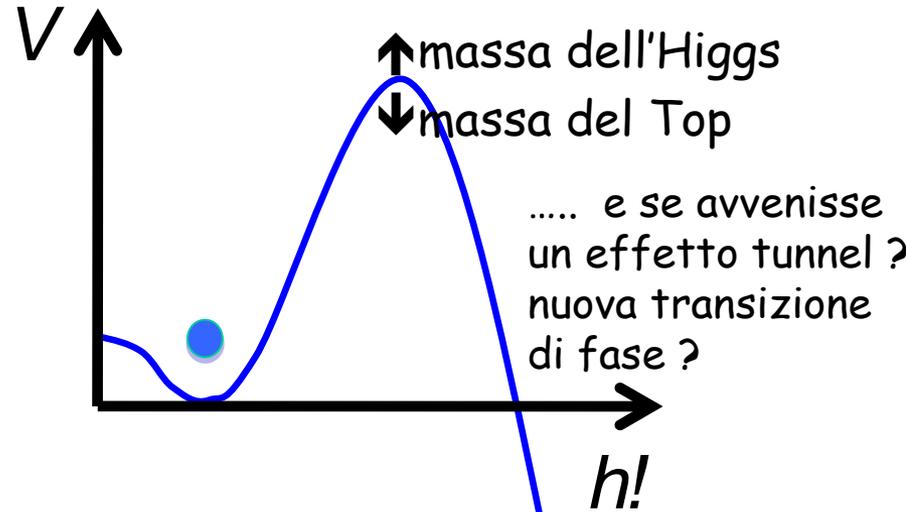
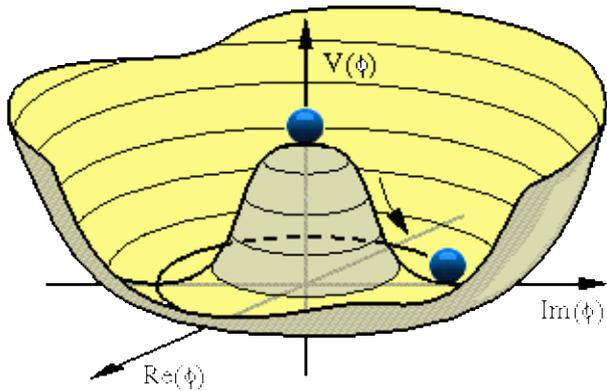


- * I quark e i leptoni posseggono una struttura interna ?
- * Esiste una quarta famiglia di quark e di leptoni ?
- * Esistono i leptoquarks ?
- * Esiste una quinta forza ?
- * Esistono dimensioni nascoste ?
- * Esiste ? ? ? ?

Grazie dell'attenzione

Altre Slides

$M_H \approx 125 \text{ GeV}$: Vuoto metastabile ?



siamo in una situazione critica ?

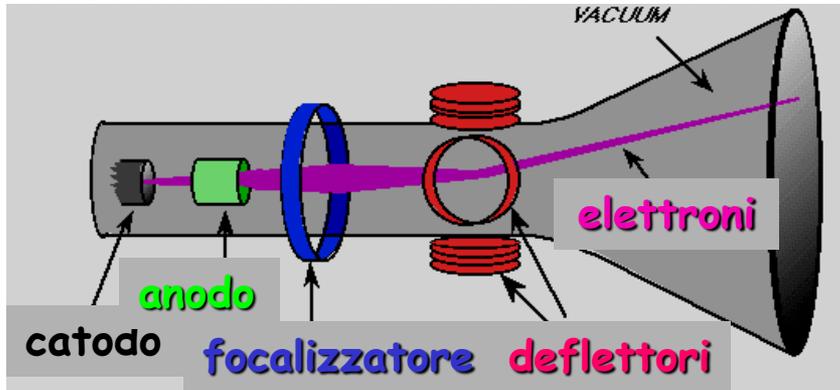


Slide da G. Giudice

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

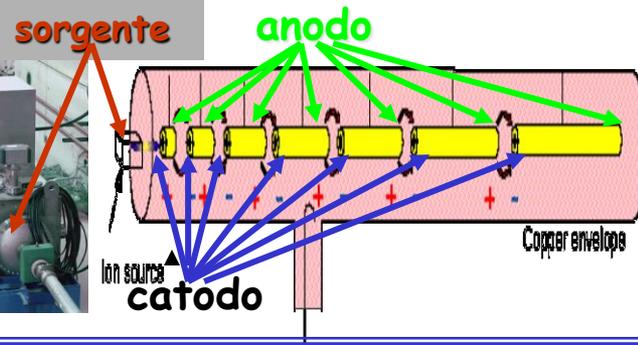
Come si accelerano le particelle

l'acceleratore di casa: il televisore

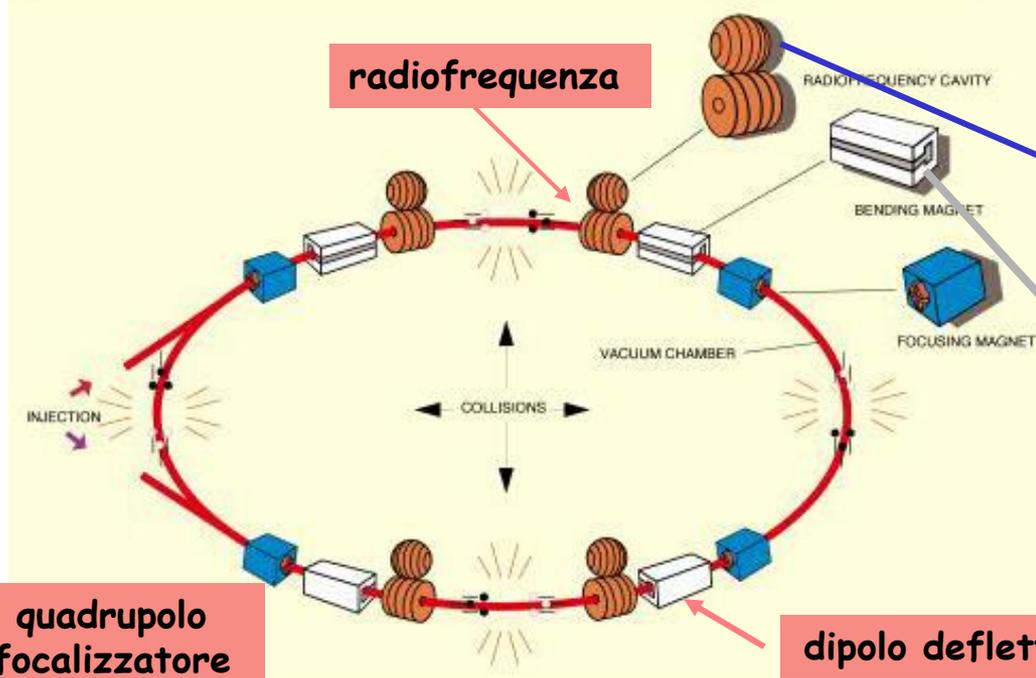


l'energia degli elettroni è ~ 20 KeV

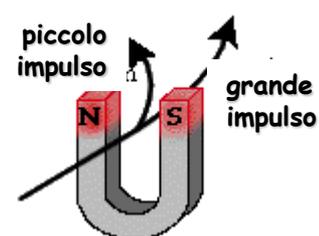
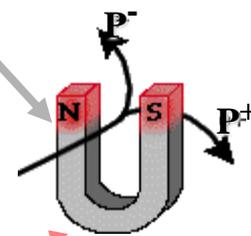
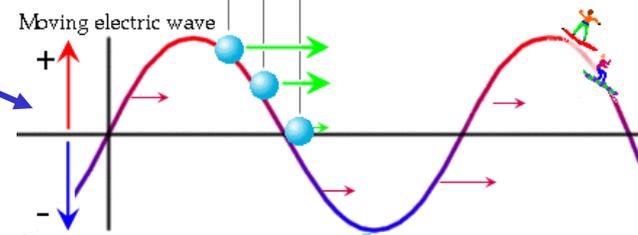
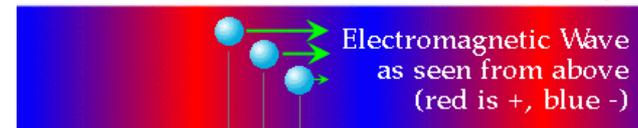
(FERMILAB-Chicago)
acceleratore lineare
energia 400 MeV



le 3 componenti principali di un acceleratore

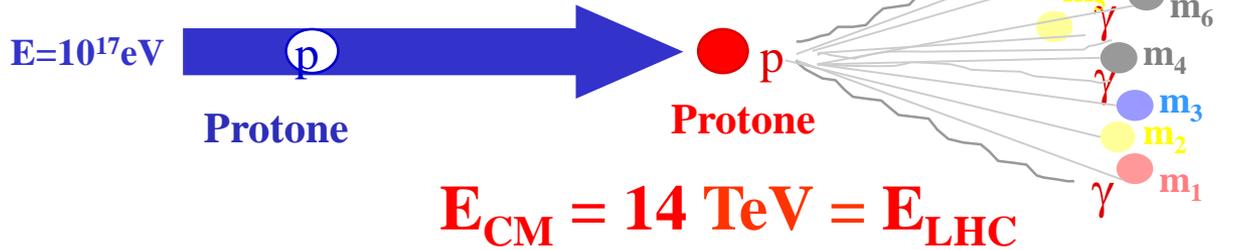


Electromagnetic wave is traveling, pushing particles along with it

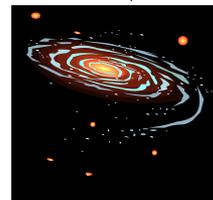
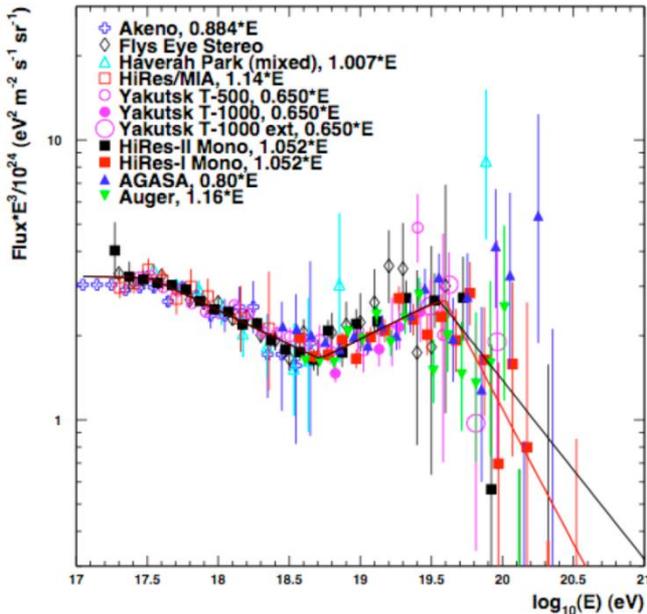


Comitato LSAG

(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...

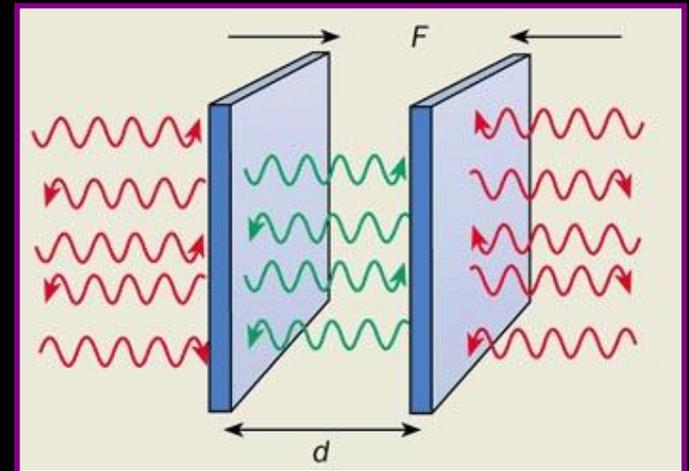
INFLAZIONE

L'espansione accelerata dell'Universo richiesta dalla soluzione inflazionaria richiede l'azione di una forza cosmica repulsiva nelle equazioni di Einstein.

Per realizzare un sistema fisico con una forza cosmica repulsiva (pressione isotropa e negativa) si fa ricorso all'energia del vuoto quantistico.

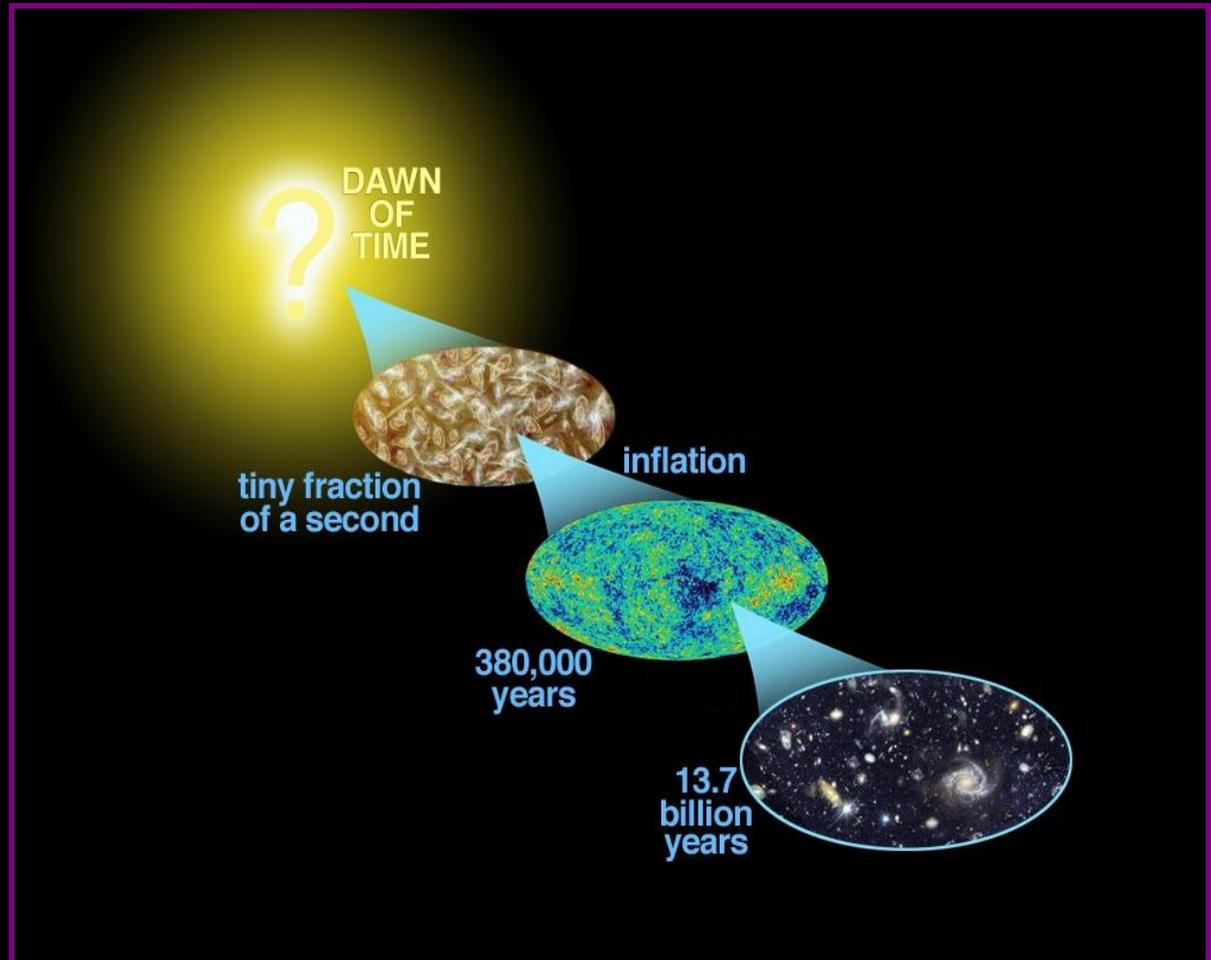
Una manifestazione delle proprietà del vuoto è l'effetto Casimir in elettrodinamica quantistica. In ambito cosmologico si fa uso dell'energia del vuoto di un opportuno "campo scalare" detto "Inflatone".

Effetto Casimir



La formazione delle strutture nell'Universo fluttuazioni del vuoto quantistico primordiale

I "semi" delle strutture cosmiche (galassie) furono generati nell'Universo primordiale dalle fluttuazioni quantistiche del vuoto, dilatati dalla enorme espansione dello spazio durante l'inflazione. Il CMB è un' "istantanea" scattata al momento dell'ultima interazione della radiazione cosmica con la materia che mostra questi semi come piccole variazioni di temperatura



Espansione accelerata dell'Universo

Oggi l'Universo sta sperimentando una fase di espansione accelerata ovvero una sorta di "inflazione",

Tale espansione accelerata viene attribuita all'azione di un campo di forze repulsive chiamata "energia oscura".

Costante Cosmologica di Einstein

R.G.: l'equazione di Einstein (sistema di 10 eq.)

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

Prima formulazione.

costante
di Newton

(Metro, Orologi) "=" (Energia, Materia)

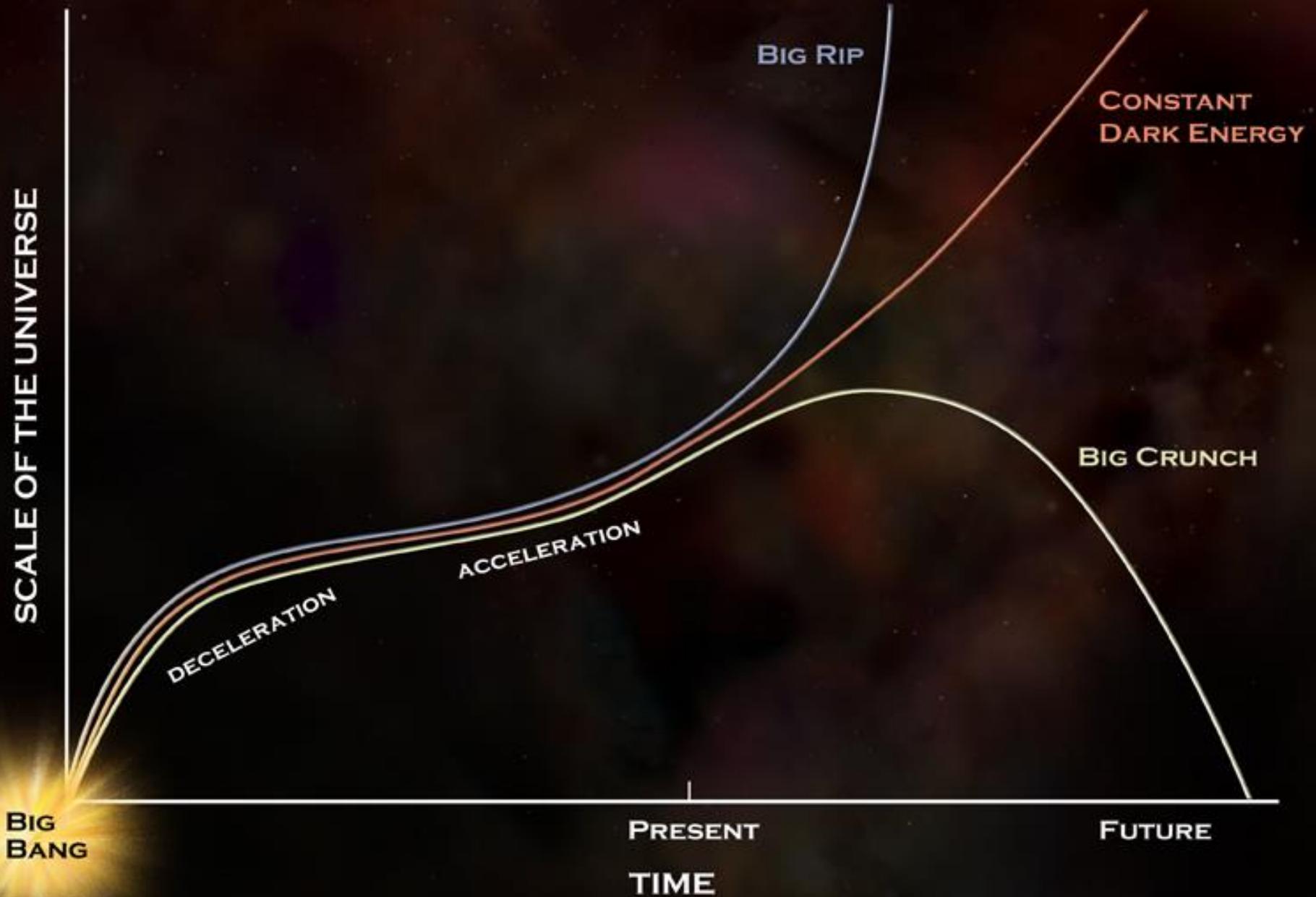
$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu} + g_{\mu\nu} \lambda$$

aggiunta di Einstein in seconda battuta...

"Costante
Cosmologica"

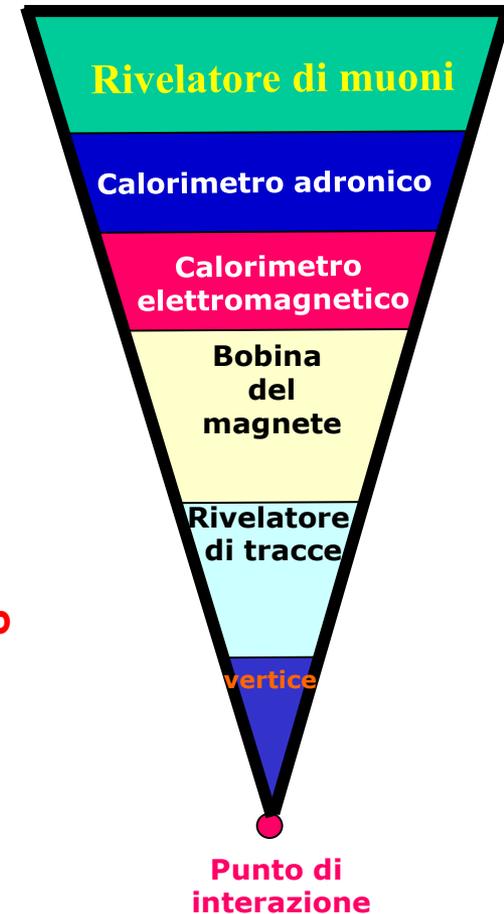
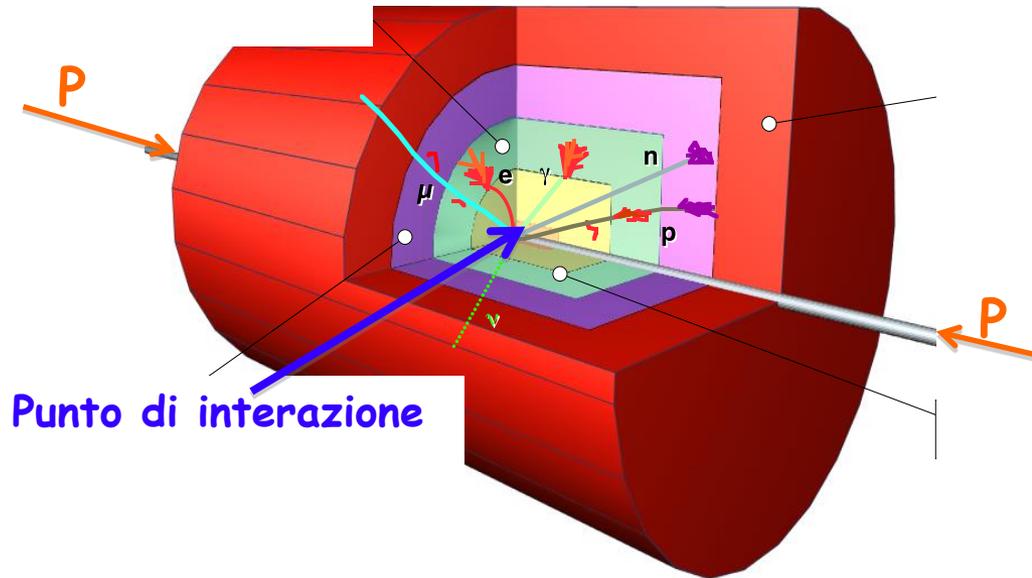
Energia
del
Vuoto
(????)

Il destino dell'Universo?



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)

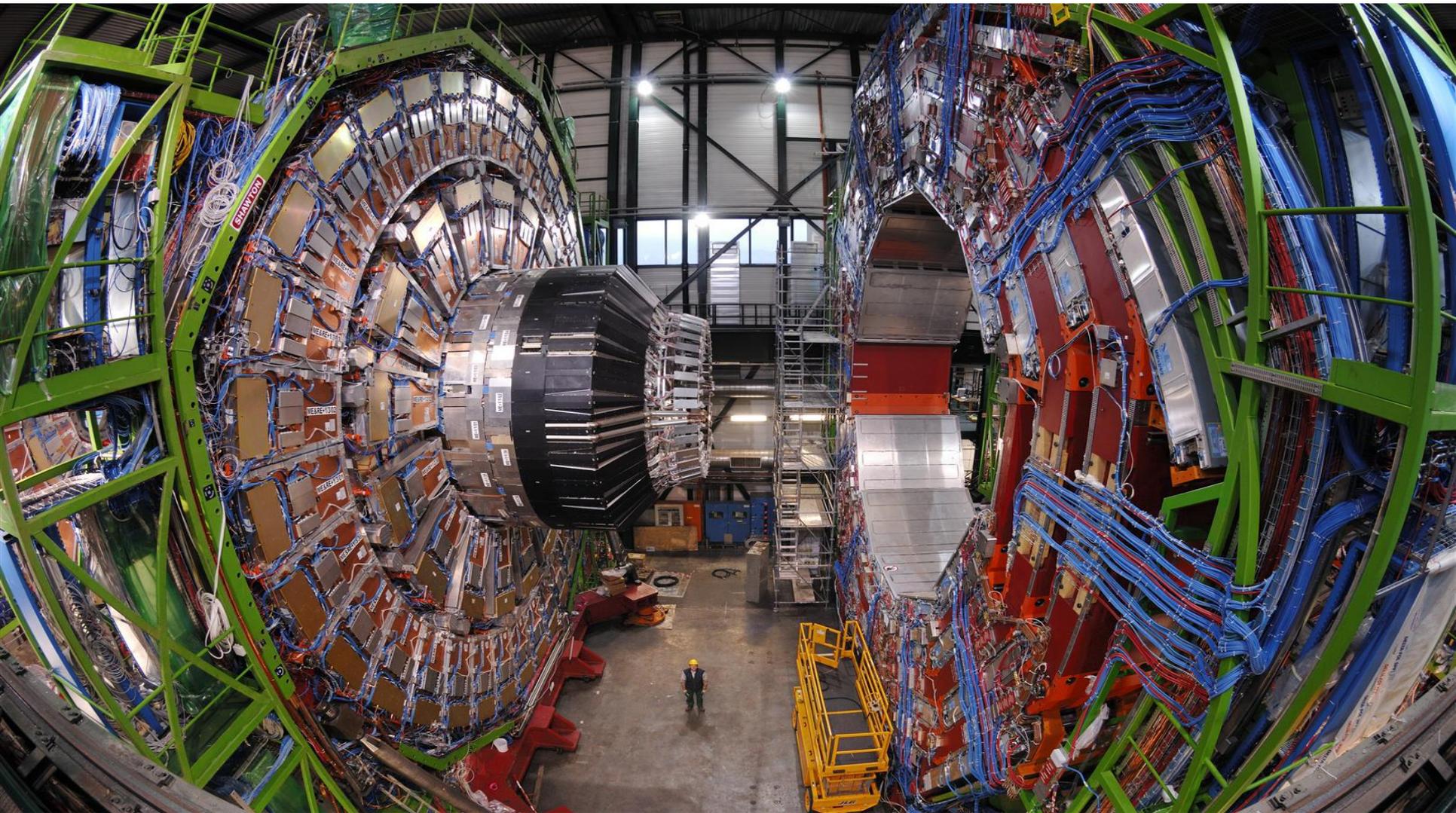
Energia mancante: ν (neutrini)

(*)

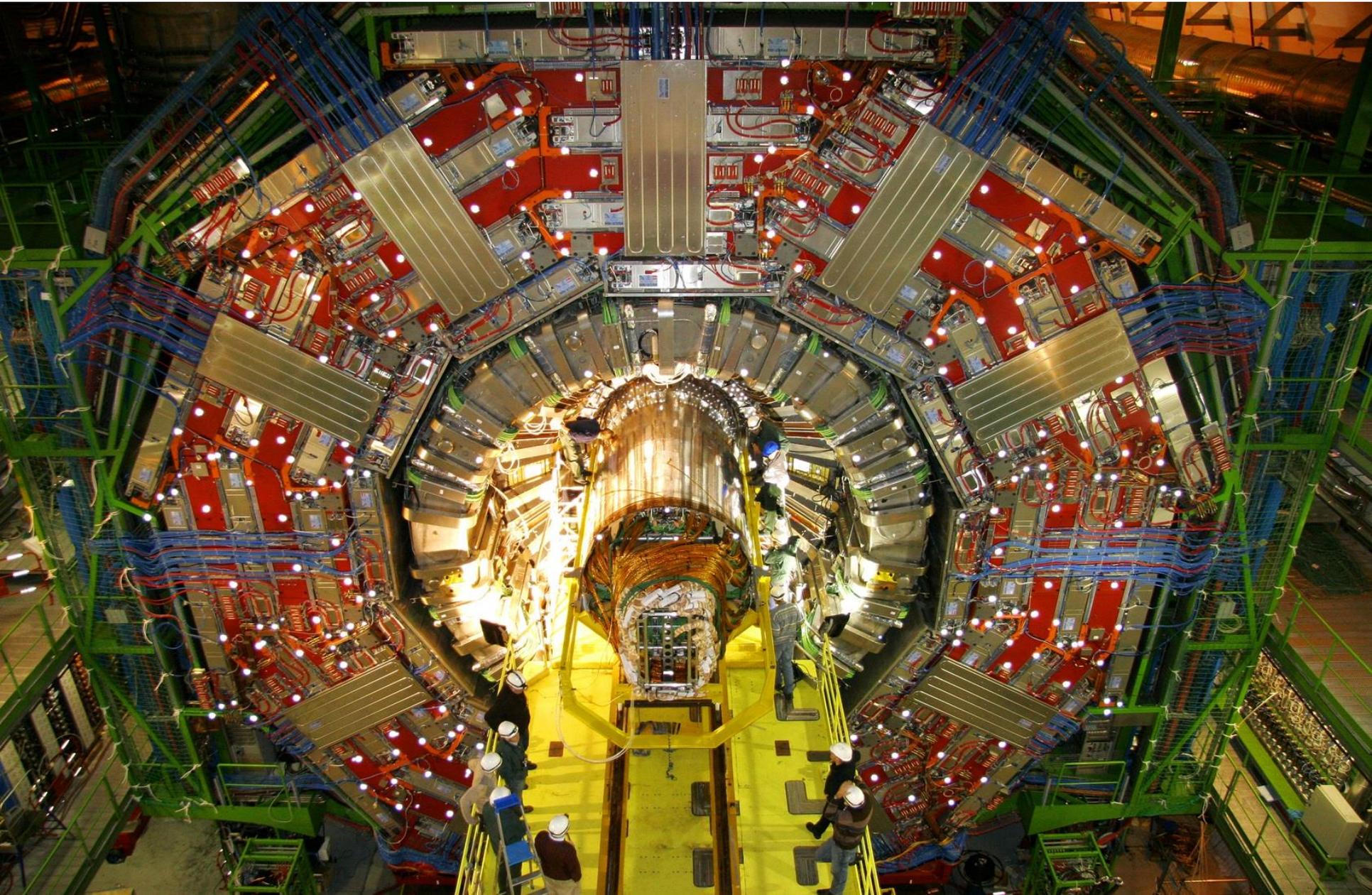
Pioni, $\tau=2.6 \times 10^{-8}$ sec, $E=20$ GeV, $\gamma = E/m = 20/0.140 = 142.86$, $\gamma\tau = 0.0037$ msec, distanza media percorsa = $c \gamma \tau = 1.1$ km

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!**

Il rivelatore CMS



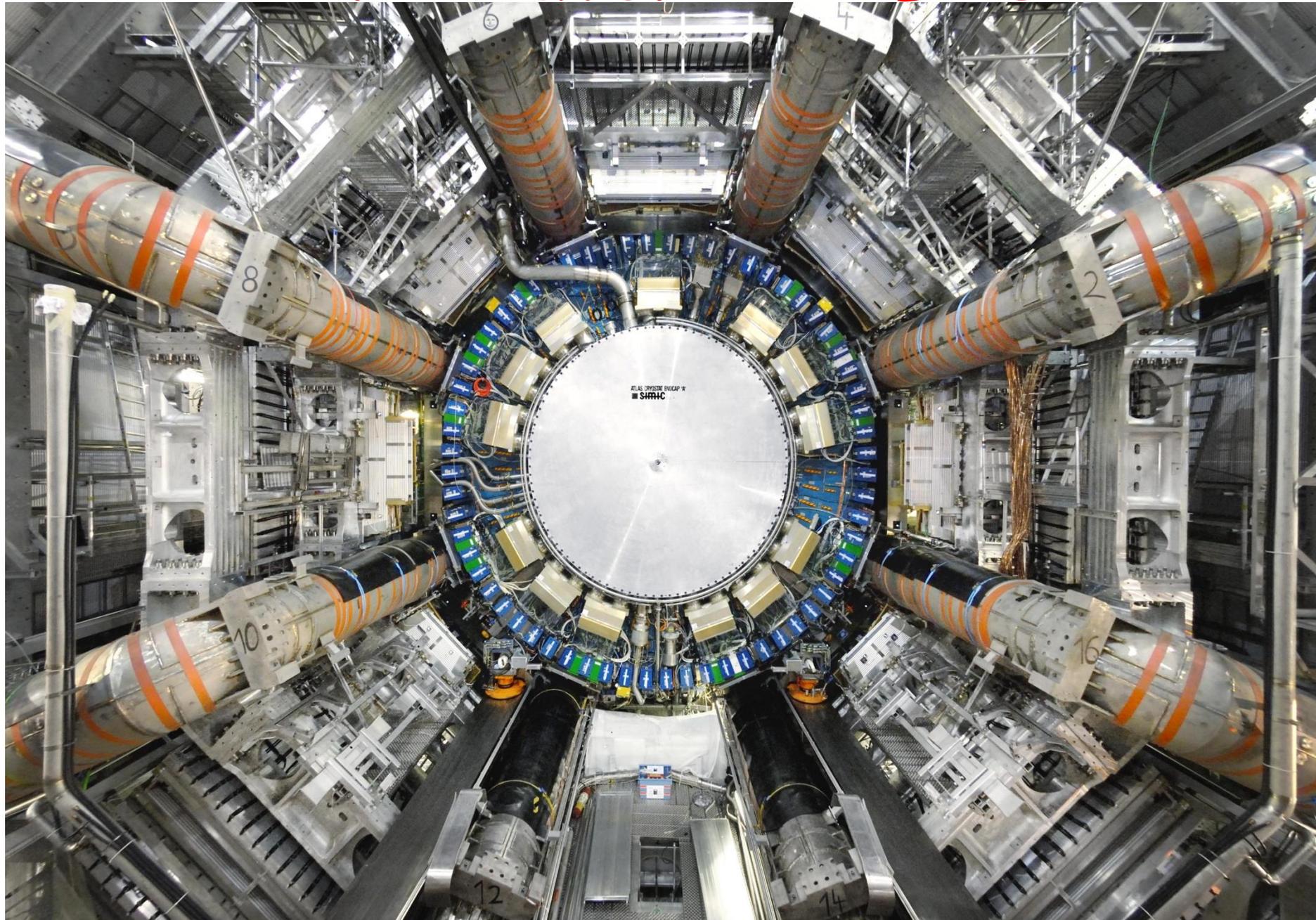
Il rivelatore CMS



Una riunione della Collaborazione CMS

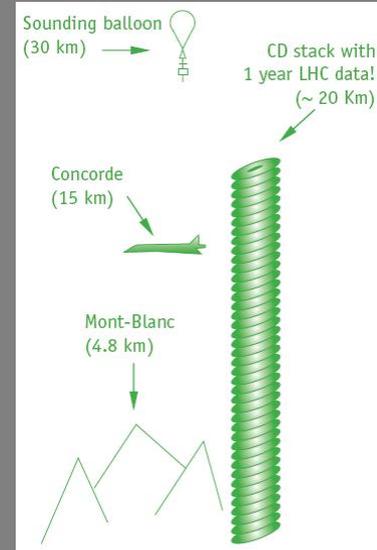


Il rivelatore ATLAS



The LHC Computing Grid

Scheduled = 15301
Running = 10525

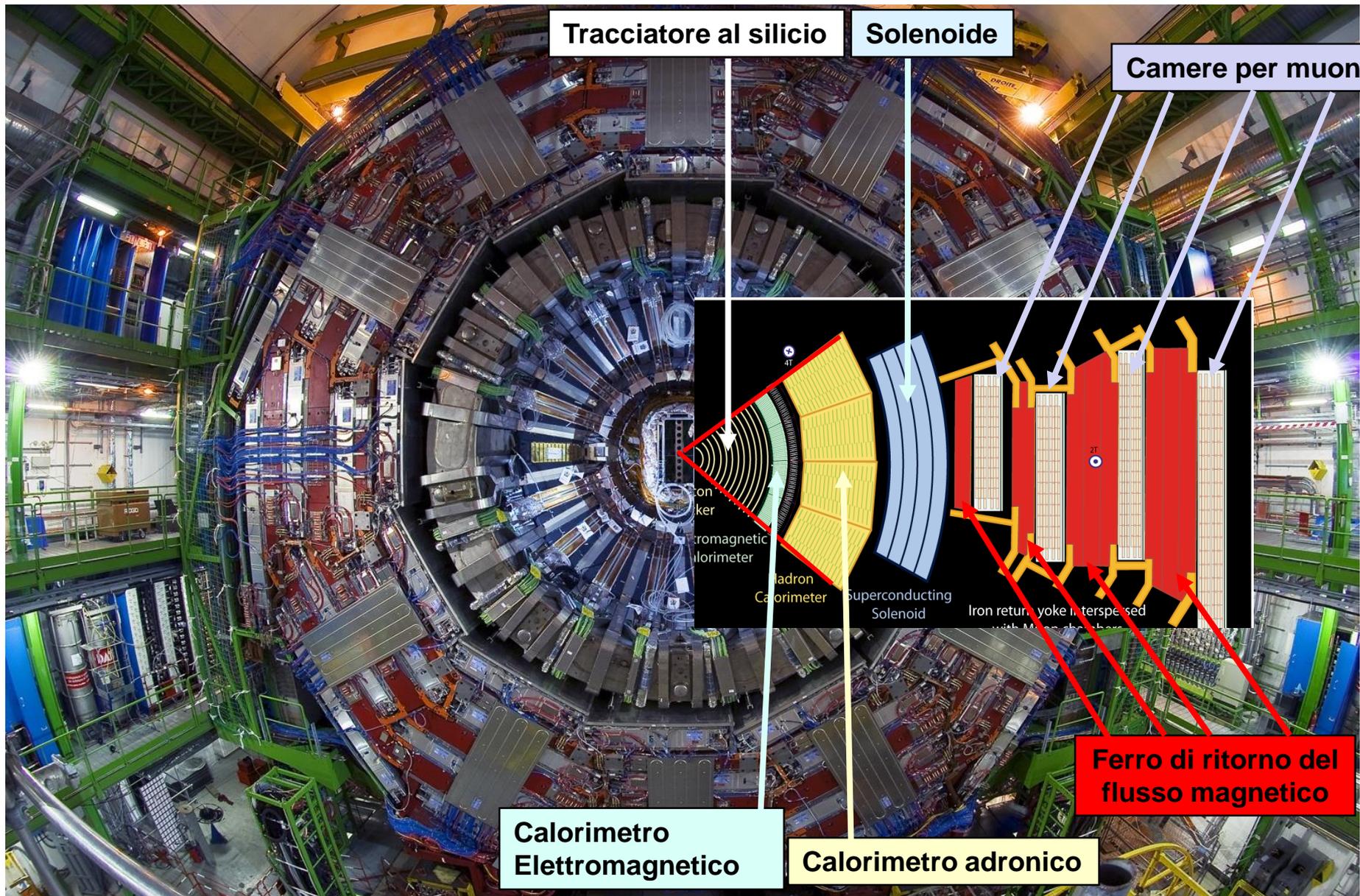


09:25:20 UTC

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!

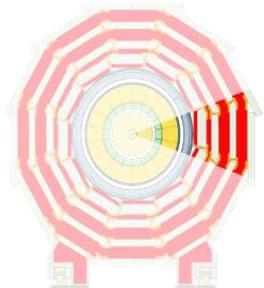
L'analisi dei dati di LHC richiede una potenza di calcolo equivalente a ~100,000 dei più veloci processori oggi esistenti.

Il rivelatore CMS



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

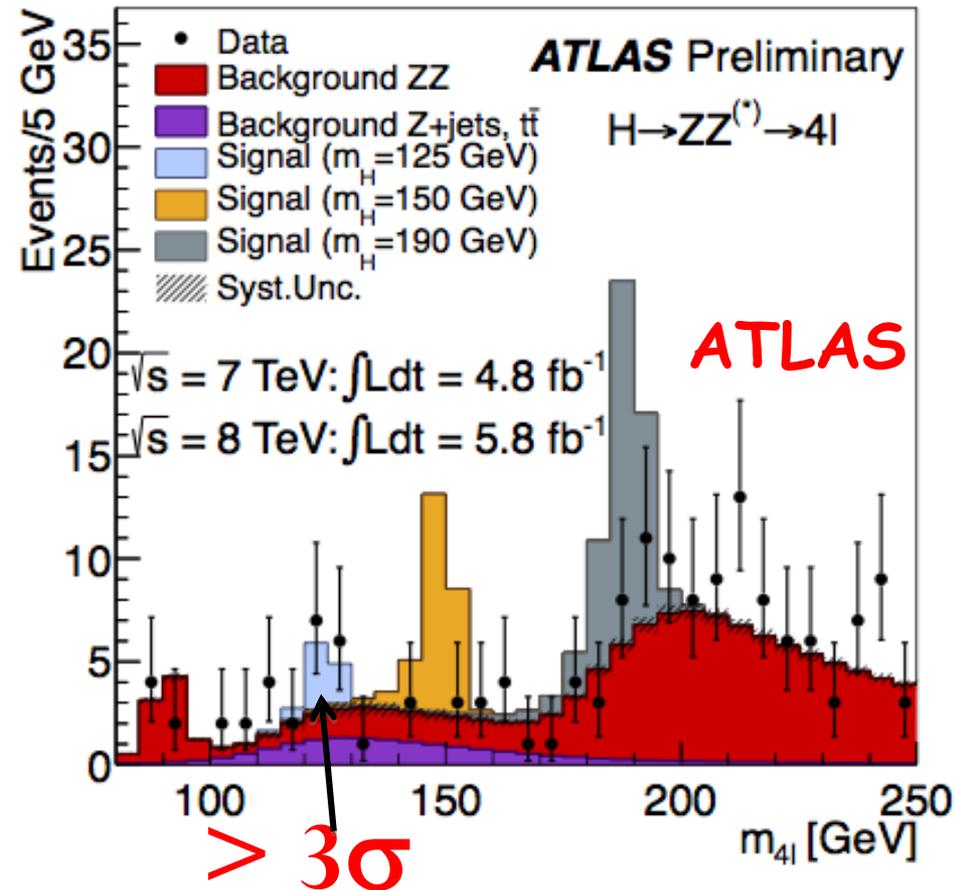
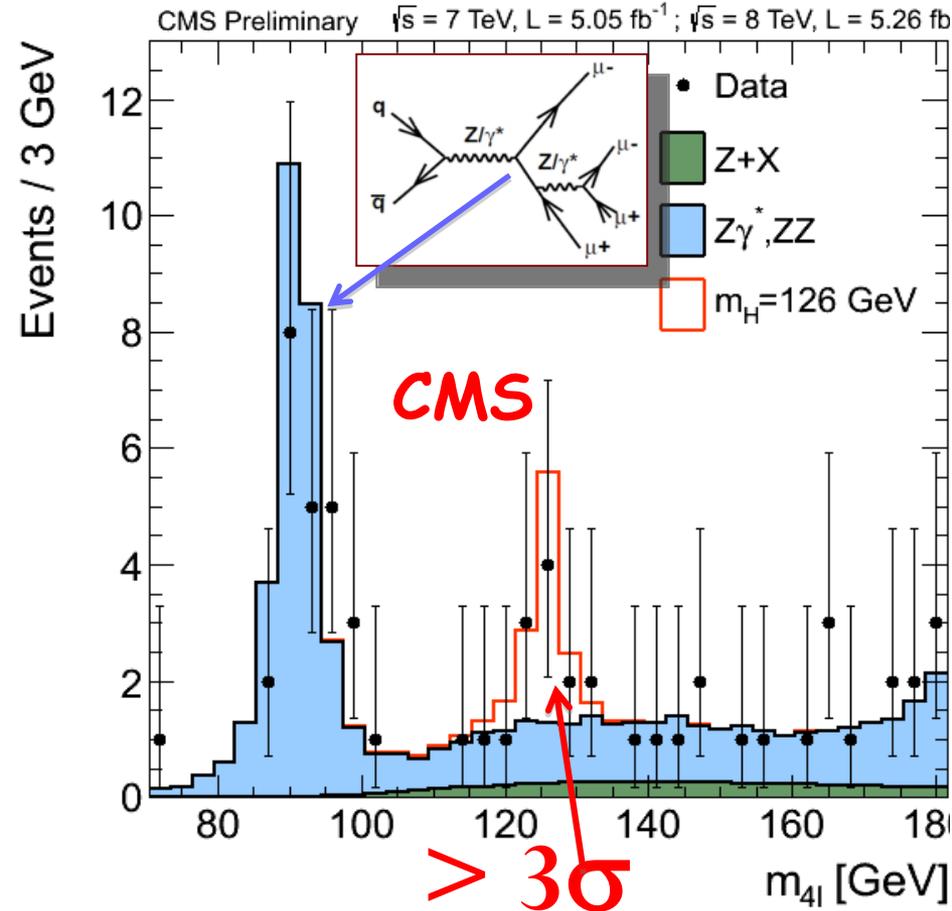
Solenoido superconduttore

Ferro
Camere per muoni

2T



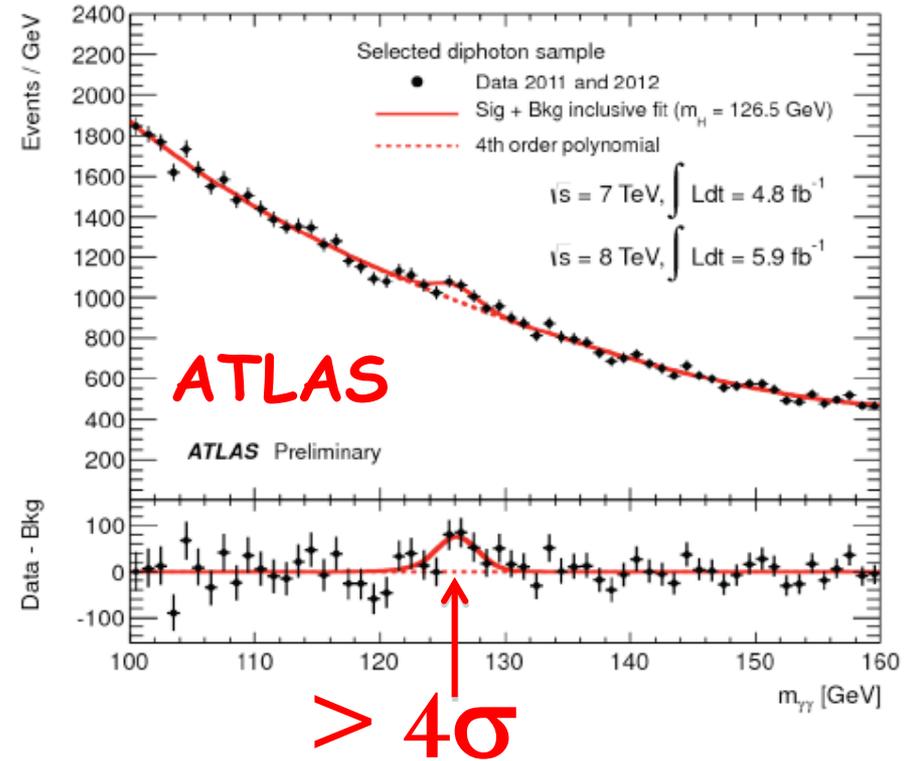
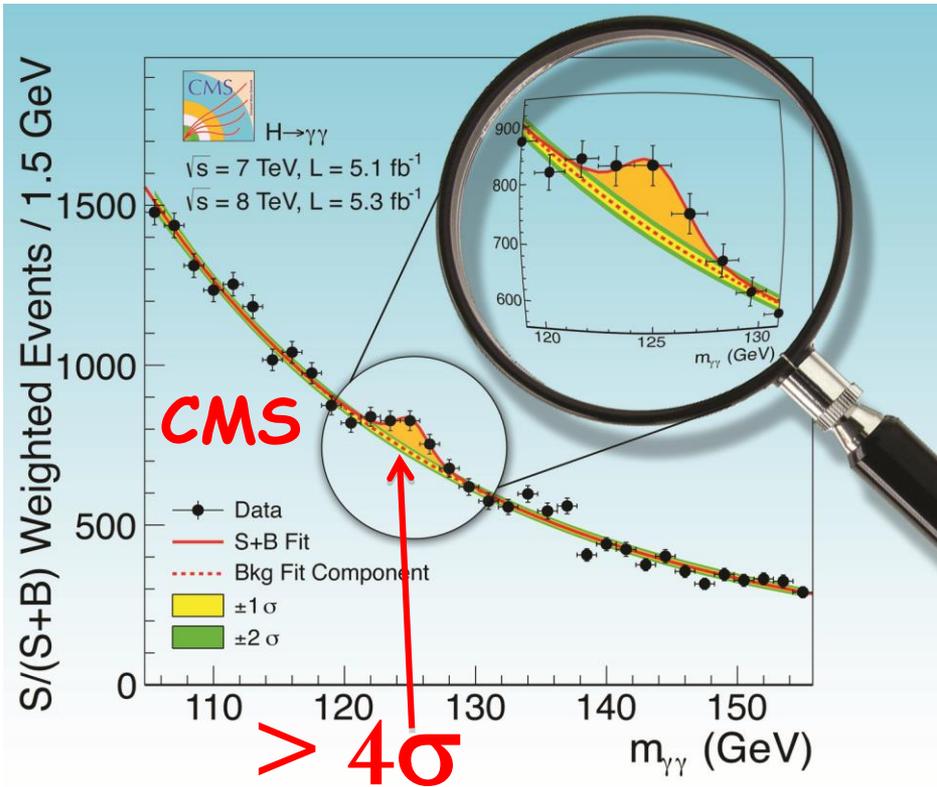
Ricerca di $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$



" 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.

Ricerca di $H \rightarrow \gamma\gamma$



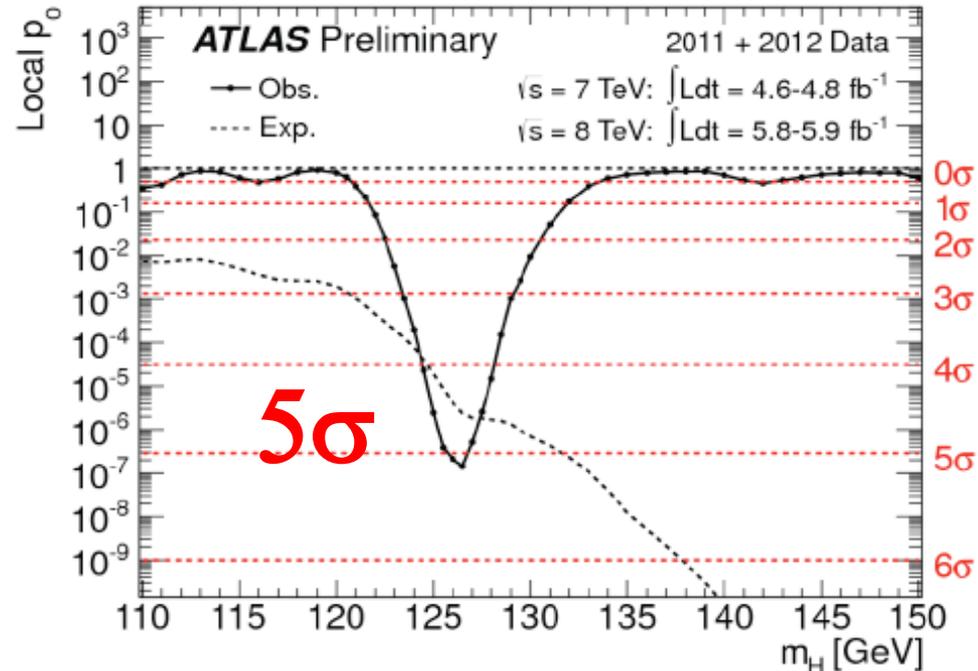
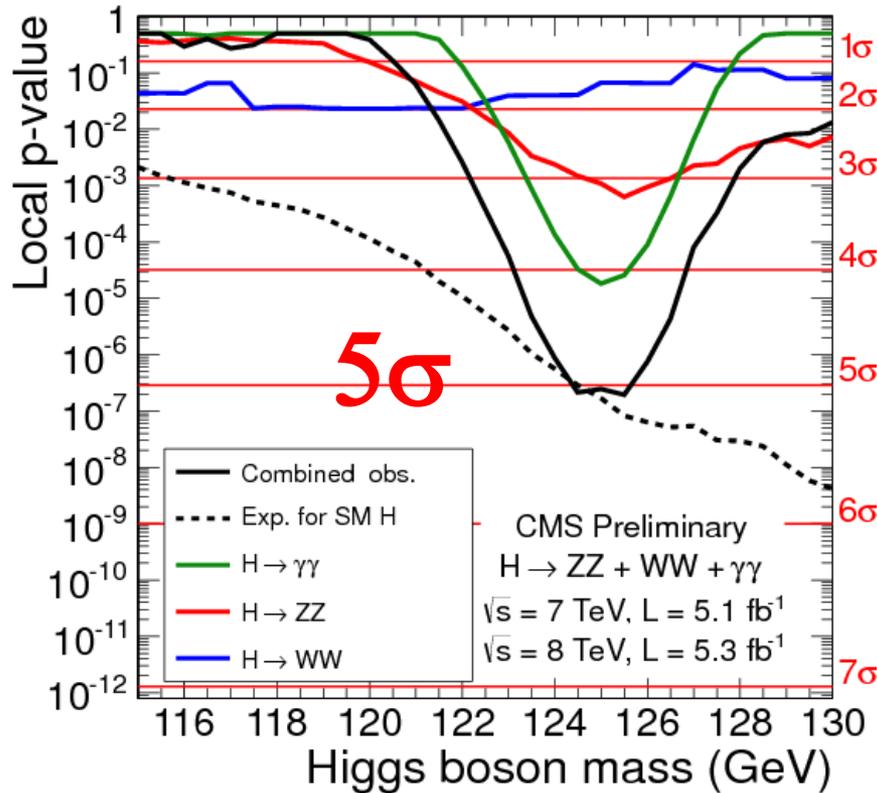
"4 σ " $\Rightarrow 3.15 \times 10^{-5}$ è la probabilità di assenza di segnale:

--> evidenza notevole di segnale

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

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 ?!

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



“evidenza di
segnale”

18 volte croce ??!

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



“notevole evidenza
di segnale”

26 volte croce !!!

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

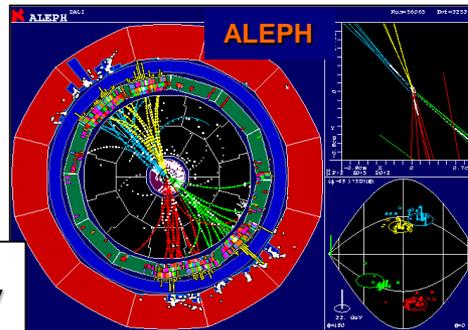


“scoperta”

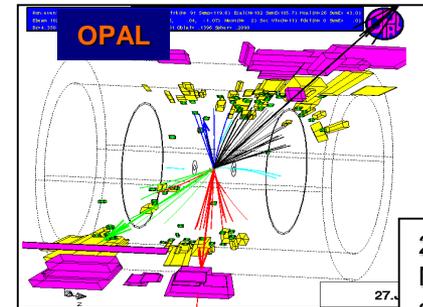
Ricerca dell'Higgs a LEP

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

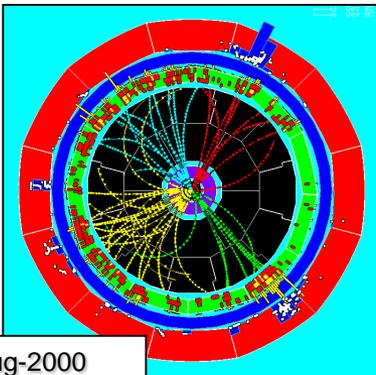
Sono stati visti alcuni eventi compatibili con una massa di un H intorno a 114 GeV: troppo pochi per poter affermare che si trattava del bosone di Higgs !



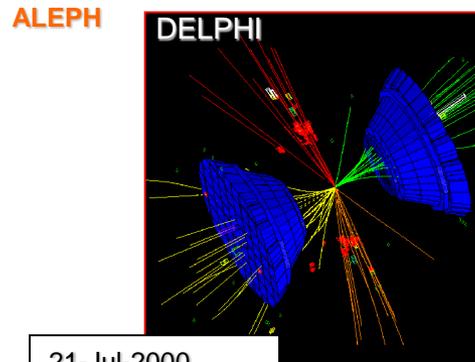
31-Jul-2000
Mass: 112 GeV
 $s/b_{115} = 2.0$



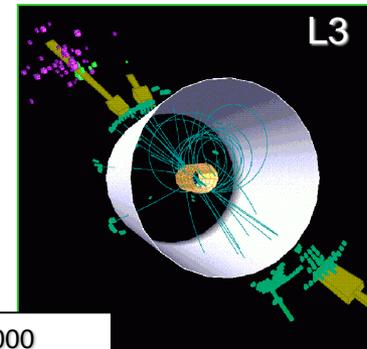
27-Jun-2000
Mass: 113 GeV
 $s/b_{115} = 0.52$



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
 $s/b_{115} = 2.0$

La "Legge di Hubble"

fattore di espansione:

$$H \equiv \frac{1}{R} \frac{dR}{dt} = \frac{\dot{R}}{R}$$

$$H = 72 \pm 8 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1} \text{ (misura 2001)}$$

V = velocità di recessione

$$zc = Hd$$



$$V = Hd$$

se si assume che il tasso di espansione rimanga costante:

$$T = \frac{1}{H} \sim 15 \text{ miliardi di anni}$$

In realta' $H = H(t)$