

Il Bosone di Higgs a tre anni dalla scoperta: risultati e prospettive

Martino Margoni

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

- Ripasso sul Modello Standard
- Lo stato dell'arte sull'Higgs (ma non solo...) e le prospettive per i prossimi anni:

Il Bosone di Higgs

La fisica del quark b

La Supersimmetria

Il Quark/Gluon Plasma

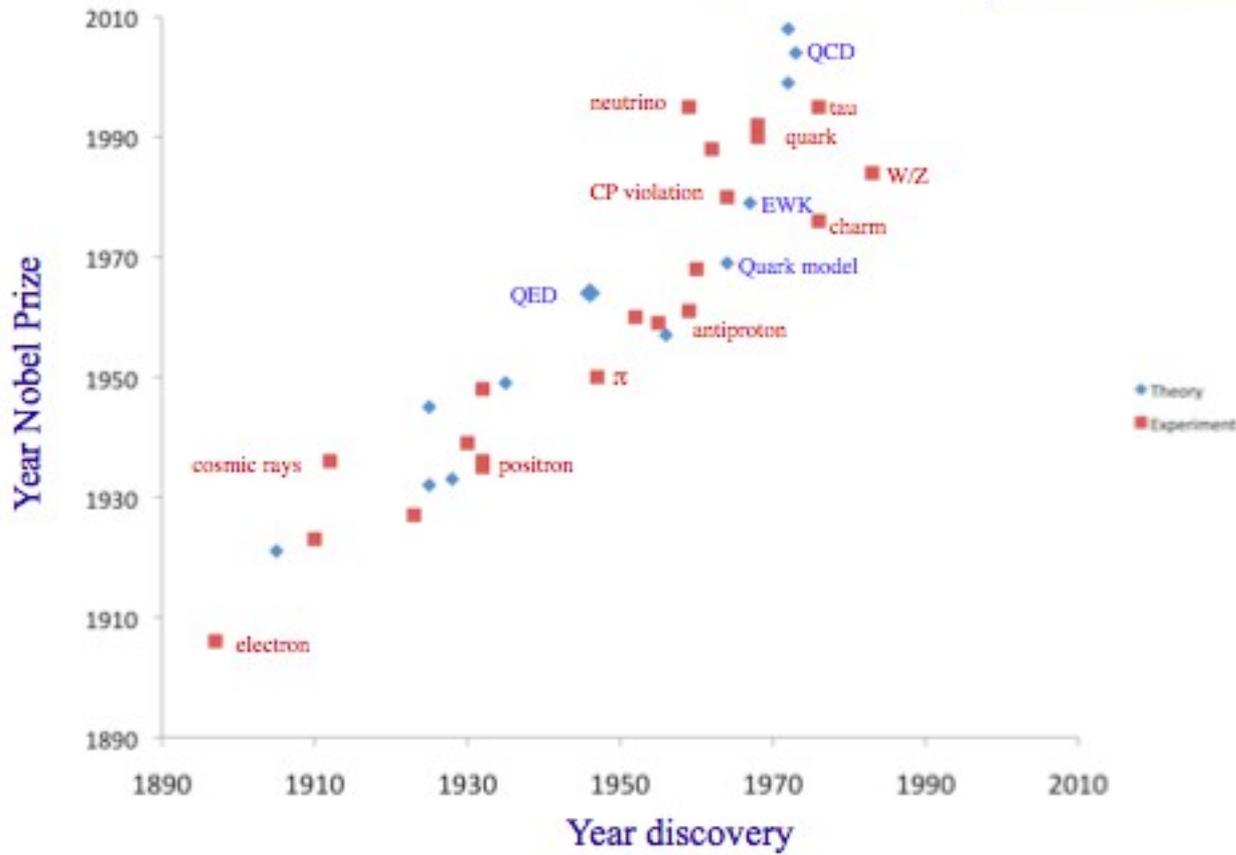
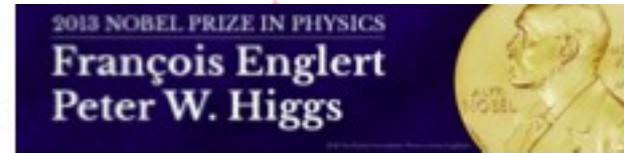
The background of the slide is a complex network of colorful lines and shapes, representing particle tracks and interactions. The lines are in various colors including green, blue, red, and grey, and are both solid and dotted. Some lines form loops or spirals, while others are straight or slightly curved. There are also small, multi-colored rectangular and square shapes scattered throughout, some of which appear to be part of the tracks or represent specific interaction points.

Il Modello Standard delle Particelle e Interazioni

Il Modello Standard

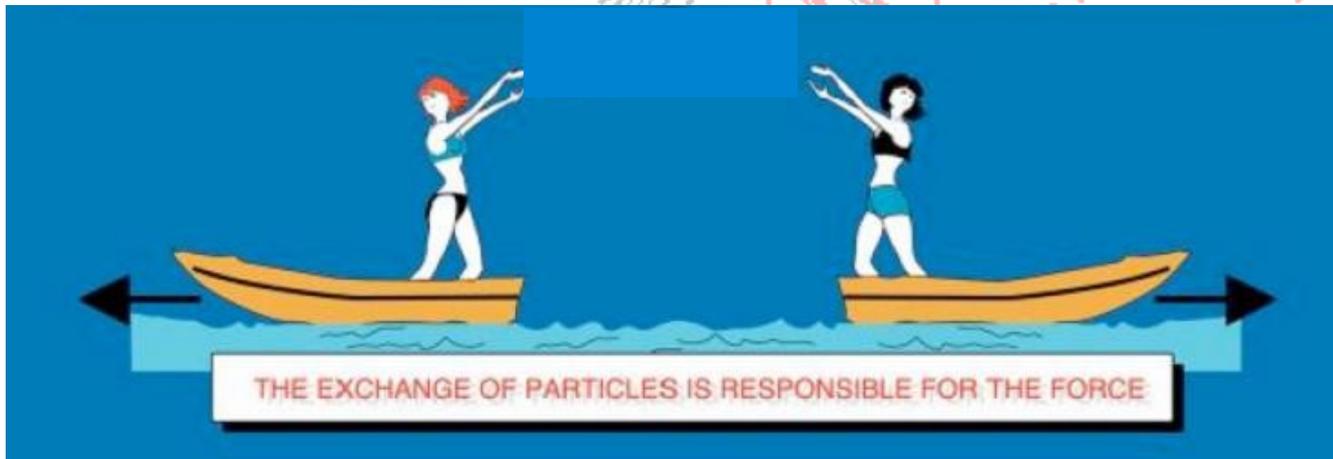
- È la teoria che descrive le particelle elementari e le loro interazioni. Prevede due generi di particelle:
 - Particelle materiali: la maggior parte delle particelle materiali, gli **adroni**, è composta di particelle “più elementari” (quarks). Un'altra classe di particelle materiali elementari, i **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).

Più di 30 premi Nobel



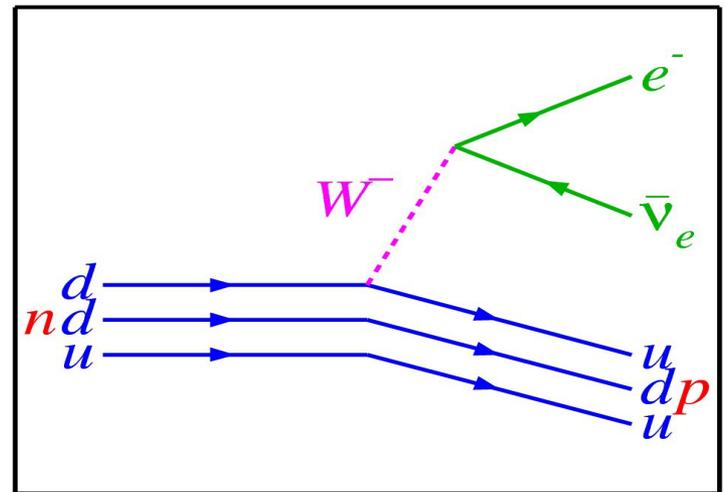
Effetti non visibili

- 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.



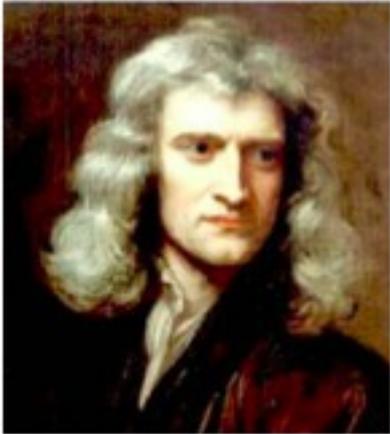
Il Problema dell'origine della massa e il meccanismo di Higgs

m



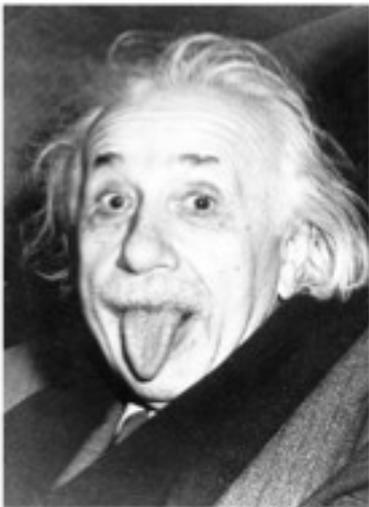
m come massa

Il Problema dell'origine della massa



Newton : $F = ma$

L'accelerazione di un corpo sottoposto all'azione di una forza F e' inversamente proporzionale alla sua massa. Equivalenza tra massa inerziale e gravitazionale



Einstein : $E = mc^2$

Energia e materia sono equivalenti. Particelle senza massa viaggiano alla velocita' della luce. Particelle massive viaggiano piu' lente. La massa curva lo spazio-tempo

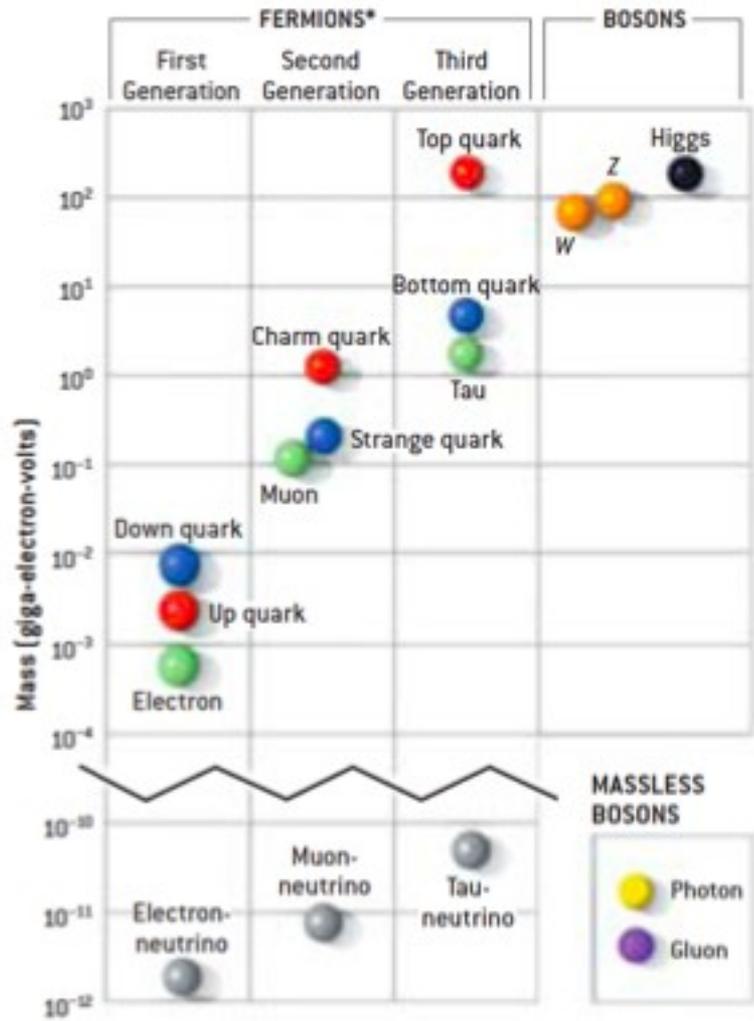
Il Problema dell'origine della massa

- La definizione di Newton della massa e' andata bene agli scienziati per piu' di 200 anni
- La scienza ha descritto come si comporta la massa prima di capire il perche'
- Questo perche' e' oggi un attivissimo campo di ricerca

Scoprire l'origine della massa completa e estende la nostra comprensione di tutte le particelle elementari e delle loro interazioni

16/72

Il Problema dell'origine della massa



Gli esperimenti hanno misurato le masse delle particelle elementari

Non c'e' nessuna regolarita'

I neutrini sono molto leggeri

L'elettrone è 350.000 volte più leggero del quark più pesante

Il fotone è privo di massa ($m = 0$), ma bosoni W e Z pesano circa come un atomo di argento!

Il Problema dell'origine della massa

- La prima formulazione del Modello Standard presentava un problema fondamentale: non esisteva un meccanismo per generare la massa delle particelle
- Tutte le particelle erano senza massa (e quindi si sarebbero dovute muovere alla velocità della luce)!
- Senza massa noi non ci potremmo essere...
- Qual è 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:

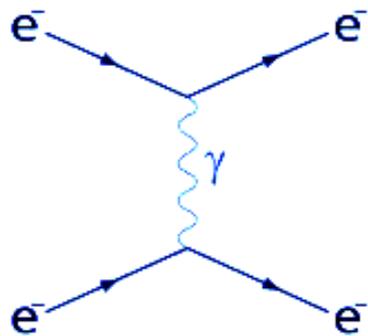


Grafico di Feynman della diffusione Moeller $e^-e^- \rightarrow e^-e^-$ mediata da scambio di fotone (γ)

Interazione Debole

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

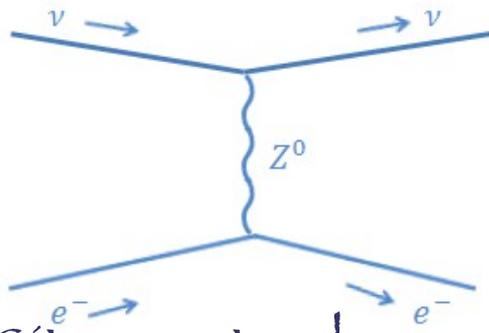
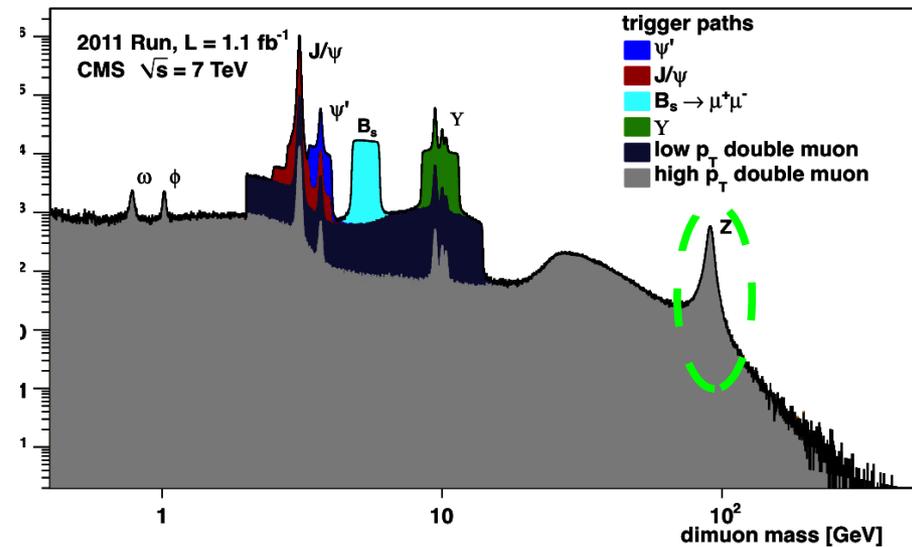
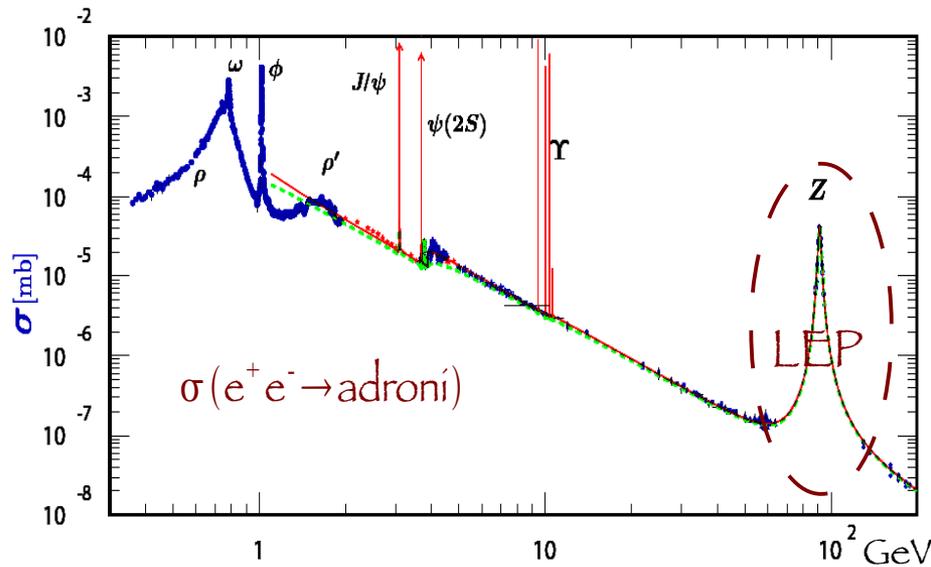


Grafico di Feynman della diffusione $\nu e^- \rightarrow \nu e^-$ mediata da scambio del vettore neutro (Z^0)

- 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):

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

- 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:

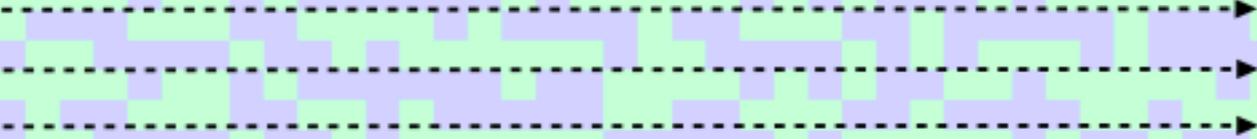
$$\mathcal{L} = W_{\mu} \left(\frac{\partial^2}{\partial t^2} - \nabla^2 \right) W^{\mu} + g^2 \phi W^2$$

- L'interazione delle varie particelle con questo campo le frena e genera la loro massa.
- In questo modo non ho più calcoli che danno ∞ !

Il Meccanismo di Higgs in tre figure

Nel vuoto disordinato del Modello Standard tutte le particelle si muovono alla velocità della luce !

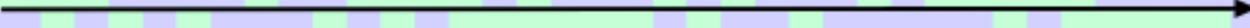
gravitone
fotone
W/Z



top



elettrone



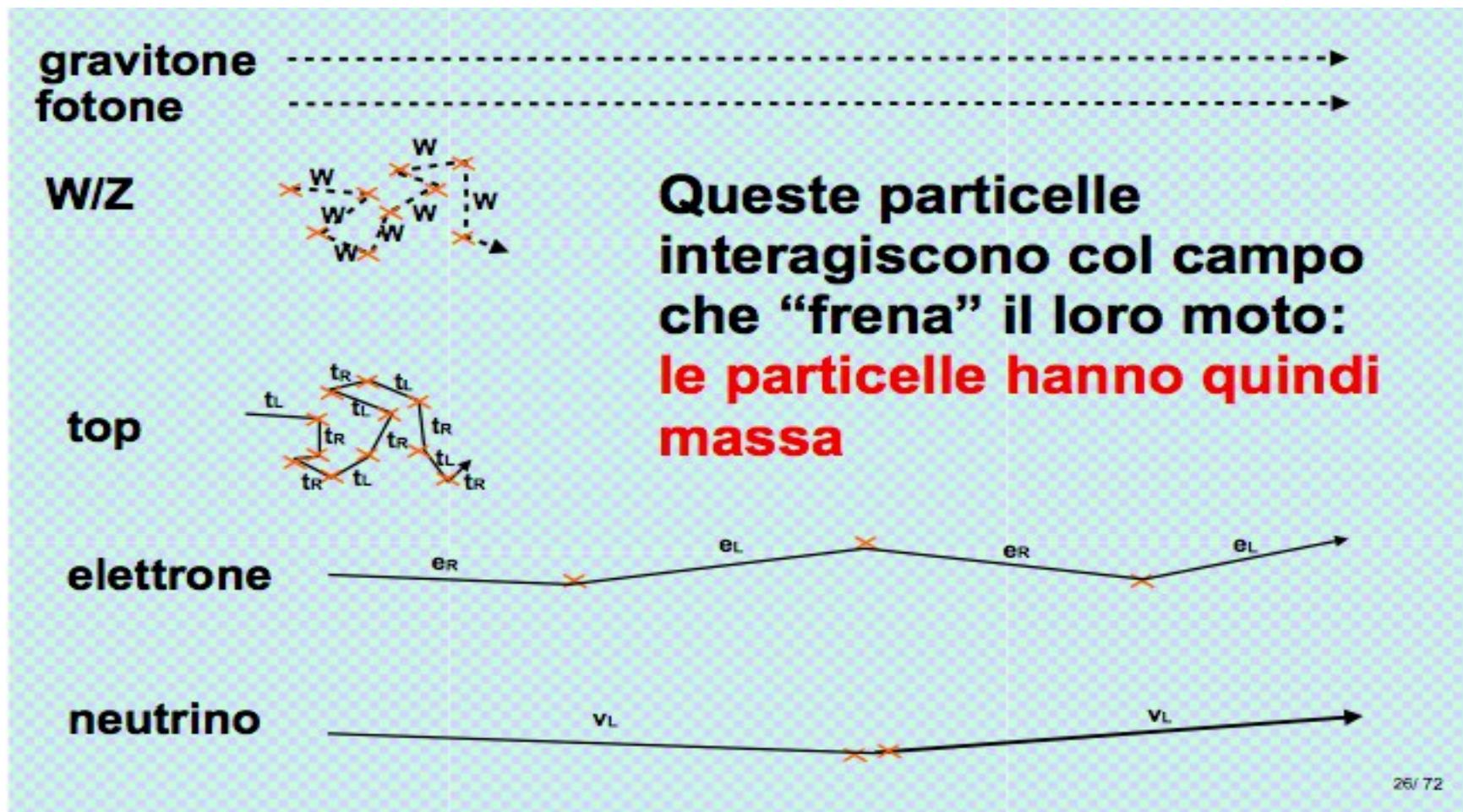
neutrino



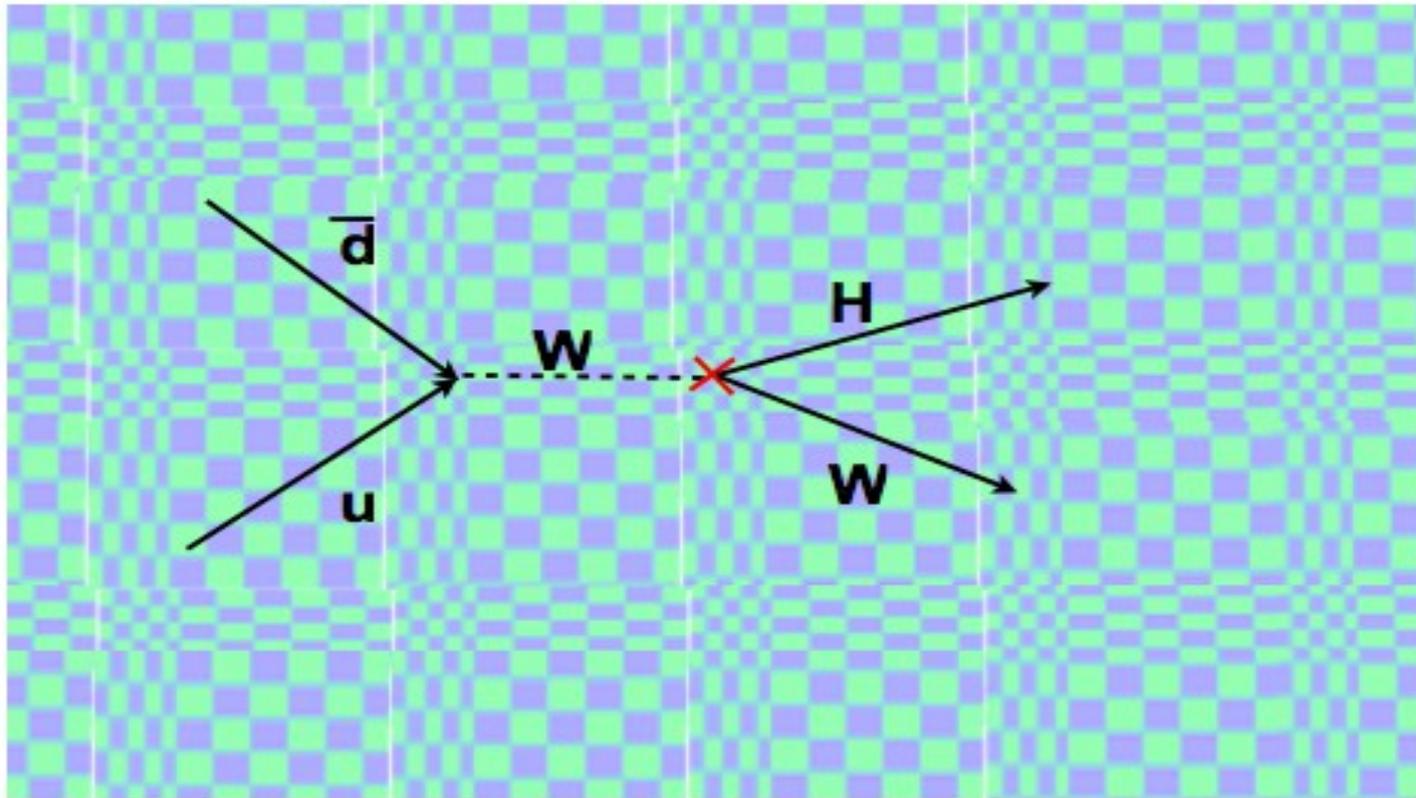
22/72

Il Meccanismo di Higgs in tre figure

Nel vuoto permeato dal campo di Higgs, alcune particelle vanno più lente della luce



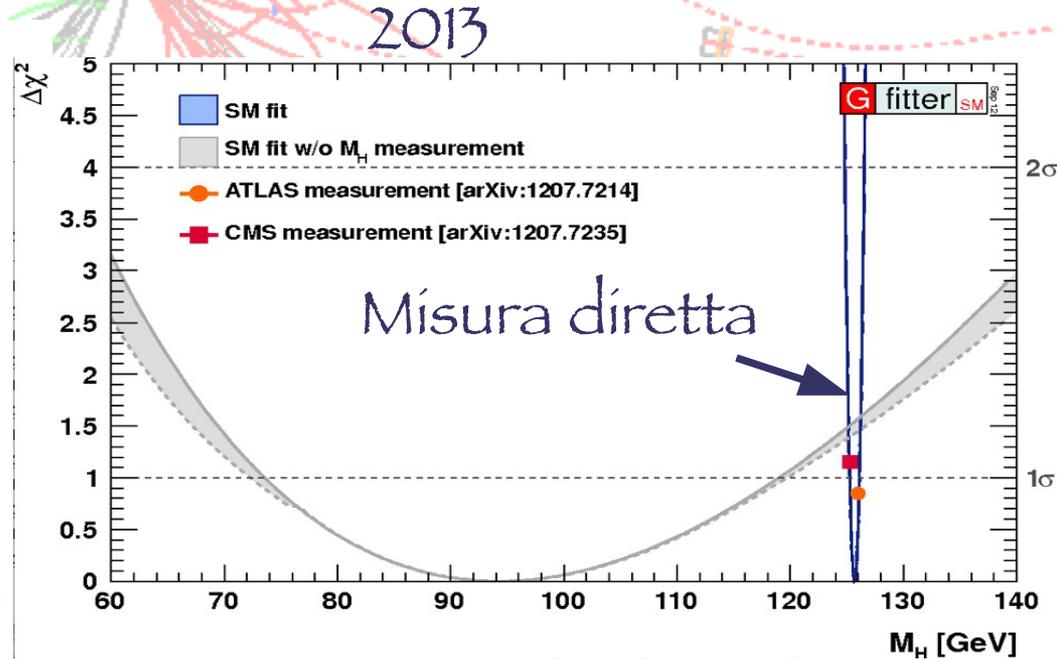
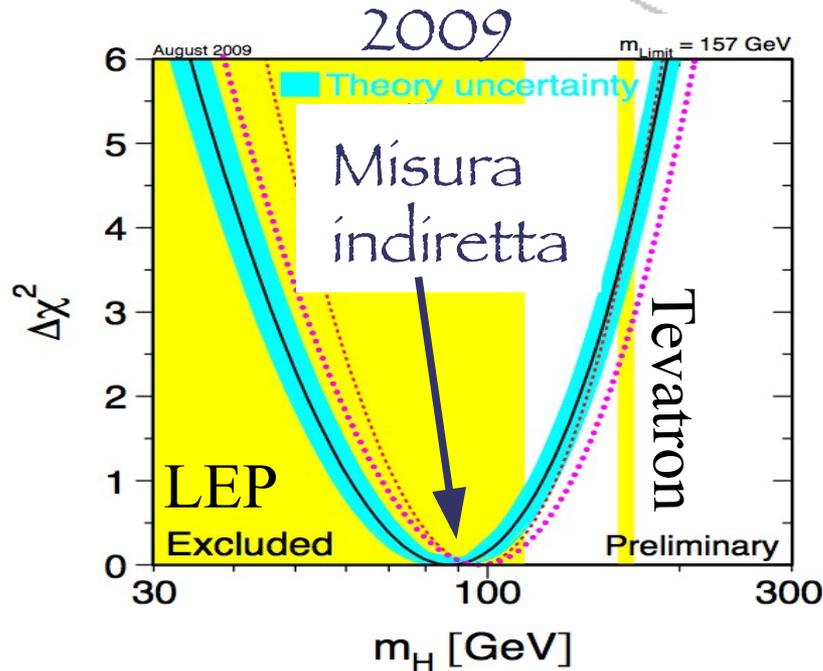
Il Meccanismo di Higgs in tre figure



Se iniettiamo nel campo abbastanza energia reale al momento giusto ed al posto giusto possiamo **materializzare il Bosone di Higgs !**

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:



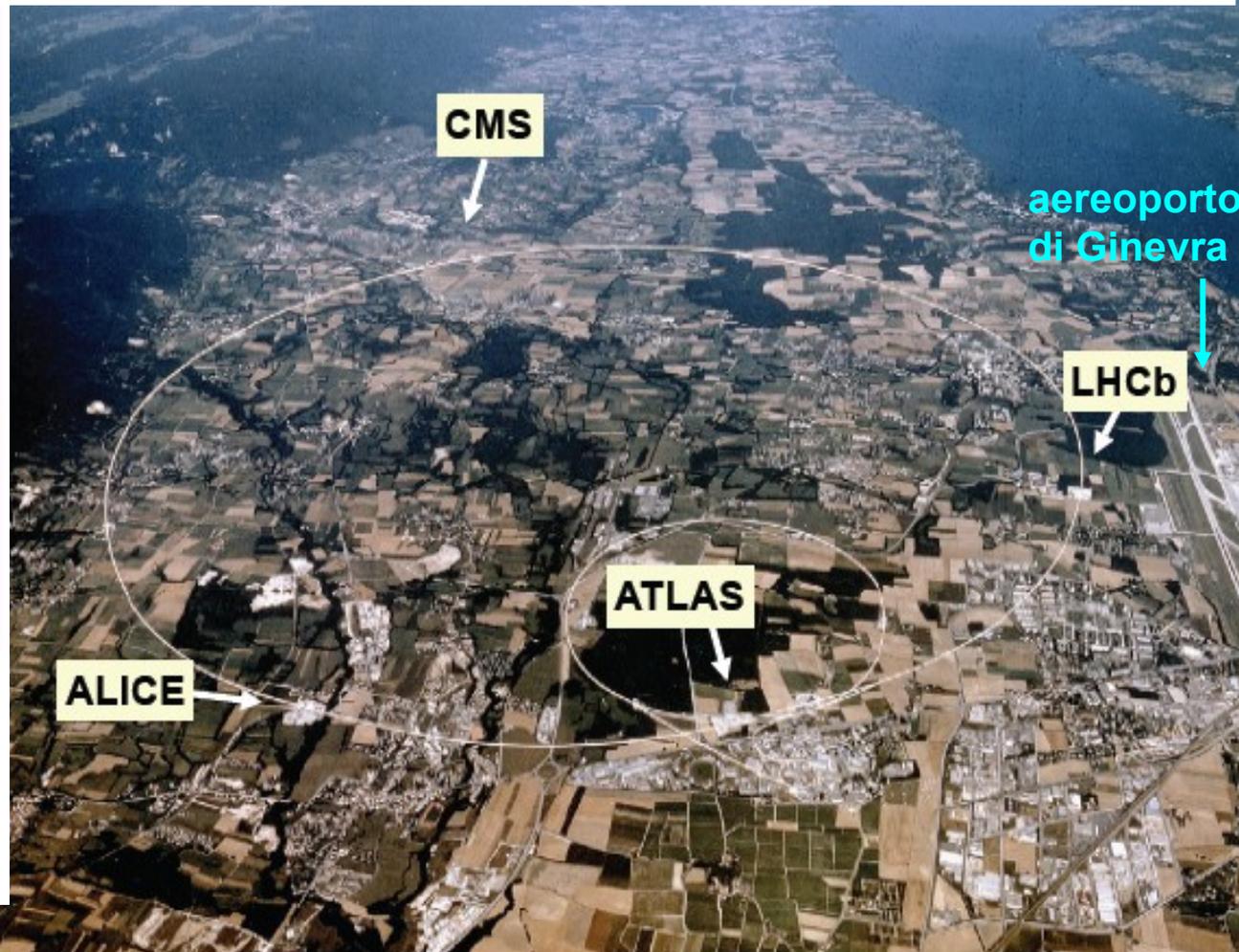
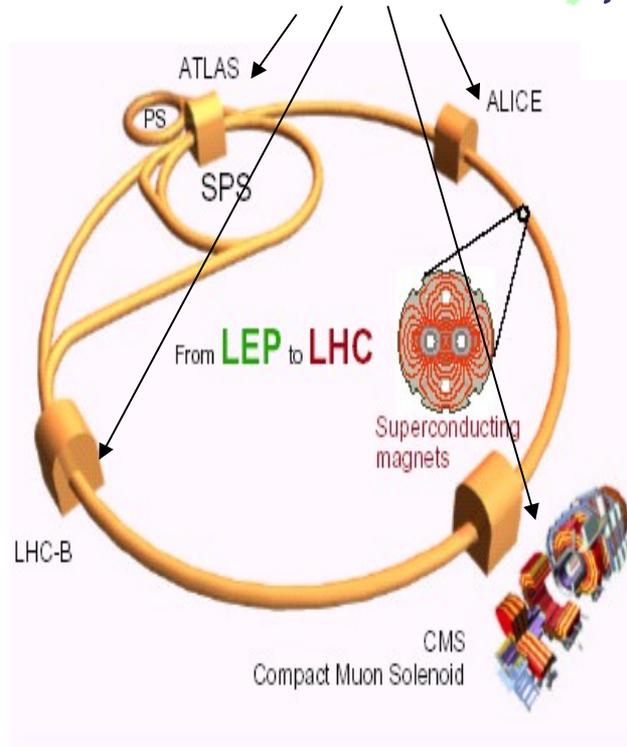


Il Large Hadron Collider del CERN e gli esperimenti

Il Large Hadron Collider

4 esperimenti
("rivelatori")

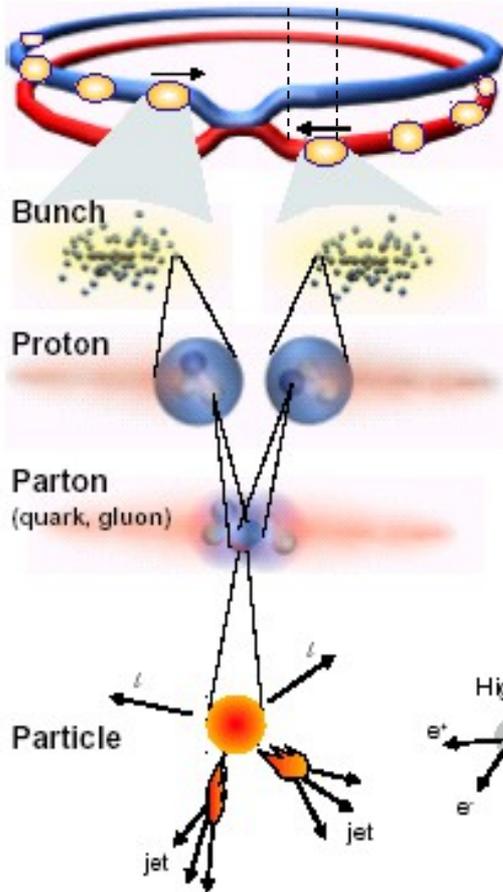
27 km di circonferenza (stesso tunnel del collisore
Precedente, il LEP, che accelerava elettroni e positroni)



	Beams	Energy	Luminosity
LEP	e+ e-	200 GeV	$10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
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 realtà, con una struttura a ‘treni’)

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

~ 10^{11} protoni/pacchetto

$$E_{\text{beam}} \approx 7 \text{ TeV} \quad (1 \text{ TeV} \approx 10^{12} \text{ eV})$$

$$2800 * 10^{11} * 7 * 10^{12}$$

$1.602 * 10^{-19}$ Joules = 315 MJ per fascio

[freccia rossa (400 tons) a 150km/h...]

Higgs

SUSY.....

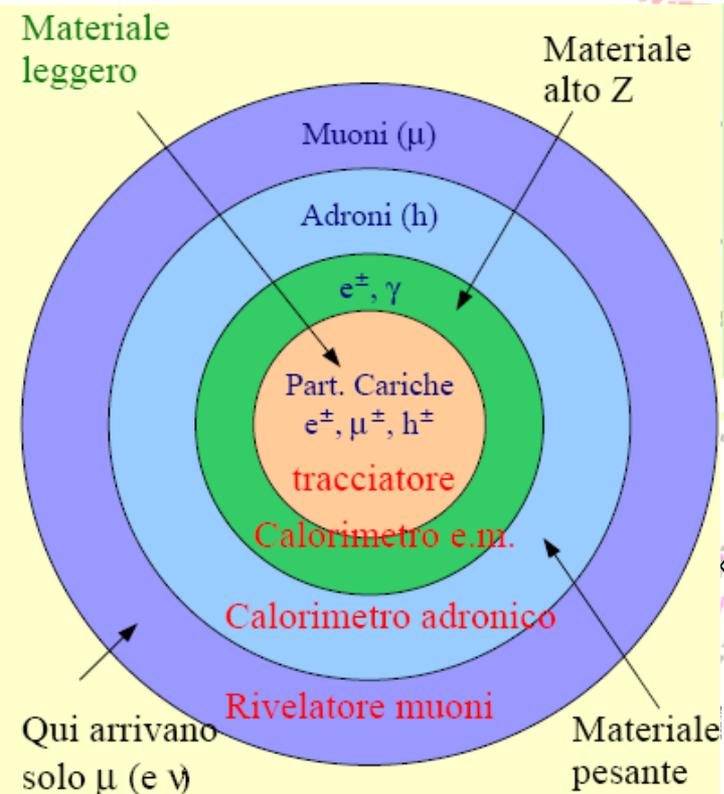
Selection of 1 in 10,000,000,000,000

I rivelatori a LHC: un difficile compito

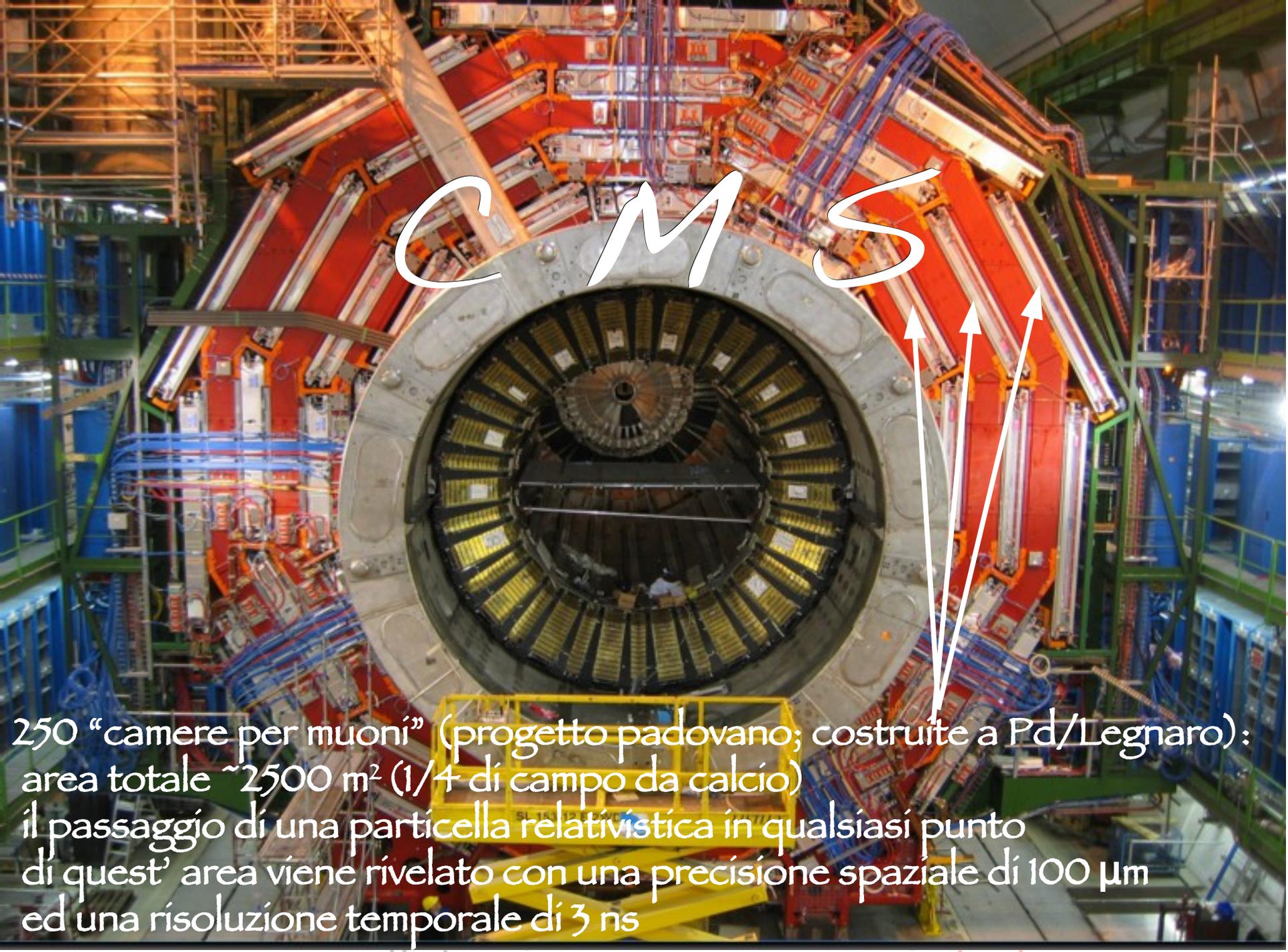
Date le energie altissime, e l'enorme numero di particelle prodotte, servono rivelatori:

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

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



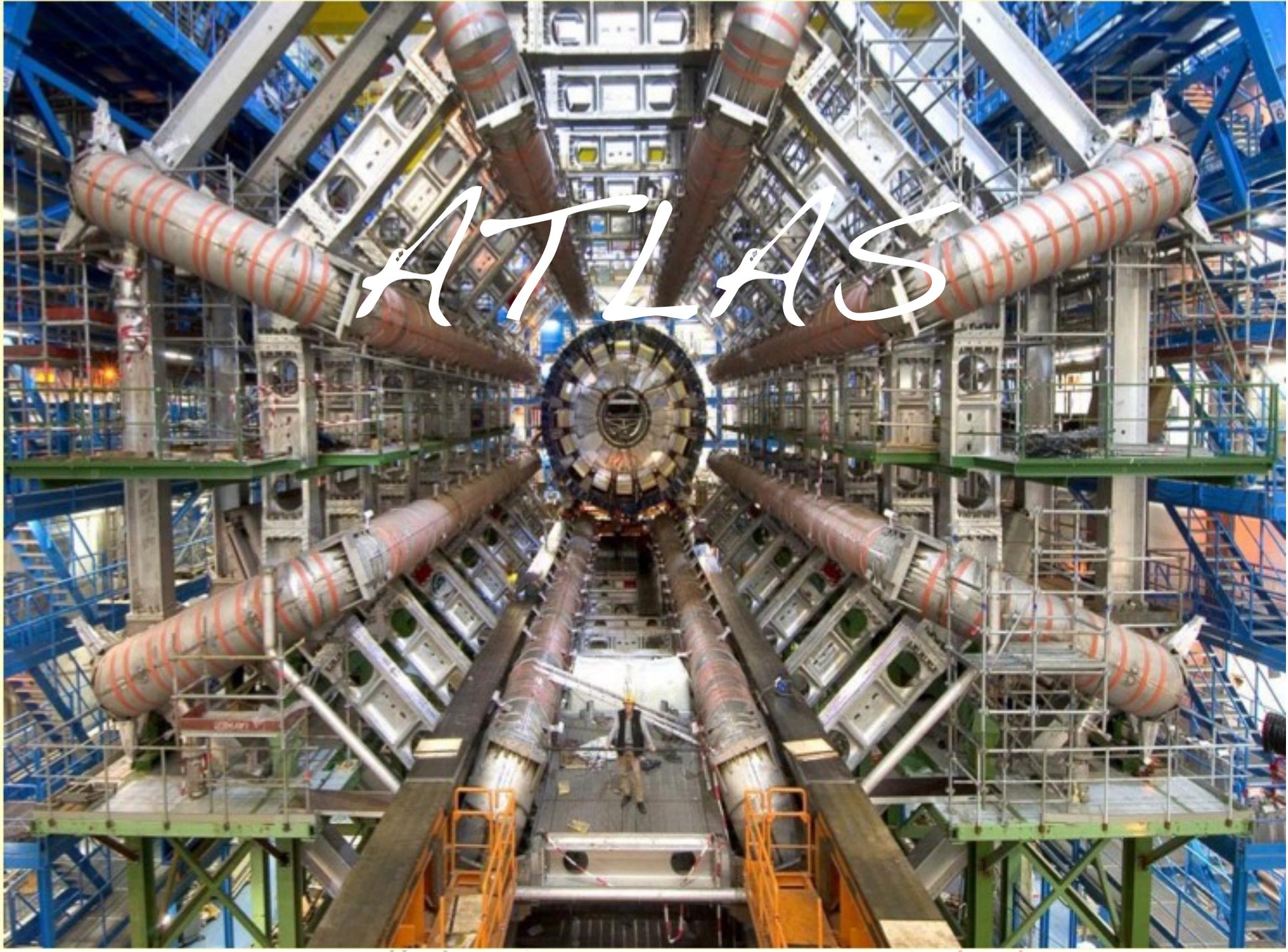
← tipica struttura “a cipolla” →



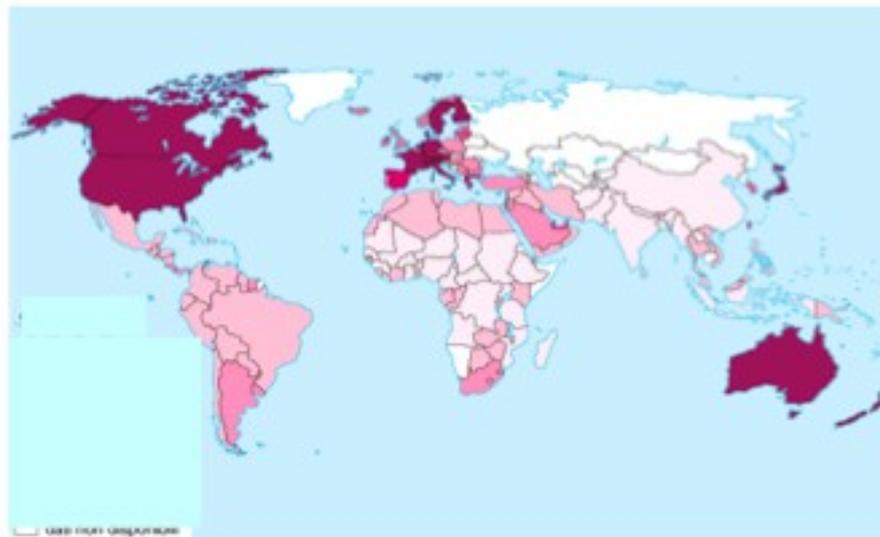
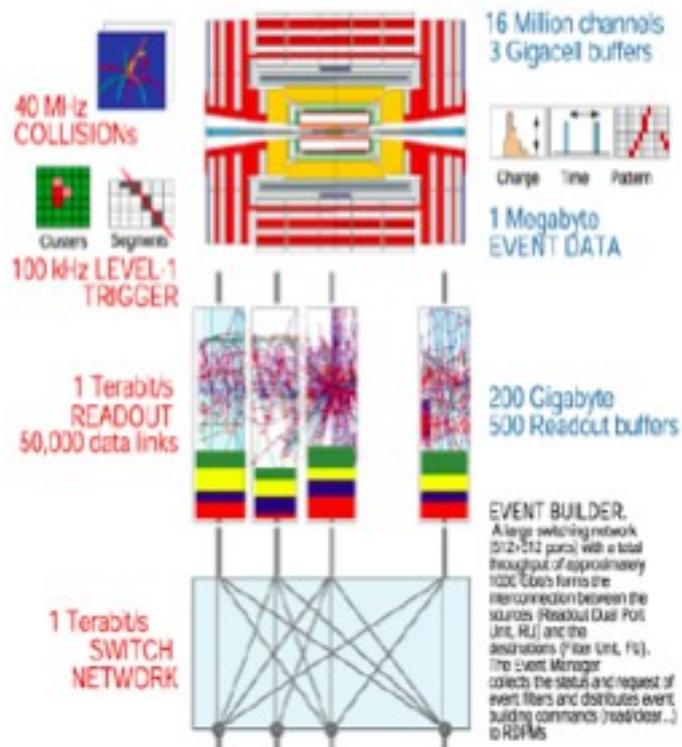
CMS

250 "camere per muoni" (progetto padovano; costruite a Pd/Legnaro):
area totale $\sim 2500 \text{ m}^2$ (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 $100 \mu\text{m}$
ed una risoluzione temporale di 3 ns

ATLAS



Il traffico di dati generato da CMS



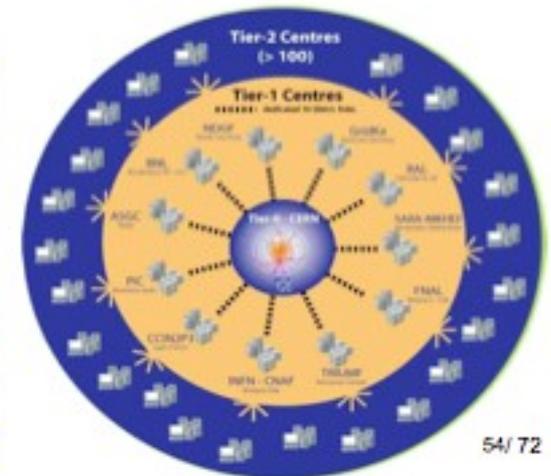
.....
(~ 500 Gigabit/sec) e' equivalente a tutto il traffico mondiale istantaneo di telefonia

Worldwide Computing GRID

La Grid e' una infrastruttura che permette l'accesso trasparente alla potenza di calcolo ed allo storage dei dati distribuiti in tutto il mondo

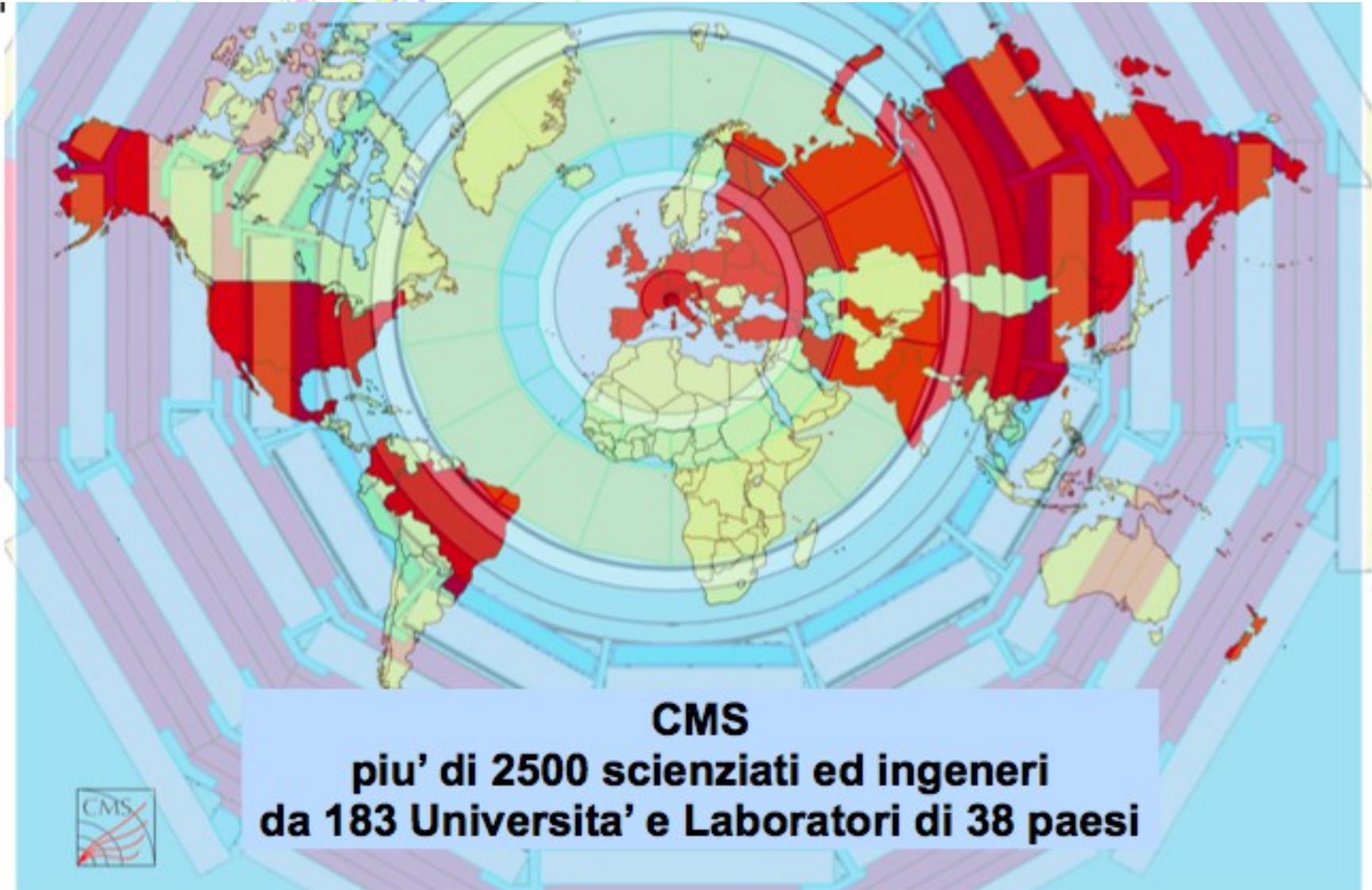
Grid collega 100,000 computers in 34 paesi con linee di trasmissione dati ultraveloci

In un anno milioni di Gigabytes di dati viaggiano attorno al mondo

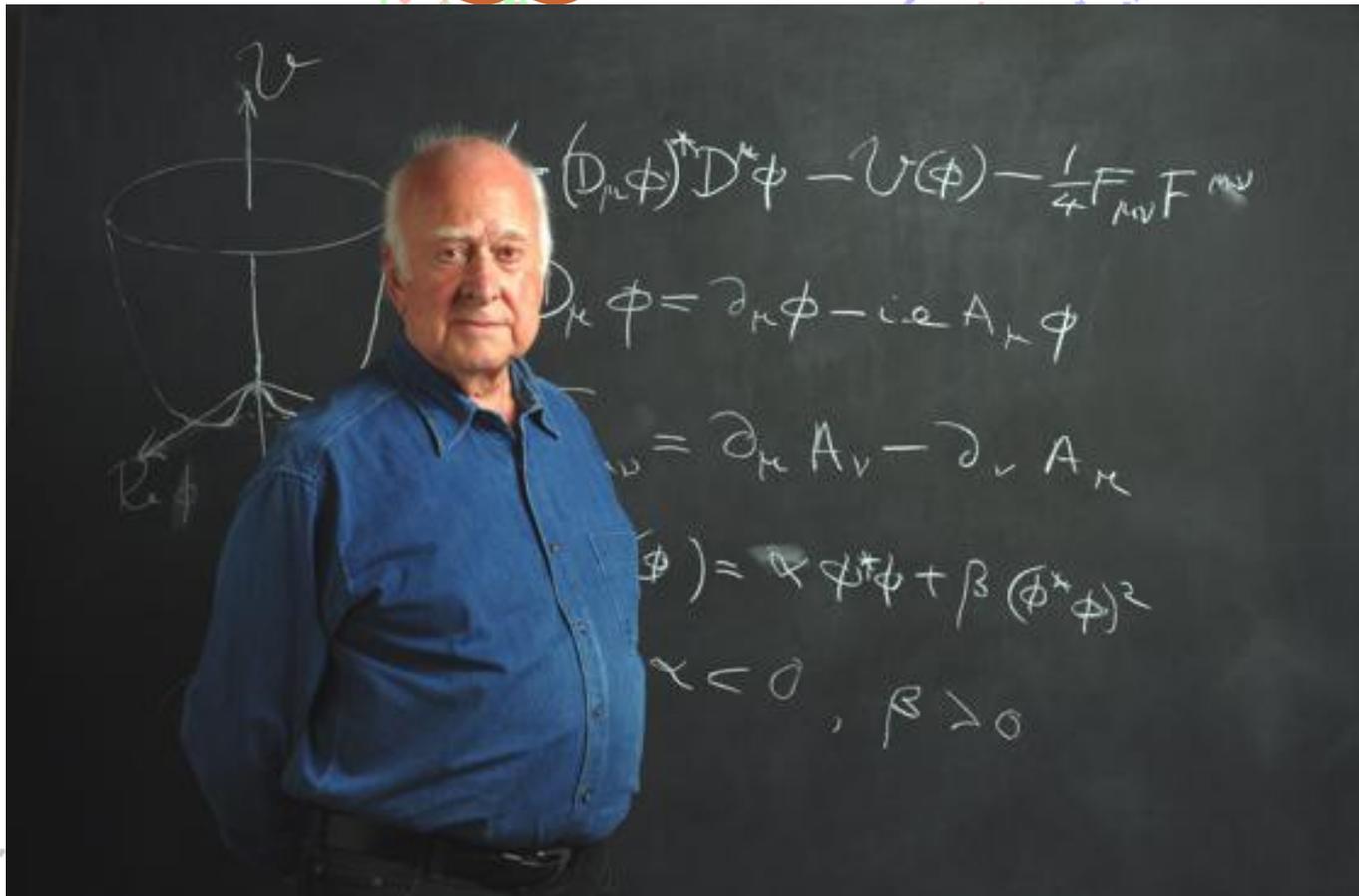


54/72

LHC: una collaborazione mondiale



La ricerca del Bosone di Higgs a LHC



Higgs: Come lo cerco?

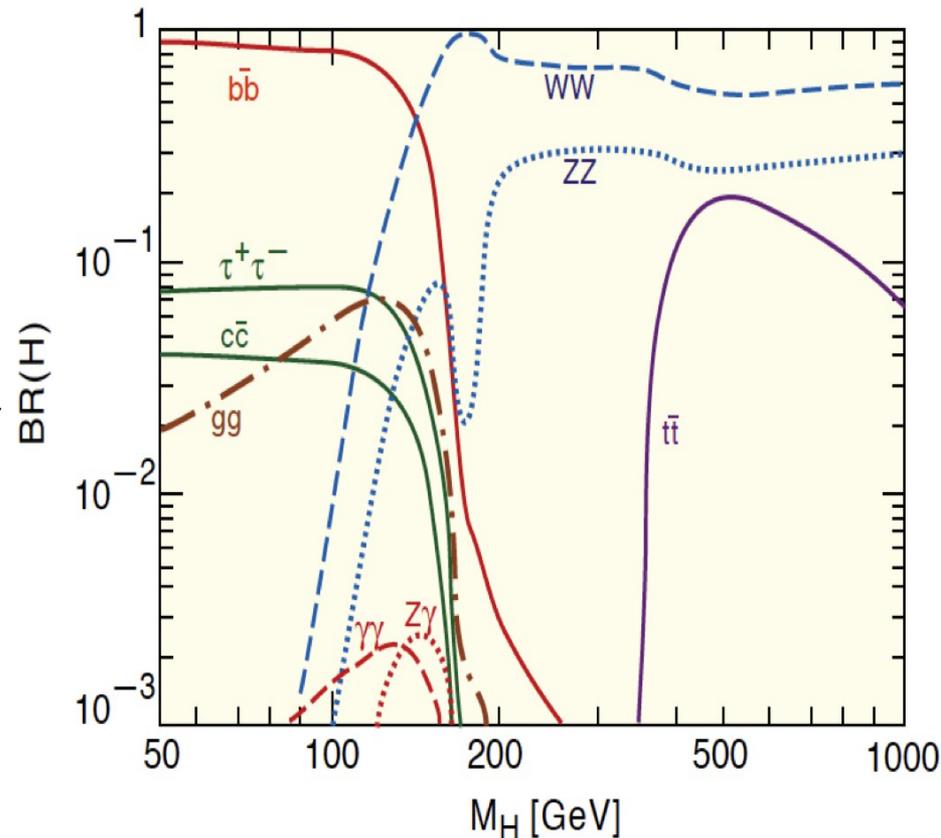
- Il Bosone di Higgs puo' essere ricercato in svariati modi legati ai diversi possibili decadimenti

- L'efficacia della ricerca dipende:

- dall'accoppiamento dell'Higgs con i suoi prodotti di decadimento
- dall'entita' dei processi parassiti simili al segnale ricercato

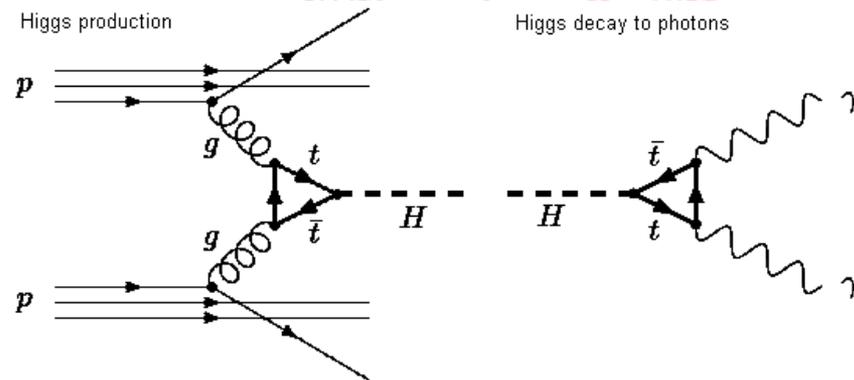
Incontro Verona 19/2/2015

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



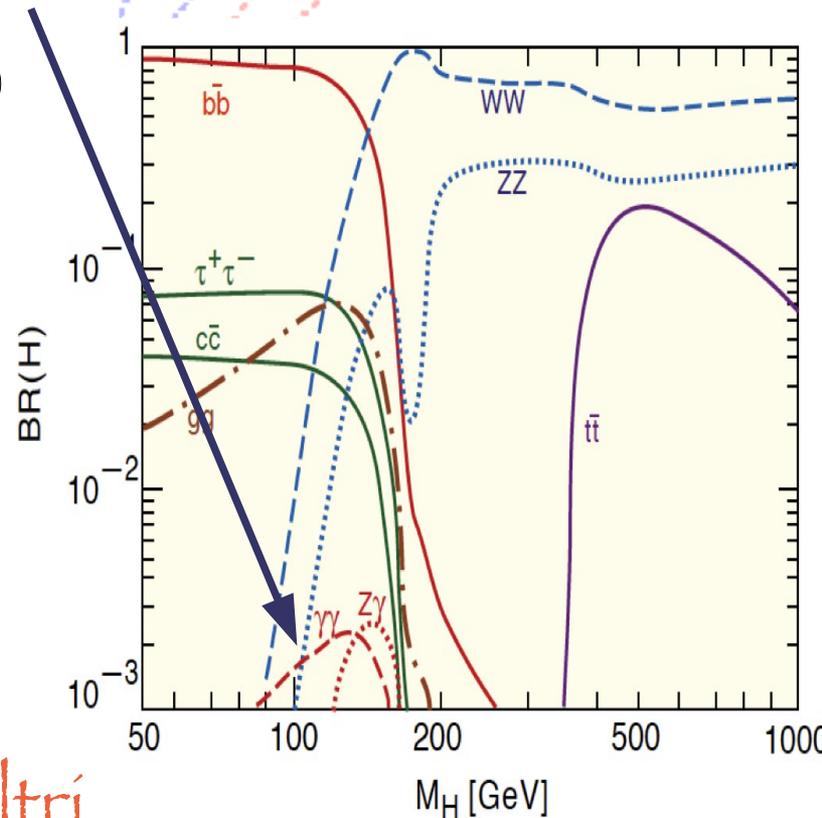
Un esempio: $H \rightarrow \gamma\gamma$

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 😊



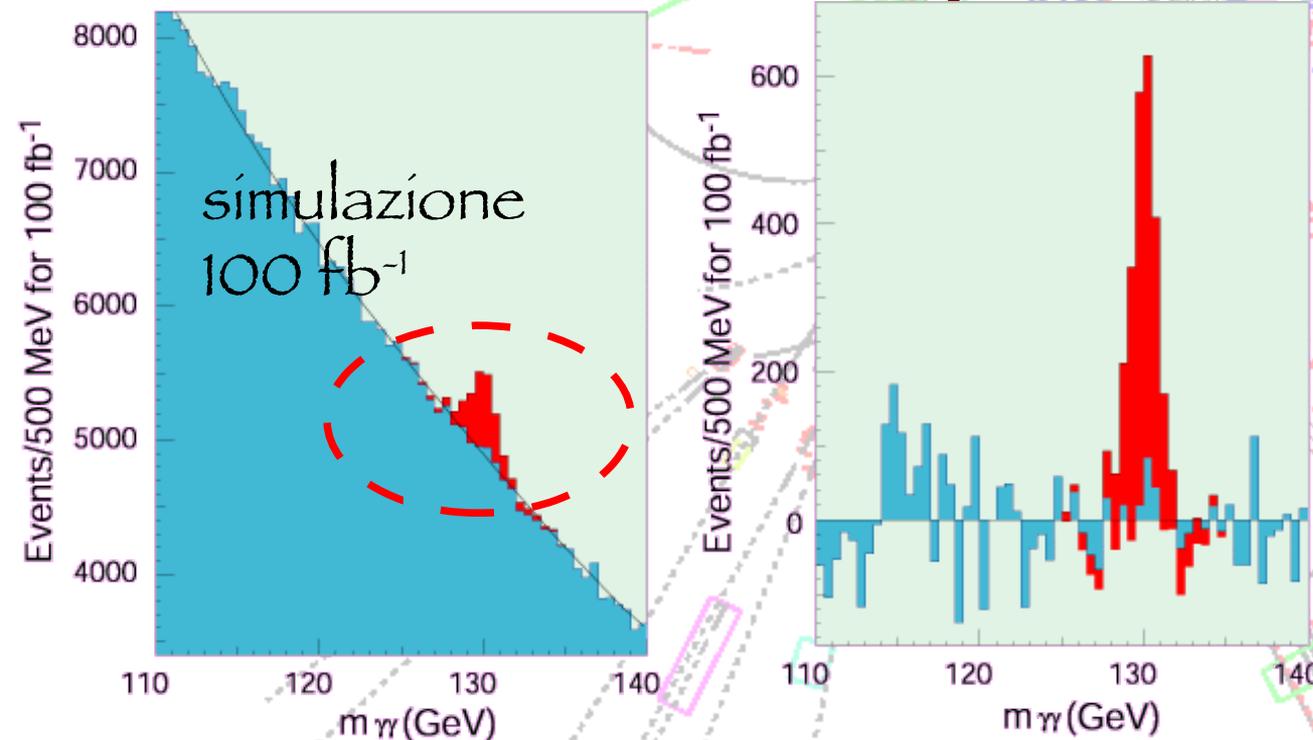
Perche` vi mostro questo e non altri canali piu` promettenti?

La risposta alle pagine seguenti...

$$\cancel{H} \rightarrow \gamma\gamma$$

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

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



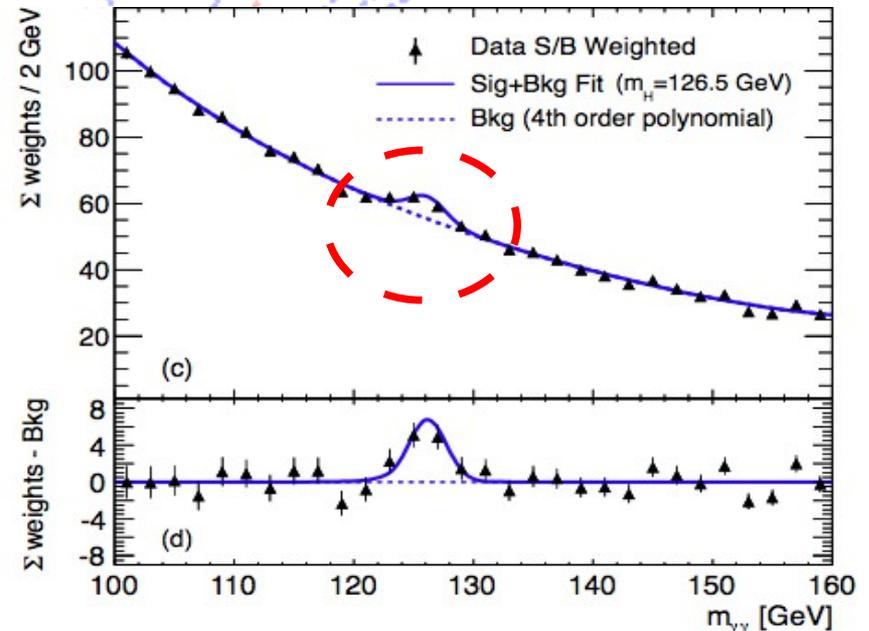
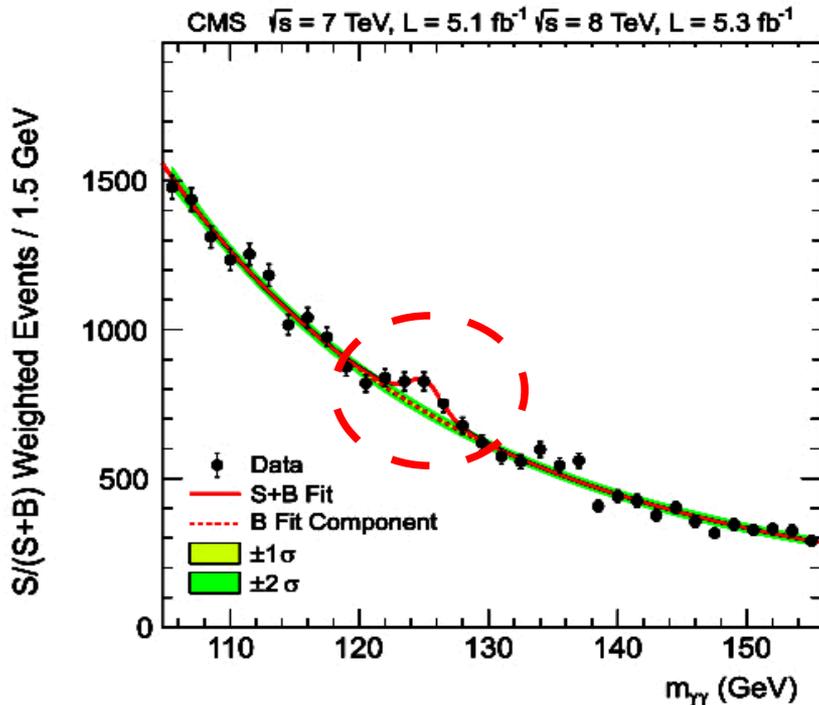
Attenzione: questa è la simulazione. Se l'avessi trovato, dovrei vedere qualcosa di simile all'istogramma rosso alla pagina seguente...

$$H \rightarrow \gamma\gamma$$

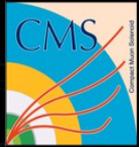
- C'è un eccesso per $m_H \sim 125$ GeV: Trovato!!

CMS

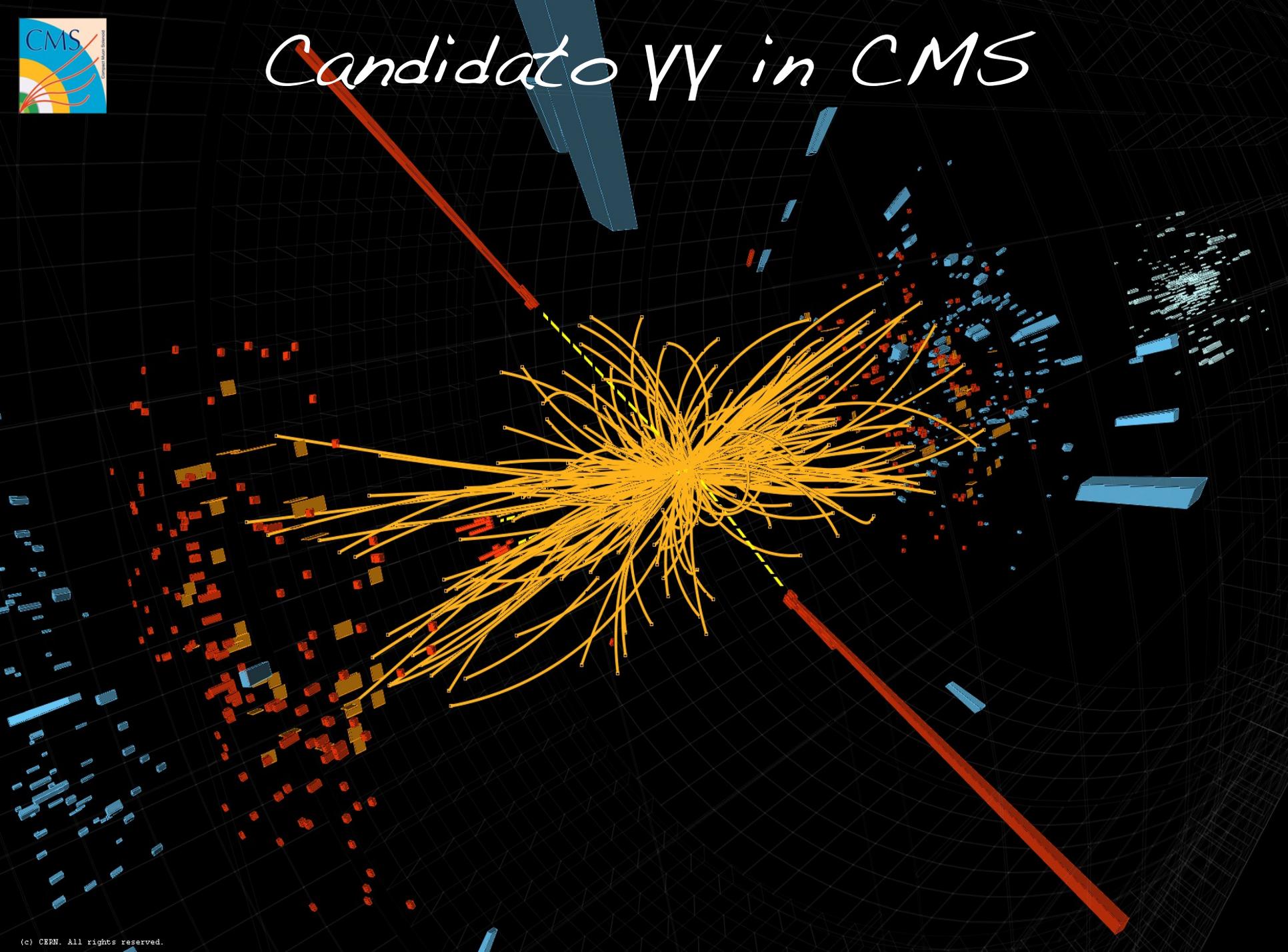
ATLAS



- Pur essendo un “canale di decadimento” con bassa probabilità, il segnale è molto pulito e la “risoluzione” in massa è elevata

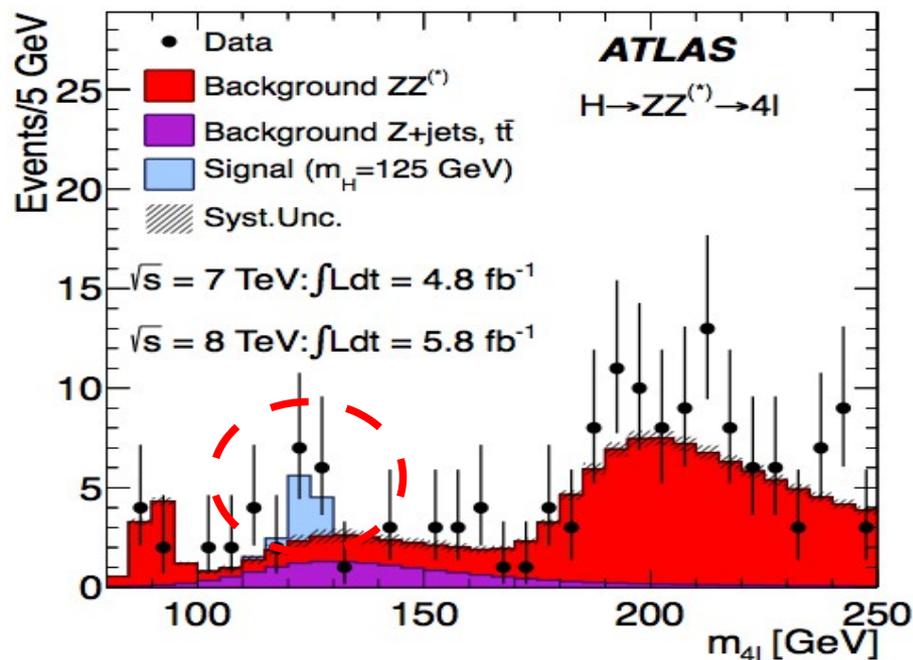
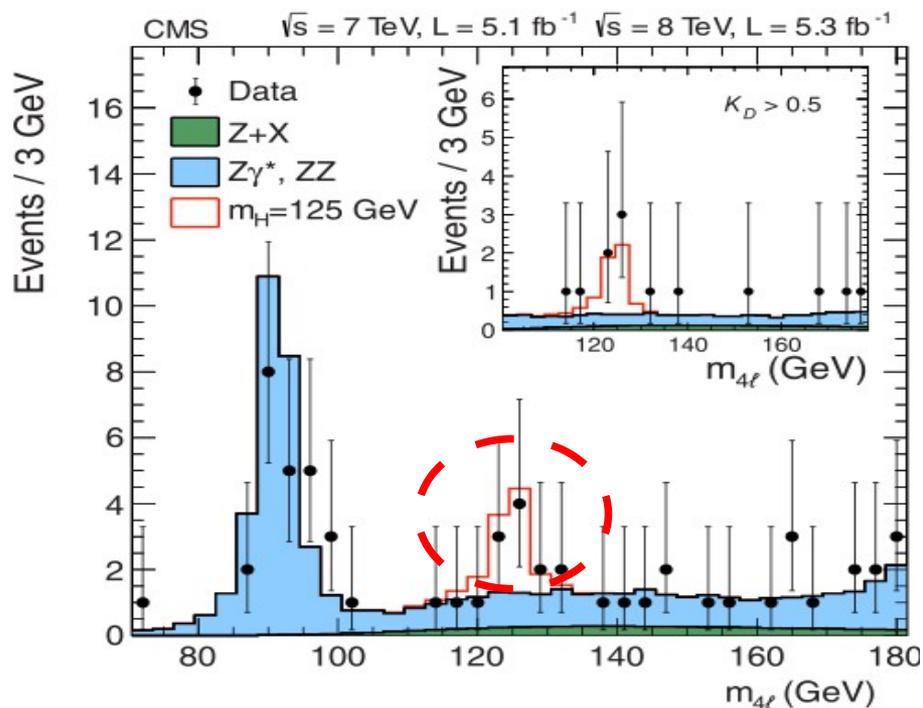


Candidate $\Upsilon\Upsilon$ in CMS



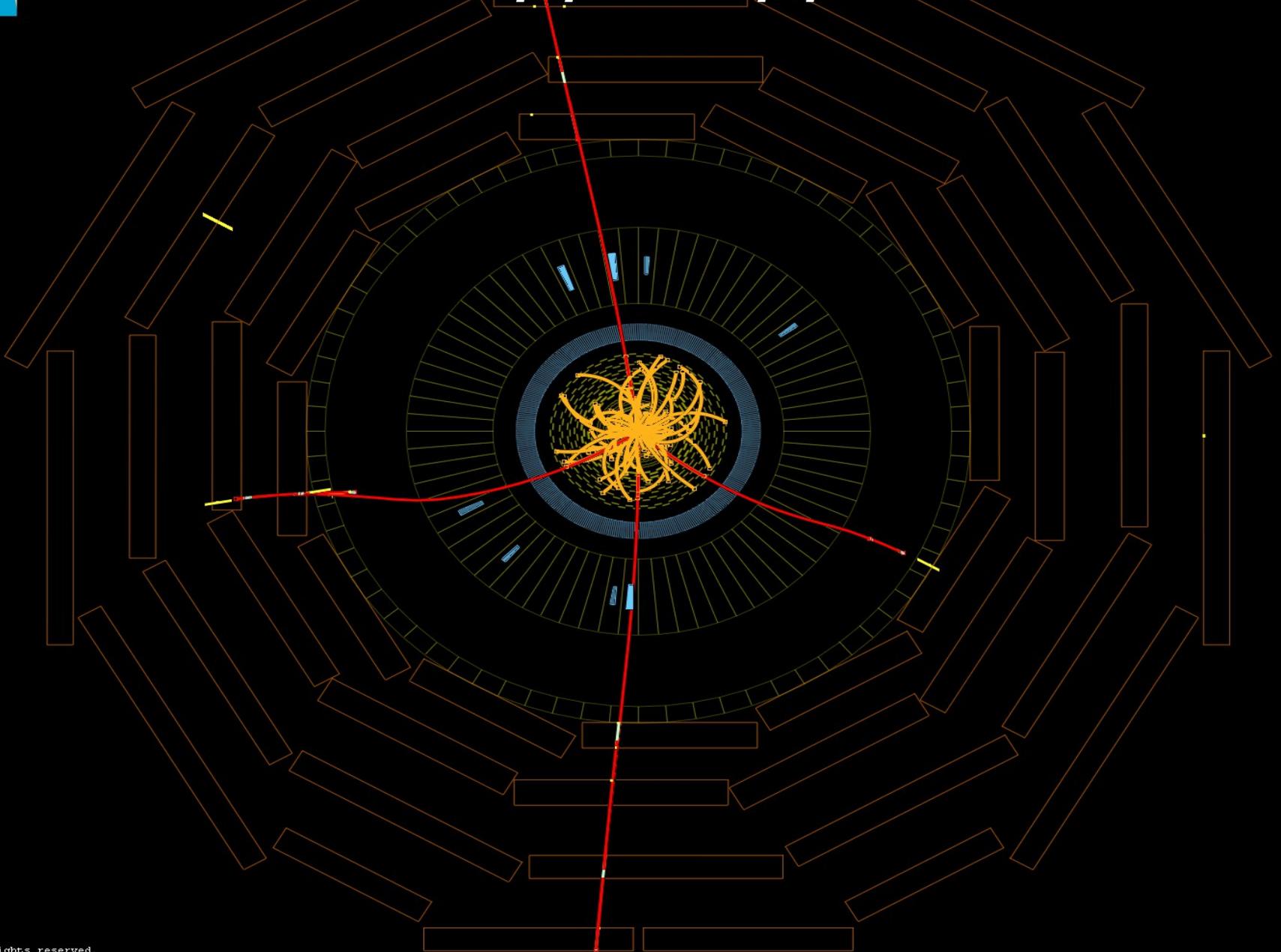
Un altro esempio: $H \rightarrow ZZ$

- 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

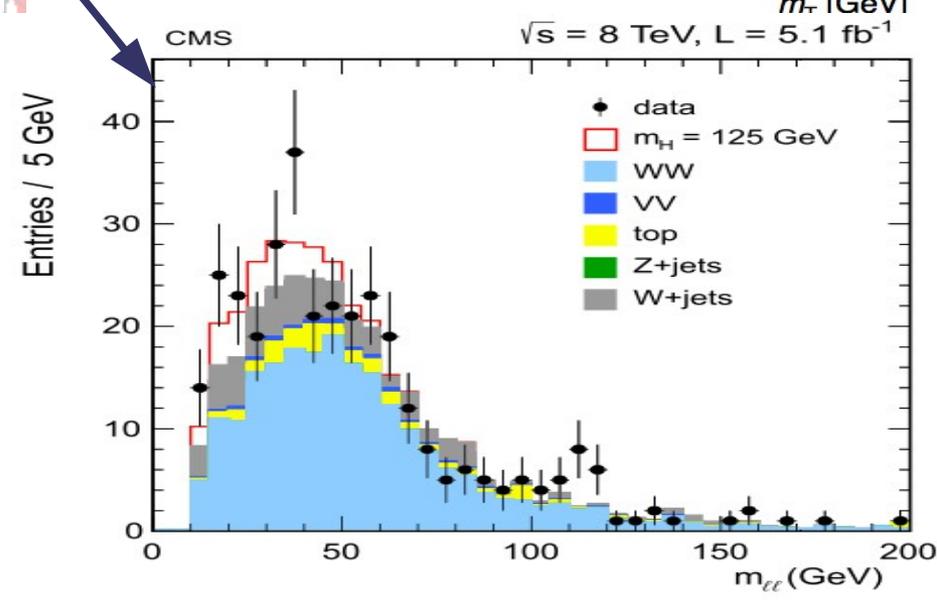
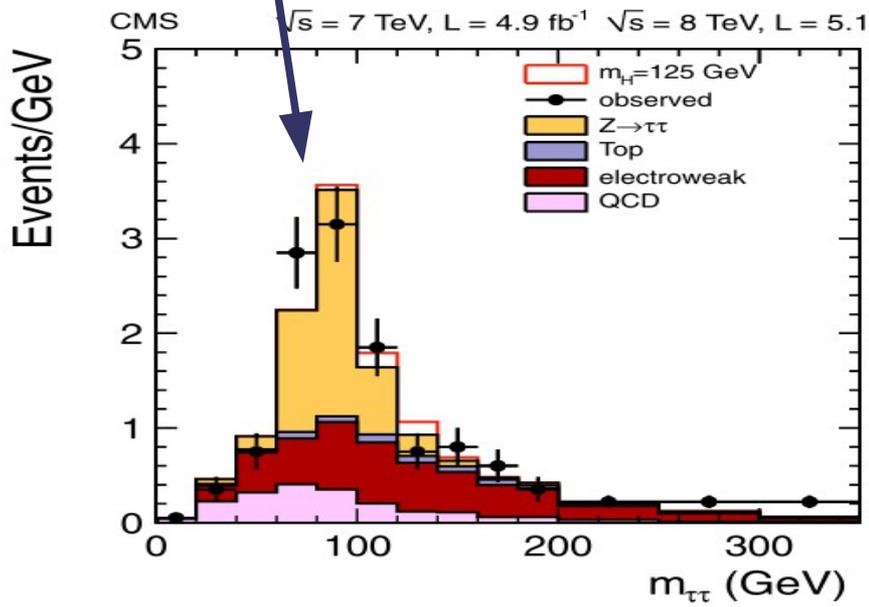
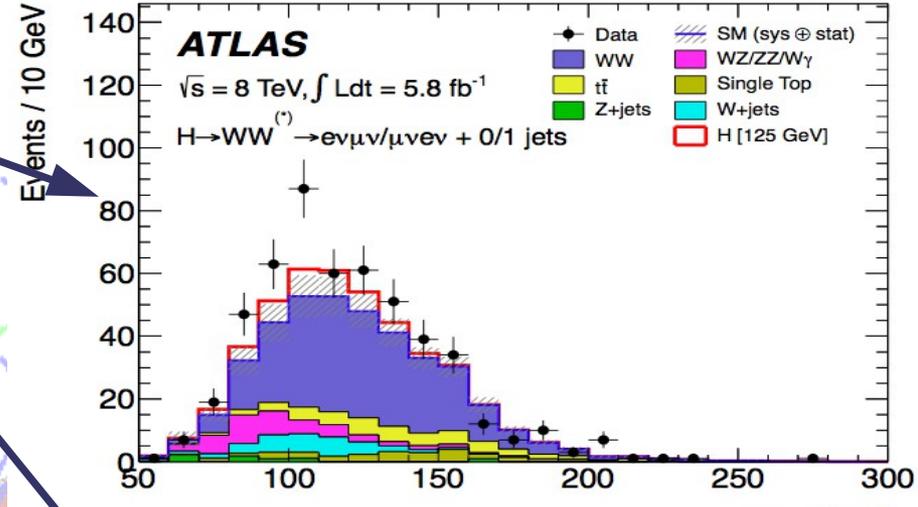
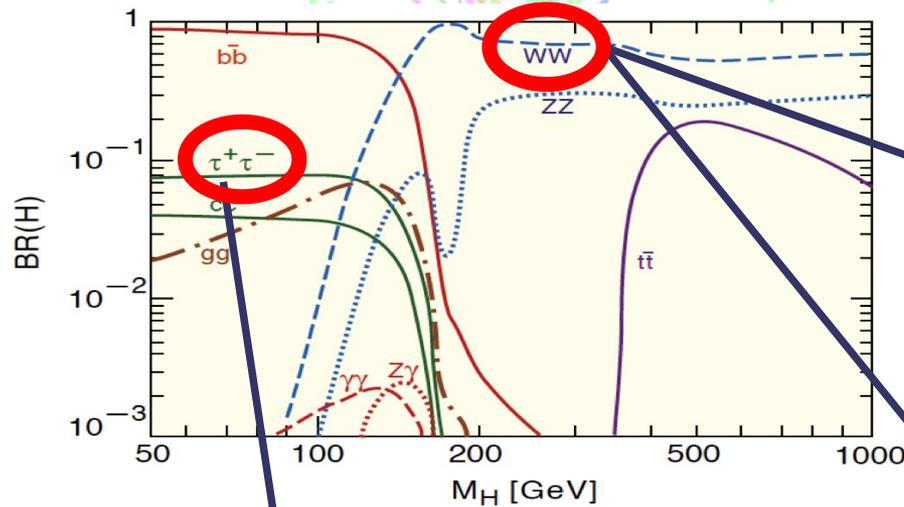




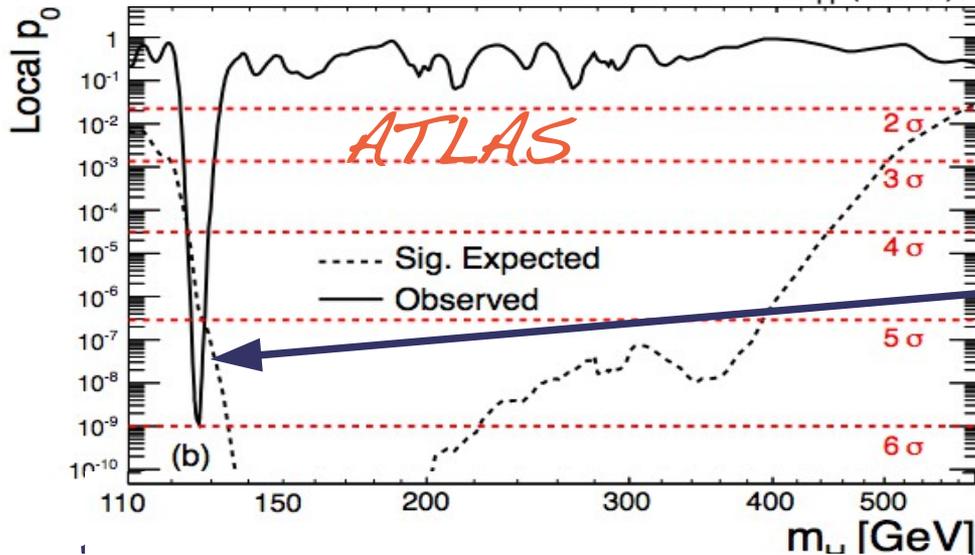
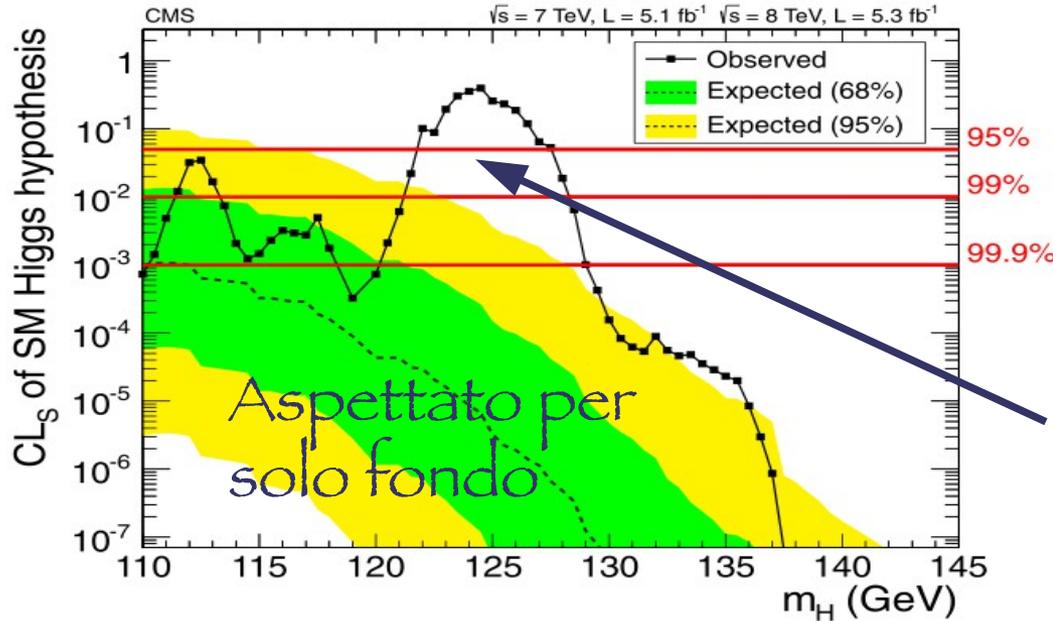
Candidato $Z(\mu\mu)Z(\mu\mu)$ in CMS



Ricerca in altri canali...



Combinazione delle varie misure



- Intensità del segnale in funzione di M_H
- L'Higgs è escluso al di sotto delle linee rosse con la probabilità indicata
- Evidenza in prossimità di $M_H \sim 125 \text{ GeV}$
- Probabilità che l'eccesso sia dovuto a una fluttuazione del fondo
- La scoperta si ha convenzionalmente per una significatività superiore a 5σ

Caratterizzazione del Segnale

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

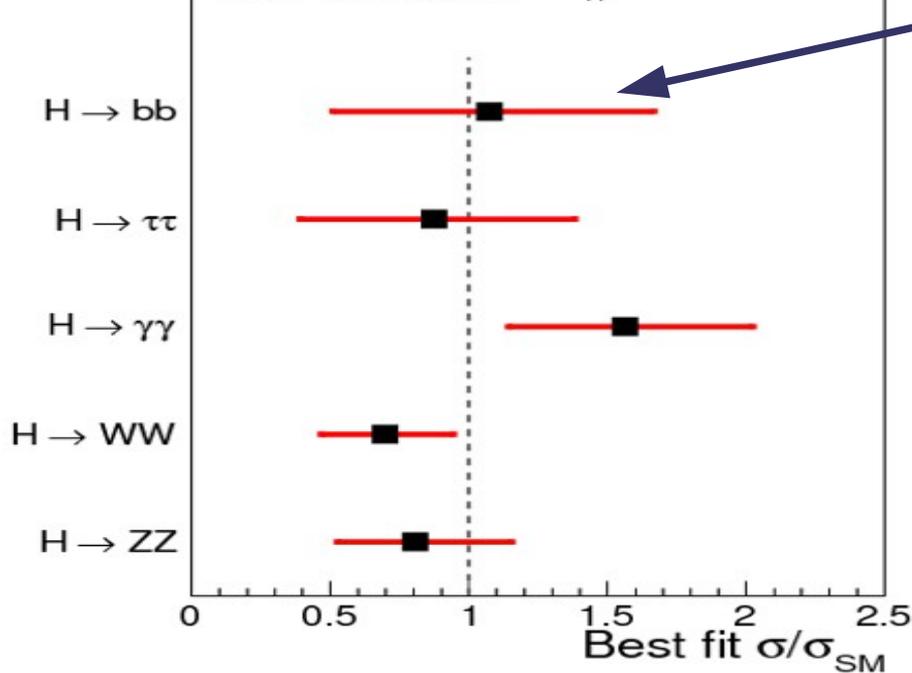
$$M_H = 125.3 \pm 0.6 \text{ GeV (CMS)}$$

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

- **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 $M_H \approx 126 \text{ GeV}$**

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

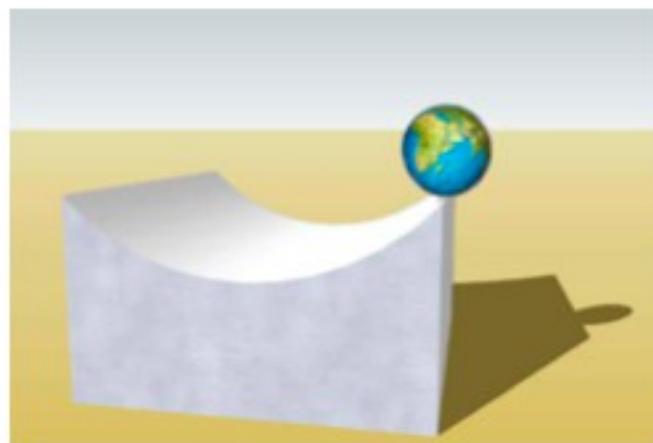
L'universo instabile del Modello Standard !



La massa del bosone di Higgs (126 GeV) e' grande rispetto a quella del protone ma piccola rispetto alla massa di Plank 10^{19} GeV che e' la scala associata alla gravita'.

Perche' $M_{\text{Higgs}} \ll M_{\text{Planck}}$?

Il modello standard puo' essere esteso sino alla scala di Plank, ma se non intervengono nuovi fenomeni ad energie piu elevate, l'universo e' instabile



L'universo instabile del Modello Standard !



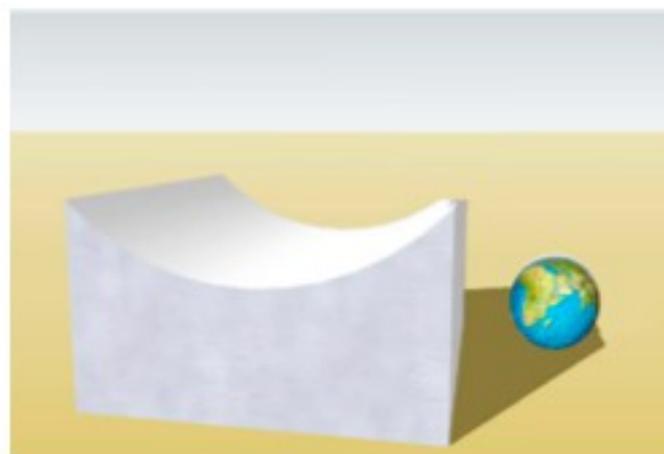
La massa del bosone di Higgs (126 GeV) e' grande rispetto a quella del protone ma piccola rispetto alla massa di Plank 10^{19} GeV che e' la scala associata alla gravita'.

Perche' $M_{\text{Higgs}} \ll M_{\text{Plank}}$?

.....e nei prossimi

13.000.000.000 di anni

l'universo andra' attraverso una altra transizione di fase del campo di Higgs



Ma non è tutto:

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

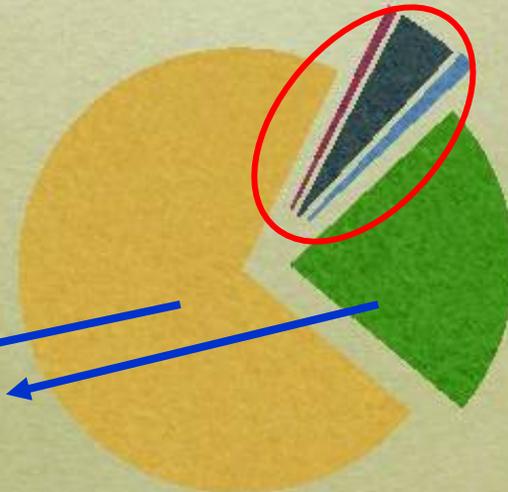
- Stars and galaxies are only ~0.5%
- Neutrinos are ~0.1–1.5%
- Rest of ordinary matter
(electrons, protons & neutrons) are 4.4%

- 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%)!



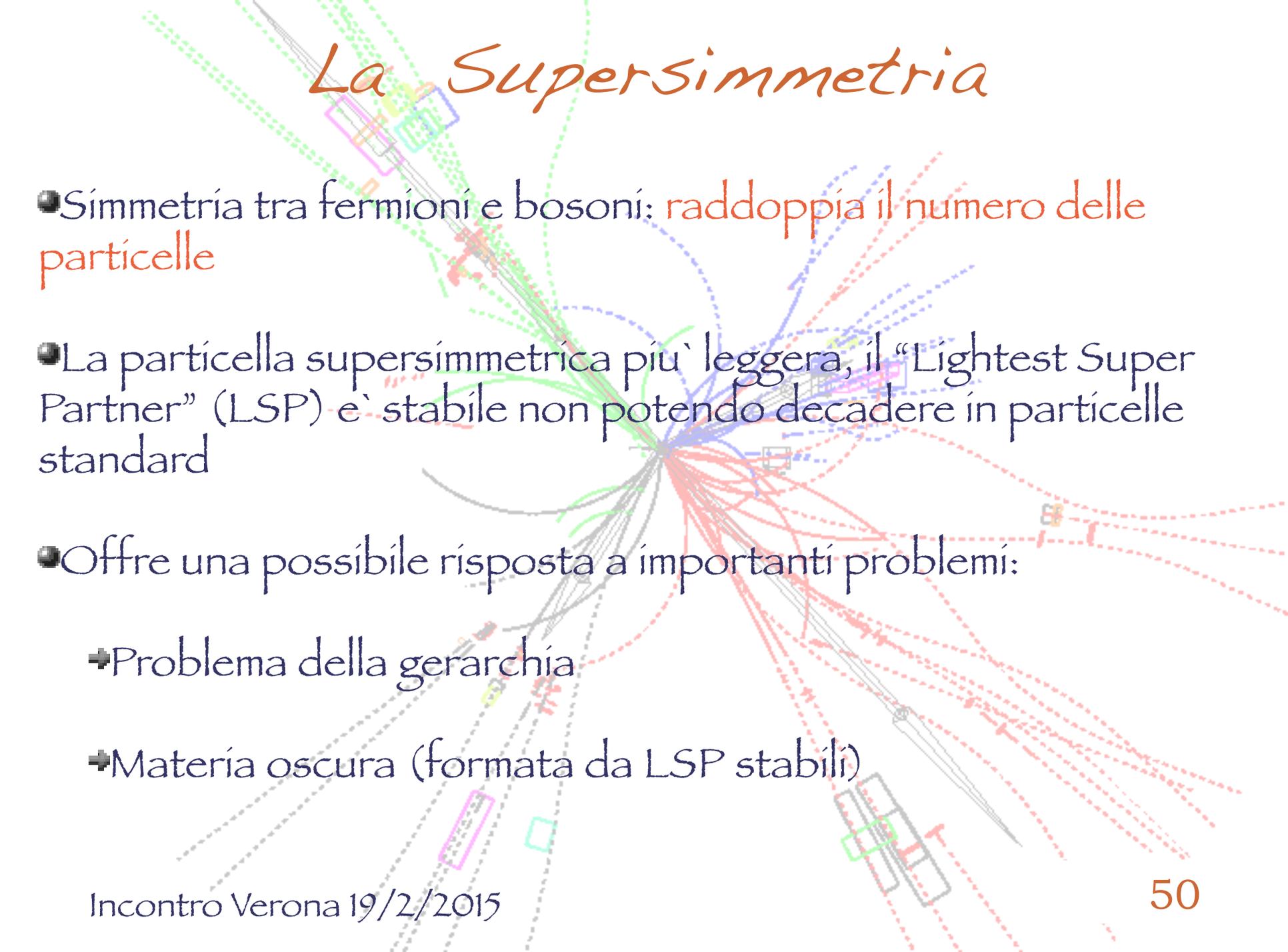
Problemi aperti

- 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?
- Da cosa origina l'asimmetria materia-antimateria nell'Universo?



La ricerca della Supersimmetria a LHC

La Supersimmetria



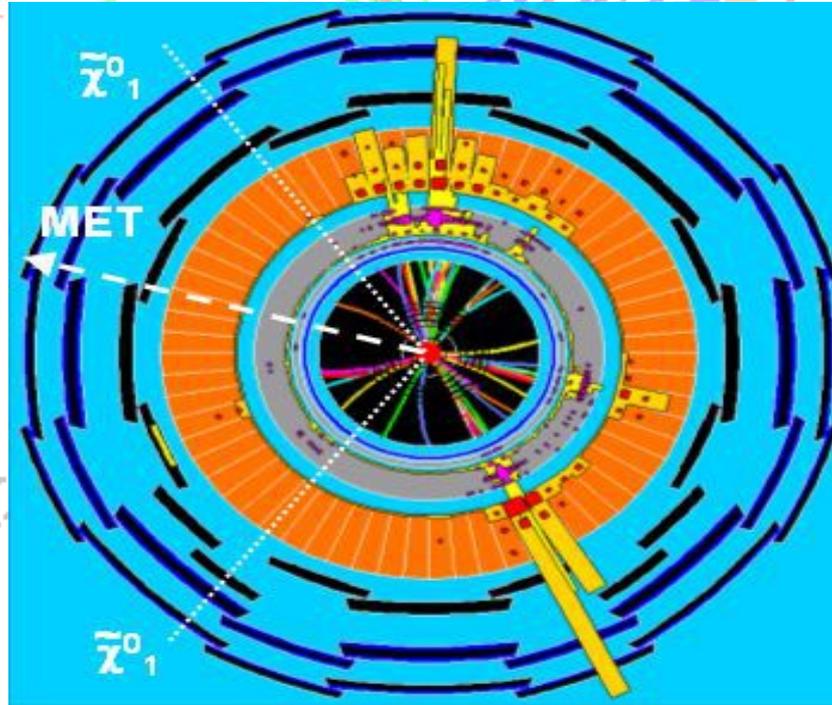
- Simmetria tra fermioni e bosoni: raddoppia il numero delle particelle
- La particella supersimmetrica piu` leggera, il “Lightest Super Partner” (LSP) e` stabile non potendo decadere in particelle standard
- Offre una possibile risposta a importanti problemi:
 - Problema della gerarchia
 - Materia oscura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

La Supersimmetria

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

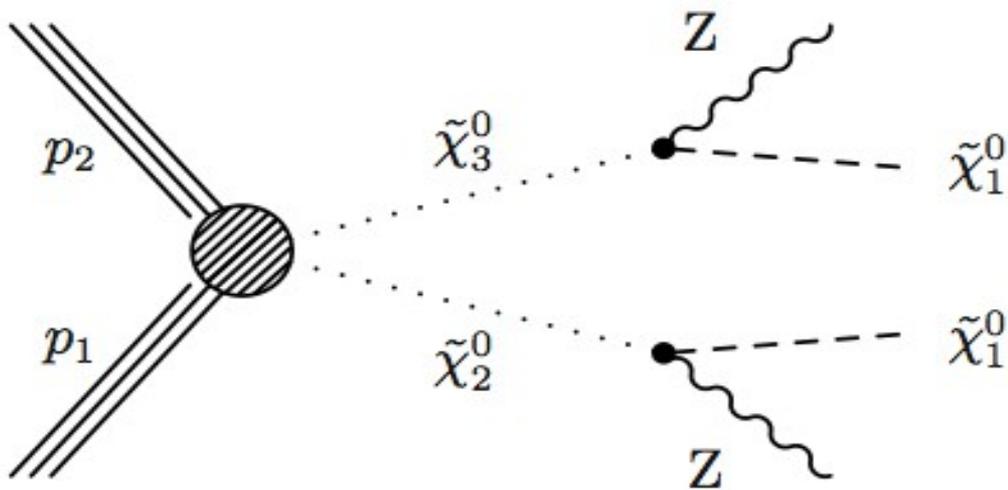
- ✦ Apparente violazione della conservazione della quantità di moto nell'urto, a causa della presenza di particelle non interagenti con il rivelatore

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



Le ricerca del neutralino a LHC

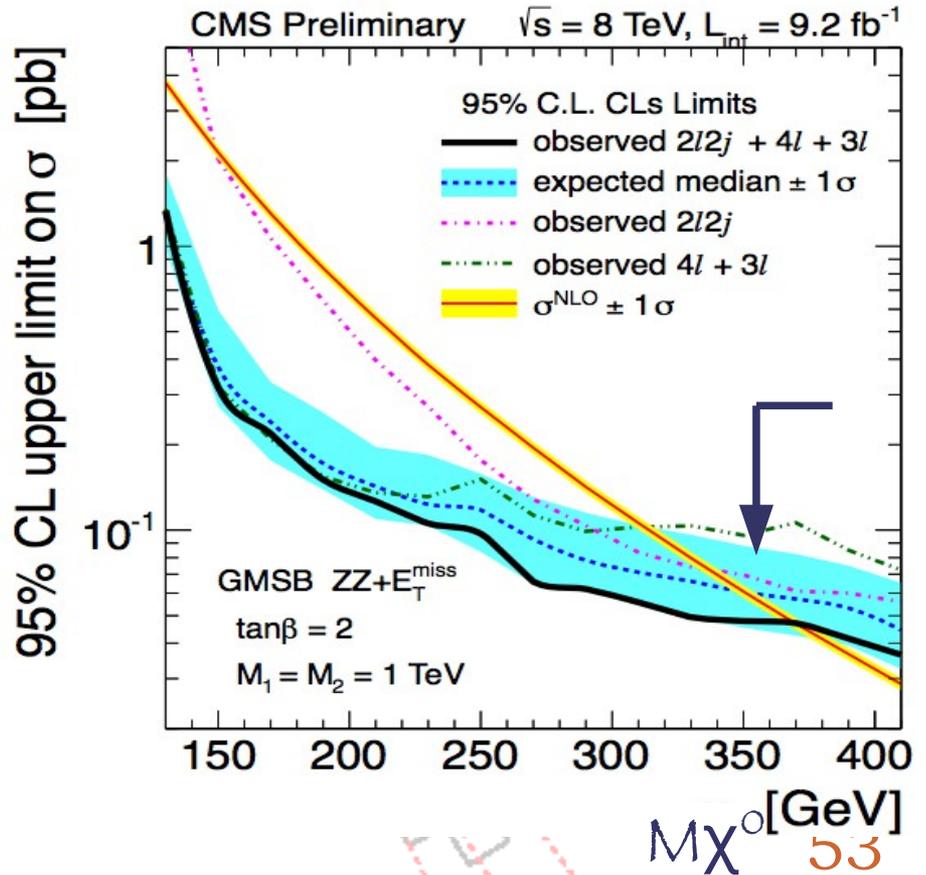
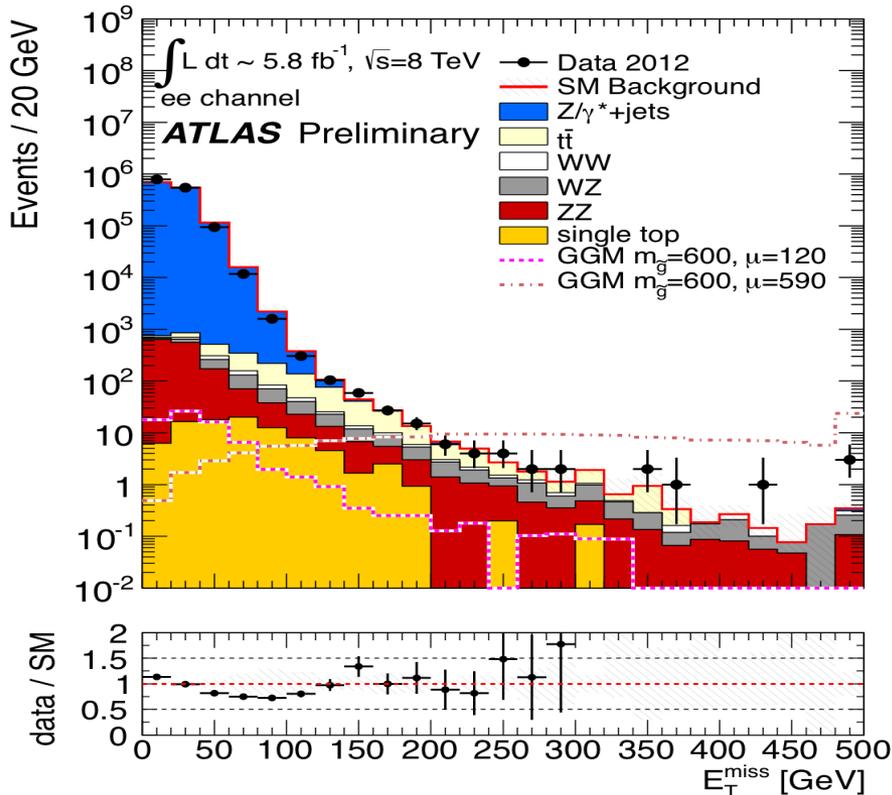
- Il neutralino χ^0 è una mistura dei partners supersimmetrici di fotone, W, Z e Higgs
- Esistono quattro diversi tipi di neutralino $\chi^0_{i=1,4}$. Il più leggero, χ^0_1 , è un buon candidato per LSP
- Uno dei possibili meccanismi di produzione è il seguente dove i bosoni Z decadono in coppie di leptoni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



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

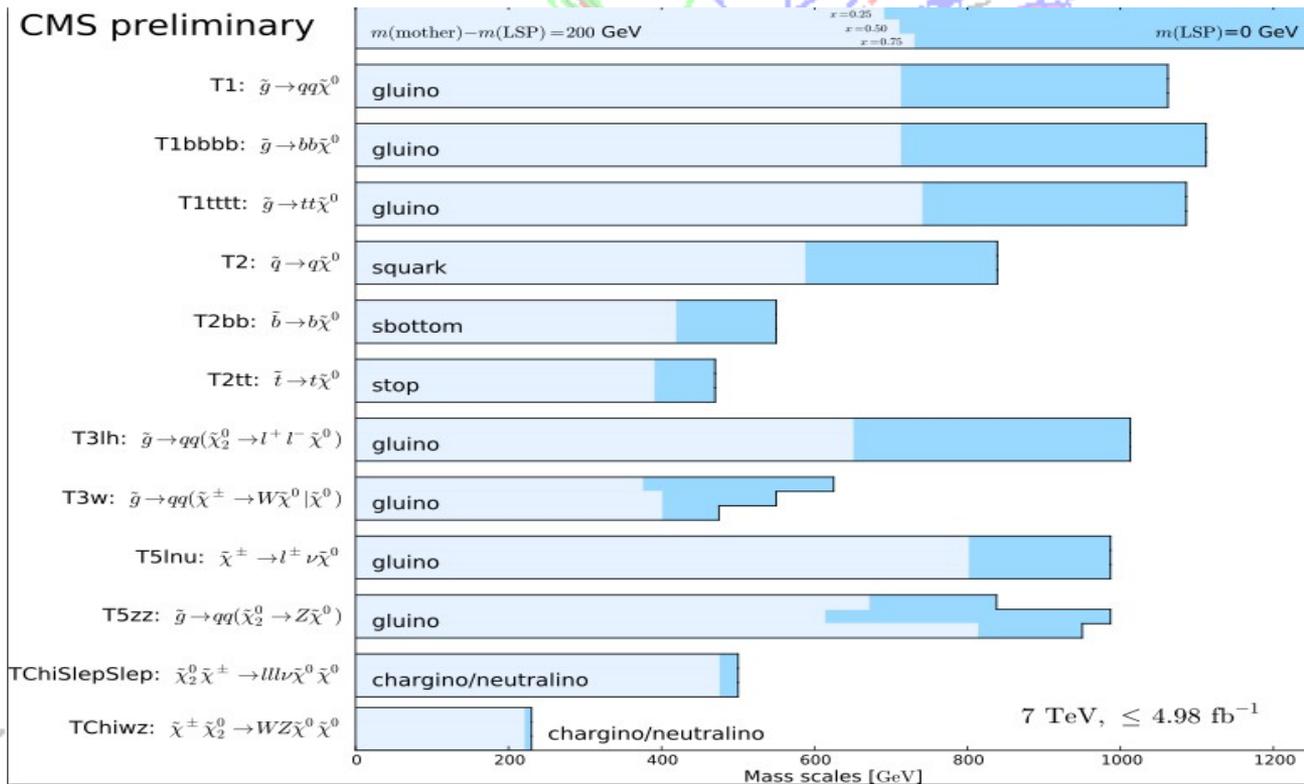
Le ricerche del neutralino a LHC

- 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 irregular polygons, some of which are filled with colors. The overall effect is a dense, multi-colored web of geometric forms that radiates from a central point, creating a sense of dynamic movement and interconnectedness.

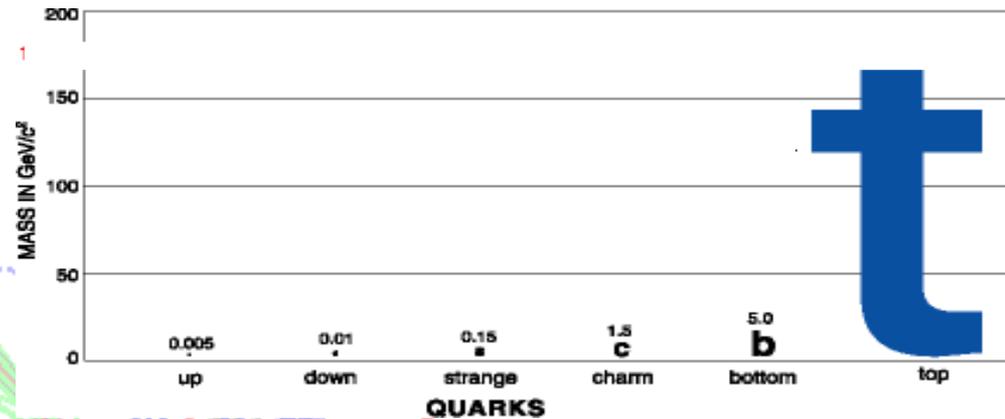
*La fisica del quark b e
le misure di precisione
all'esperimento LHCb*

ЛУСБ



Perche' la Fisica del b?

Elementary Particles

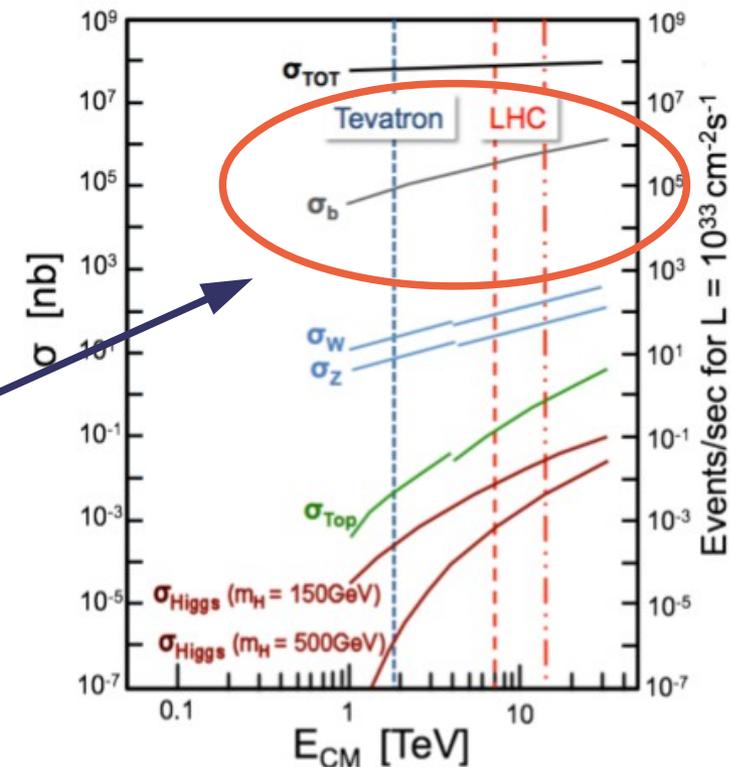


- Il b appartiene alla terza generazione di quarks, proposta nel 1973 e scoperta nel 1977

- 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 Verona 19/2/2015

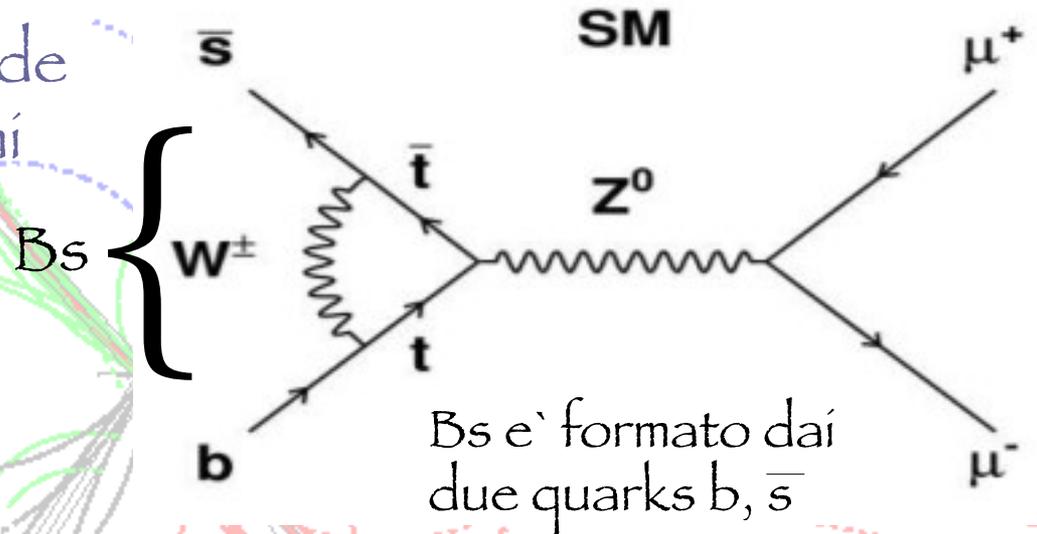


Perche' la Fisica del b?

- 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

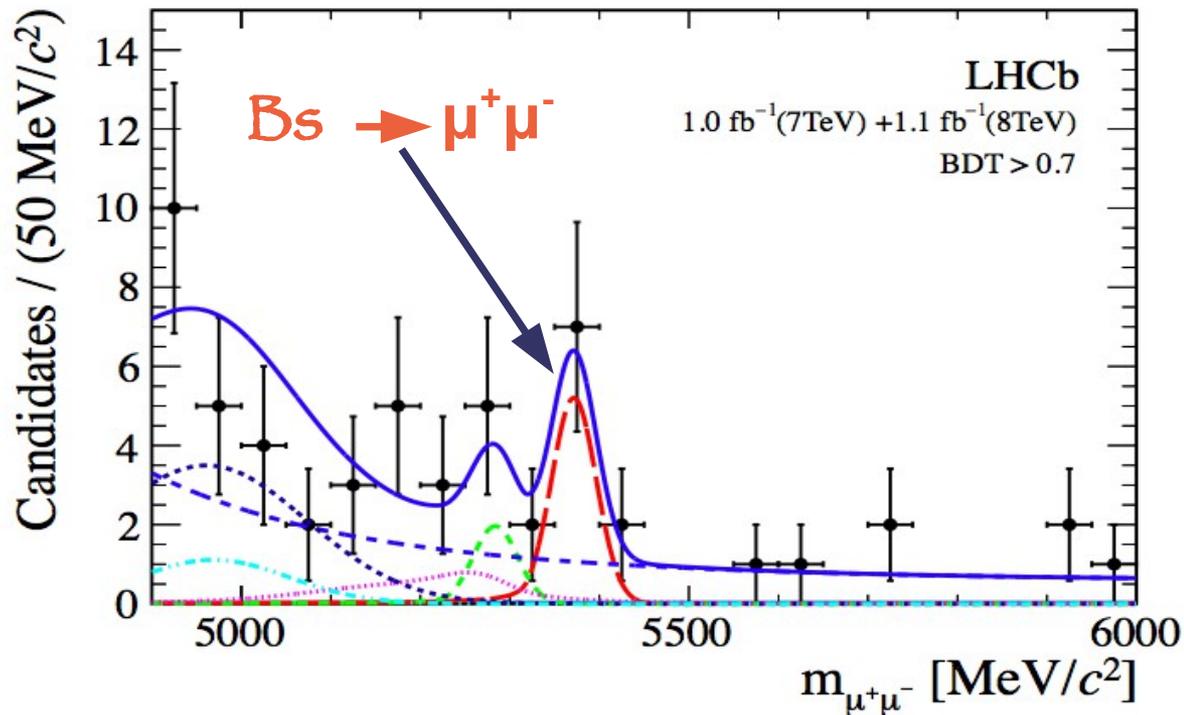
- Il mesone B_s viene ricostruito nel decadimento in due muoni
- Si nota un piccolo eccesso al valore di massa corretto
- Prima evidenza sperimentale di questo decadimento in ottimo accordo con le previsioni del Modello Standard!!
- Si ottiene:

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

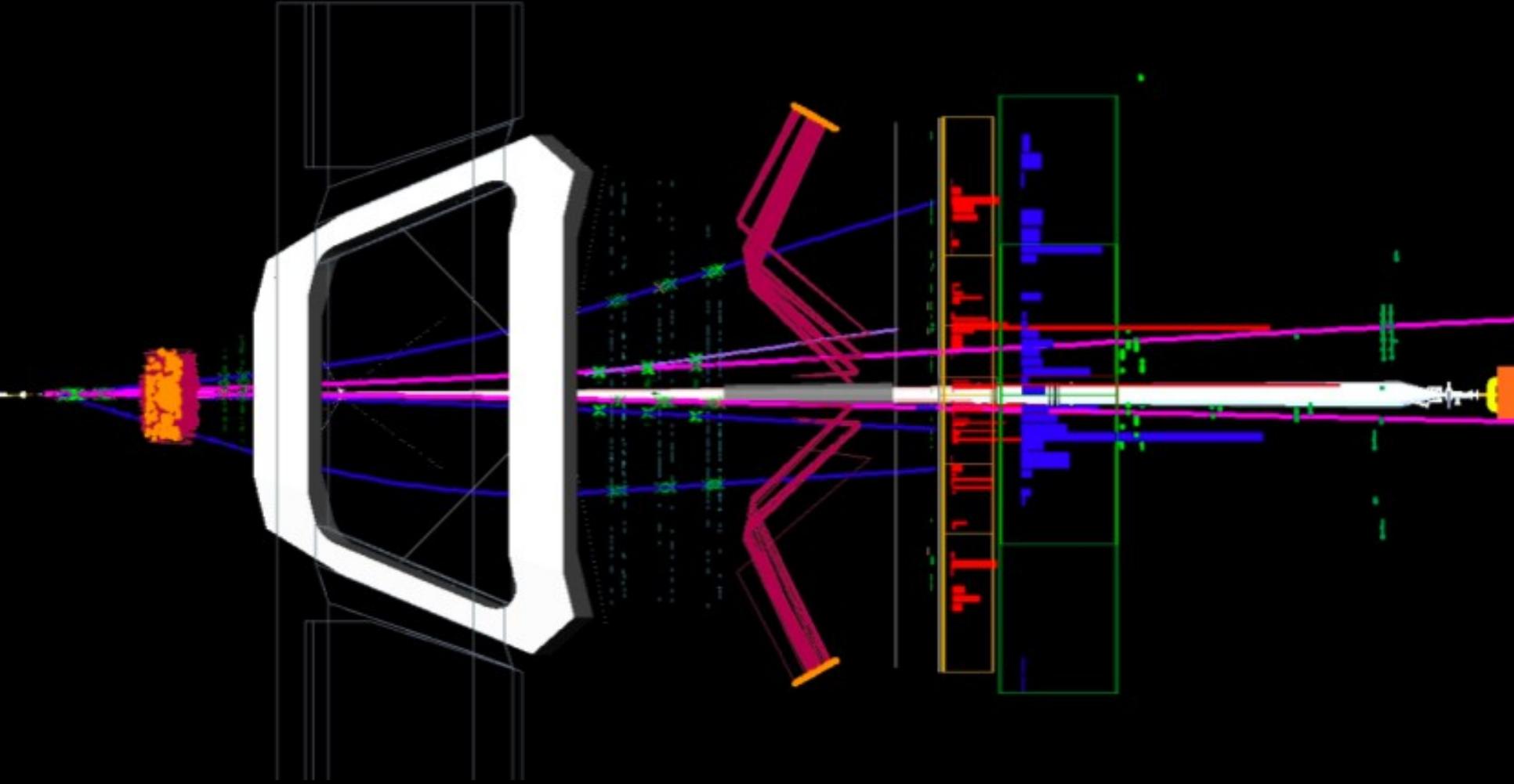
$$BR_{MS} = (3.54 \pm 0.30) 10^{-9}$$

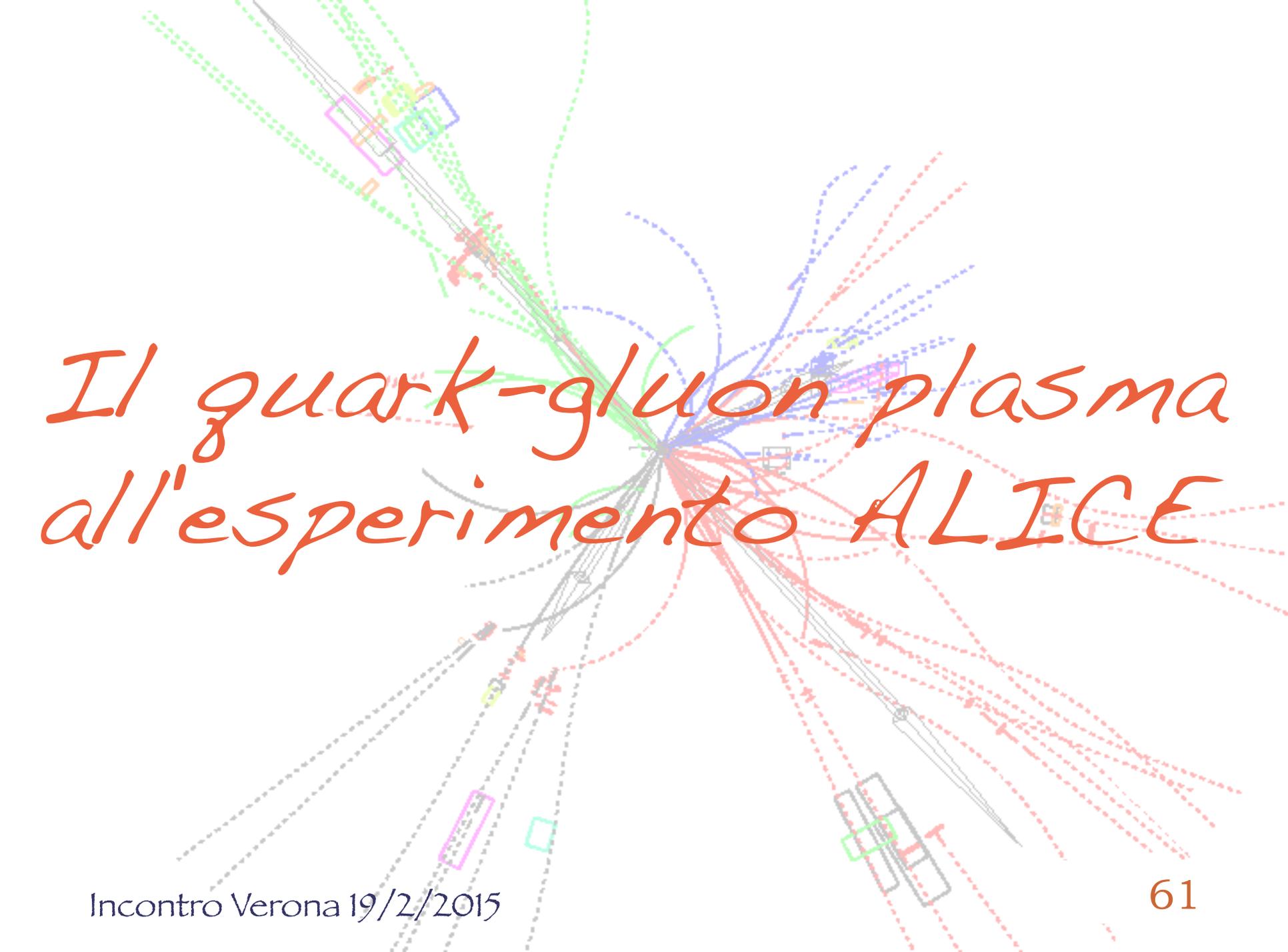
- Poco spazio per Nuova Fisica...
- Anche questo settore del MS gode di buona salute

Incontro Verona 19/2/2015



Candidate $B_s \rightarrow \mu\mu$ 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 muon spectrometers. The text is overlaid on this diagram.

Il quark-gluon plasma all'esperimento ALICE

Alice

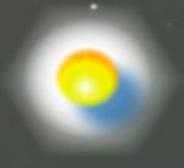


Interazione Forte

- 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



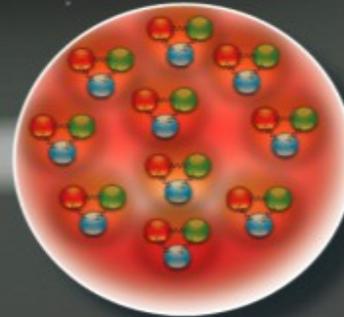
Big Bang

Temperatura
Tempo



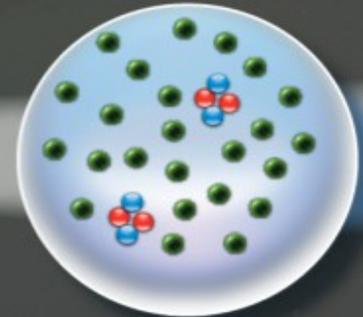
Plasma di Quark
e Gluoni

$< 10^{-5}$ s



Formazione di protoni
& neutroni

2×10^{12} K
 4×10^{-5} s

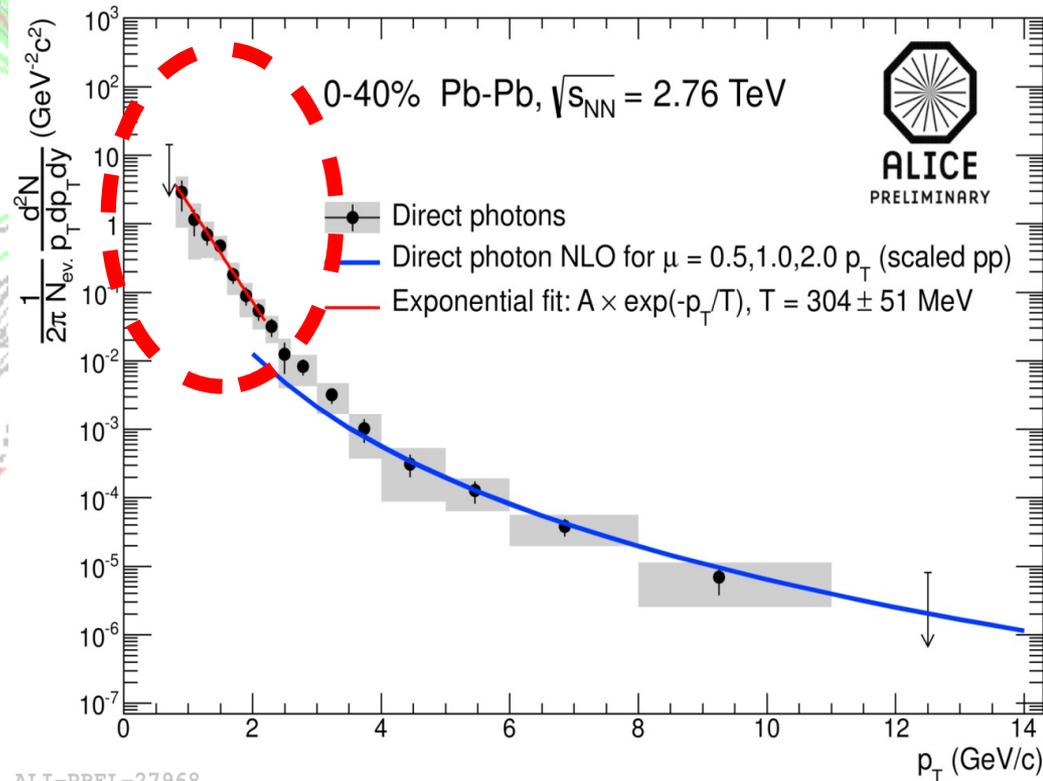


Formazione di nuclei
a basso numero atomico

5×10^8 K
3 min

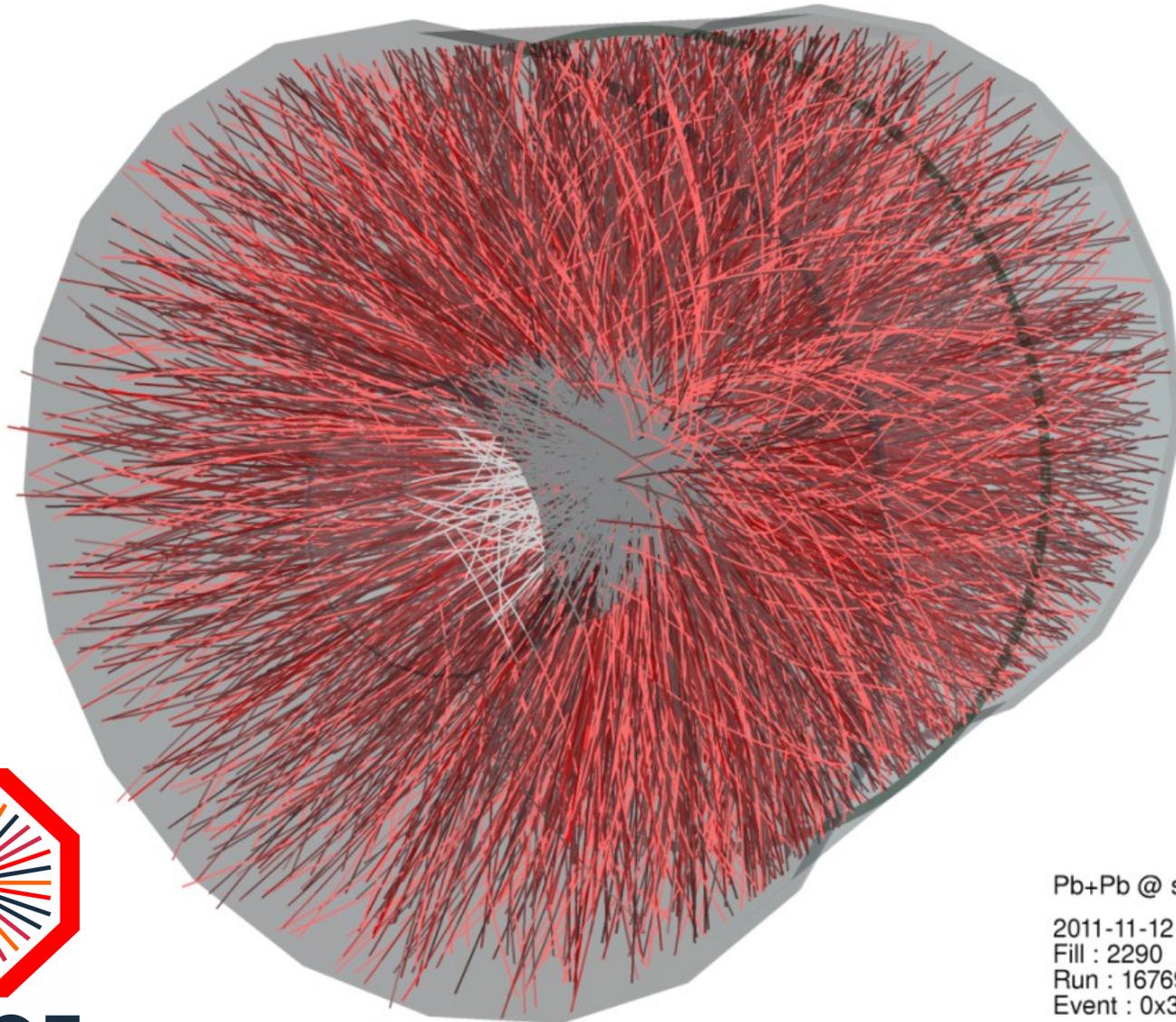
Il Quark-Gluon Plasma

- 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

A cosa serve tutto questo.....

A soddisfare una delle piu' nobili esigenze dell'uomo: la sete di conoscenza. La ricerca fondamentale e' la chiave per convertire la curiosita' scientifica in conoscenza e progresso.

*"..Considerate la vostra semenza:
fatti non foste a viver come bruti,
ma per seguir virtute e
canoscenza..."*

Dante, Inferno canto 26,
vv 118-120