

Introduzione alla Fisica delle Particelle Elementari

Martino Margoni

Dipartimento di Fisica & INFN Sezione di Padova, Esperimenti CMS e BaBar

- Un po' di Storia
- Il Modello Standard: particelle e interazioni
- Il Large Hadron Collider del CERN e gli esperimenti
- Lo stato dell'arte e le prospettive:

Il Bosone di Higgs

La Supersimmetria

La fisica del quark b

Il Quark/Gluon Plasma



Un po' di Storia

Introduzione

La Fisica di base fa sue alcune delle domande fondamentali del Pensiero dall'antichità ad oggi:

- Da cosa è costituito l'Universo?
- Quali sono le leggi che lo governano?
- In che "direzione" evolve?
- Quali sono i componenti ultimi della materia?
- Come interagiscono tra di loro?



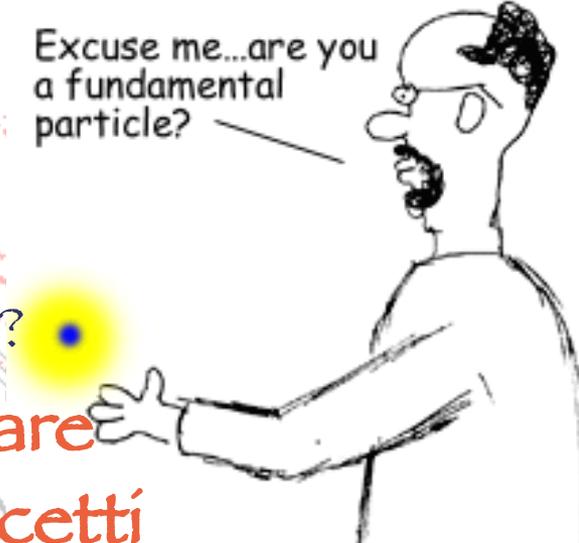
*Si studia l'elementare per capire il macroscopico
... sperando di fare un po' di ordine!* 😊

Di cosa è fatto il mondo?

- La materia è un agglomerato di pochi elementi “fondamentali” e “elementari”, che costituiscono tutto l'Universo.
- La parola “elementare” è una parola chiave:
 - Oggetto privo di struttura interna (non composto)

• Domande:

- Esistono mattoni elementari?
(Democrito, 460 A.C.)
- Quali sono?
- Come determinano le proprietà dell'Universo?

Un'altra cosa “fondamentale” è utilizzare il Metodo Scientifico = limitare i preconcetti (da Galileo alle “blind analyses”)!


Un po' di ordine...

Alchimia → Chimica (1700-1800)

- Classificazione degli atomi in base alle proprietà chimiche
- Evidenza di una "periodicità" (Mendeleev)
- **Indicazioni di una struttura comune degli elementi (atomo: nucleoni, orbitali elettronici)**

ELEMENTS

Hydrogen	1	Strontian	46
Azote	5	Barytes	68
Carbon	5	Iron	50
Oxygen	7	Zinc	56
Phosphorus	9	Copper	56
Sulphur	13	Lead	90
Magnesia	20	Silver	190
Lime	24	Gold	190
Soda	28	Platina	190
Potash	42	Mercury	167

Periodic Table of the Elements

1	2											3	4	5	6	7	8	9	10		
H	He											B	C	N	O	F	Ne				
Li	Be											Al	Si	P	S	Cl	Ar				
Na	Mg	III B	IV B	V B	VI B	VII B	VII		IB	IIB	Ga	Ge	As	Se	Br	Kr					
K	Ca	Sc	Ti	V	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	In	Sn	Sb	Te	I	Xe				
Rb	Sr	Y	Zr	Nb	Mo	Tc	Ru	Rh	Pd	Ag	Cd	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn			
Cs	Ba	*La	Hf	Ta	W	Re	Os	Ir	Pt	Au	Hg	Tl	Pb	Bi	Po	At	Rn				
Fr	Ra	+Ac	Rf	Ha	Sg	Ns	Hs	Mt	110	111	112	113									

* Lanthanide Series

58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71
Ce	Pr	Nd	Pm	Sm	Eu	Gd	Tb	Dy	Ho	Er	Tm	Yb	Lu

+ Actinide Series

90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103
Th	Pa	U	Np	Pu	Am	Cm	Bk	Cf	Es	Fm	Md	No	Lr

... ma l'atomo è "elementare"? NO!

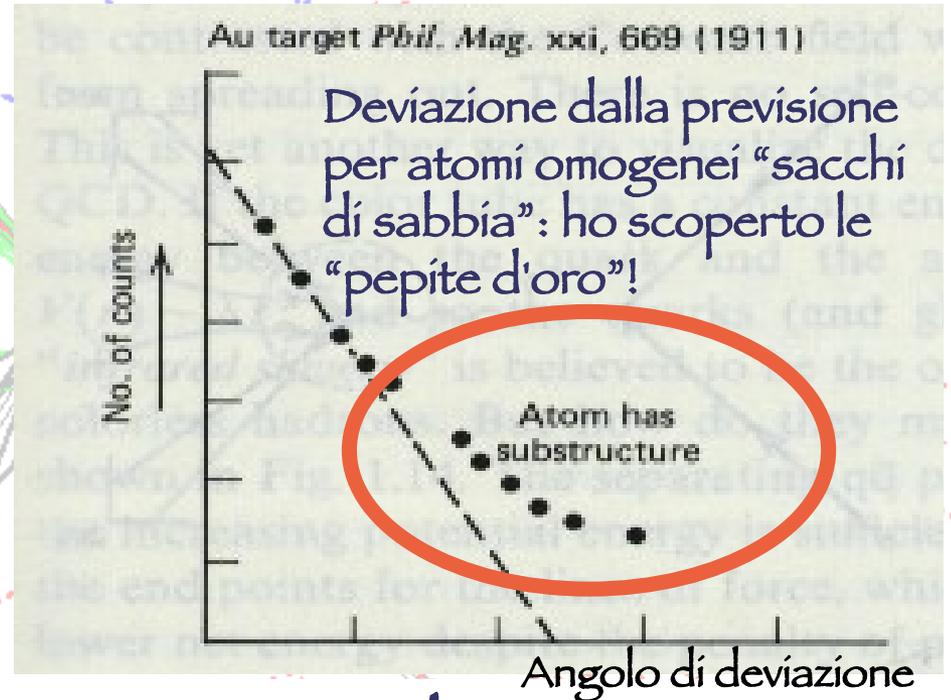
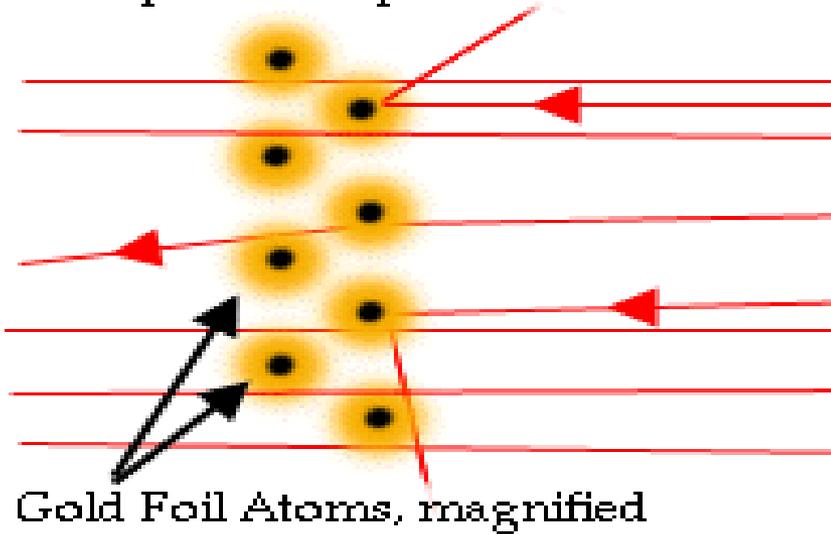
Il Metodo "Tex Willer"



- Un sacco contiene sabbia, l'altro pepite d'oro: come faccio a scegliere senza toccarli? **Osservo la deviazione dei proiettili!**
- Analogamente, "sparo" all'atomo, usando particelle α come proiettili e osservo la loro deviazione.
- Particelle α : nuclei di Elio da decadimenti di nuclei pesanti

Il Modello di Rutherford

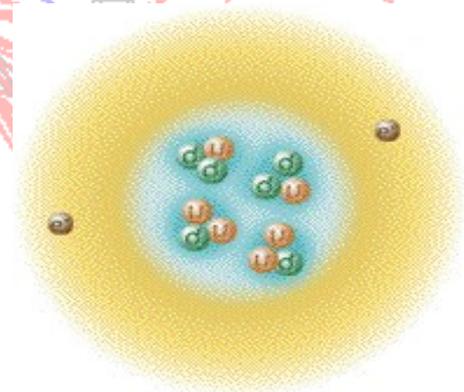
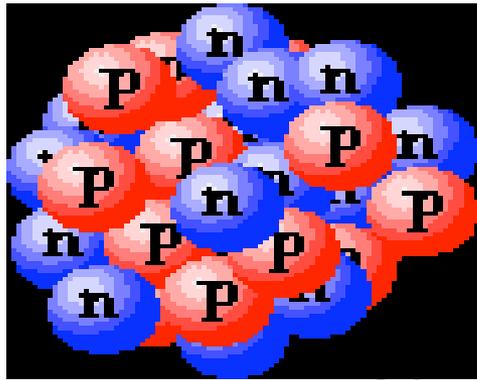
The Positive Nucleus Theory
Explains Alpha Deflection



Risultato: L'atomo contiene un nucleo con carica positiva di raggio $< 10 \text{ fm}$ [$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$]

...ma il nucleo e' "elementare"? NO!

- Il **nucleo** e' composto da protoni (carica elettrica positiva) e neutroni (privi di carica elettrica, ipotizzati da Rutherford)
- Anche i **protoni** e i **neutroni** (Chadwick 1932) hanno una struttura: sono composti da particelle elementari: i **quarks**.



...Ma per capire cio' ci vollero proiettili di maggiore energia delle particelle α ... raggi cosmici e acceleratori...

Per vedere di cosa è fatta la materia...

- Bisogna guardare con lo strumento giusto!
- La lunghezza d'onda della sonda deve essere più piccola dell'oggetto da studiare
- $\lambda \sim 1/E$:
 - Cellula ($d \sim 10^{-5} \text{ m}$): luce visibile $E \sim \text{eV}$
 - Virus ($d \sim 10^{-8} \text{ m}$): microscopio elettronico $E \sim \text{keV}$
 - Protone ($d \sim 10^{-15} \text{ m}$): acceleratore $E \sim \text{GeV}$
 - Quark ($d < 10^{-18} \text{ m}$): LHC $E \sim 10 \text{ TeV}$

Gli Acceleratori

Le particelle cariche vengono accelerate da campi elettromagnetici variabili all'interno di cavità risonanti.

Energia elevata:

- Per entrare nei dettagli del bersaglio il proiettile deve avere “lunghezza d'onda” corta, ossia energia elevata $\lambda \sim 1/E$
- Per produrre altre particelle dagli urti sfruttando l'equivalenza di massa e energia ($E=mc^2$)

Luminosità elevata:

- Il numero di urti al secondo con produzione di particelle (“eventi”) è pari al prodotto della “Sezione d'urto” (probabilità che il fenomeno si manifesti) per la “Luminosità” L dell'acceleratore (numero di particelle che si “incontrano” per unità di tempo e di superficie):

$$\frac{dN}{dt} = \sigma * L$$

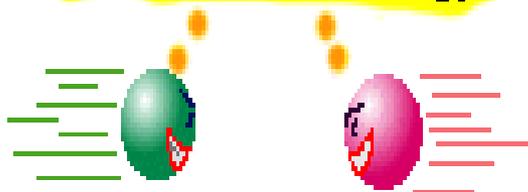
Energie sempre maggiori

Facendo urtare una particella accelerata contro una ferma, una parte dell'energia disponibile viene sprecata perche' la seconda particella viene "trascinata via".

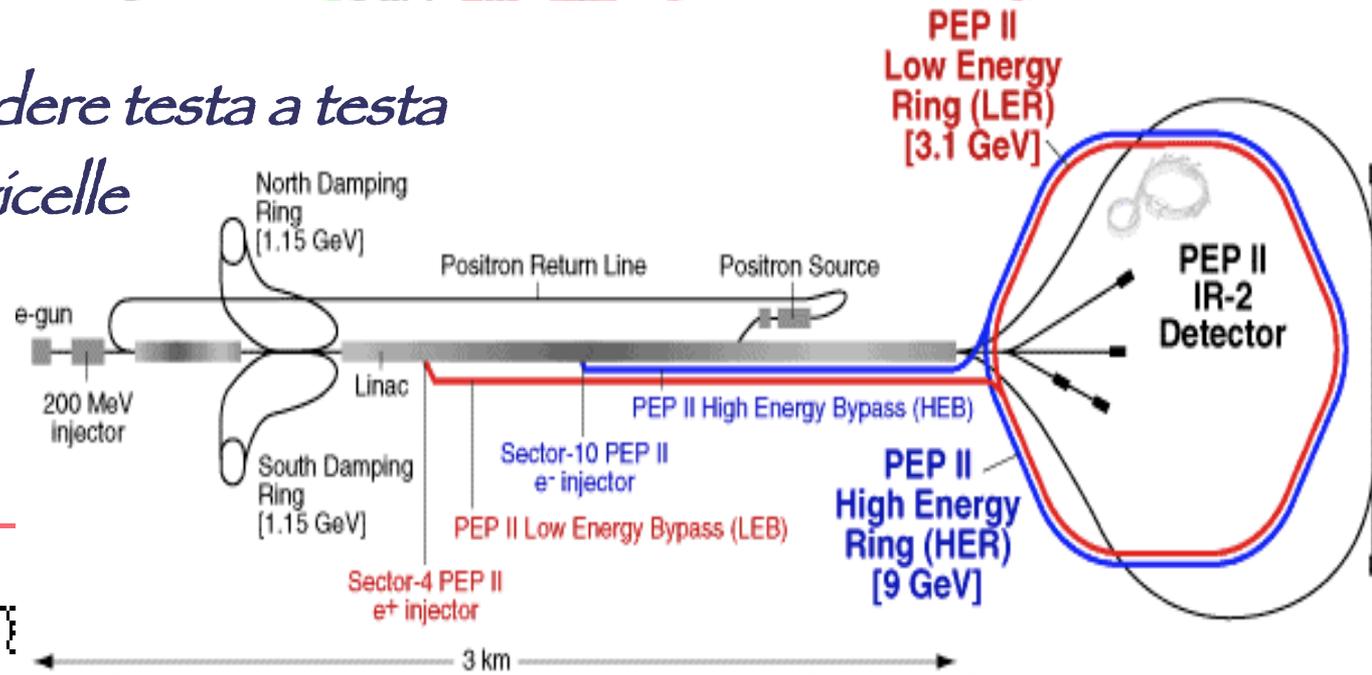


IDEA!: fare collidere testa a testa due fasci di particelle

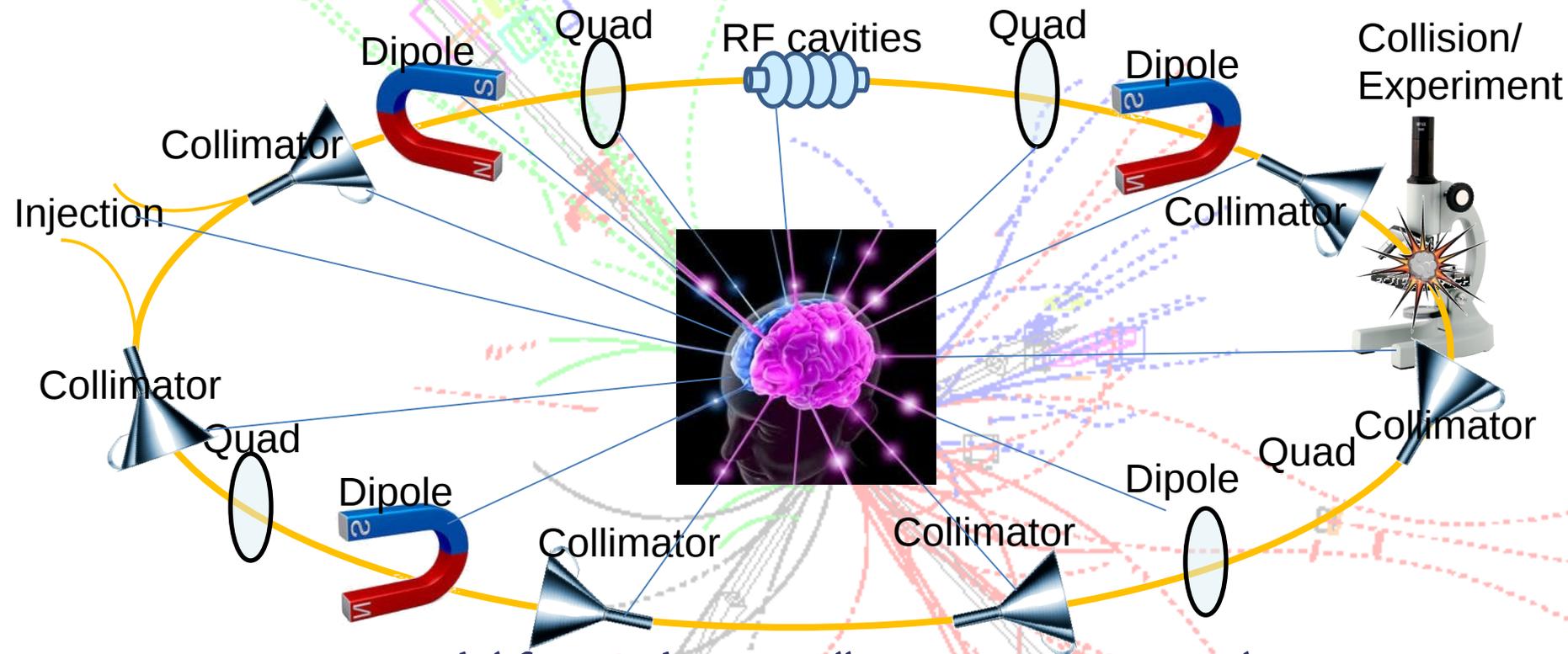
Heh-heh. I have a lot of kinetic energy!



energy + energy = lots of energy



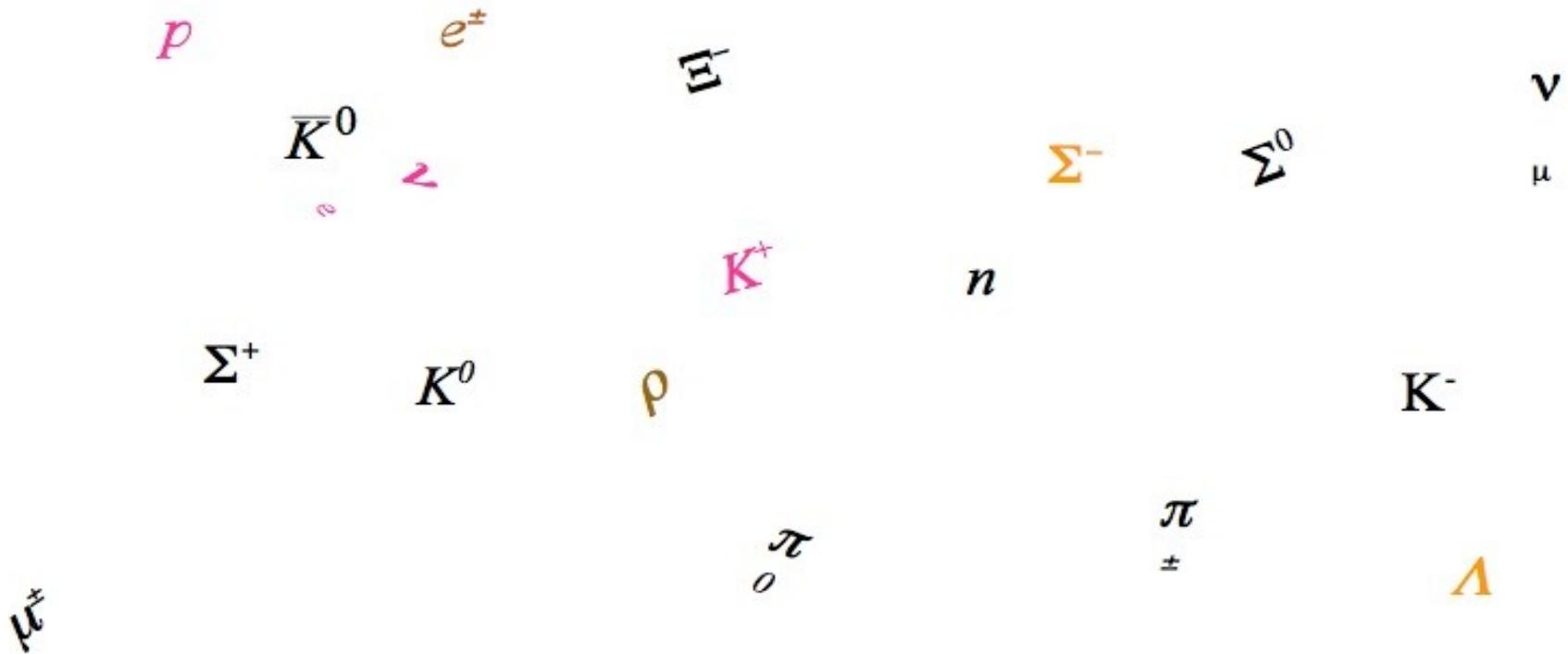
Lo schema di un collisore



- Sistema iniezione del fascio di particelle (tipicamente acceleratori più piccoli)
- Cavità a radio frequenza per accelerare
- Magneti dipoli (più altri correttori) per mantenere il fascio in traiettoria circolare
- Esperimenti (detectors) nei punti di collisione

Dov'è l'ordine?

Con i nuovi acceleratori di particelle e nuovi rivelatori (camera a bolle) a disposizione i fisici delle particelle negli anni 50 si divertirono un mondo...



Ordine e

Costituenti "elementari" (?)

Gell-Mann e Zweig proposero che gran parte delle particelle prodotte con gli acceleratori (gli "adroni") fossero costituite da tre oggetti che vennero chiamati "quarks"

UP

DOWN

Strange

I quark hanno cariche elettriche pari a $2/3$ (u), $-1/3$ (d), $-1/3$ (s) della carica del protone

p	uud	Δ^{++}	uuu	K^+	$u\bar{s}$
n	udd	Δ^+	uud	K^0	$d\bar{s}$
π^+	$u\bar{d}$	Δ^0	udd	K^-	$s\bar{u}$
π^0	$u\bar{u}$	Δ^-	ddd	K^0	$s\bar{d}$
π^-	$d\bar{u}$	Ω	sss		

Dove sono i quarks?

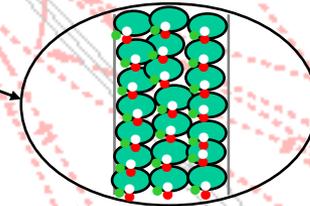
Questa descrizione e' molto interessante, ma i quark erano ancora entita' matematiche...

- Fino a che l'esperimento confermo' la loro esistenza!

Ripetiamo l'esperimento di Rutherford ad energie MOLTO piu' alte...

elettrone

Protone



Sempre con il metodo di Tex Willer si verifico' che il protone e' costituito da altri oggetti "piu' elementari"!

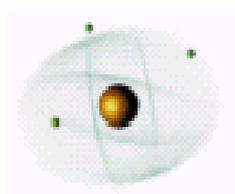
...Ma i quarks "liberi" non esistono!

Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

La storia della Fisica delle Particelle

Modello Standard

Oggi



$$\lambda = h/p$$

10^{-10} m

≤ 10 eV

$$T \approx t^{-10^2}$$

> 300000 Y

1900....

Quantum Mechanics
Atomic Physics



1940-50

Quantum Electro Dynamics



10^{-15} m

MeV - GeV

≈ 3 min

1950-65

Nuclei, Hadrons
Symmetries
Field theories



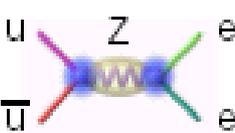
10^{-16} m

\gg GeV

$\approx 10^{-20}$ sec

1965-75

Quarks
Gauge theories



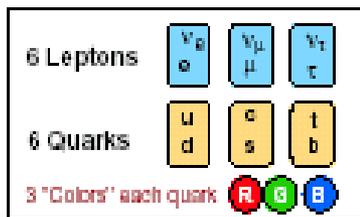
10^{-18} m

≈ 100 GeV

$\approx 10^{-10}$ sec

SPS, $p\bar{p}$ 1970-83

ElectroWeak Unification,
QCD



LEP 1990

3 families

Tevatron 1994

Top quark

Origin of masses
The next step...

10^{-19} m

$\approx 10^3$ GeV

$\approx 10^{-12}$ sec

LHC

Higgs/supersimmetria

Proton Decay ?

10^{-32} m

$\approx 10^{16}$ GeV

$\approx 10^{-32}$ sec

Underground Labs

GRAND Unified
Theories ?

The Origin of the
Universe

10^{-26} m

$\approx 10^{19}$ GeV
(Planck scale)

$\approx 10^{-43}$ sec

??
Quantum Gravity?
Superstrings ?

The background of the slide is a complex network of colorful lines and shapes. It features several tracks of particles, some solid and some dashed, in various colors including green, blue, red, and grey. These tracks radiate from a central point and branch out towards the corners of the slide. Interspersed among the tracks are various geometric shapes, such as rectangles and squares, some of which are outlined in different colors. The overall appearance is that of a particle detector or a complex network diagram.

Il Modello Standard delle Particelle e Interazioni

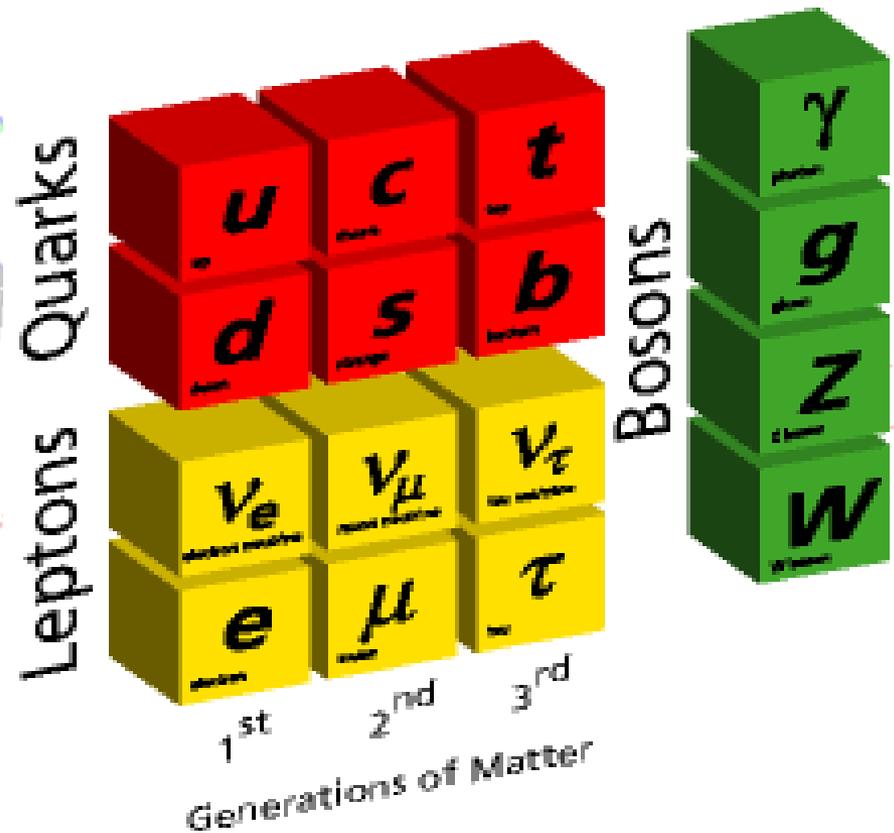
Il Modello Standard

- È la teoria che descrive le particelle elementari e le loro interazioni. Prevede due generi di particelle:
 - Particelle materiali: la maggior parte delle particelle materiali, gli **adroni**, è composta di particelle “più elementari” (quarks). Un'altra classe di particelle materiali elementari, i **leptoni** (un esempio è l'elettrone), non forma altre particelle.
 - Particelle mediatrici di forza: Ogni tipo di interazione agisce mediante una o più particelle **mediatrici di forza** (un esempio è il fotone).

Il Modello Standard

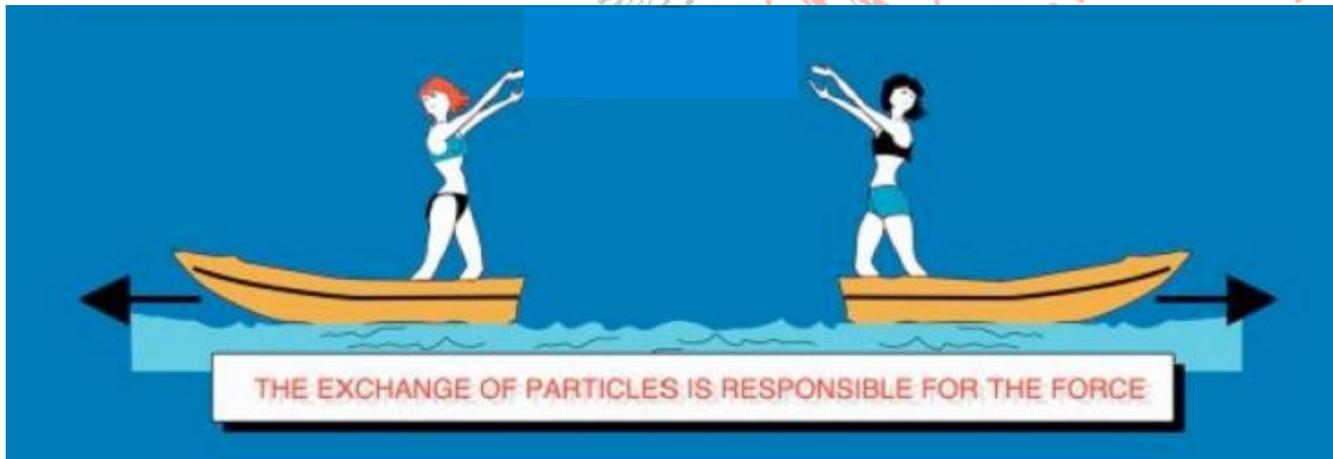
- Il Modello Standard descrive:
 - tutta la materia
 - tutte le forze dell'universo (escludendo per ora la gravità)
- Eleganza: centinaia di particelle e interazioni complesse descritte per mezzo di “poche” particelle elementari raggruppate in tre “generazioni” e quattro interazioni fondamentali

Elementary Particles



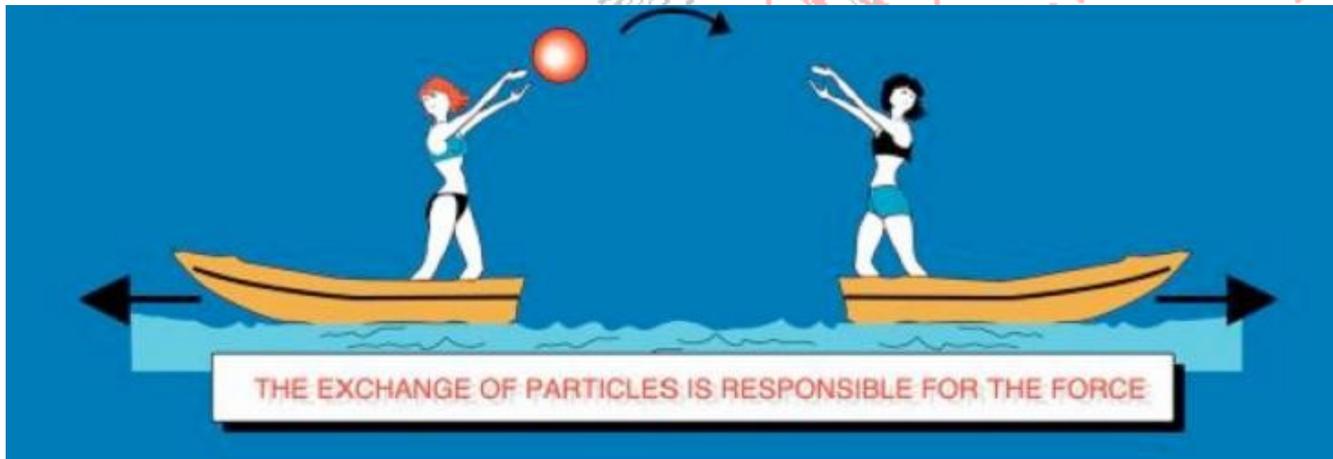
Effetti non visibili

- Tutte le interazioni che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di "mediatori".
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli effetti dei mediatori sulle particelle materiali.
- Esistono quattro interazioni tra le particelle: **Gravitazionale**, **Elettromagnetica**, **Nucleare debole** e **Nucleare Forte**



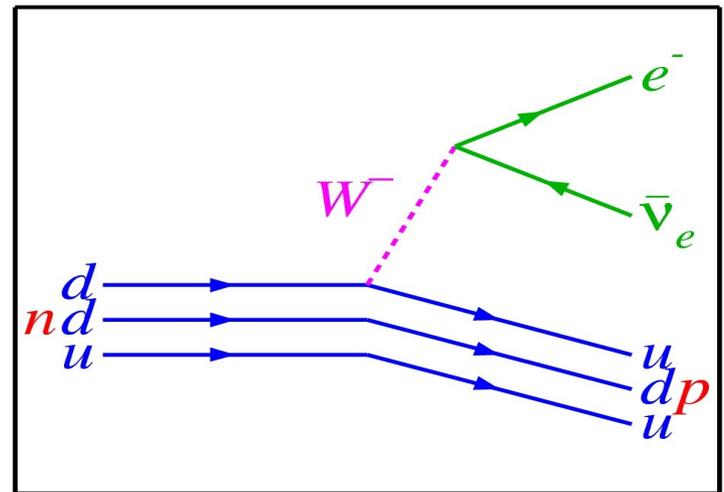
Effetti non visibili

- Tutte le interazioni che riguardano le particelle materiali sono dovute ad uno scambio di "mediatori".
- Quelle che noi chiamiamo comunemente "forze" sono gli effetti dei mediatori sulle particelle materiali.
- Esistono quattro interazioni tra le particelle: **Gravitazionale**, **Elettromagnetica**, **Nucleare debole** e **Nucleare Forte**



Esempio: le Interazioni Deboli

- Questa classe di interazioni viene introdotta per spiegare la radioattività naturale
- Il decadimento del neutrone $n \rightarrow p e^- \bar{\nu}_e$ è indotto dalla produzione intermedia di un mediatore, la W^- (pesante come 80 protoni!) che interviene “virtualmente” nel processo
- La probabilità e le modalità di un processo dipendono dalle caratteristiche delle particelle virtuali scambiate.



Caratteristiche delle interazioni

Le interazioni si differenziano per: particella che funge da mediatore, intensità, sorgente, raggio d'azione e tipo di particelle interessate:

Interazione	Sorgente	Mediatore	Intensità relativa	Raggio
Gravitazionale	m	Gravitone	10^{-38}	∞
Nucleare Debole	q debole	W, Z^0	10^{-5}	$10^{-18}m$
Elettromagnetica	q elettrica	Fotone	10^{-2}	∞
Nucleare Forte	"colore"	Gluone	1	$10^{-15}m$

- W e Z sono state scoperte da Carlo Rubbia et al. al CERN nel 1980.
- Il Gravitone non è ancora stato scoperto!

Il Problema dell'origine della massa e il meccanismo di Higgs

- Fino a questo punto il Modello Standard presenta un problema fondamentale: non esiste un meccanismo per generare la massa delle particelle
- Qual e' l'origine della massa?
- Entriamo un po' nel dettaglio del formalismo delle interazioni...

Interazione elettromagnetica

$$\mathcal{L} = A_\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) A^\mu$$

Questa è l'equazione che descrive la propagazione del fotone nel vuoto, alla velocità della luce $c = 2.997 \cdot 10^8 \text{ m/s}$.

Il fotone ha massa nulla ed è la particella più veloce

- Interazione tra due elettroni:

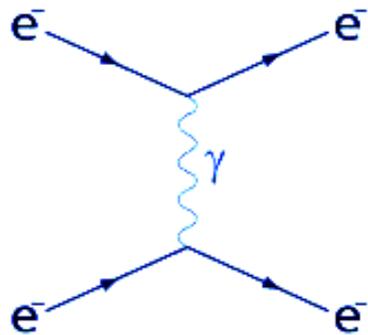


Grafico di Feynman della diffusione Moeller $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ mediata da scambio di fotone (γ)

Interazione Debole

- Possiamo usare lo stesso formalismo per descrivere l'interazione debole?
- Esempio: Interazione tra un elettrone e un neutrino:

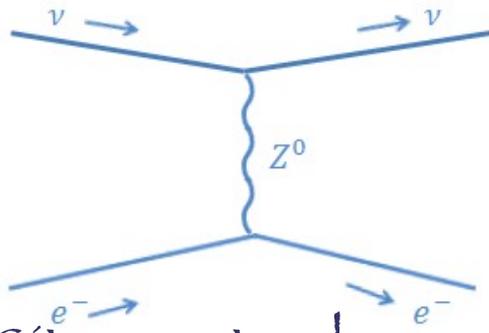
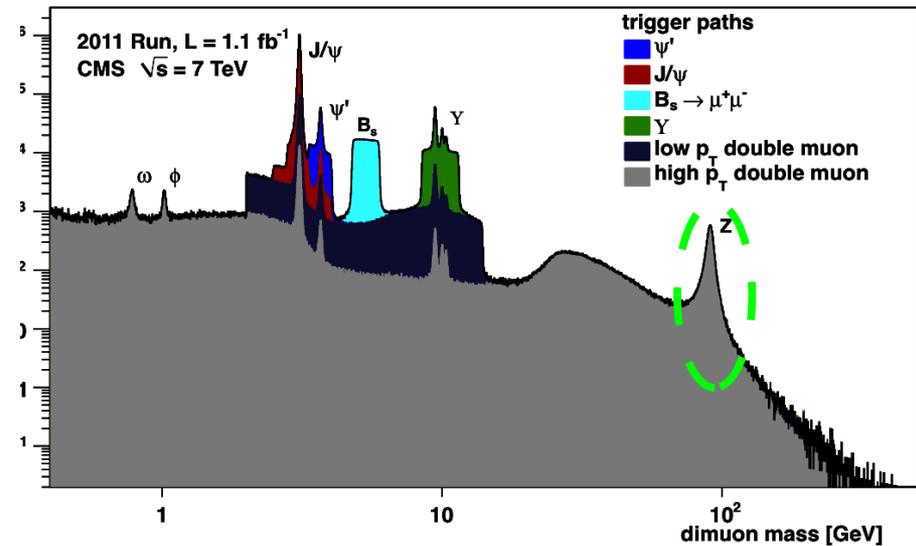
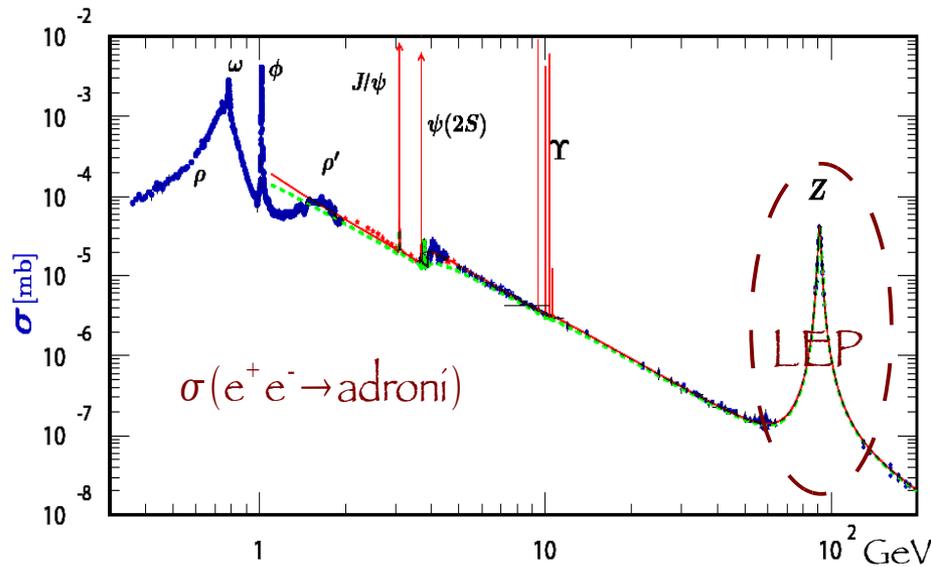


Grafico di Feynman della diffusione $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$ mediata da scambio del vettore neutro (Z^0)

- Sì, però solo scoprendo i mediatori dell'interazione debole e modificando l'equazione di propagazione del fotone.
- Queste interazioni sono deboli perché W e Z sono molto pesanti, decadono in 10^{-25} s e si propagano per distanze brevissime.

Primo: scoprire i mediatori!

- W, Z osservate nel 1980 al CERN (UA1, C. Rubbia)
- prodotte a iosa in collisioni e^+e^- (LEP)
- ... e pp (LHC)



Secondo: Modificare le equazioni!

- A differenza del fotone, W e Z hanno massa... e non piccola: pesano come 80 e 90 protoni
- Prendo l'equazione per il fotone e vi inserisco forzatamente la massa del W (analogamente per Z):

$$L = W_{\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^{\mu} + M^2 W^2$$

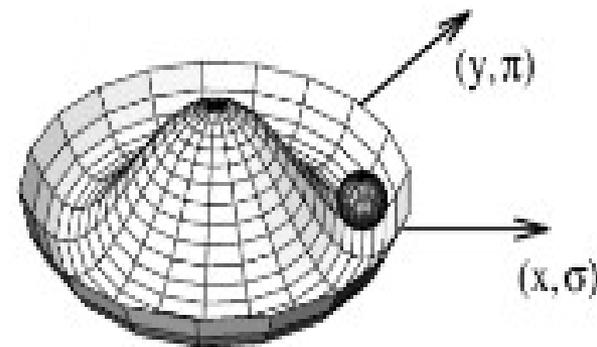
- Così ottengo un modello che non funziona perché molti calcoli di sezioni d'urto divergono (ottengo ∞) ☹️
- Devo cambiare strada: cosa dà la massa a W e Z?
 - Sfrutto il meccanismo di Higgs...

Meccanismo di Higgs

- Introduco un nuovo campo Φ (=particella) che è una eccitazione del vuoto (stato a energia minima), permea tutto lo spazio e interagisce con i mediatori W e Z:

$$\mathcal{L} = W_{\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^{\mu} + g^2 \phi W^2$$

- L'interazione delle varie particelle con questo campo le frena e genera la loro massa.
 - In questo modo non ho più calcoli che danno ∞ !
 - Tra le infinite possibilità per la scelta del vuoto, la Natura ne sceglie una (simmetria spontaneamente rotta)
- Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013



Ma anche così il Modello Standard è incompleto...

● Problema della gerarchia

- Il Modello Standard prevede alcune interazioni non osservate alle energie sondate dagli esperimenti: devono essere sopresse con termini $(E/\Lambda)^n$, $\Lambda \gg \text{TeV}$
- La massa del Bosone di Higgs è prevista $M_H \sim \Lambda$
- Le misure sperimentali indicano invece $M_H \sim 125 \text{ GeV}$

● Due possibili soluzioni tra le tante:

- “**Fine Tuning**”: Cancellazioni tra parametri della teoria portano M_H ai valori osservati. Innaturale!
- **Supersimmetria**: simmetria tra bosoni e fermioni, al prezzo di molte particelle nuove e parametri non calcolabili

Ma non è tutto:

- Velocità di rivoluzione delle stelle nelle galassie: Materia Oscura
- Espansione accelerata dell'Universo: Energia Oscura (?)

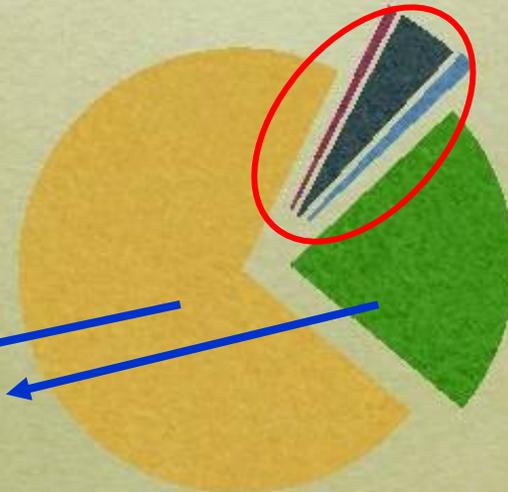
- Stars and galaxies are only ~0.5%
- Neutrinos are ~0.1–1.5%
- Rest of ordinary matter
(electrons, protons & neutrons) are 4.4%

- stars
- baryon
- neutrinos
- dark matter
- dark energy

- Dark Matter 23%
- Dark Energy 73%
- Anti-Matter 0%

Questo è ciò che
NON conosciamo

Questo è
ciò che
al momento
conosciamo
dell'Universo
(~5%)!

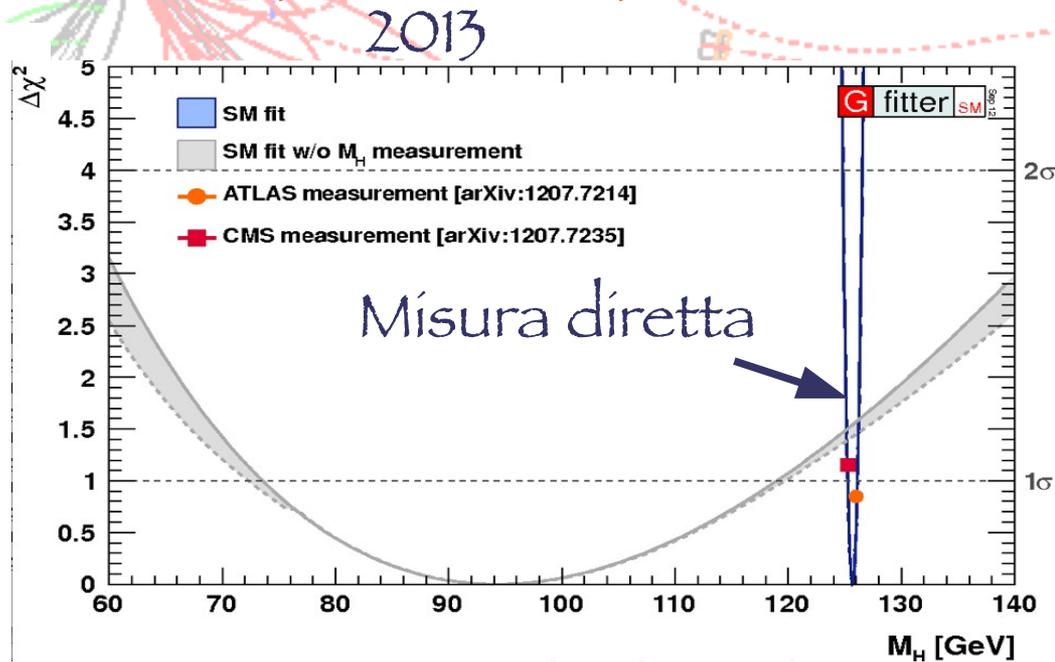
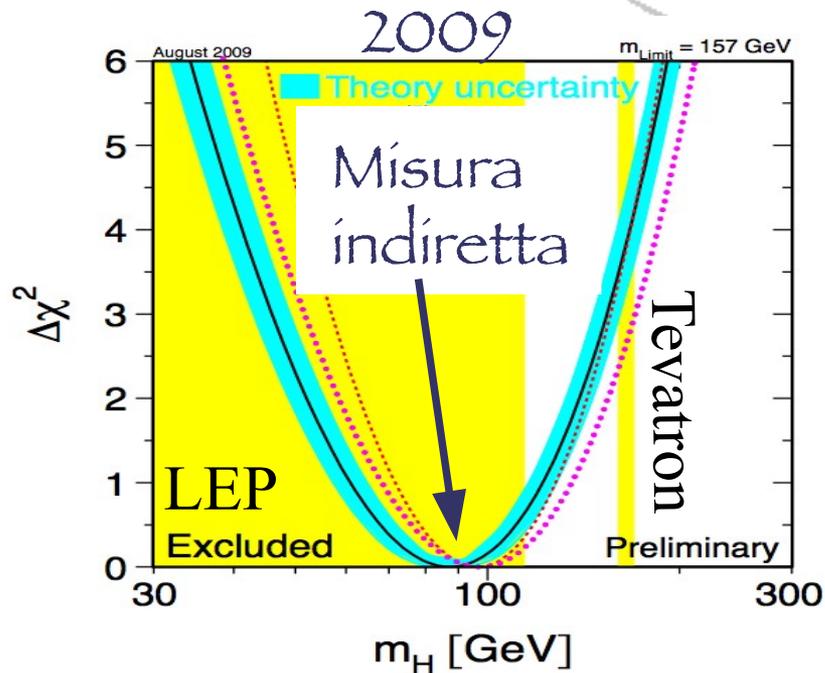


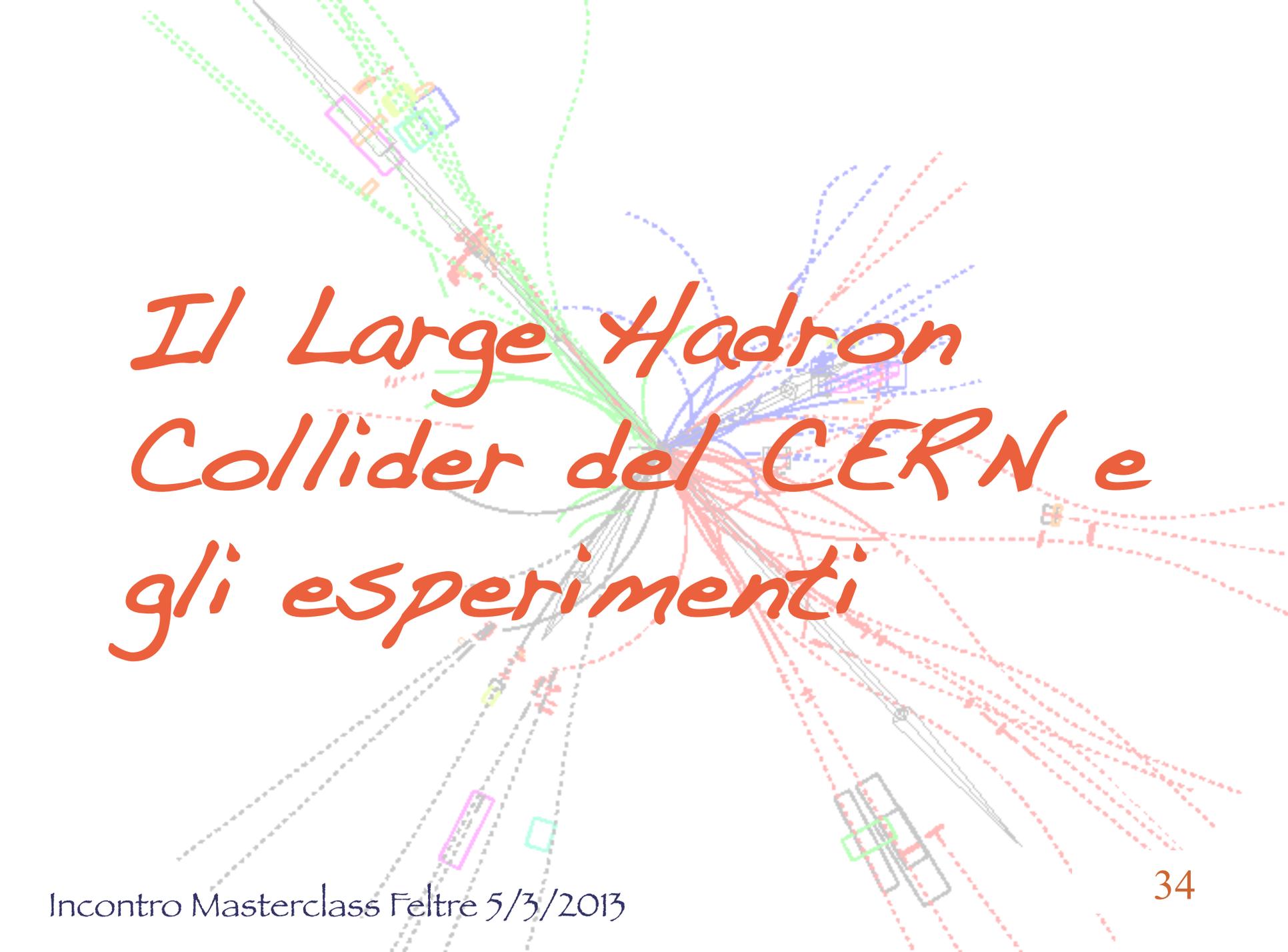
Problemi aperti

- Il Modello Standard non è conclusivo
- C'è Nuova Fisica dietro l'angolo? Di cosa è fatta la Materia oscura? (Particelle supersimmetriche?)
- Quarks e Leptoni sono davvero elementari?
- Perché le “generazioni” di particelle sono 3?
- Da cosa origina l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo?

Strategie di ricerca di Nuova Fisica

- Ricerca diretta:
 - Produzione di nuove particelle mediante urti a energie sempre maggiori
- Ricerca indiretta:
 - Misura di precisione di alcune grandezze per evidenziare l'effetto di particelle che intervengono a livello virtuale
- Complementari, spesso la seconda precede la prima:



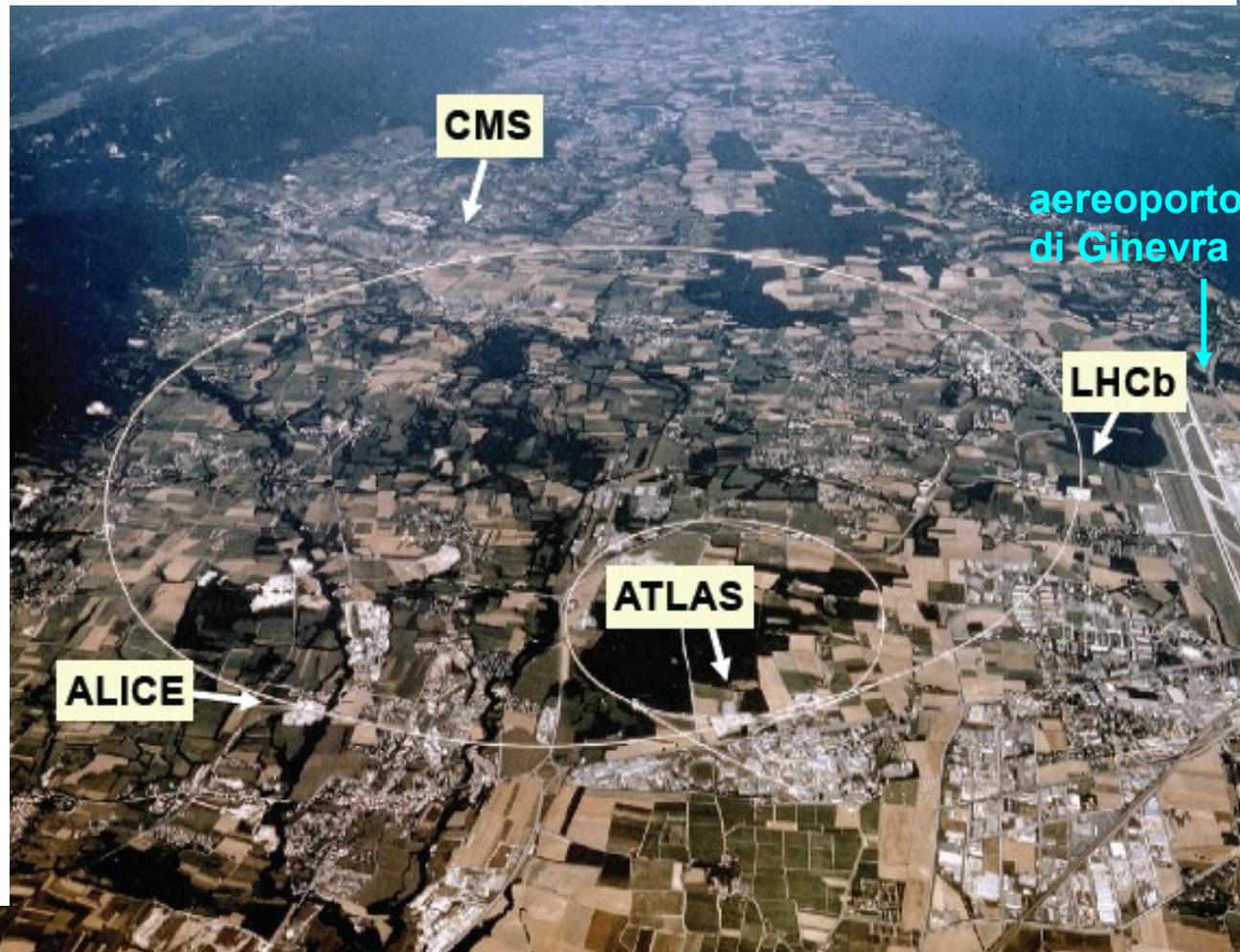
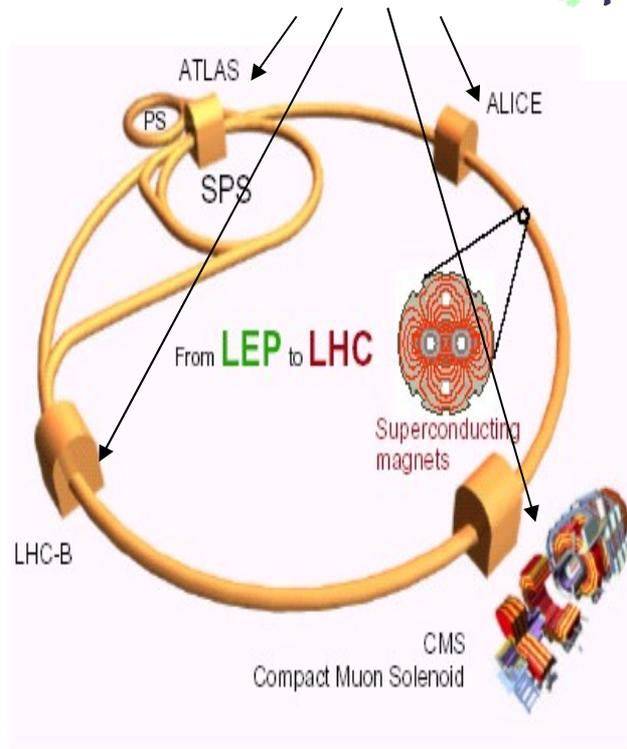


Il Large Hadron Collider del CERN e gli esperimenti

Il Large Hadron Collider

4 esperimenti
("rivelatori")

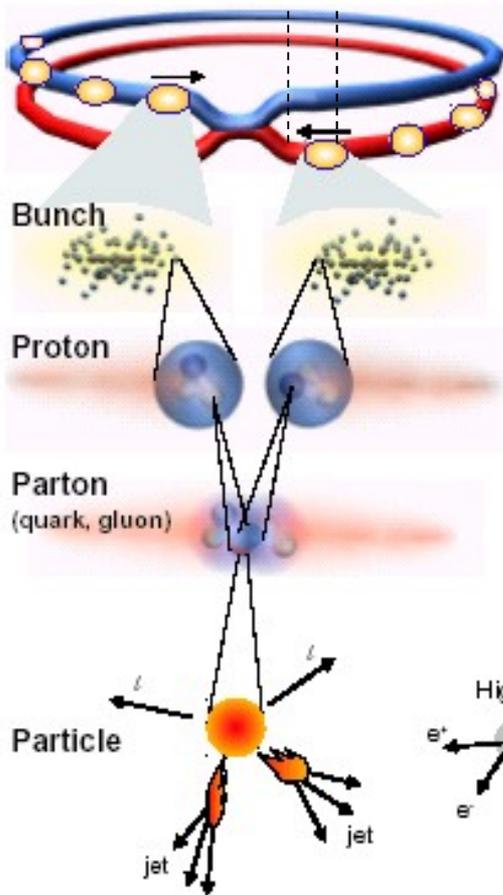
27 km di circonferenza (stesso tunnel del collisore
Precedente, il LEP, che accelerava elettroni e positroni)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e ⁺ e ⁻	200 GeV	10 ³² cm ⁻² s ⁻¹
LHC	p p	14 TeV	10 ³⁴
	Pb Pb	1312 TeV	10 ²⁷

LHC: come funziona

↔ 25 ns



Proton-Proton	(2835 x 2835 bunches)
Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	10^{34} cm ⁻² s ⁻¹
Crossing rate	40 MHz
Collisions ≈	10^7 - 10^9 Hz

~2800 "pacchetti" distanziati di 25 ns ognuno (in realta', con una struttura a 'treni')

$$T_{\text{giro}} = 2\pi R / c = 88 \mu\text{s}$$

~ 10^{11} protoni/pacchetto

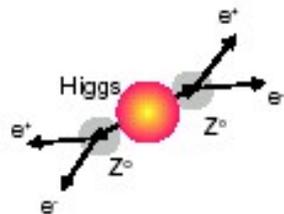
$$E_{\text{beam}} = 8 \text{ TeV} \quad (1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV})$$

$$2800 * 10^{11} * 8 * 10^{12} *$$

$$1.602 * 10^{-19} \text{ Joules} = 360 \text{ MJ per fascio}$$

[~ 1TGV (400 tons) a 150km/h...]

Higgs



SUSY.....

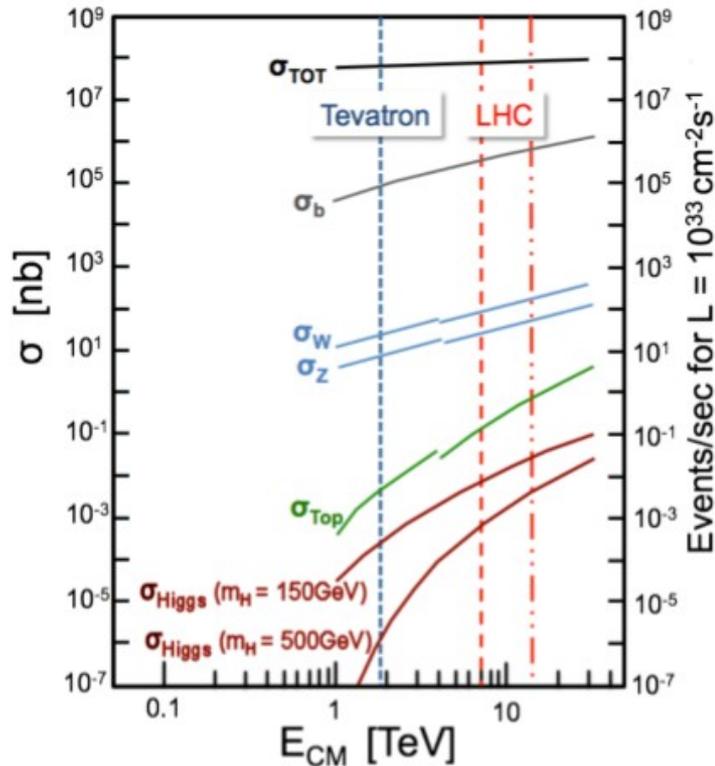
Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Il Large Hadron Collider

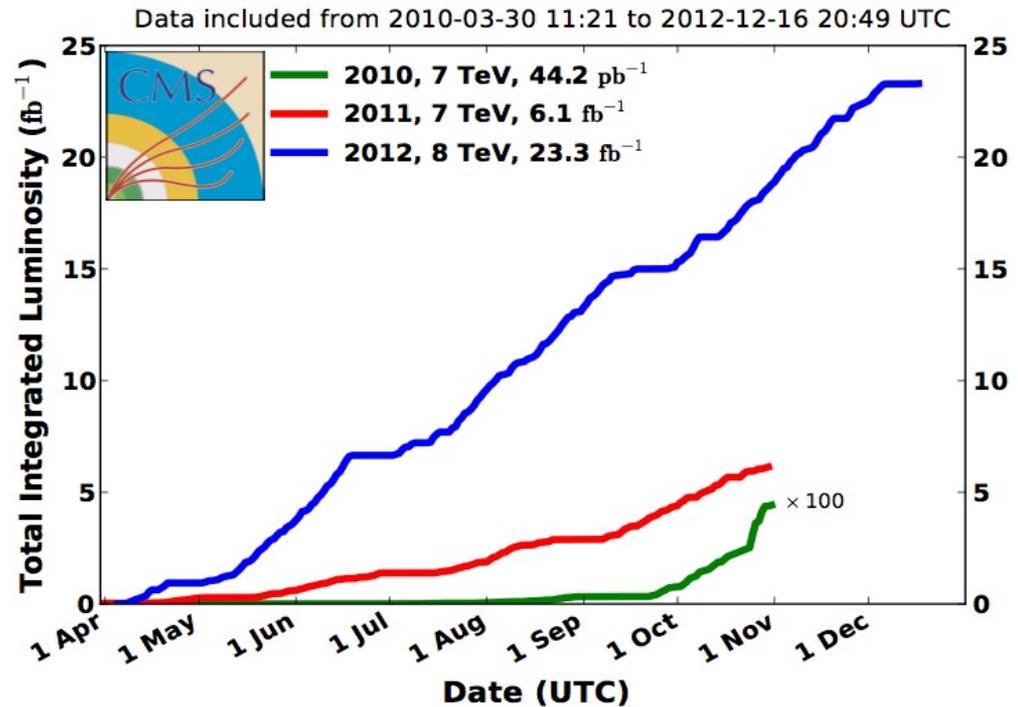
Sezione d'urto dei processi
in funzione dell'energia

Luminosità accumulata in
funzione del tempo

$$N = \sigma * L$$



CMS Integrated Luminosity, pp



● LHC è stato spento il 20/2/2013. La presa dati riprenderà nel 2015 all'energia di 13 TeV nel centro di massa

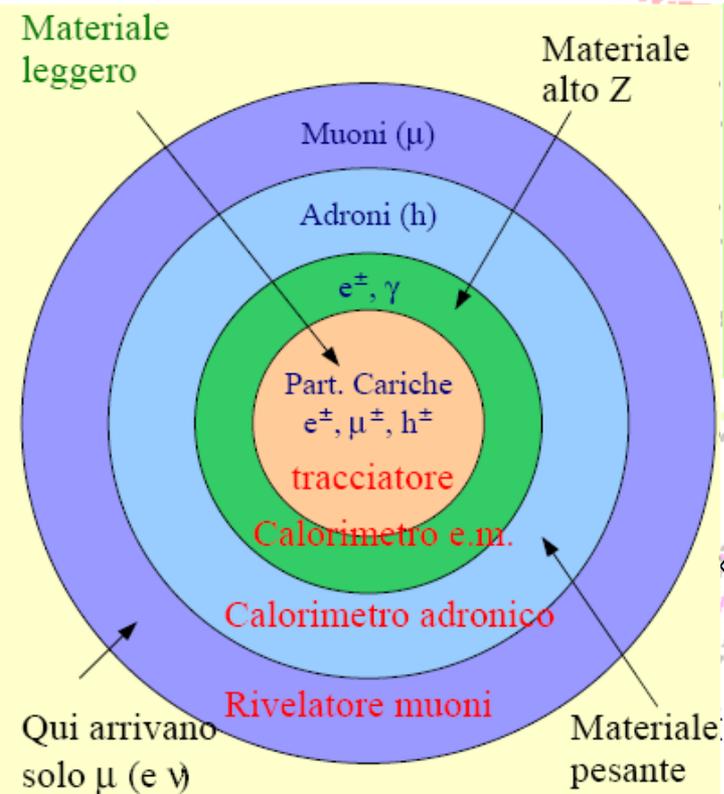
Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

I rivelatori a LHC: un difficile compito

Date le energie altissime, e l'enorme numero di particelle prodotte, servono rivelatori:

- estremamente grandi, granulari, veloci e ermetici (privi di buchi)

- specializzati per l'identificazione di particelle diverse (elettroni / fotoni / muoni / adroni)



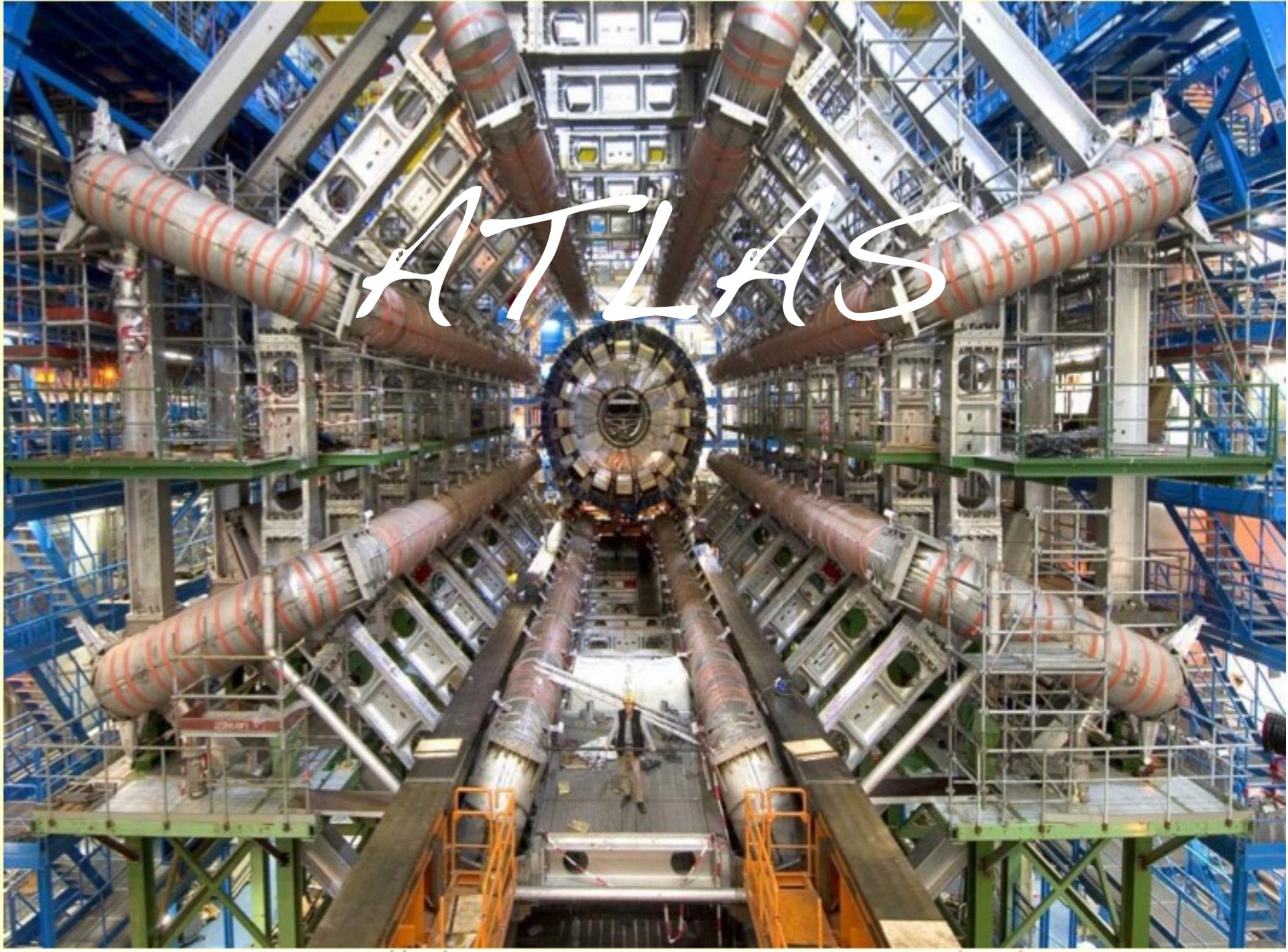
← tipica struttura “a cipolla” →

CMS



250 "camere per muoni" (progetto padovano; costruite a Pd/Legnaro):
area totale ~2500 m² (1/4 di campo da calcio)
il passaggio di una particella relativistica in qualsiasi punto
di quest' area viene rivelato con una precisione spaziale di 100 μm
ed una risoluzione temporale di 3 ns

ATLAS

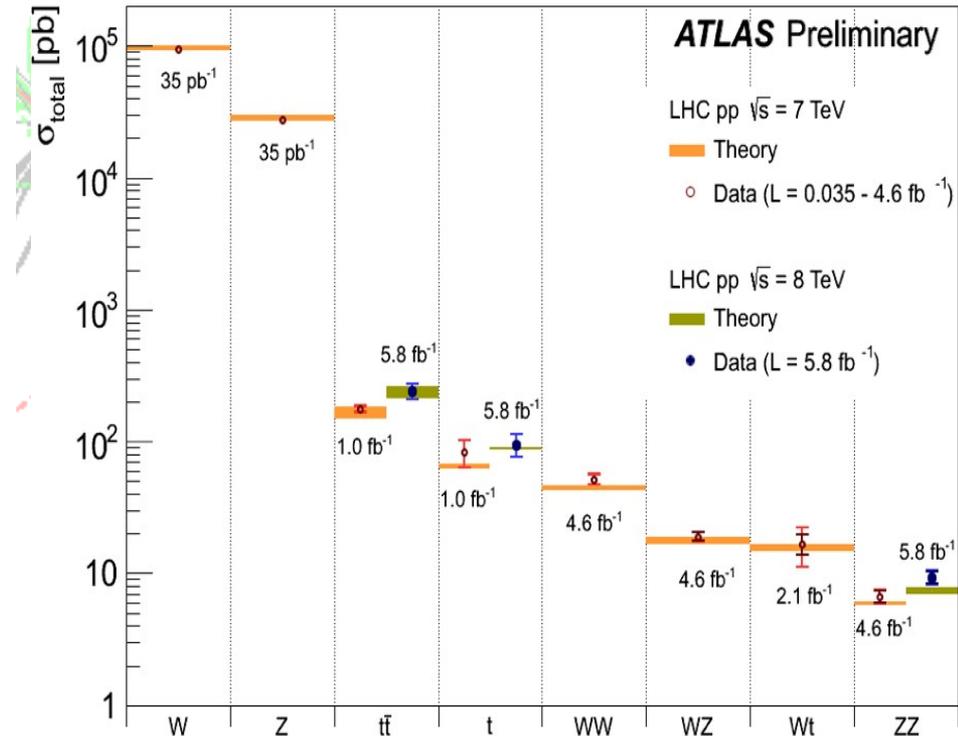
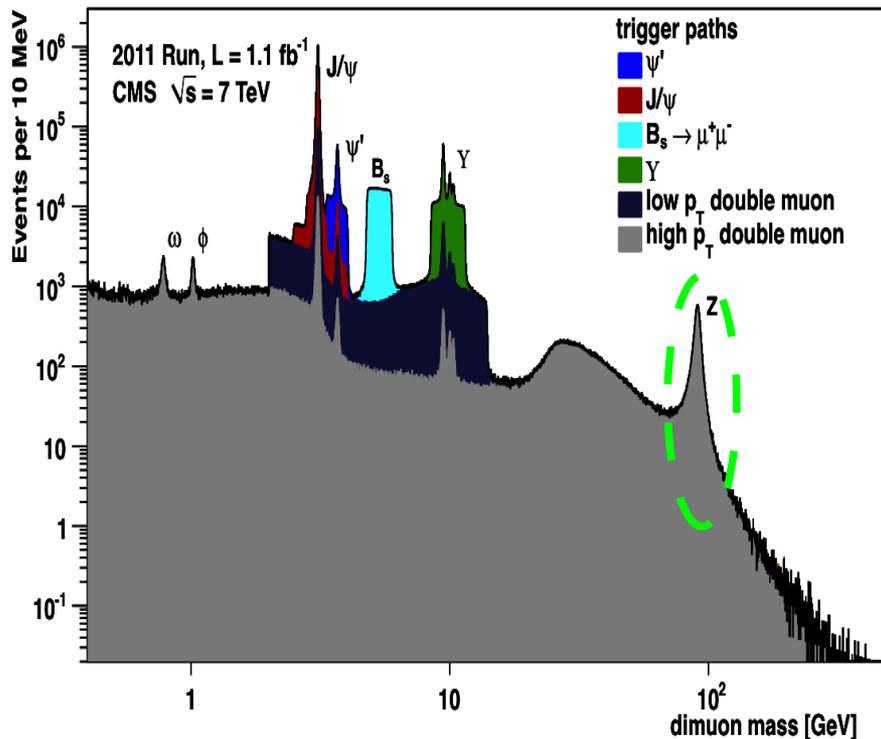




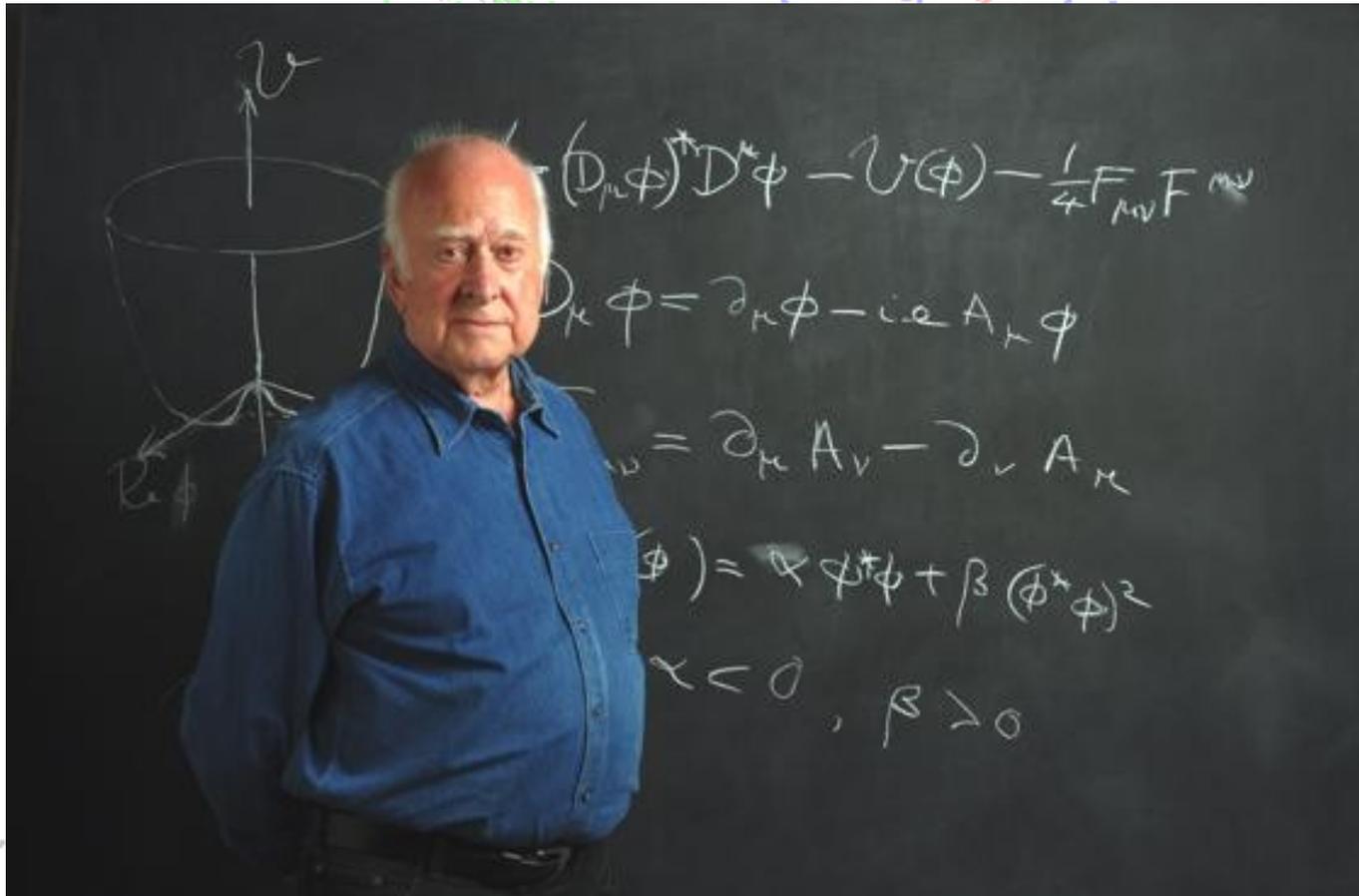
I risultati degli esperimenti a LHC

Primo passo: la riscoperta del Modello Standard

Prima di puntare verso l'ignoto, gli esperimenti a LHC hanno rimisurato i processi del Modello Standard già conosciuti



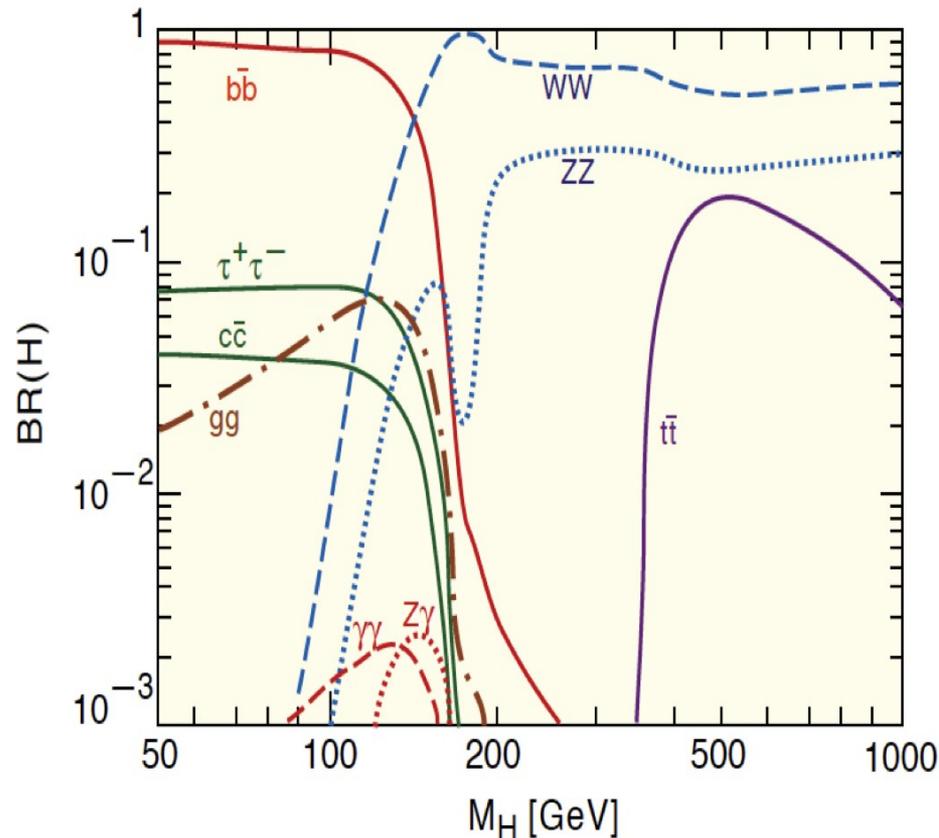
La ricerca del Bosone di Higgs a LHC



Higgs: Come lo cerco?

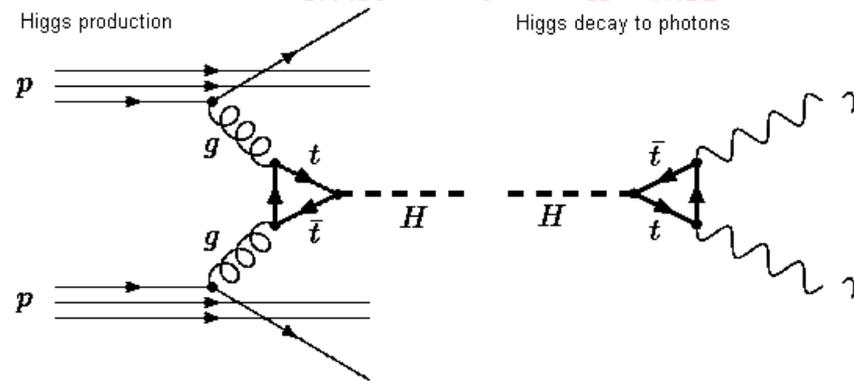
- Il Bosone di Higgs puo' essere ricercato in svariati modi legati ai diversi possibili decadimenti
 - L'efficacia della ricerca dipende:
 - dall'accoppiamento dell'Higgs con i suoi prodotti di decadimento
 - dall'entita' dei processi parassiti simili al segnale ricercato
- Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

Probabilita' di decadimento dell'Higgs nelle diverse modalita' ("canali") in funzione della sua massa:



Ricerca del Bosone di Higgs @ LHC

- Collisioni protone protone alla massima energia
- Scopo: convertire parte dell'energia cinetica dei protoni nell'energia di massa dell'Higgs ($E=Mc^2$)
- Identificare l'Higgs cercando tra le particelle effettivamente osservate



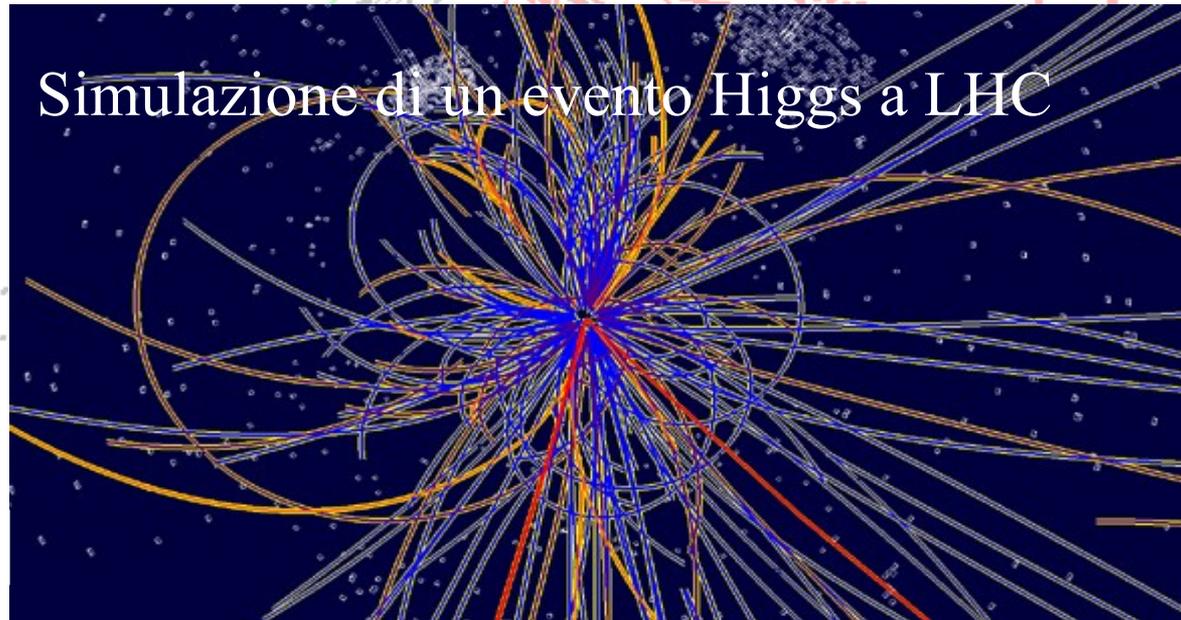
Ricerca del Bosone di Higgs @ LHC

Complicazioni

- I protoni sono particelle composite, le topologie sono assai complesse
- I processi parassiti sono molto più frequenti

$$\frac{\text{segnale}}{\text{rumore}} < 10^{-10}$$

Simulazione di un evento Higgs a LHC



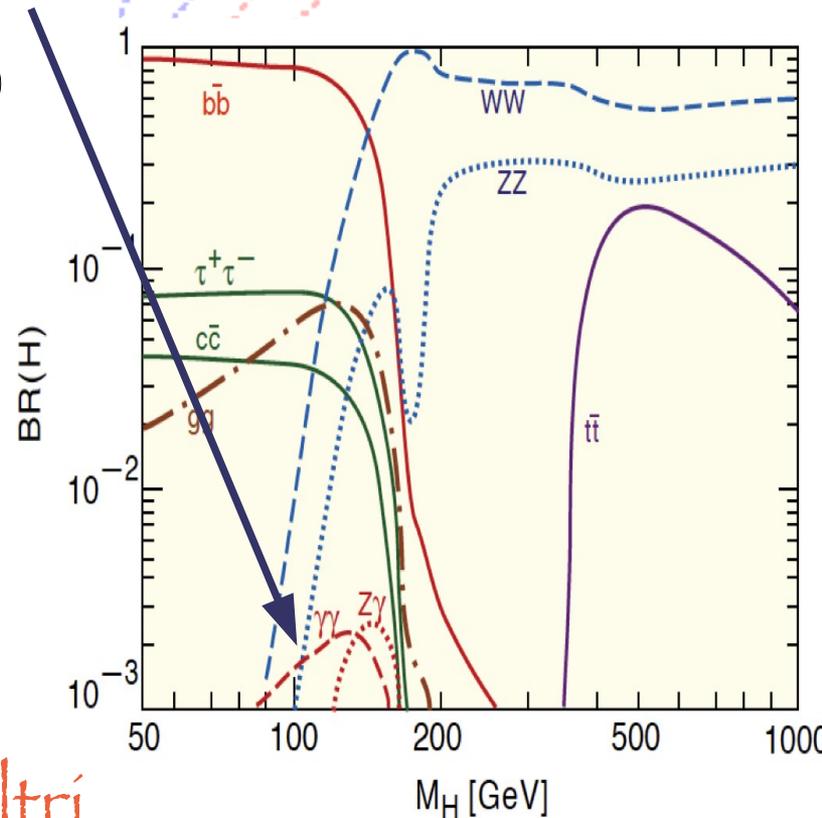
Un esempio: $H \rightarrow \gamma\gamma$

Questo “canale” copre un margine molto ristretto:

- 0.1-0.3 % se $M_H < 200$ GeV ☹️

Tuttavia:

- alta efficienza per i fotoni 😊
- misura precisa della massa 😊
- “fondi” abbastanza bassi 😊



Perche` vi mostro questo e non altri canali piu` promettenti?

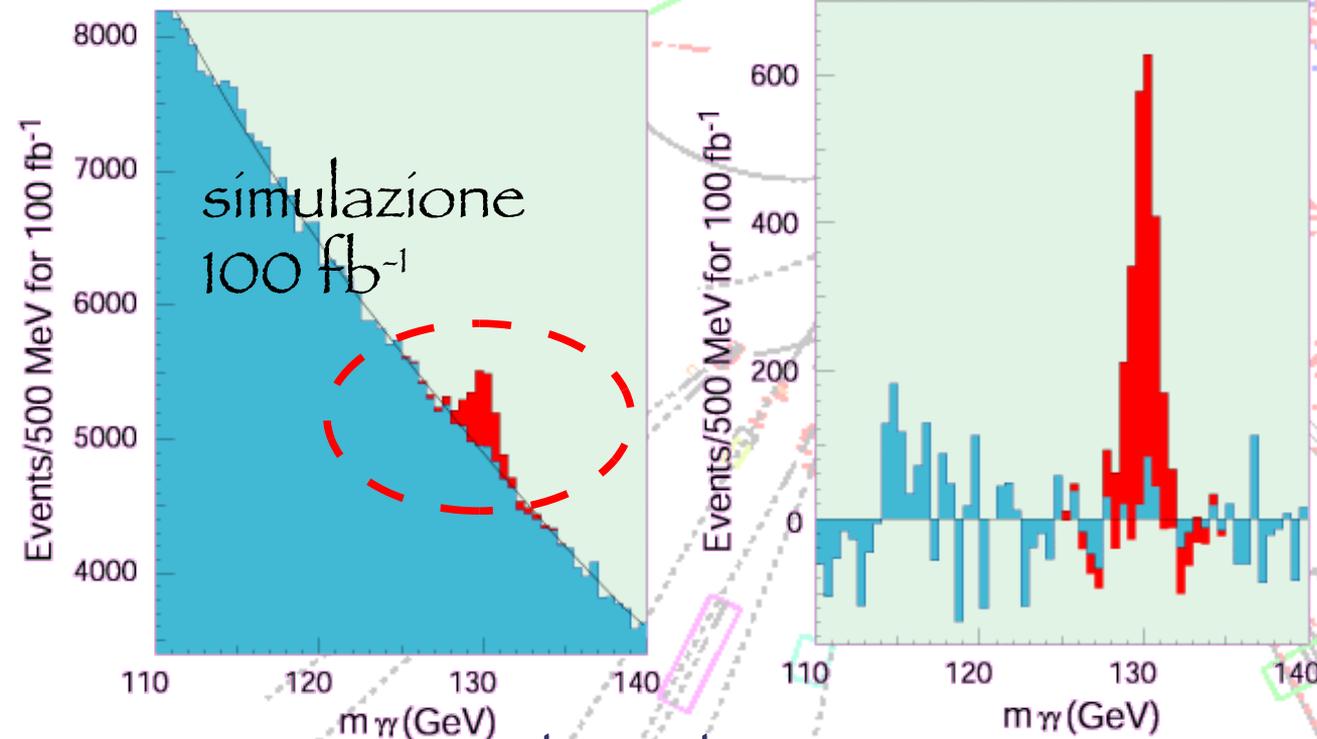
La risposta alle pagine seguenti...

Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

- misuro energia e direzione dei due fotoni
- calcolo la "massa invariante":

$$\left. \begin{aligned} E_H &= E_1 + E_2 \\ \vec{p}_H &= \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{aligned} \right\} M_H^2 = E_H^2 - \vec{p}_H \cdot \vec{p}_H$$



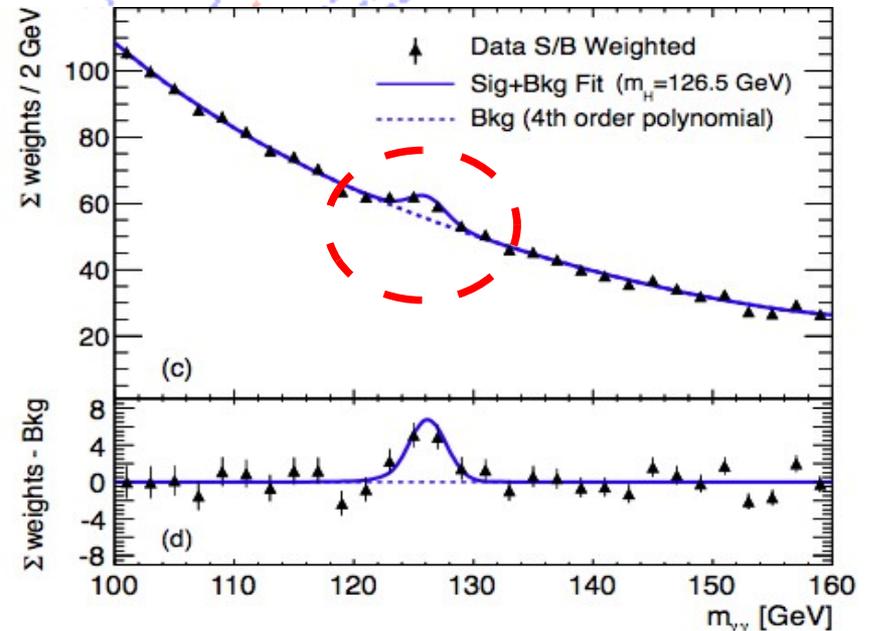
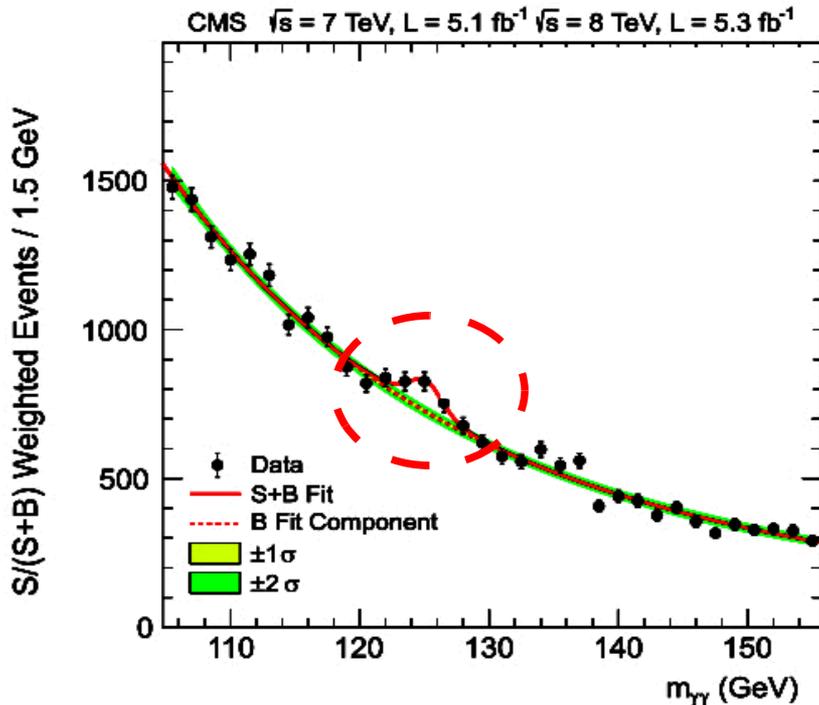
Attenzione: questa è la simulazione. Se l'avessi trovato, dovrei vedere qualcosa di simile all'istogramma rosso alla pagina seguente...

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

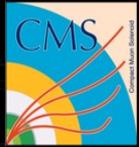
- C'è un eccesso per $m_H \sim 125$ GeV: Trovato!!

CMS

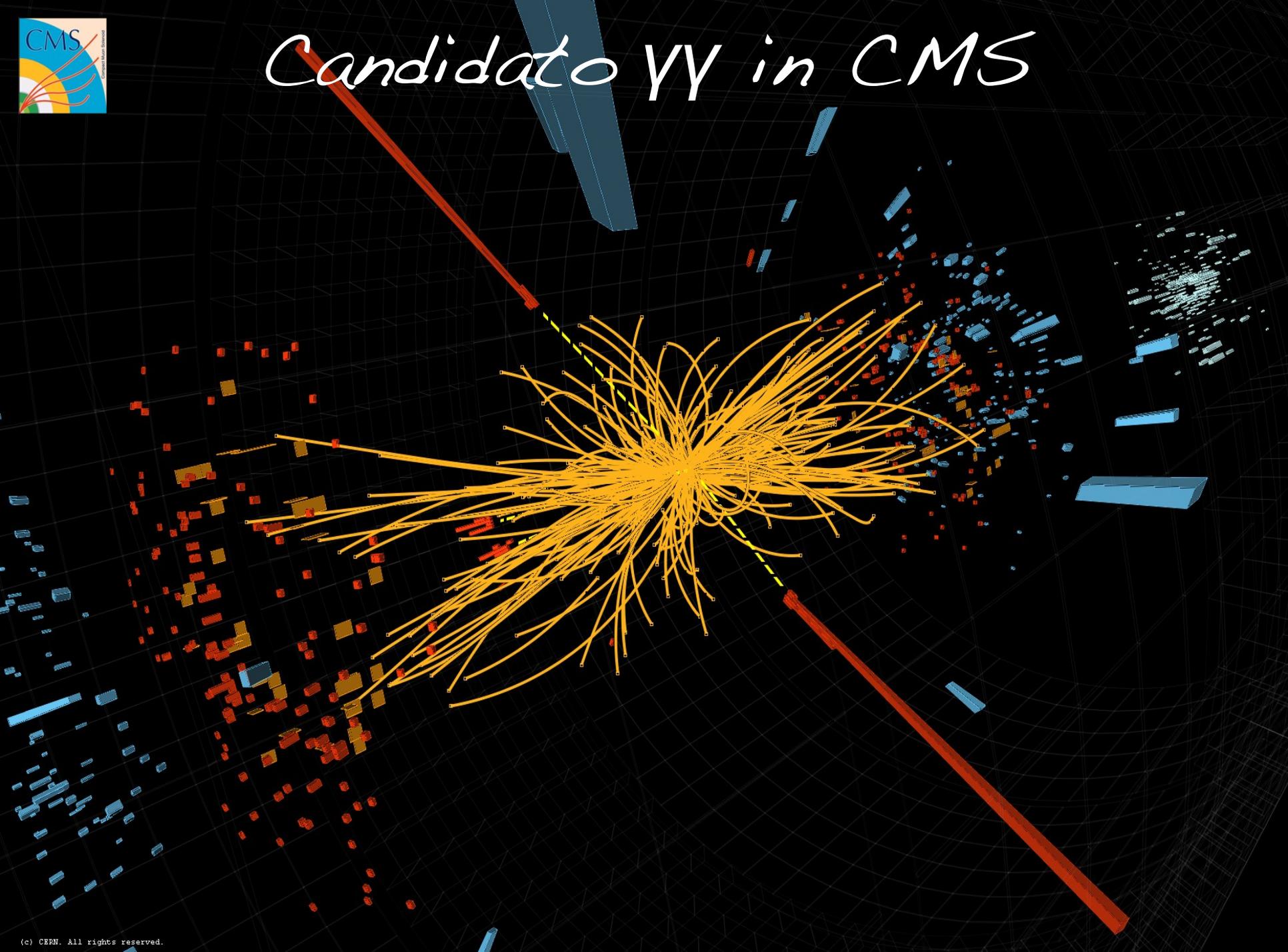
ATLAS



- Pur essendo un “canale di decadimento” con bassa probabilità, il segnale è molto pulito e la “risoluzione” in massa è elevata
- Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

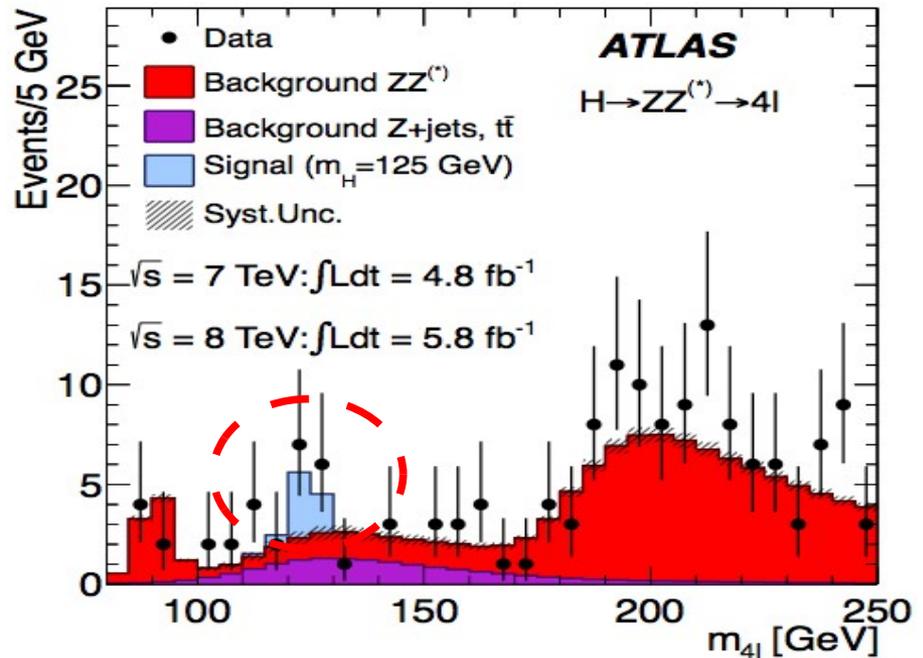
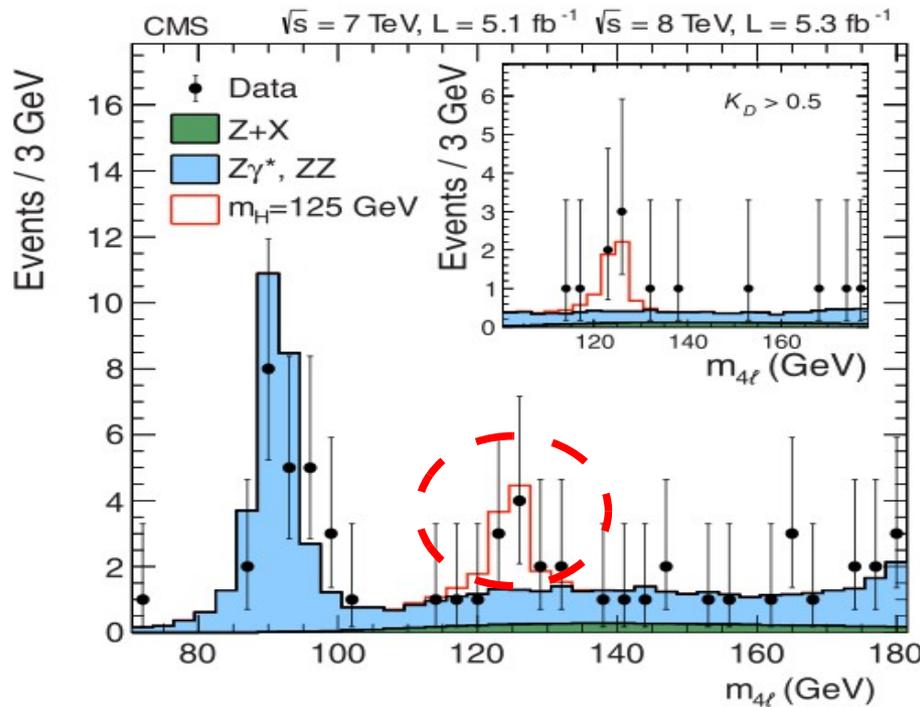


Candidate $\Upsilon\Upsilon$ in CMS



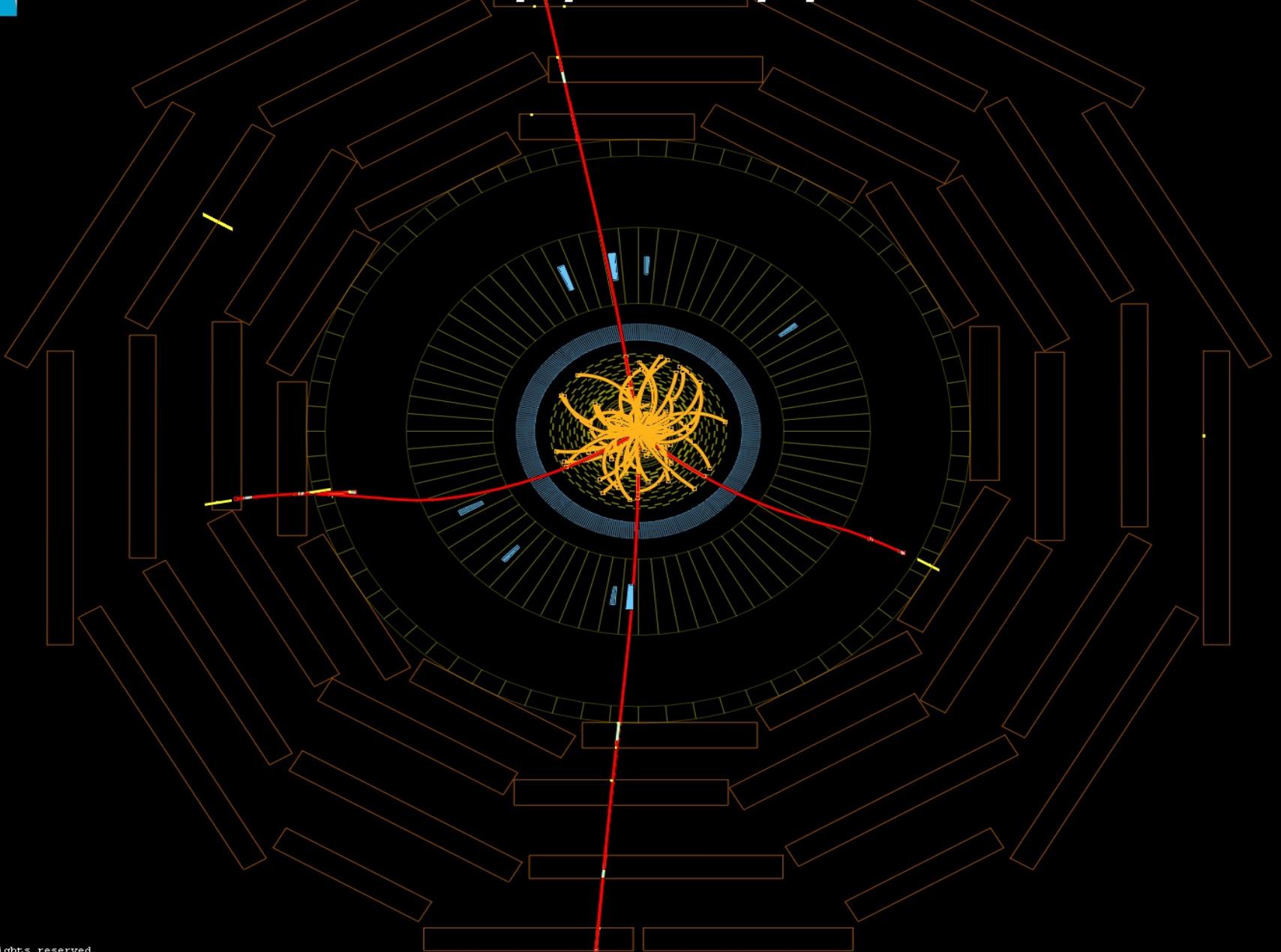
Un altro esempio: $H \rightarrow ZZ$

- I due bosoni Z vengono ricostruiti nel decadimento in una coppia di elettroni o muoni (buon rapporto tra segnale e fondo e buona risoluzione in massa)
- C'è anche qui un eccesso allo stesso valore di massa!!
Conferma la scoperta in un modo indipendente

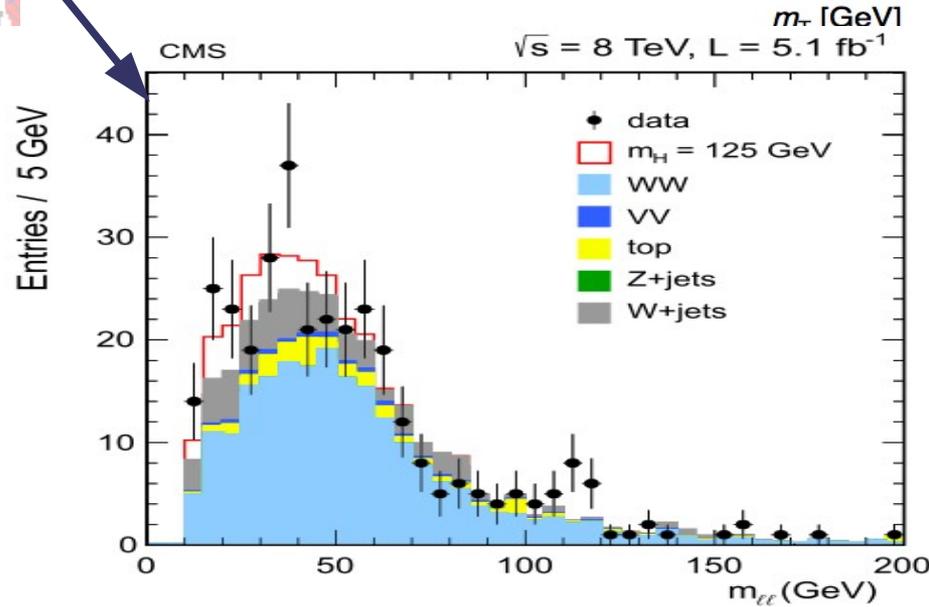
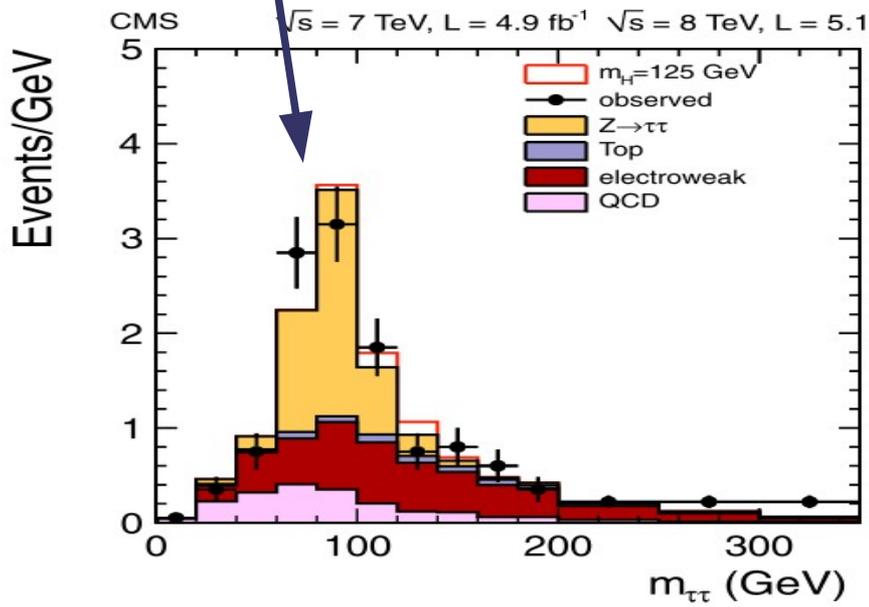
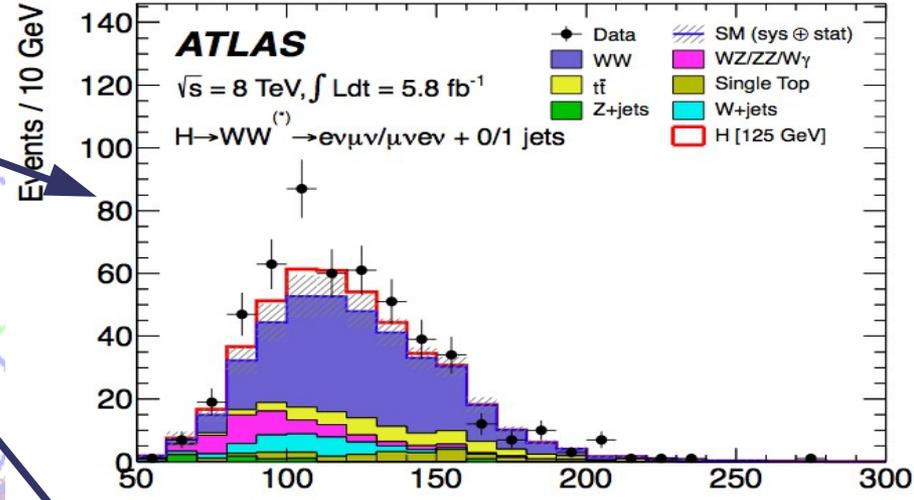
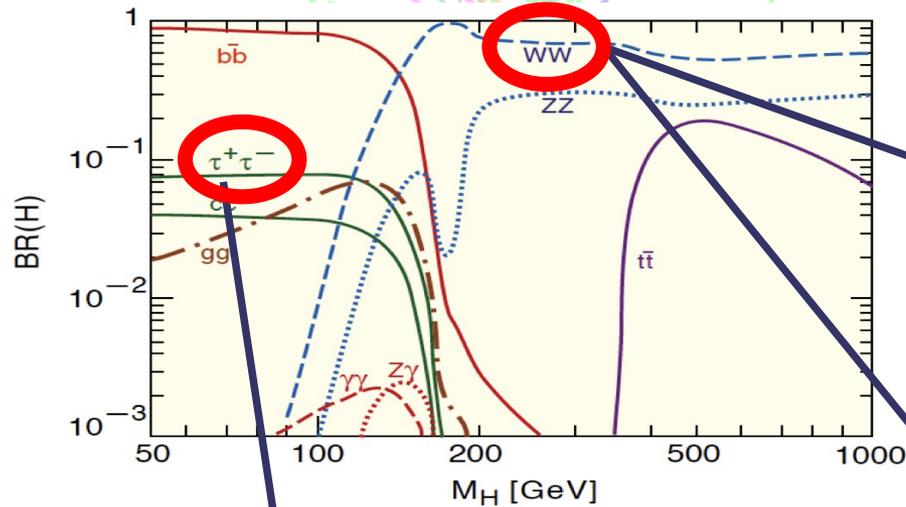




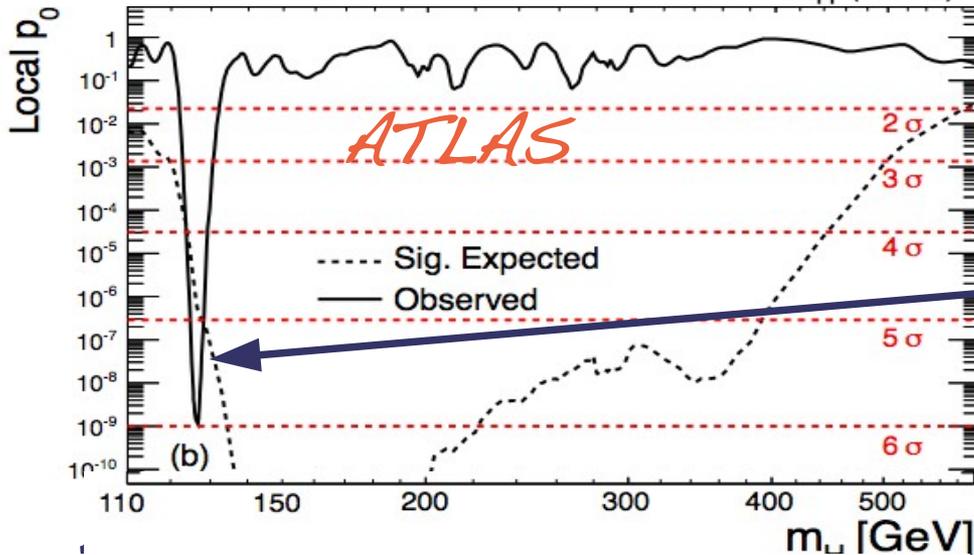
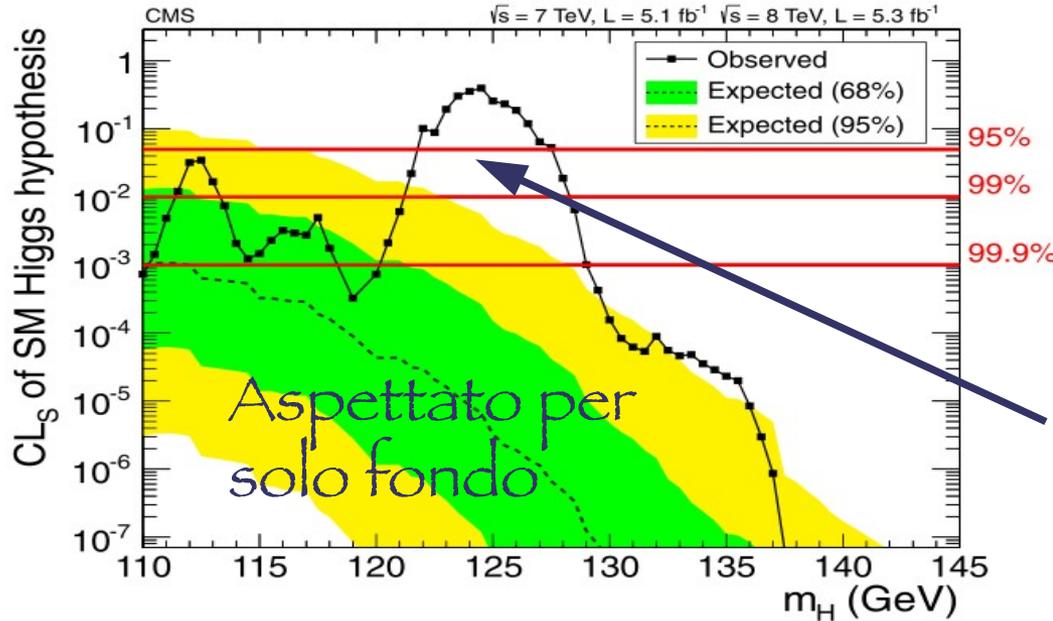
Candidate $Z(\mu\mu)Z(\mu\mu)$ in CMS



Ricerca in altri canali...



Combinazione delle varie misure



- Intensita' del segnale in funzione di M_H
- L'Higgs e' escluso al di sotto delle linee rosse con la probabilita' indicata
- Evidenza in prossimita' di $M_H \sim 125 \text{ GeV}$
- Probabilita' che l'eccesso sia dovuto a una fluttuazione del fondo
- La scoperta si ha convenzionalmente per una significativita' superiore a 5σ

Caratterizzazione del Segnale

- Usando i decadimenti nei canali ZZ e $\gamma\gamma$ si trova:

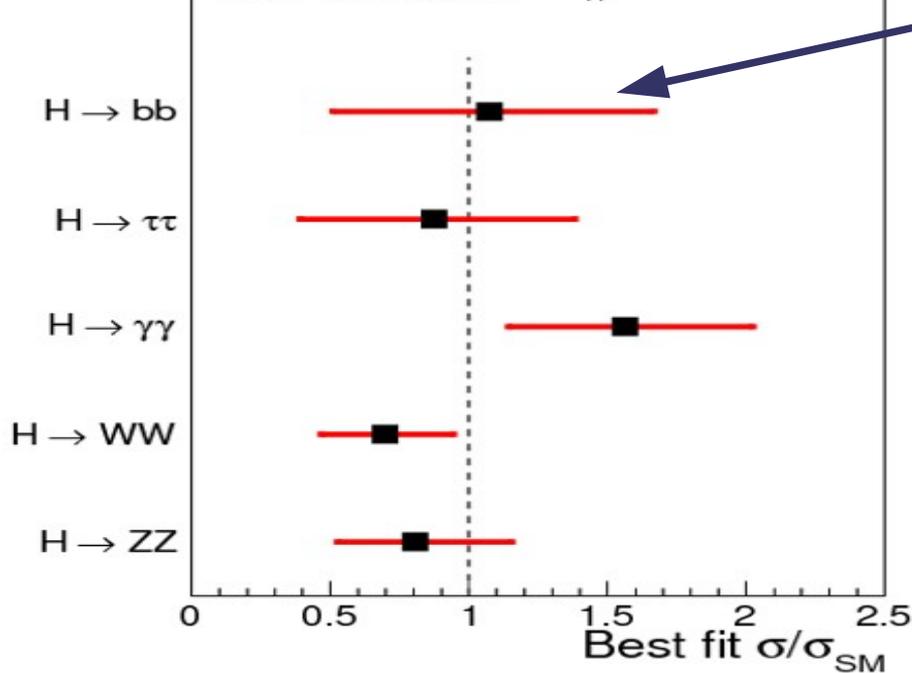
$$M_H = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV (CMS)}$$

$$M_H = 126.0 \pm 0.6 \text{ GeV (ATLAS)}$$

- Ma abbiamo scoperto veramente il bosone di Higgs?

$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L \leq 5.1 \text{ fb}^{-1}$ $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L \leq 12.2 \text{ fb}^{-1}$

CMS Preliminary $m_H = 125.8 \text{ GeV}$



- Intensità del segnale nei vari canali rispetto alle previsioni del Modello Standard:

Ottimo accordo!!

- Altri studi sono in corso per definire se le caratteristiche della nuova particella sono quelle aspettate (spin, parità...)

Conclusioni sull'Higgs

- Il meccanismo di Higgs e' il paradigma preferito per assegnare la massa a tutte le particelle, e quindi alla materia
- Le ricerche a LEP (1990-2000) hanno escluso l'esistenza di un Higgs leggero ($M_H < 115 \text{ GeV}$)
- **Dopo meno di tre anni di piena attivita', gli esperimenti ATLAS e CMS a LHC scoprono il bosone di Higgs con massa $M_H \approx 125 \text{ GeV}$**

The background features a complex, abstract pattern of overlapping lines and shapes. It includes solid and dashed lines in various colors such as green, blue, red, and purple. There are also several rectangular outlines in different colors, some of which appear to be stylized representations of particle detectors or experimental setups. The overall effect is that of a dynamic, multi-colored network or data visualization.

La ricerca della Supersimmetria a LHC

La Supersimmetria

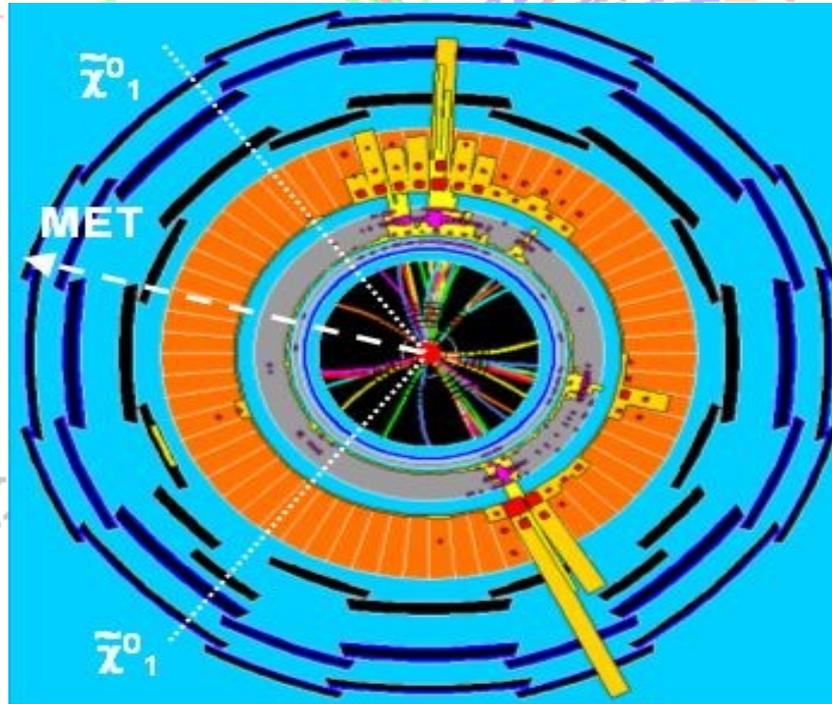
- Simmetria tra fermioni e bosoni: raddoppia il numero delle particelle
- La particella supersimmetrica più leggera, il “Lightest Super Partner” (LSP) è stabile non potendo decadere in particelle standard
- Offre una possibile risposta a importanti problemi:
 - Problema della gerarchia
 - Materia oscura (formata da LSP stabili)

La Supersimmetria

● La ricerca si basa generalmente sulla selezione di eventi con “Energia mancante”:

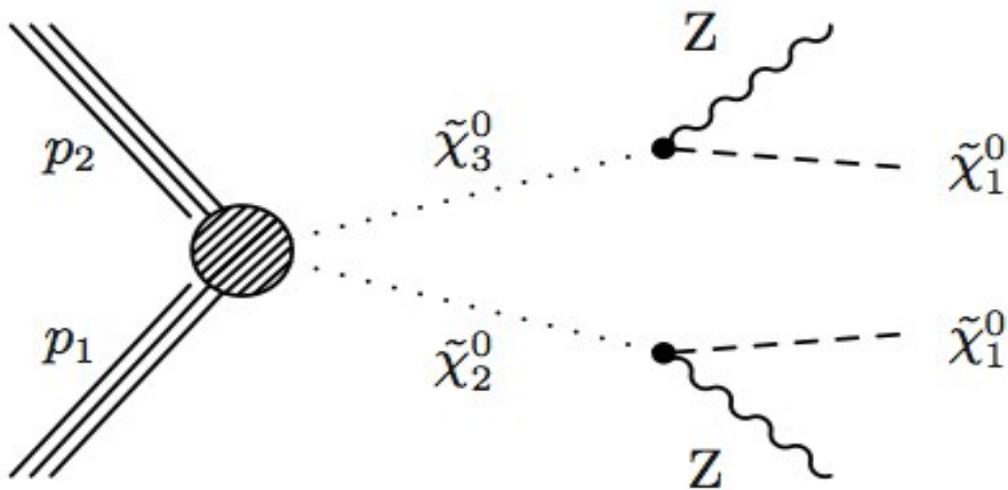
- ✦ Apparente violazione della conservazione della quantità di moto nell'urto, a causa della presenza di particelle non interagenti con il rivelatore

● Esempio: produzione di neutralini leggeri $\tilde{\chi}_1^0$



Le ricerca del neutralino a LHC

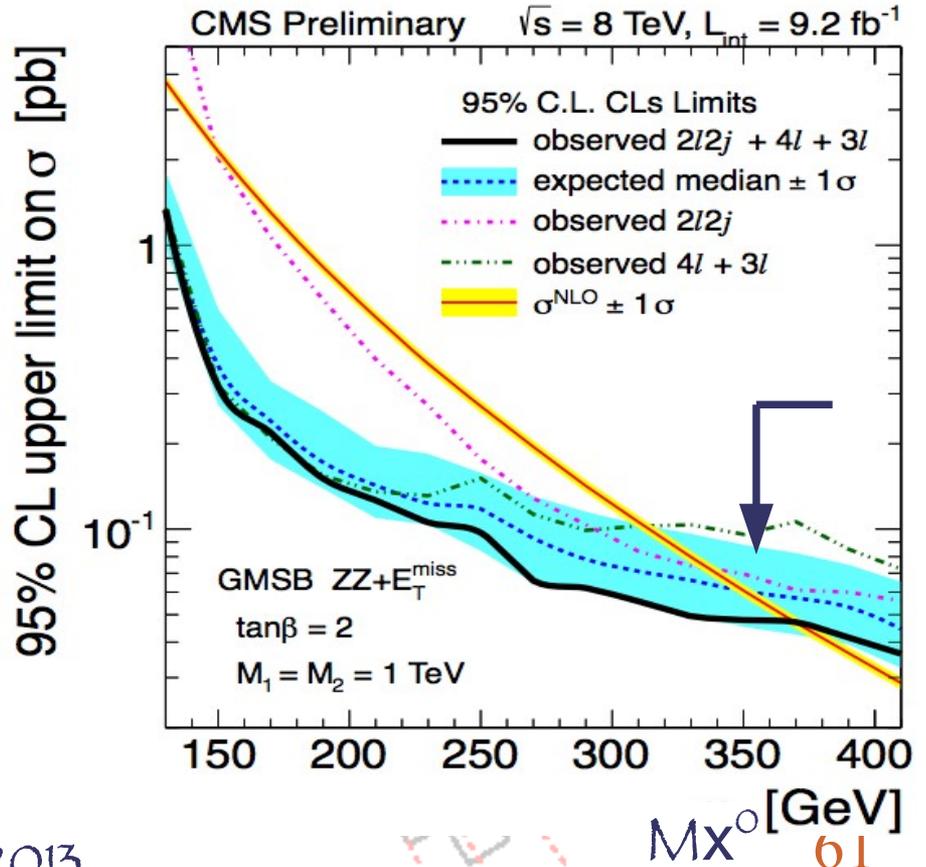
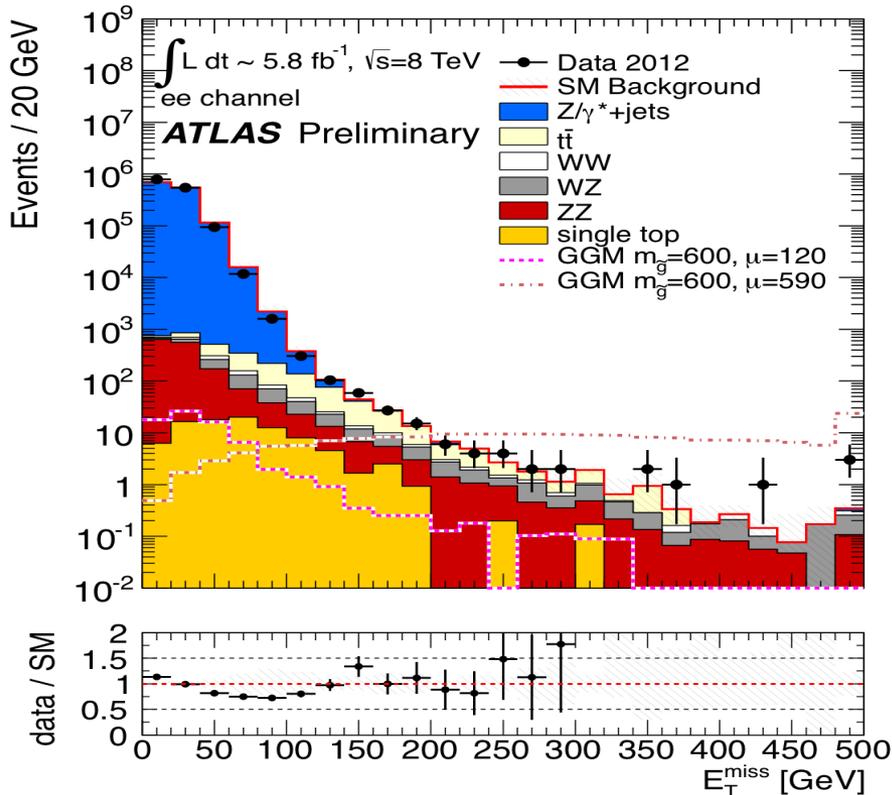
- Il neutralino χ^0 è una mistura dei partners supersimmetrici di fotone, W, Z e Higgs
- Esistono quattro diversi tipi di neutralino $\chi^0_{i=1,4}$. Il più leggero, χ^0_1 , è un buon candidato per LSP
- Uno dei possibili meccanismi di produzione è il seguente dove i bosoni Z decadono in coppie di leptoni ($e^+e^- / \mu^+\mu^-$) o quarks:



● Ricerca di eventi con coppie di leptoni, "jets" e energia mancante

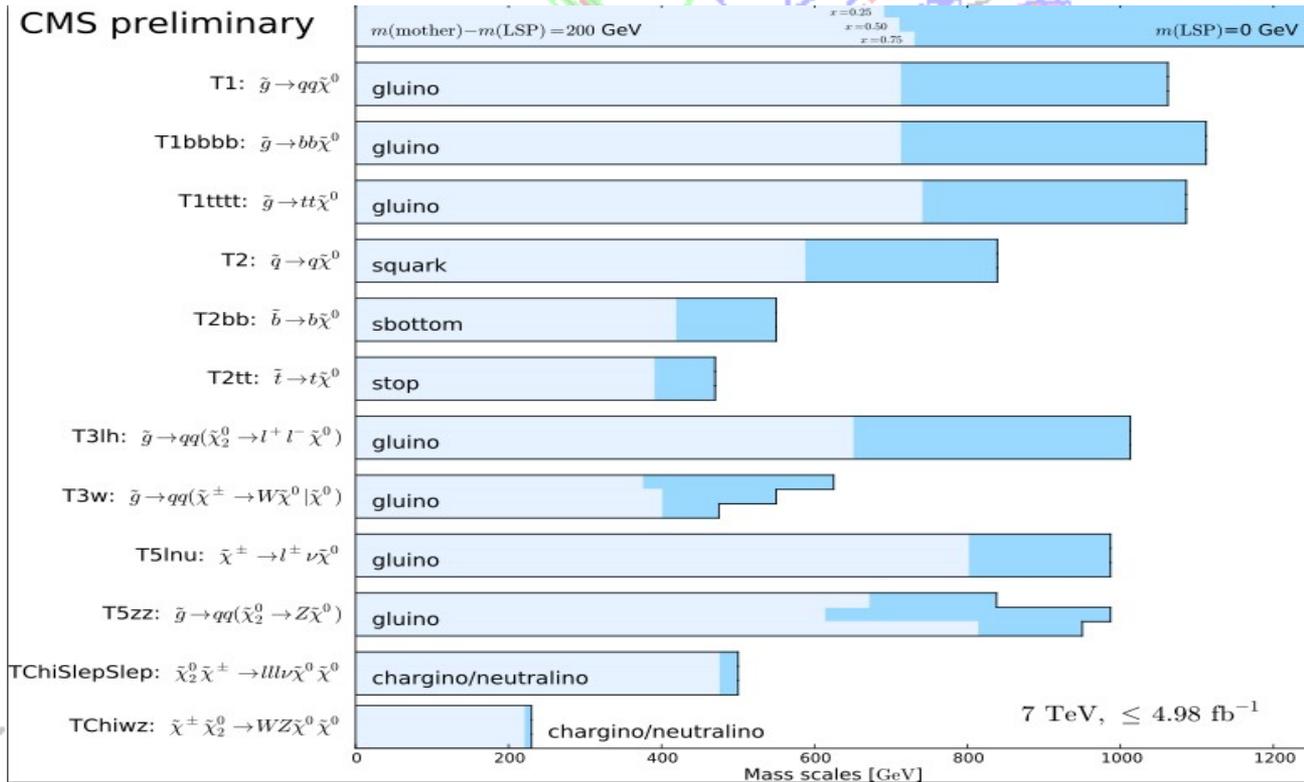
Le ricerche del neutralino a LHC

- La distribuzione dell'energia mancante e' in ottimo accordo con le previsioni per il fondo da processi noti!
- Confrontando il numero di eventi selezionati con le previsioni teoriche si ottiene un limite sulla massa del neutralino



Limiti sulla supersimmetria

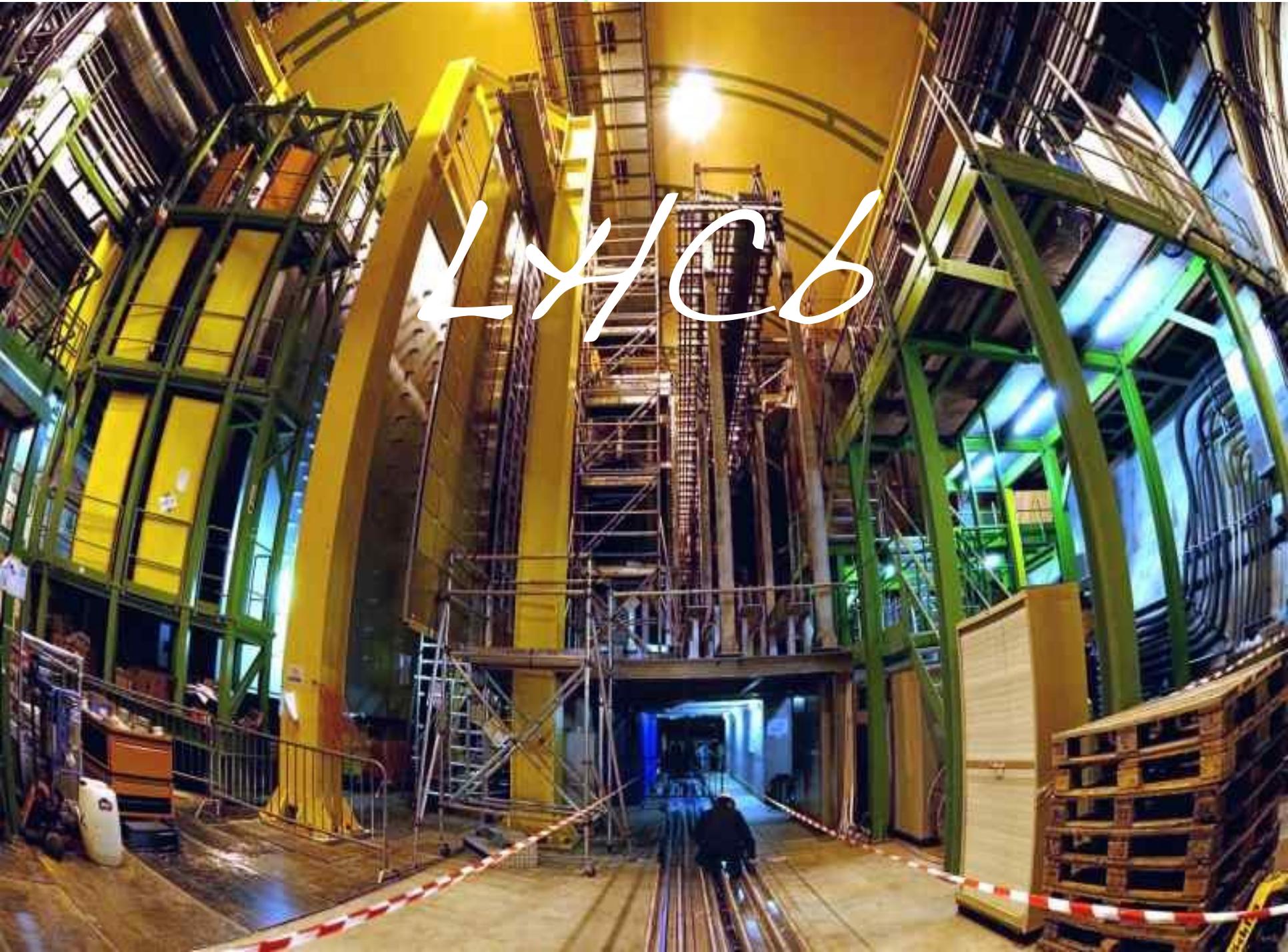
- Tutti i risultati sperimentali sono al momento compatibili con processi previsti dal Modello Standard
- Vengono posti limiti sempre più stringenti sulla massa delle particelle supersimmetriche con diverse assunzioni sui molti parametri liberi



The background features a complex, abstract pattern of overlapping lines and shapes. The lines are primarily in shades of green, blue, red, and purple, with some grey and black lines. The shapes include rectangles, squares, and circles, some of which are filled with colors. The overall effect is a dense, multi-colored web of lines and shapes that radiates from a central point, creating a sense of depth and complexity.

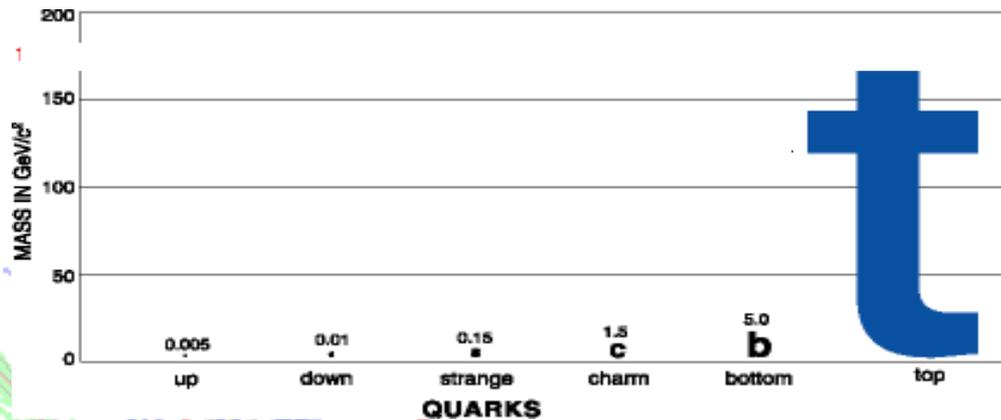
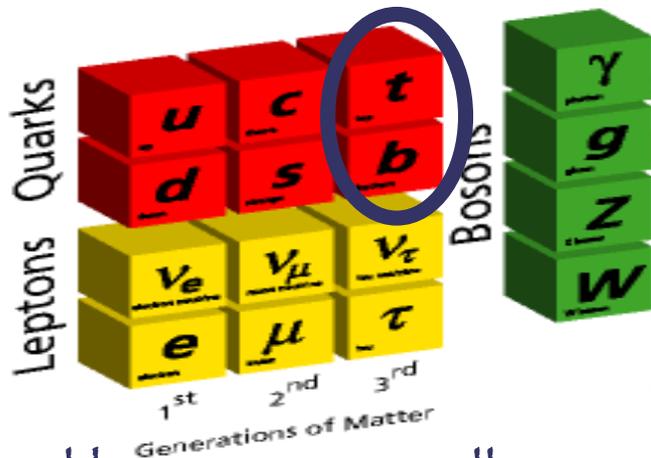
*La fisica del quark b e
le misure di precisione
all'esperimento LHCb*

ЛУСБ



Perche' la Fisica del b?

Elementary Particles

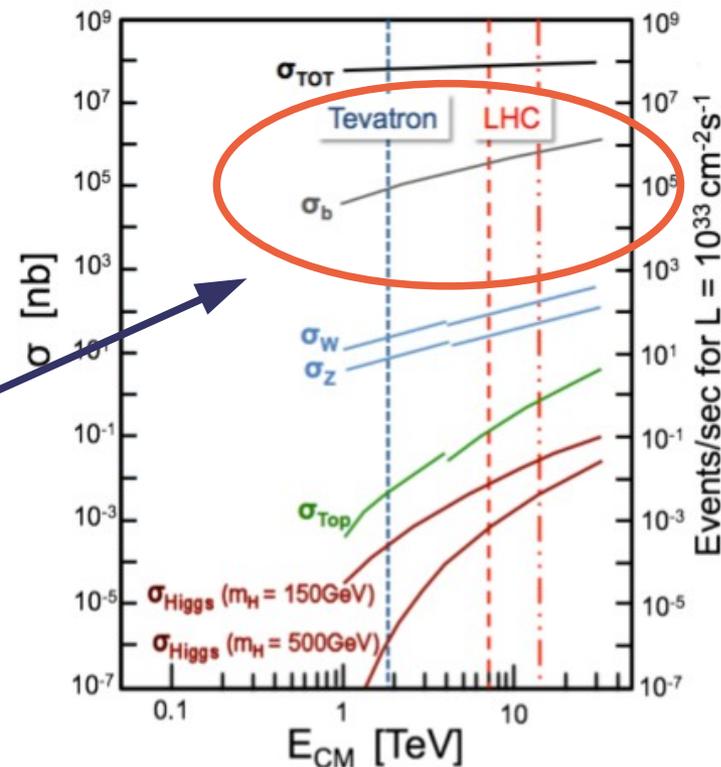


- Il b appartiene alla terza generazione di quarks, proposta nel 1973 e scoperta nel 1977

- Il b è il quark più pesante tra quelli che formano adroni e viene prodotto copiosamente a LHC

- Viene studiato da anni in esperimenti installati a acceleratori a alta luminosità e energia più bassa

Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

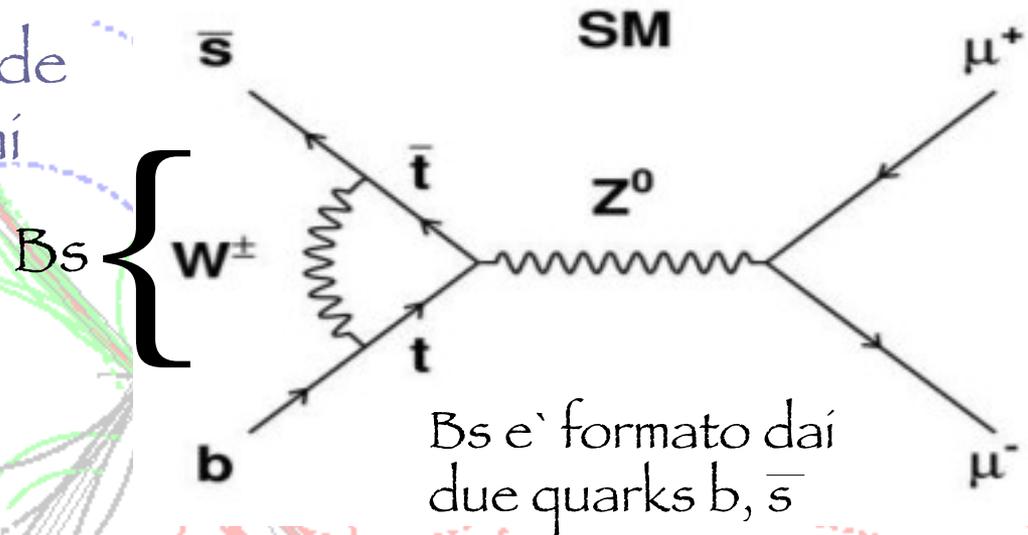


Perche' la Fisica del b?

- Massa elevata ~ 5 GeV: Interazioni Forti piu' semplici!

- Il Modello Standard prevede con elevata precisione alcuni decadimenti del quark b estremamente rari:

 - **Esempio: $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$**
 $BR = (3.54 \pm 0.30) 10^{-9}$



- La presenza nel diagramma di particelle supersimmetriche virtuali al posto dei mediatori W o Z potrebbe aumentare le previsioni di ordini di grandezza!

- Ambiente ideale per la ricerca indiretta di nuova fisica mediante misure di precisione alla ricerca di eventuali discrepanze rispetto alle previsioni del Modello Standard

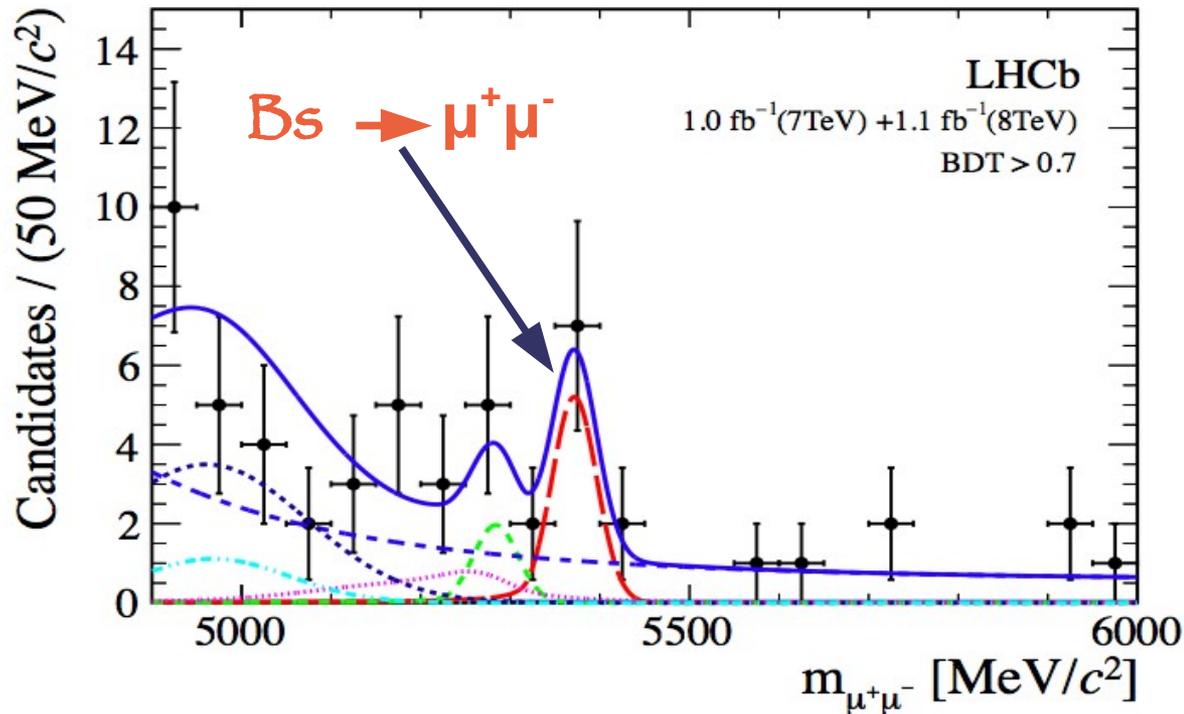
La ricerca di $B_s \rightarrow \mu\mu$ a LHCb

- Il mesone B_s viene ricostruito nel decadimento in due muoni
- Si nota un piccolo eccesso al valore di massa corretto
- Prima evidenza sperimentale di questo decadimento in ottimo accordo con le previsioni del Modello Standard!!
- Si ottiene:

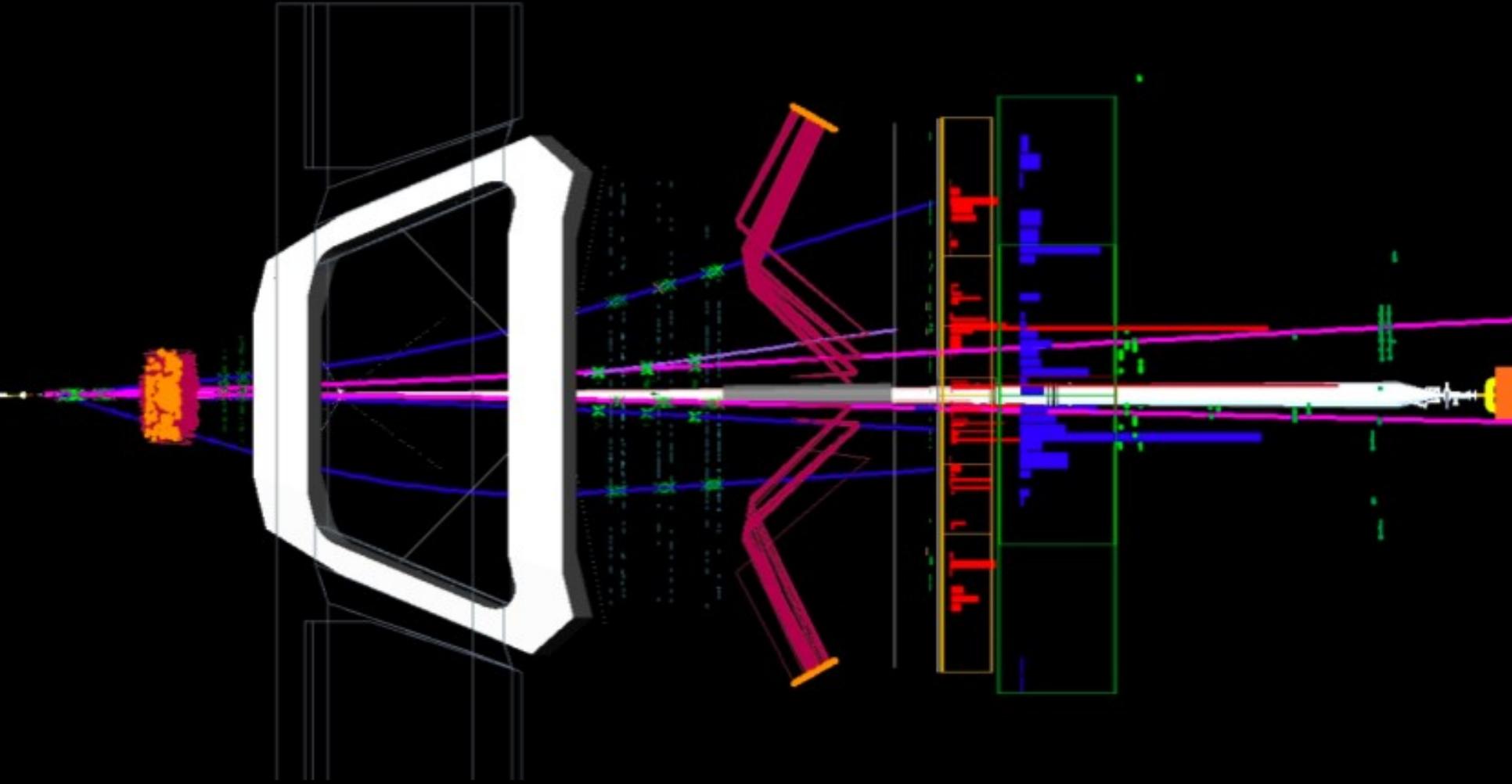
$$BR = (3.2 \pm^{+1.5}_{-1.2}) 10^{-9}$$

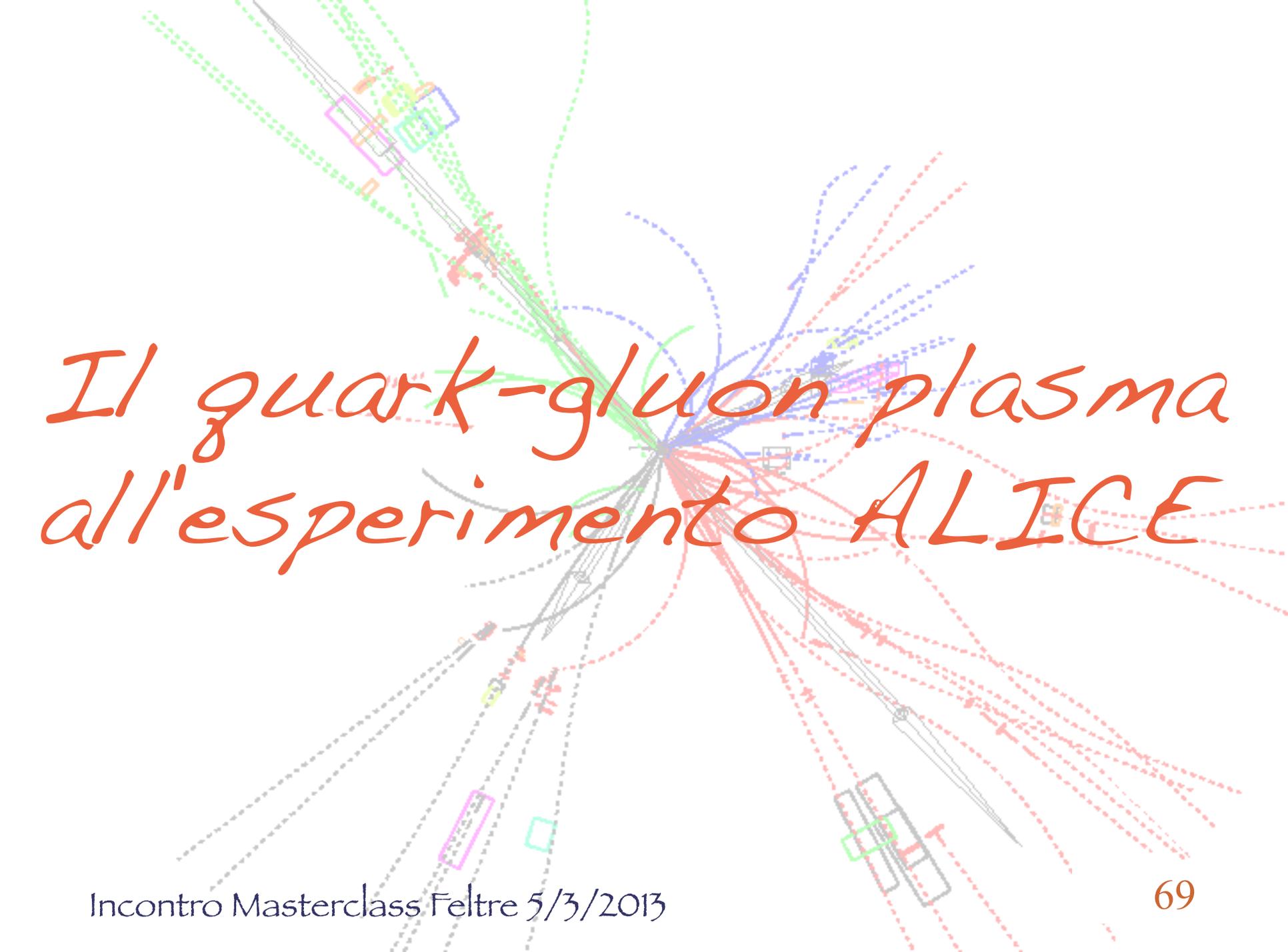
$$BR_{MS} = (3.54 \pm 0.30) 10^{-9}$$

- Poco spazio per Nuova Fisica...
- Anche questo settore del MS gode di buona salute



Candidato $B_s \rightarrow \mu\mu$ in LHCb



The background of the slide is a schematic diagram of the ALICE experiment detector. It shows a central collision point from which various detector components are arranged in a cylindrical geometry. The components are represented by different colored lines and shapes: green for the inner tracking system, blue for the outer tracking system, red for the calorimeters, and grey for the central barrel. The text is overlaid on this diagram in a large, orange, cursive font.

Il quark-gluon plasma all'esperimento ALICE

Alice

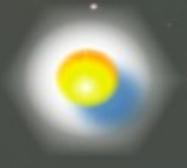


Interazione Forte

- I quarks vengono trattenuti all'interno di protoni e neutroni dall'interazione forte dovuta allo scambio di mediatori chiamati gluoni.
- Interazione ben nota, restano alcuni interrogativi:
 - I quarks esistono solo se legati tra loro all'interno degli adroni: **qual è l'origine del confinamento?**
 - Gli adroni sono molto più pesanti della somma delle masse dei quarks che li compongono: **da dove viene questa massa?**

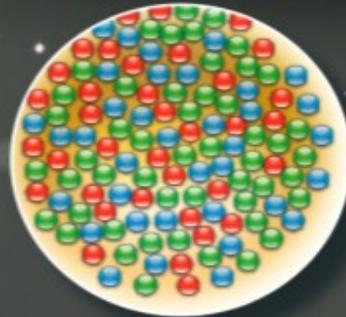
Il Quark-Gluon Plasma

- Utilizzando urti tra nuclei di piombo, l'esperimento Alice studia le proprietà della materia in uno stato di altissima temperatura esistente nei primi istanti di vita dell'universo
- Nel QGP ($T > 2 \cdot 10^{12}$ K) i quarks e i gluoni sono liberi



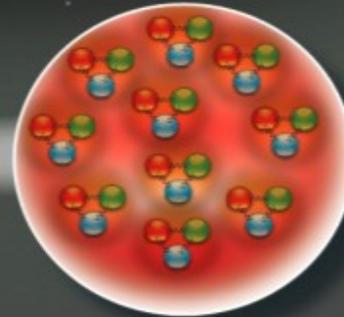
Big Bang

Temperatura
Tempo



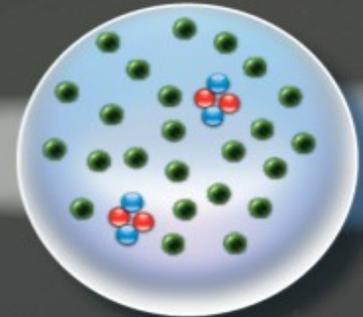
Plasma di Quark
e Gluoni

$< 10^{-5}$ s



Formazione di protoni
& neutroni

2×10^{12} K
 4×10^{-5} s

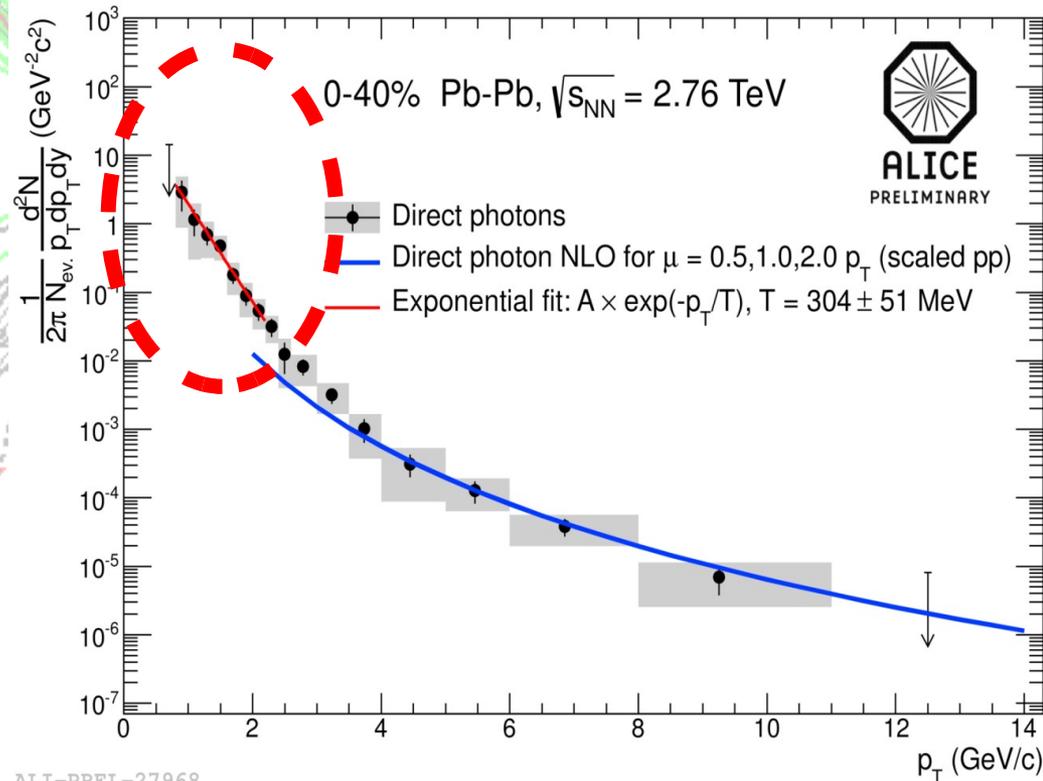


Formazione di nuclei
a basso numero atomico

5×10^8 K
3 min

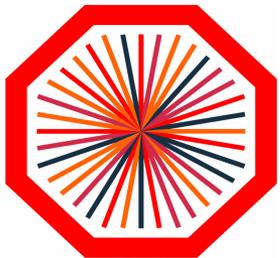
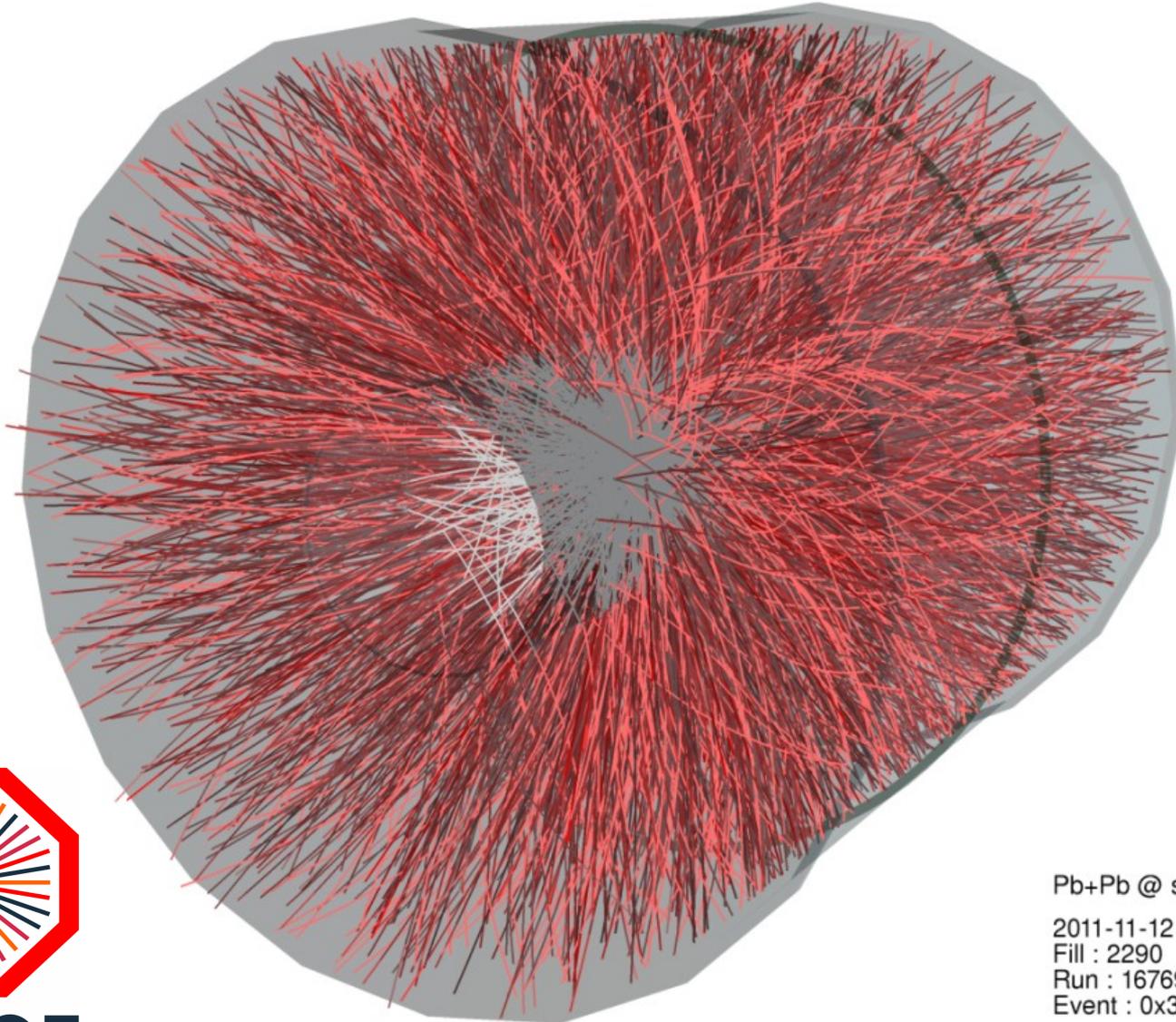
Il Quark-Gluon Plasma

- A seguito della collisione tra due nuclei di piombo si crea una “fire ball” di raggio $R \approx 5$ fm che vive per 10^{-23} s
- Questo stato della materia si comporta come un liquido quasi perfetto a bassissimo attrito
- Dallo spettro dei fotoni termici di bassa energia prodotti nella fire ball si stima una temperatura $T \approx 1.8 \cdot 10^{12}$ K (la più alta creata dall'uomo)



ALI-PREL-27968

Collisione Pb-Pb a ALICE



ALICE

Pb+Pb @ $\sqrt{s} = 2.76$ ATeV

2011-11-12 06:51:12

Fill : 2290

Run : 167693

Event : 0x3d94315a

Conclusioni

- Il Modello Standard ha avuto un grandissimo numero di conferme ottenute con due metodologie complementari:
 - Ricerca diretta di nuove particelle con esperimenti a alta energia (l'Higgs e' l'ultimo esempio eclatante)
 - Ricerca indiretta utilizzando misure di alta precisione per evidenziare eventuali discrepanze dalle aspettative

Conclusioni

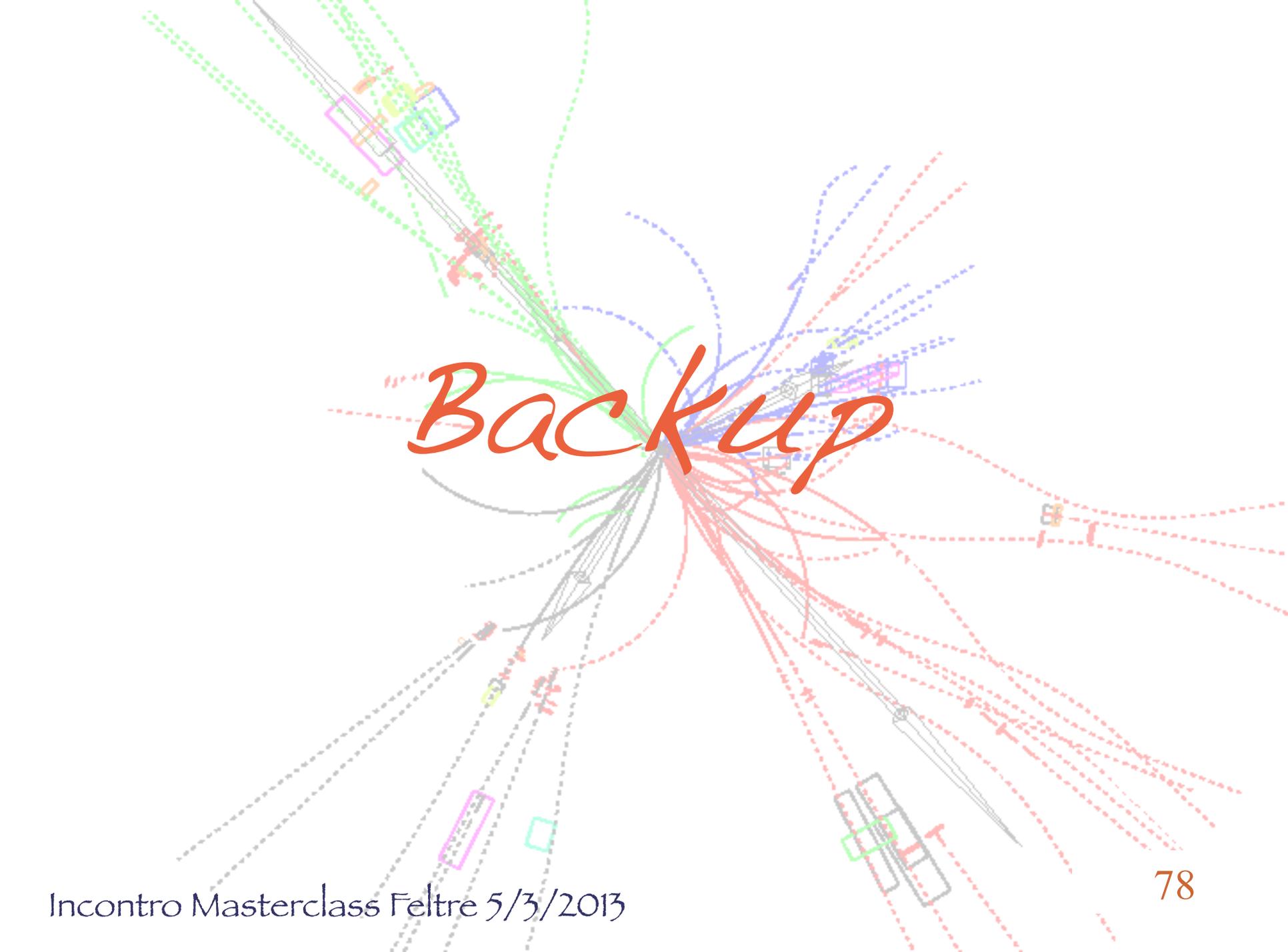
- ...Tuttavia sappiamo che la nostra descrizione della natura e' ancora molto parziale e il Modello Standard e' incompleto, molto resta ancora da indagare!



Conclusioni



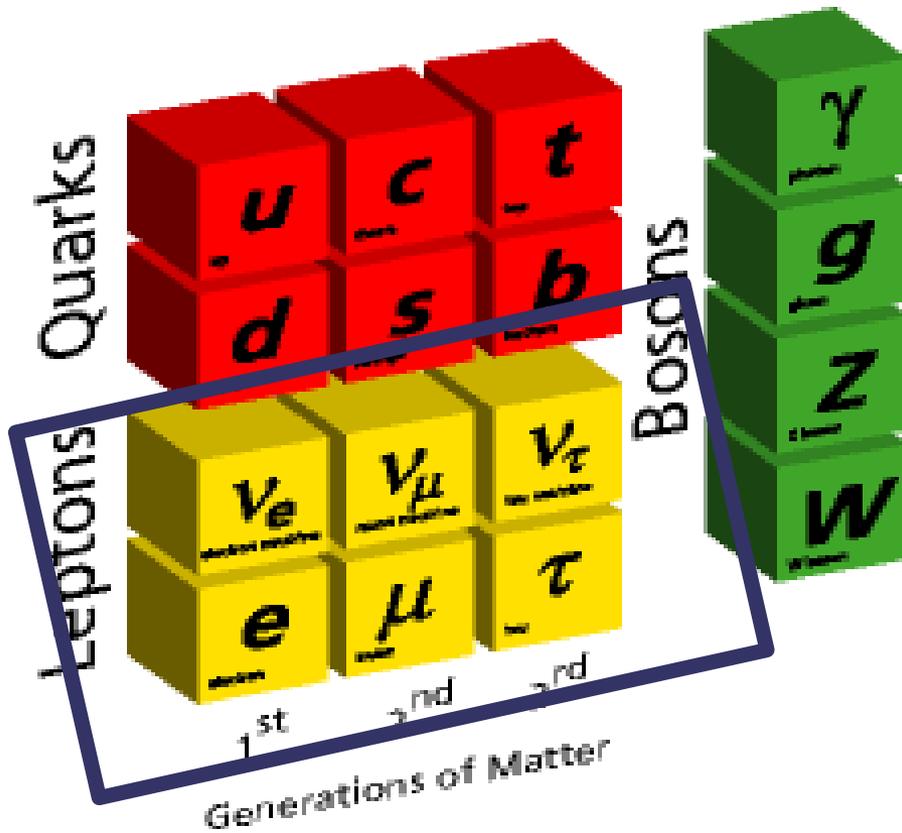
Nuova Fisica ci sta
aspettando?



Backup

I leptoni

Elementary Particles

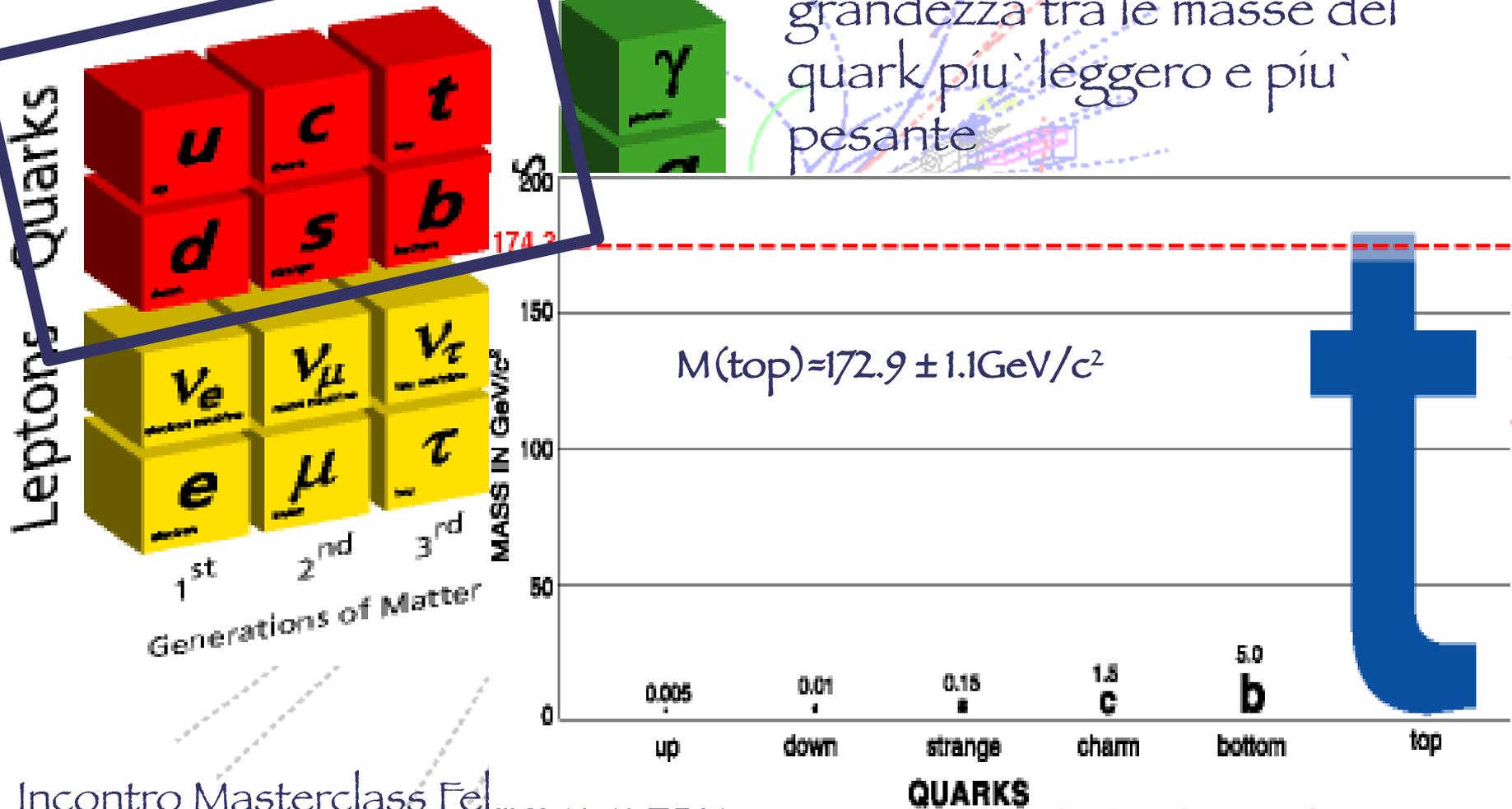


- I leptoni sono sei:
 - tre hanno carica elettrica (negativa)
 - tre non hanno carica elettrica
- Il leptone carico più conosciuto è l'elettrone (e). Gli altri due leptoni carichi sono il muone (μ) e il tau (τ)
 - Muone e tau sono repliche dell'elettrone con massa più grande
- I leptoni neutri si chiamano neutrini:
 - c'è un neutrino corrispondente a ogni leptone carico
 - hanno massa molto piccola (ma non nulla)

I quarks

Elementary Particles

Ci sono 5 ordini di grandezza tra le masse del quark piu' leggero e piu' pesante



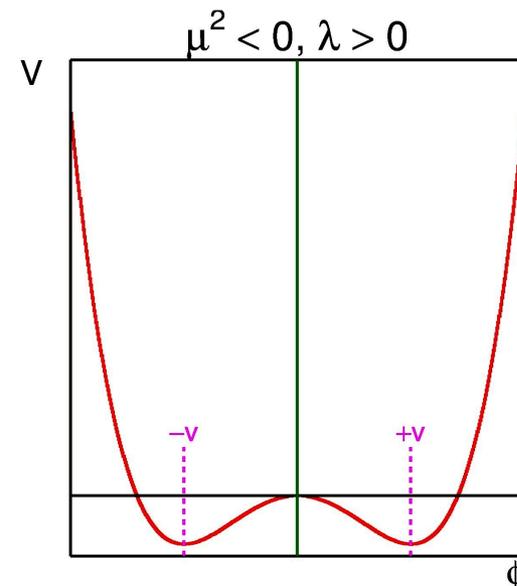
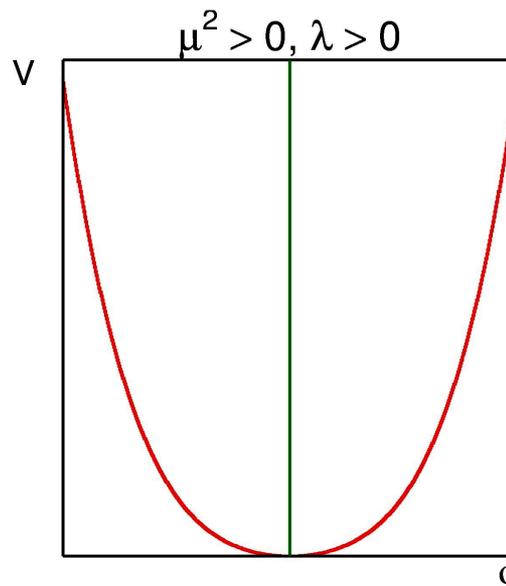
Meccanismo di Higgs

- Introduco un nuovo campo Φ (=particella) che interagisce con i mediatori W e Z:

$$\mathcal{L} = W_\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^\mu + g^2 \phi W^2$$

- Associao ad esso un potenziale: $V(\phi) = \frac{1}{4} \lambda |\phi|^4 - \frac{1}{2} \mu^2 |\phi|^2$

- Considero due possibilità:

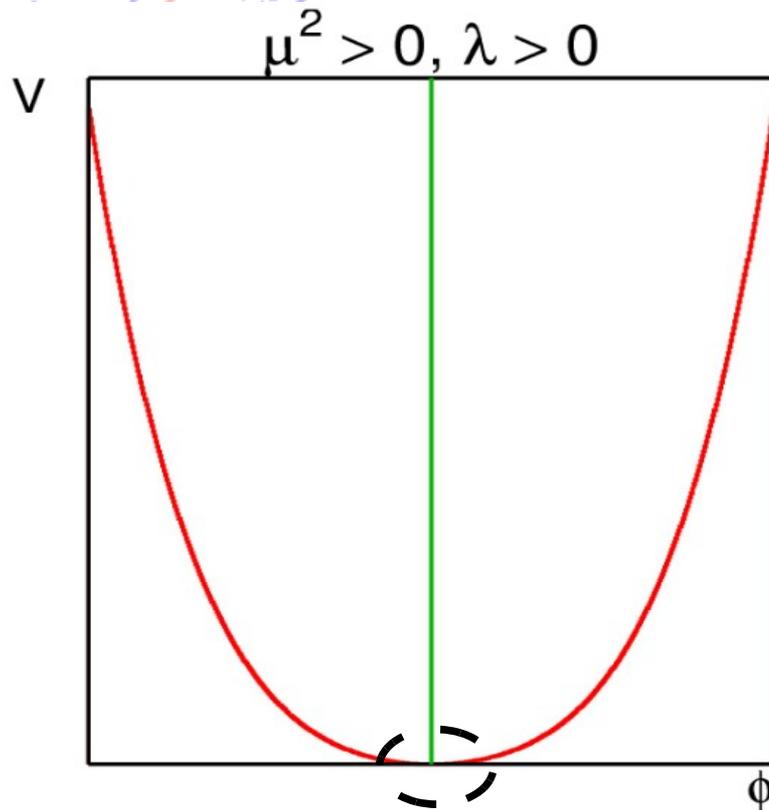


Meccanismo di Higgs

- Il vuoto è lo stato di energia minima complessiva (quindi anche quella potenziale)

$$\mathcal{L} = W_\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^\mu + g^2 \phi W^2$$

- In questo caso ho il minimo per $\Phi=0$ e il termine di interazione tra Higgs e W nell'equazione scompare



Meccanismo di Higgs

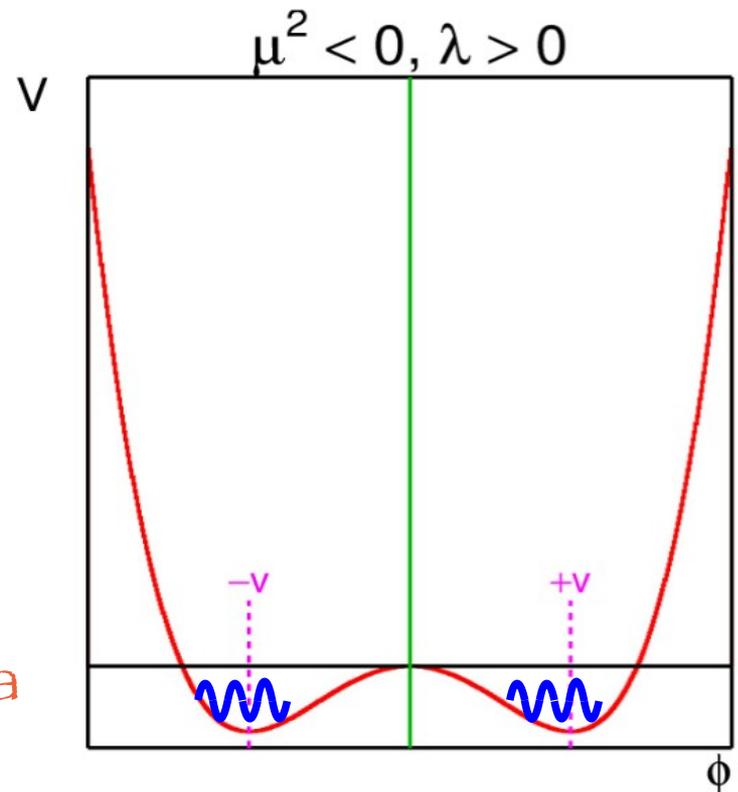
- Il vuoto è lo stato di energia minima

$$L = W_\mu \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^\mu + g^2 \phi W^2$$

- In questo caso ho il minimo per $\Phi = \pm v$ e il termine di interazione tra Higgs e W rimane: uso questo!
- Higgs: eccitazione del vuoto
- Così si ottengono le masse senza

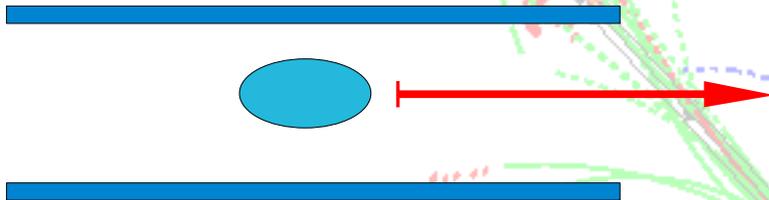
introdurre divergenze!

Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013



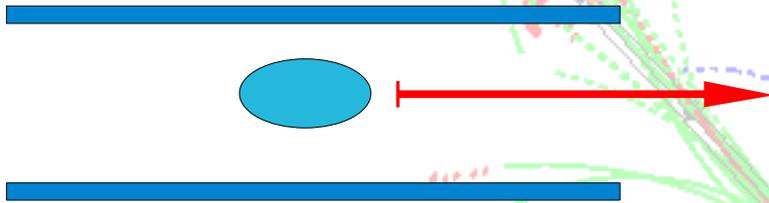
Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

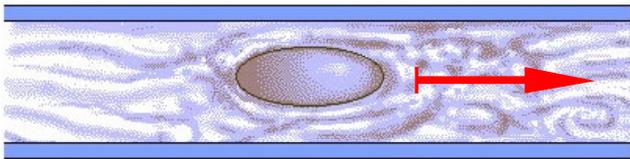


Analogie Classiche

Vuoto : velocità V_0

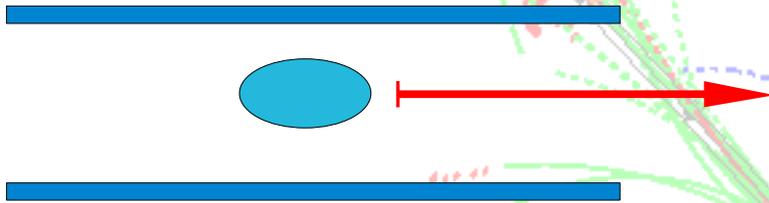


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

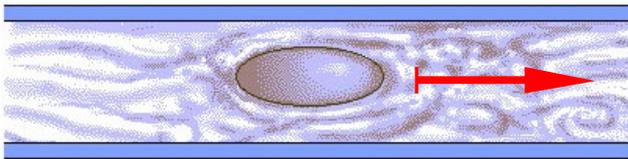
Vuoto : velocità V_0



Vuoto classico : $M=0$, $v=c$

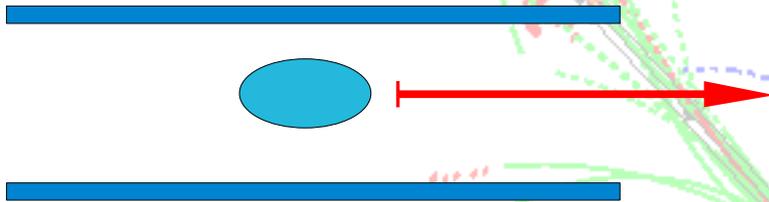


Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$, $a = -kv$



Analogie Classiche

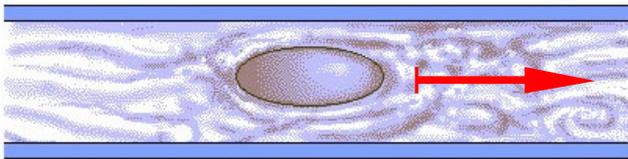
Vuoto : velocità V_0



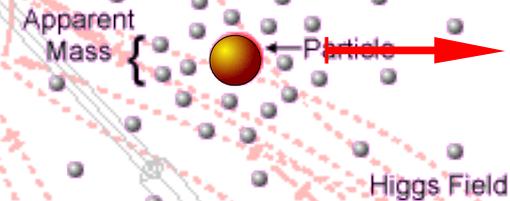
Vuoto classico : $M=0, v=c$



Mezzo viscoso : velocità $v < V_0$



Vuoto di Higgs : $M = \frac{1}{2} g v$ $v < c$

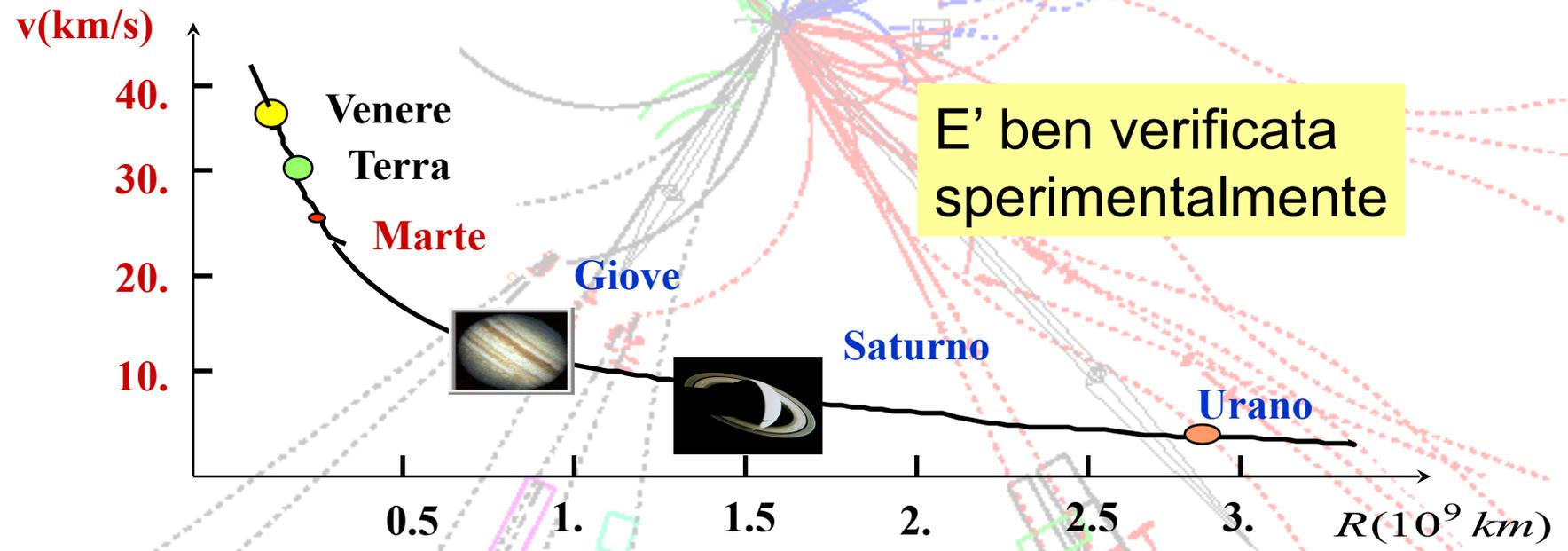


Curve di rotazione (I)

“Curva di rotazione” (o **curva kepleriana**) del sistema solare:
dalla legge di gravitazione universale, per un pianeta in orbita
circolare di raggio R:

$$ma = mv^2/R = GmM/R^2$$

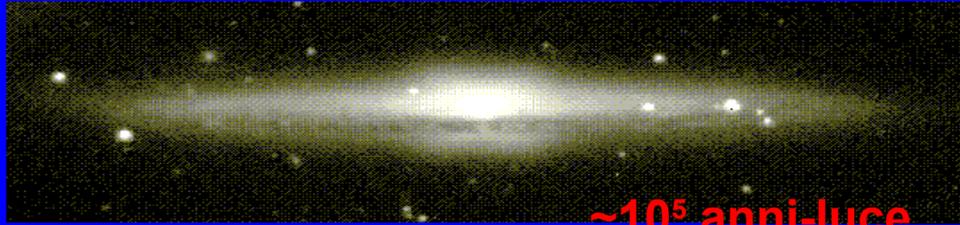
$$v(R) = \sqrt{GM/R}$$



Curve di rotazione

La “curva di rotazione” delle galassie **non** segue la legge kepleriana :

NGC 5746



~10⁵ anni-luce

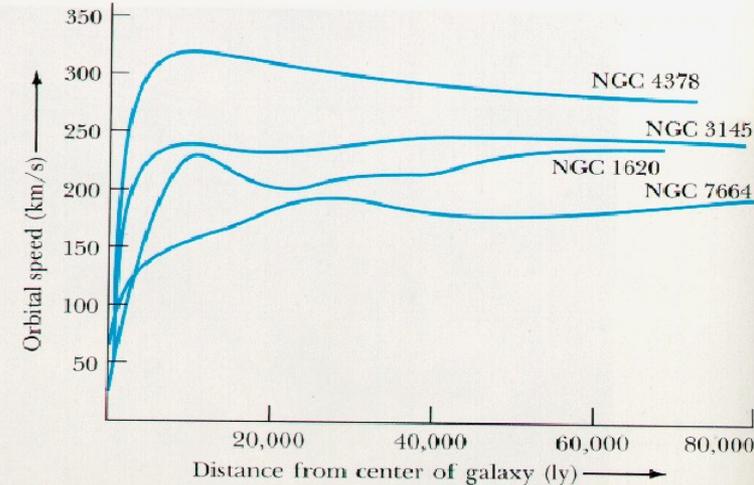
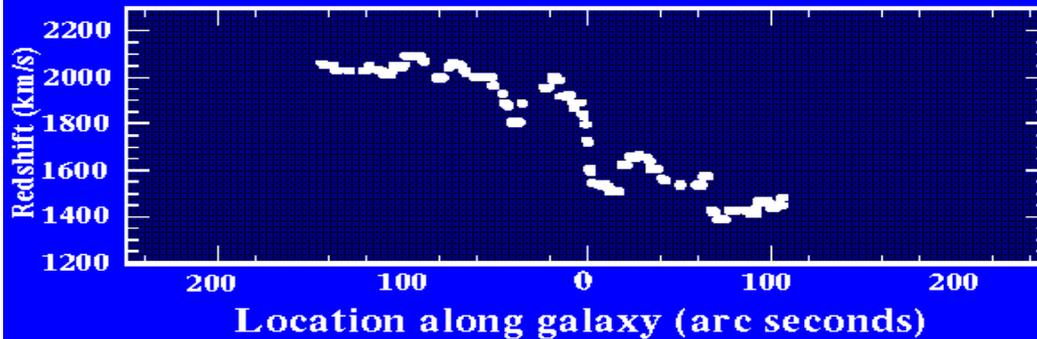


FIGURE 26-25 The Rotation Curves of Four Spiral Galaxies This graph shows the orbital speed of material in the disks of four spiral galaxies. Many galaxies have flat rotation curves, indicating the presence of extended halos of dark matter. (Adapted from V. Rubin and K. Ford)

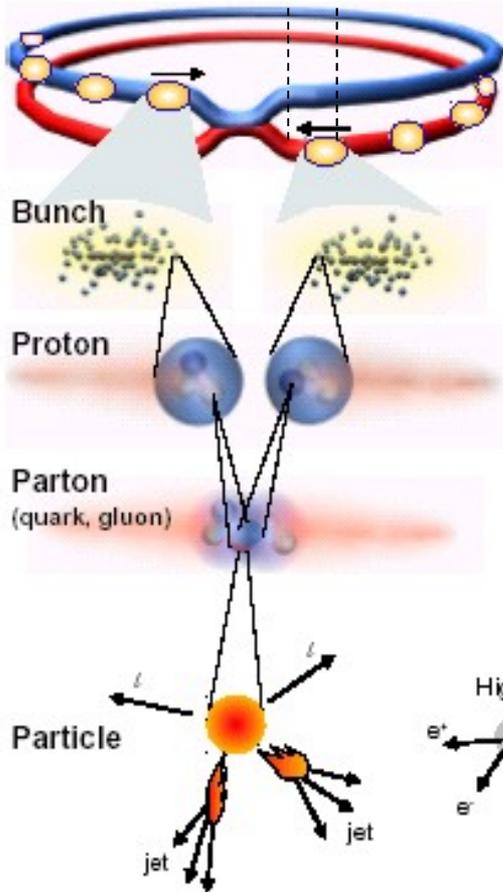
per spiegare l'**andamento di $v(r)$** delle stelle nelle galassie [misurato dall'osservazione del '**redshift**' (= spostamento verso il rosso) degli spettri di emissione della luce] è necessario ammettere l'esistenza di **materia oscura nell'Universo** che contribuisca alla massa totale della galassia stessa, sorgente della forza gravitazionale....

(**stelle di neutroni ? buchi-neri ? Neutrini ? nuove particelle sub-nucleari ?...**)

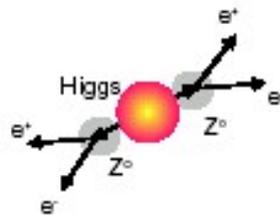
Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

Il Large Hadron Collider

↔ 25 ns



Proton-Proton	(2835 x 2835 bunches)
Protons/bunch	10^{11}
Beam energy	7 TeV (7×10^{12} eV)
Luminosity	10^{34} cm ⁻² s ⁻¹
Crossing rate	40 MHz
Collisions ≈	10^7 - 10^9 Hz



~2800 "pacchetti" distanziati di 25 ns ognuno (in realta', con una struttura a 'treni')

$$T_{\text{giro}} = 2\pi R / c = 88 \mu\text{s}$$

~ 10^{11} protoni/pacchetto

$$E_{\text{beam}} = 8 \text{ TeV} \quad (1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV})$$

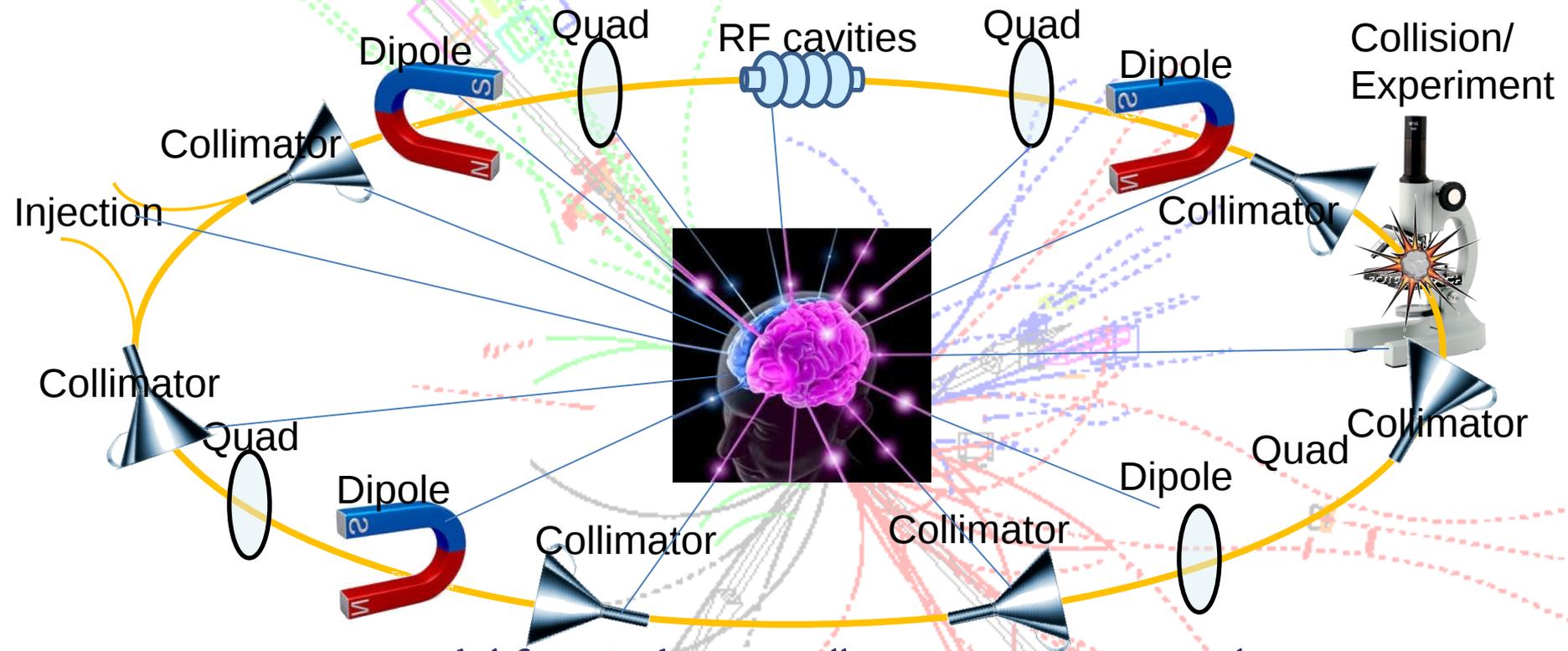
$$2800 * 10^{11} * 8 * 10^{12} *$$

$$1.602 * 10^{-19} \text{ Joules} = 360 \text{ MJ per fascio}$$

[~ 1TGV (400 tons) a 150km/h...]

Selection of 1 in 10,000,000,000,000

Lo schema di un collisore



- Sistema iniezione del fascio di particelle (tipicamente acceleratori più piccoli)
 - Cavità a radio frequenza per accelerare
 - Magneti dipoli (più altri correttori) per mantenere il fascio in traiettoria circolare
 - Esperimenti (rivelatori) nei punti di collisione
- Incontro Masterclass Feltre 5/3/2013

Il Quark-Gluon Plasma

- La J/Ψ è un mesone composto da una coppia quark-antiquark ($c\bar{c}$) legata assieme dalla forza forte
- La produzione di J/Ψ nel QGP è soppressa rispetto agli urti pp a causa della schermatura della forza che lega i due quarks
- Effetto meno evidente a ALICE rispetto a esperimenti a energia inferiore per la possibilità della rigenerazione di J/Ψ dato il grande numero di coppie $c\bar{c}$ prodotte

● Numero di J/Ψ rispetto a quelle prodotte in urti pp

