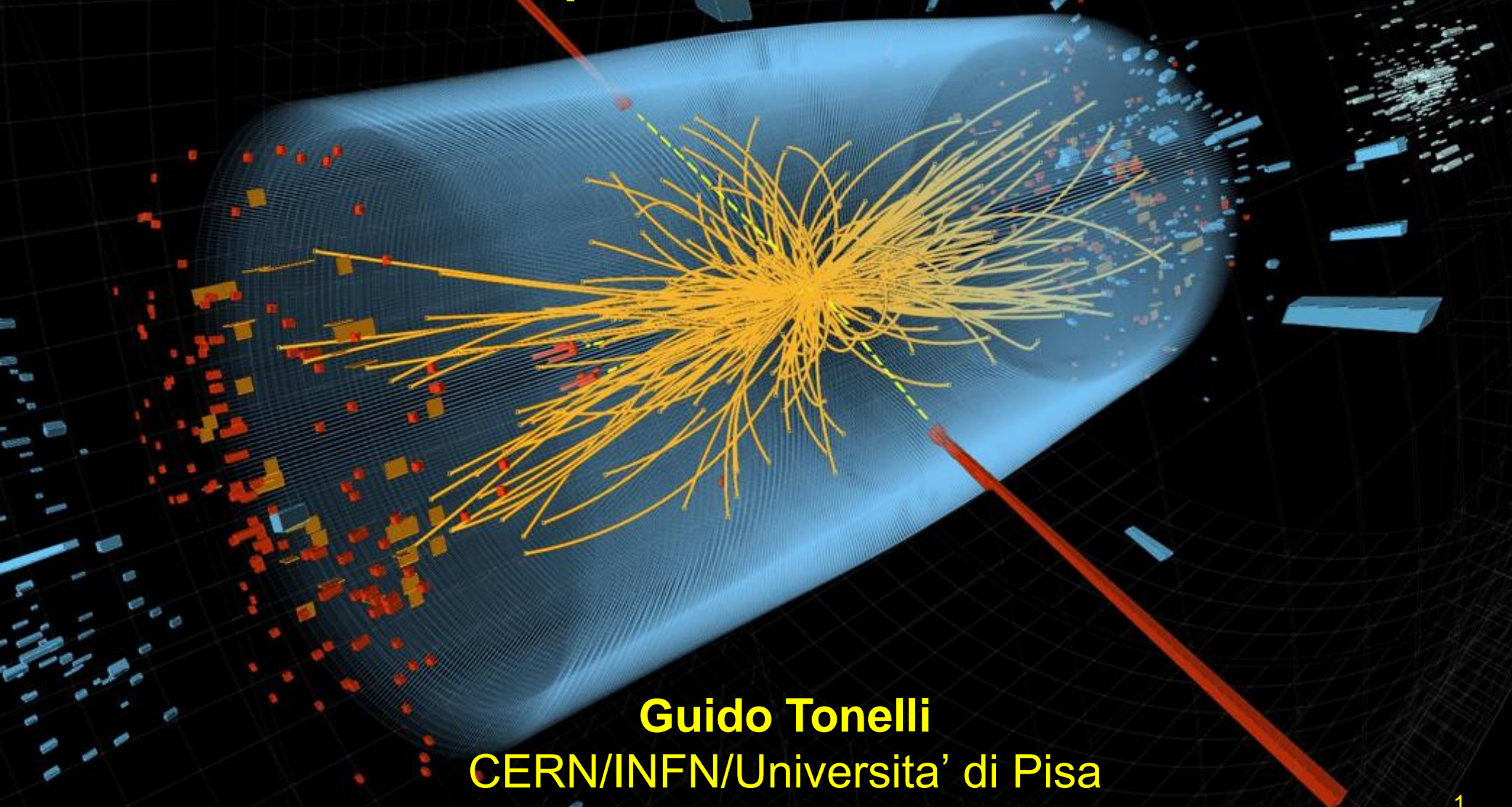




La scoperta del Bosone di Higgs:

le tappe salienti, i risultati piu' recenti, le prime implicazioni scientifiche.

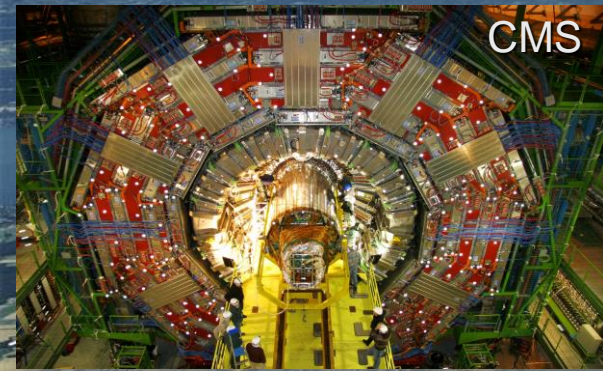


Guido Tonelli
CERN/INFN/Universita' di Pisa

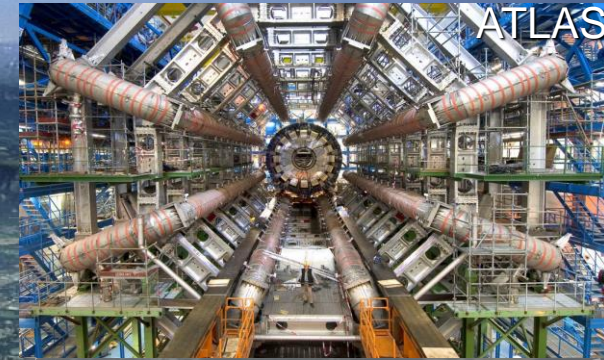
L' estate scorsa gli esperimenti ATLAS e CMS di LHC hanno scoperto un nuovo bosone di massa intorno a 125 GeV.

Come si e' arrivati a questo risultato?

A che punto siamo oggi?



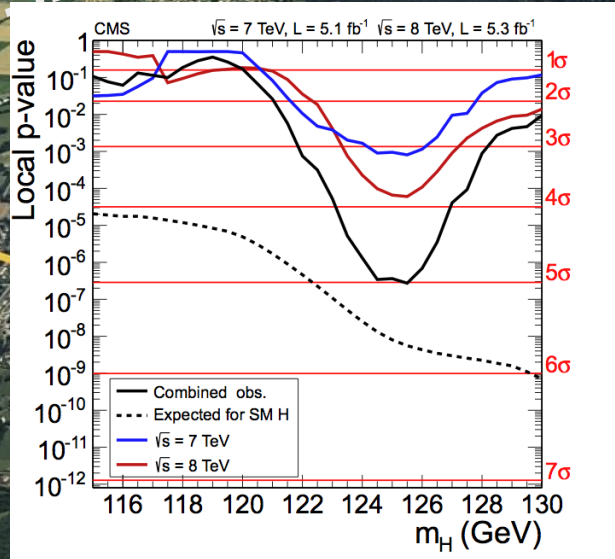
CMS



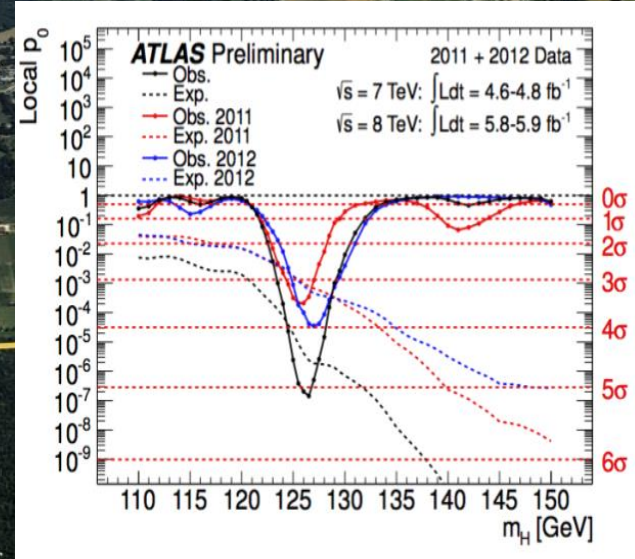
ATLAS



CMS



LHC 27 km







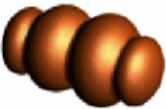



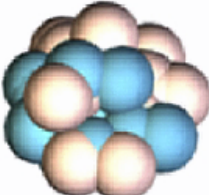
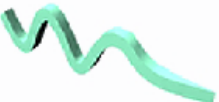
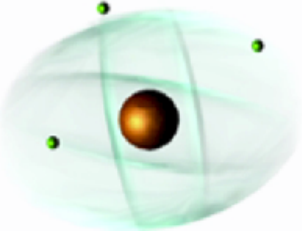







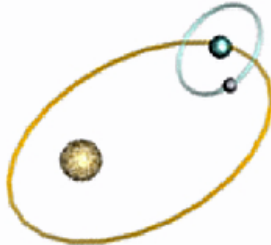
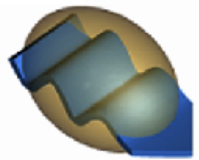
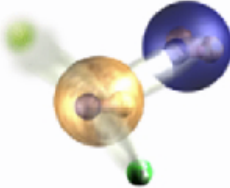


Cosa si cerca ad LHC

- Qual e' l'origine della massa. **Il bosone di Higgs**
- Cos'e' la materia oscura che tiene insieme gli ammassi di galassie. **Particelle supersimmetriche (SUSY)**
- Quante sono le forze che agiscono nel nostro universo e perche' sono cosi' diverse fra loro. Quante sono realmente le dimensioni in cui viviamo. **Extra-dimensioni.**

Ci sono buoni motivi per pensare che la risposta a queste domande possa venire dallo studio delle collisioni ad altissima energia che avvengono in LHC.

La materia conosciuta e' fatta di particelle che interagiscono tramite forze portate da altre particelle.

Leptons	Strong	Electromagnetic
<p>Tau  -1 0  Tau Neutrino</p> <p>Muon  -1 0  Muon Neutrino</p> <p>Electron  -1 0  Electron Neutrino</p> <p>Electric Charge</p>	<p>Gluons (8) </p> <p>Quarks </p> <p>Mesons  Baryons </p> <p>Nuclei </p>	<p>Photon </p> <p>Atoms  Light Chemistry Electronics</p>
Quarks	Gravitational	Weak
<p>Electric Charge</p> <p>Bottom  -1/3 2/3  Top</p> <p>Strange  -1/3 2/3  Charm</p> <p>Down  -1/3 2/3  Up</p> <p>each quark: R, B, G 3 colors</p>	<p>Graviton ? </p> <p>Solar system  Galaxies Black holes</p>	<p>Bosons (W,Z) </p> <p>Neutron decay  Beta radioactivity Neutrino interactions Burning of the sun</p>

Il mistero della massa.



Perche' W e Z risultano cosi' massicci mentre il fotone ha massa a riposo nulla?
Cosa differenzia un quark pesantissimo come il "top" dai leggerissimi "up" and
"down" ?

Una proprieta' intrinseca della materia?

La massa e' uno dei concetti piu' comuni della nostra vita quotidiana. Da millenni si misura la massa dei beni che si scambiano nei mercati; misurare masse "pesandole" su bilance e' una delle poche misure di fisica fatte realmente da ciascuno di noi. Per millenni, tutti, compresi i grandi della fisica, hanno sempre pensato che la massa fosse una proprieta' intrinseca della materia.

Galileo Galilei

Pisa (1564)
Florence (1642)



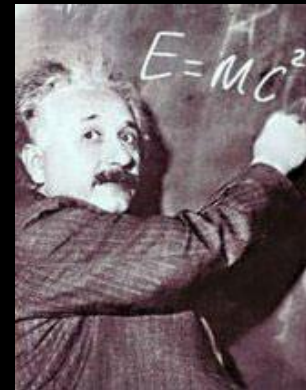
$$P=mg$$



$$F=ma$$

Albert Einstein

Ulm (1879)
Princeton (1955)

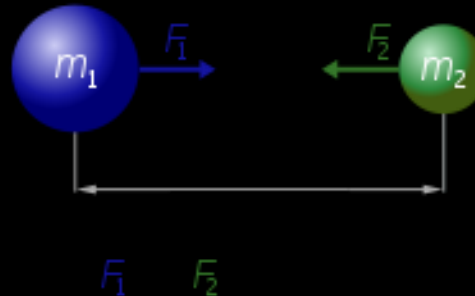
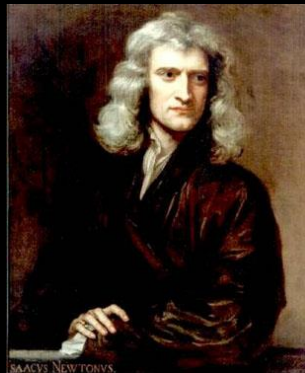


$$E=mc^2.$$

La massa curva lo spazio-tempo.

Isaac Newton

Woolsthorpe-by-Colsterworth (1642)
London (1727)



Qual e' l' origine della massa?

Il meccanismo di Brout-Englert-Higgs.



Un elegante meccanismo e' stato proposto da due fisici belgi, R. Brout and F. Englert e, indipendentemente da P. Higgs; All teoria hanno contribuito anche tre altri scienziati: R. Hagen, G. Guralnik and T. Kibble.



Robert Brout and Francois Englert
Bruxelles (1964)

Peter Higgs
Edinburgh (1964)

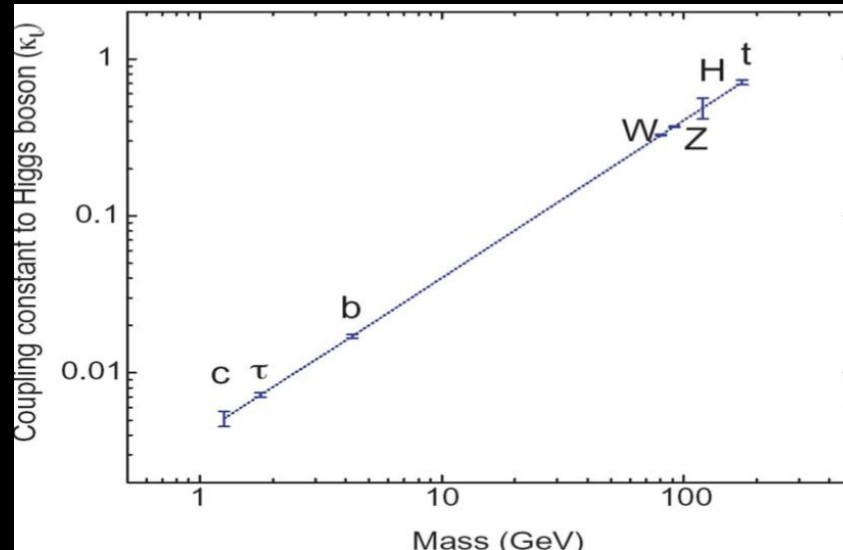


Richard Hagen, Gerald Guralnik, Tom Kibble
London (1964)

Rottura spontanea della simmetria elettrodebole

Tutte le particelle sono intrinsecamente prive di massa. Acquisiscono la massa dinamicamente dal momento che interagiscono con un nuovo campo scalare che pervade ogni angolo dell' universo.

Piu' forte e' l' interazione e piu' pesante diventa la particella. Il fotone non interagisce e rimane privo di massa mentre W e Z si accoppiano fortemente al campo scalare e diventano percio' estremamente massicci.



Un meccanismo simile fu proposto in seguito per dare massa ai fermioni (quarks e leptoni) che compongono la materia.

Cosa sappiamo veramente del nostro Universo?



Quale “motore” ha spinto l’ inflazione?

Cos’ e’ l’ energia oscura che accelera il tutto?

13.81 Miliardi di Anni

10^{28} cm

Oggi

Cosa tiene insieme gli enormi ammassi di galassie?

la materia visibile non ci spiega quello che osserviamo

Immagine ai raggi X e nel visibile (Chandra)

Galaxy cluster
1E 0657-56, "bullet cluster"

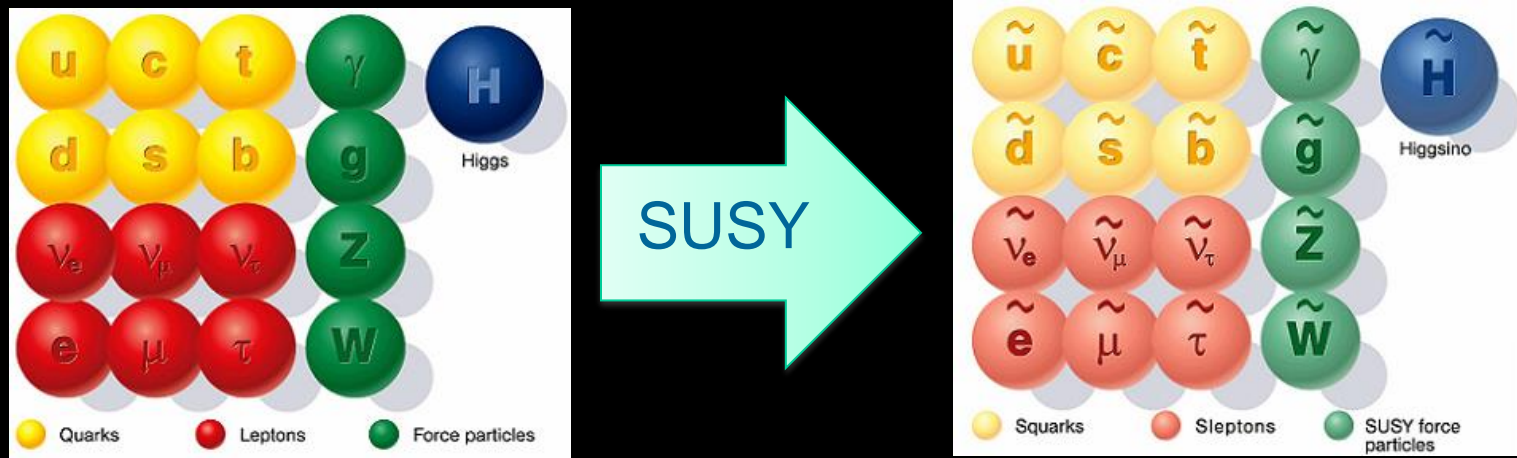
**Dobbiamo ipotizzare una forma nuova
di materia, sconosciuta ed “invisibile”:
la materia oscura.**

Immagine dal gravitational lensing e nel visibile

Galaxy cluster
1E 0657-56, "bullet cluster"

Una elegante congettura: la supermateria

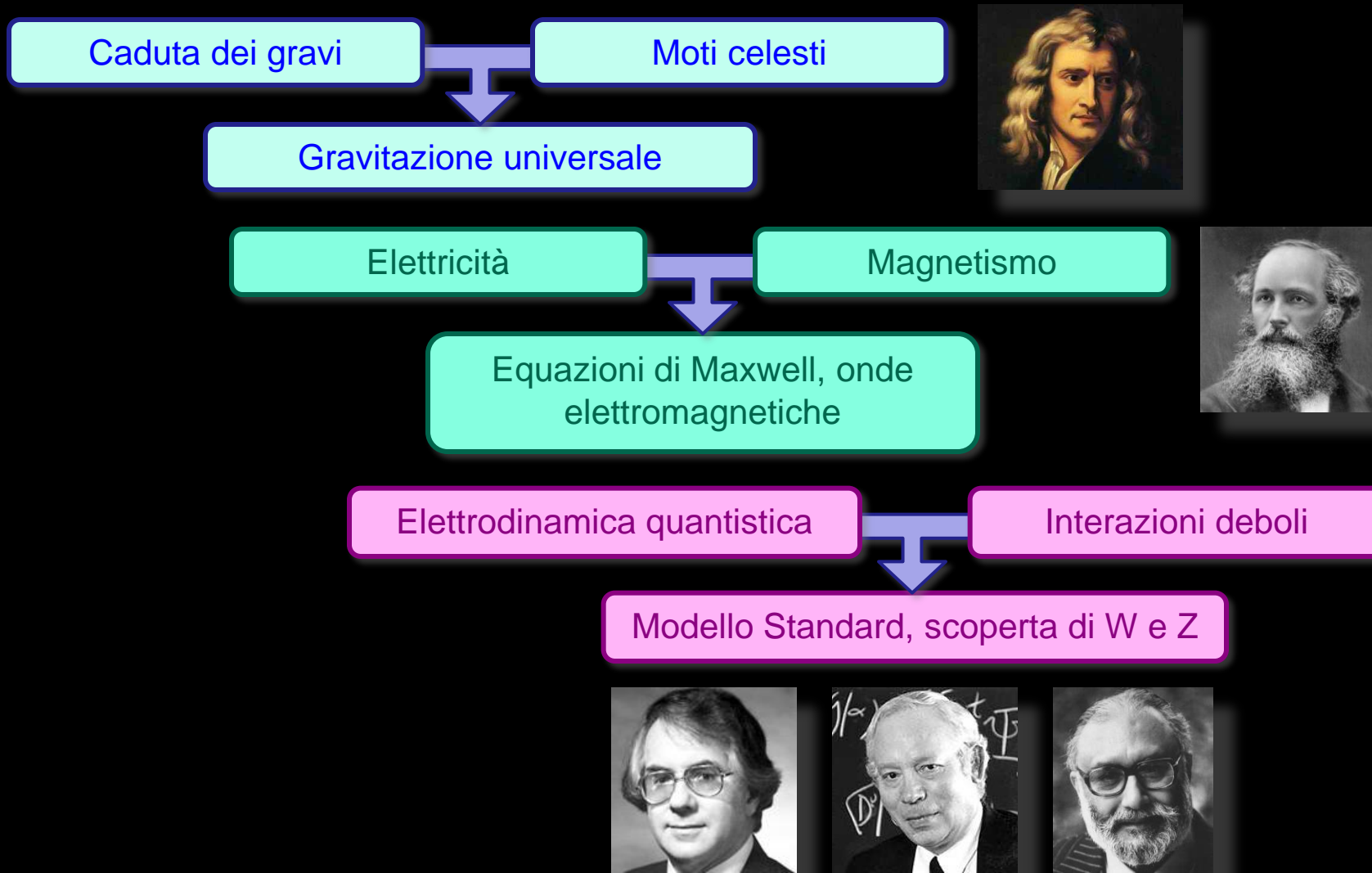
Per ciascuna particella conosciuta ci sarebbe un partner supersimmetrico: una super-particella. Vedremmo di colpo raddoppiare la famiglia delle particelle. Se la supersimmetria fosse davvero una simmetria della natura scopriremmo la “faccia nascosta della materia”.



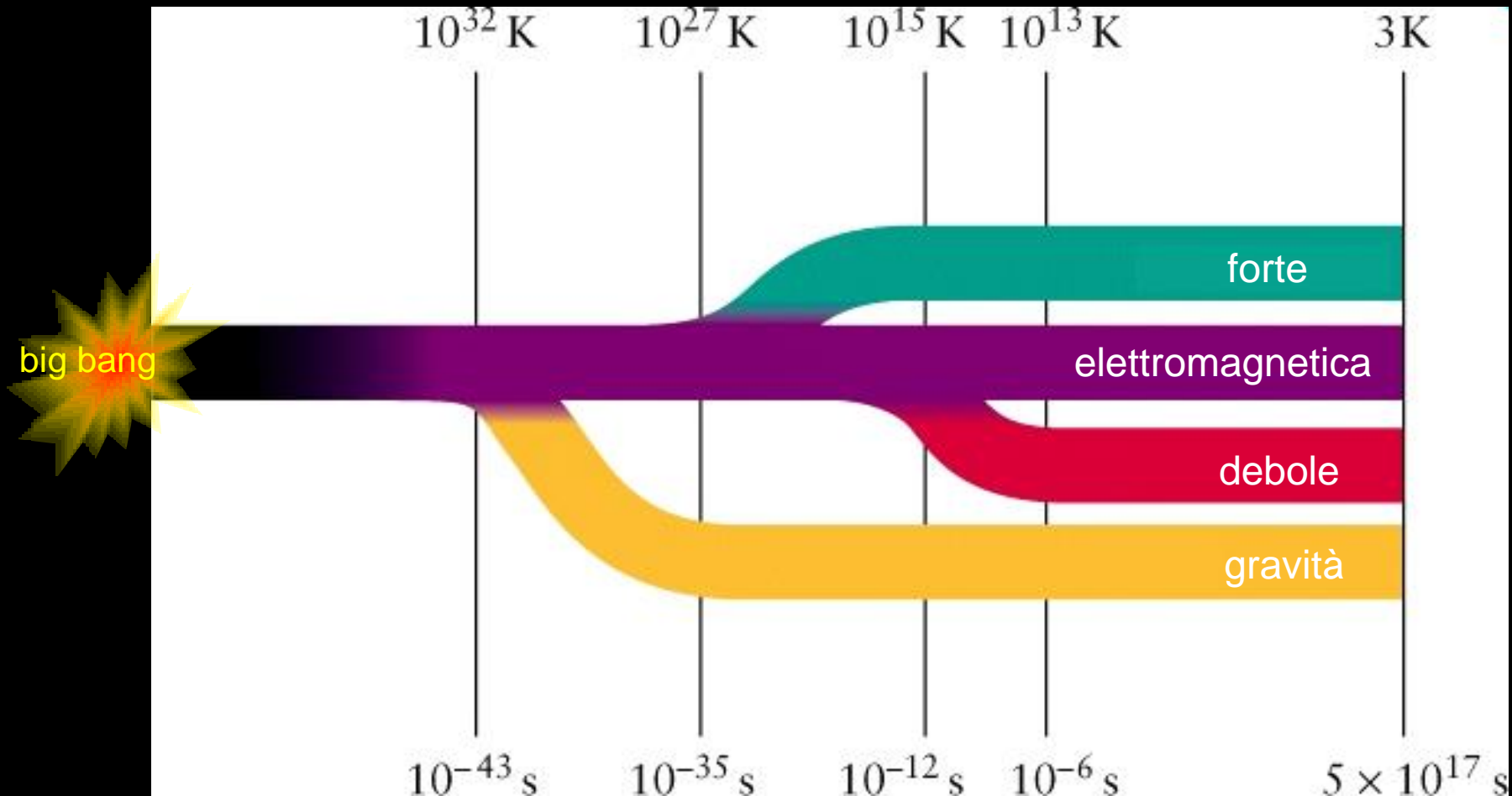
Un gas di pesanti neutralini potrebbe essere la spiegazione della “materia oscura” che tiene insieme le galassie.

Sarebbe una rivoluzione nella nostra concezione dell'Universo.

Unificazione delle interazioni fondamentali



L' unificazione delle forze: il sogno di generazioni di fisici.



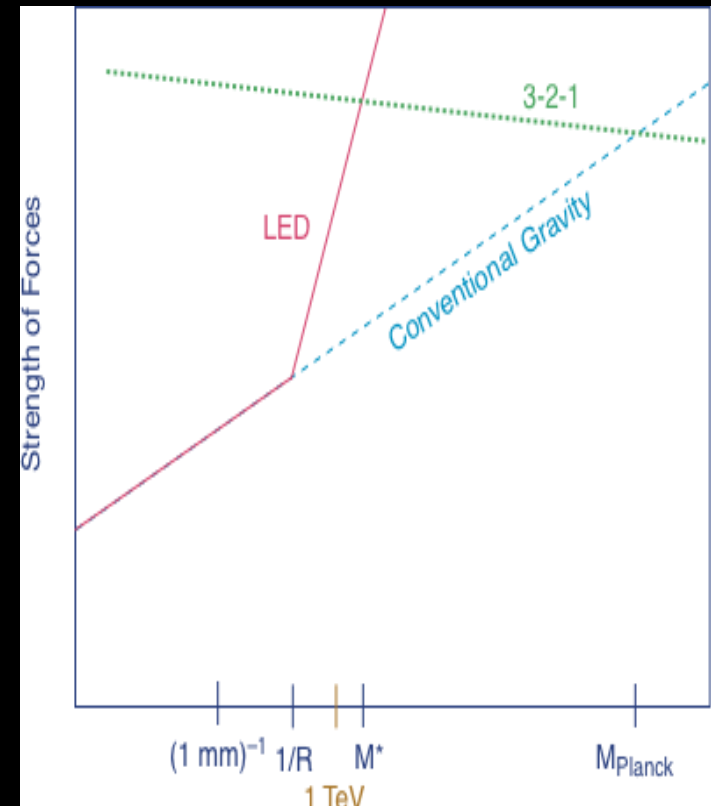
Extradimensioni.

Le interazioni fondamentali (forte ed elettrodebole) sembrerebbero provenire da una unica superforza.

La gravita' sembrerebbe fare eccezione perche' troppo debole.

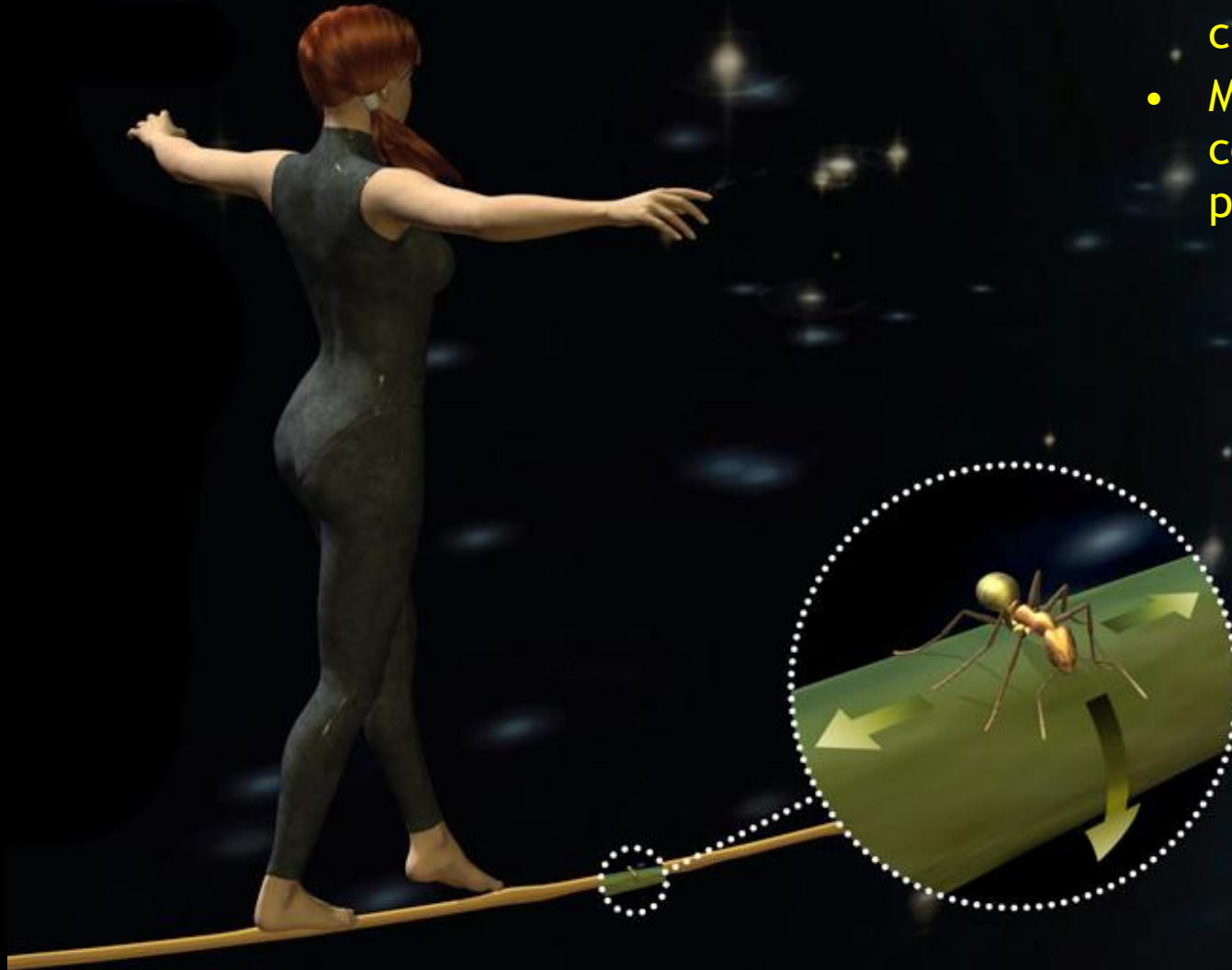
Grande idea qualche anno fa.

La gravita' NON E' debole. Ci APPARE debole perche' la osserviamo in un mondo a 4 dimensioni. **Se invece assumessimo che il nostro universo si sviluppa in 5-10 dimensioni**, di colpo la gravita' ci apparirebbe molto piu' forte rispetto alla sua debole proiezione nel mondo in 4D cui siamo abituati ed avremmo a portata di mano la Grande Unificazione delle Forze.

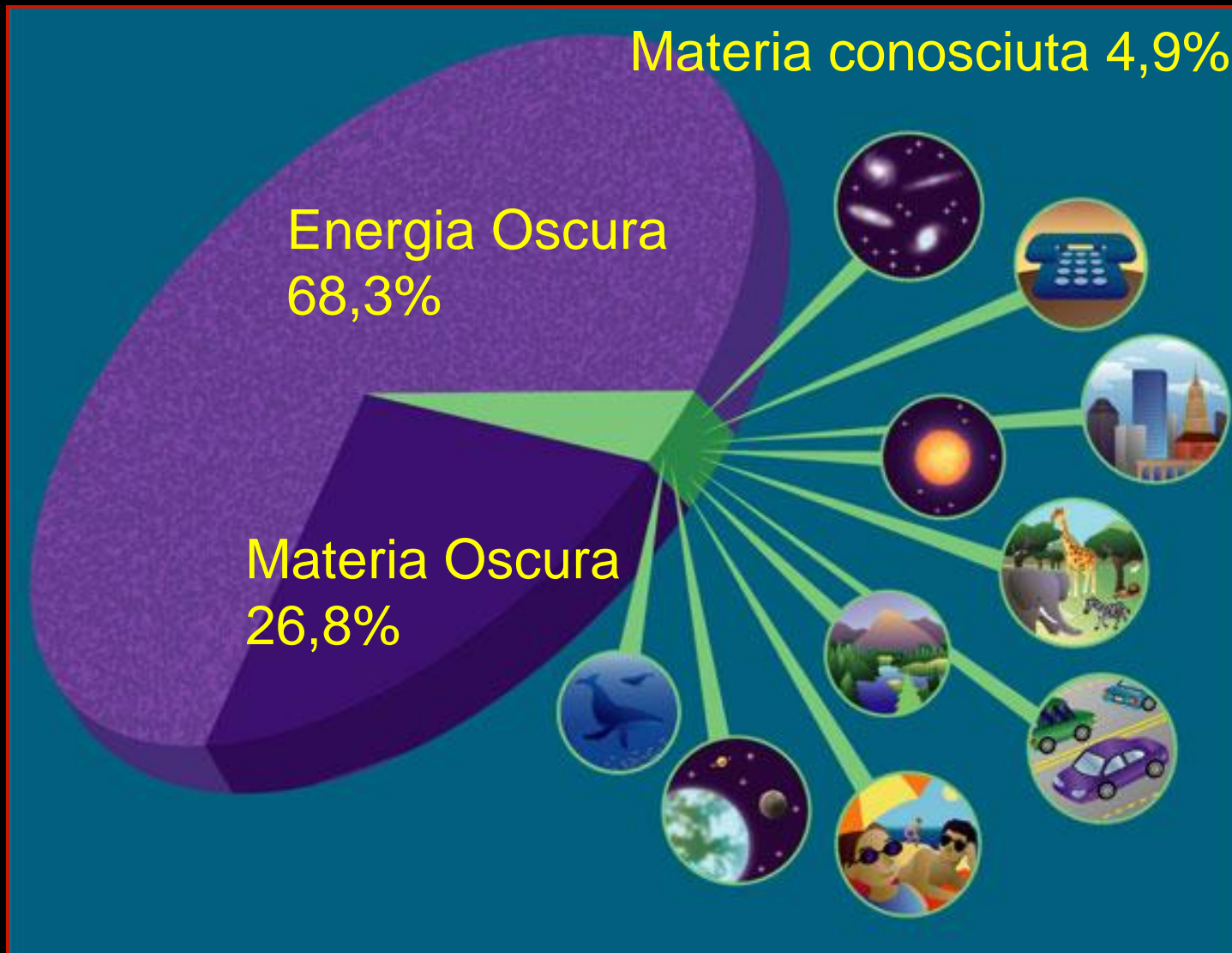


Extra dimensioni

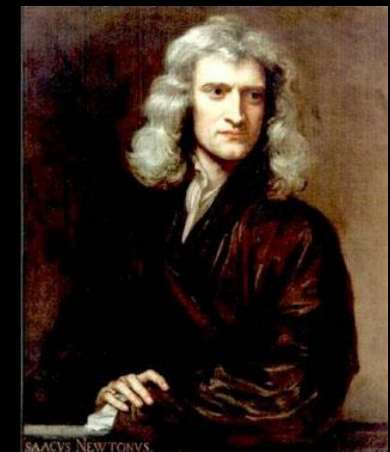
- Le extra-dimensioni non sono accessibili nella nostra esperienza perché “compattificate” con raggi di curvatura molto piccoli.
- Ma si potrebbero manifestare con l’apparizione di nuove particelle rivelabili ad LHC.



La nostra ignoranza e' immensa.



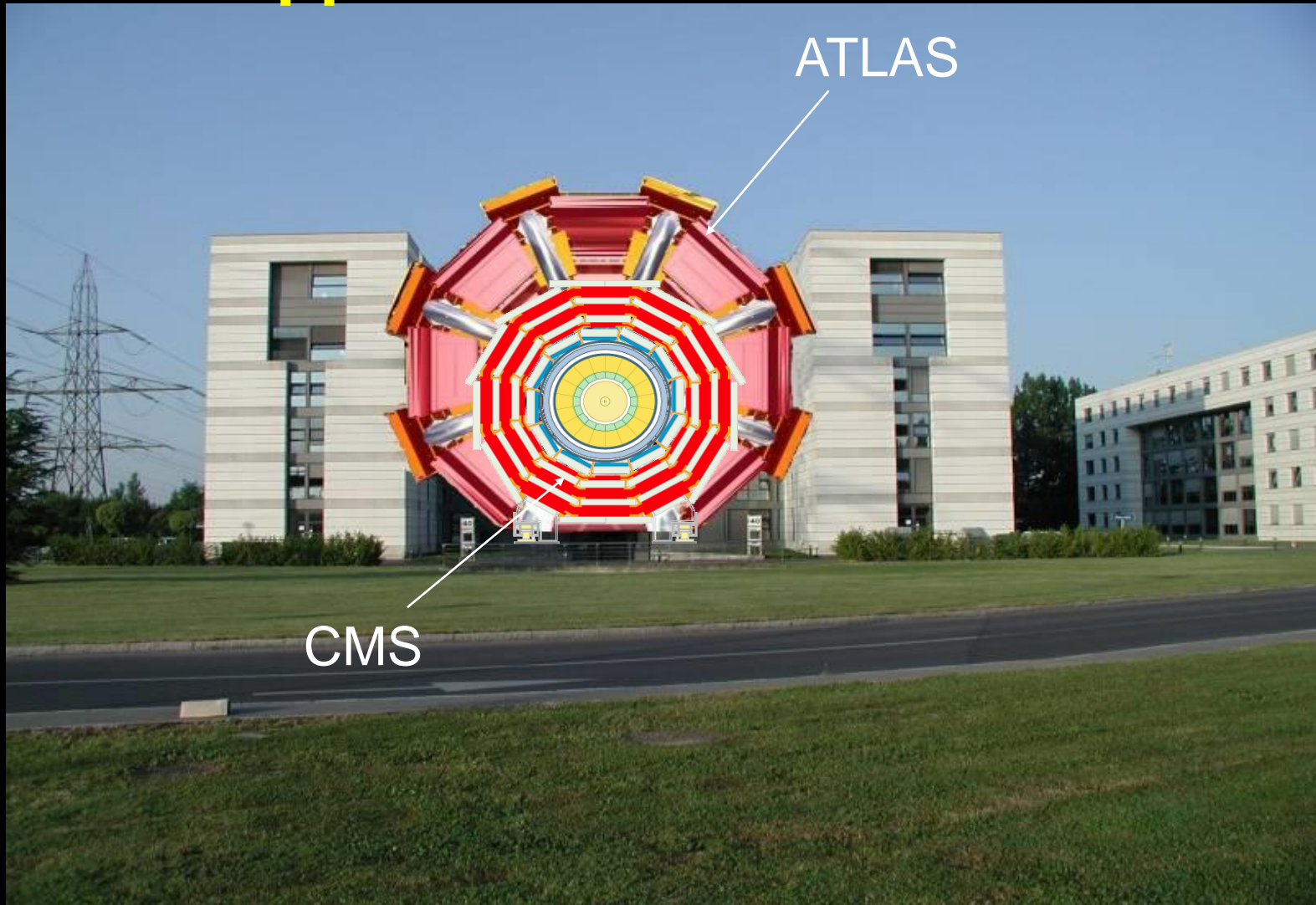
“cio' che conosciamo sono poche gocce; quello che non conosciamo e' un oceano” Isaac Newton



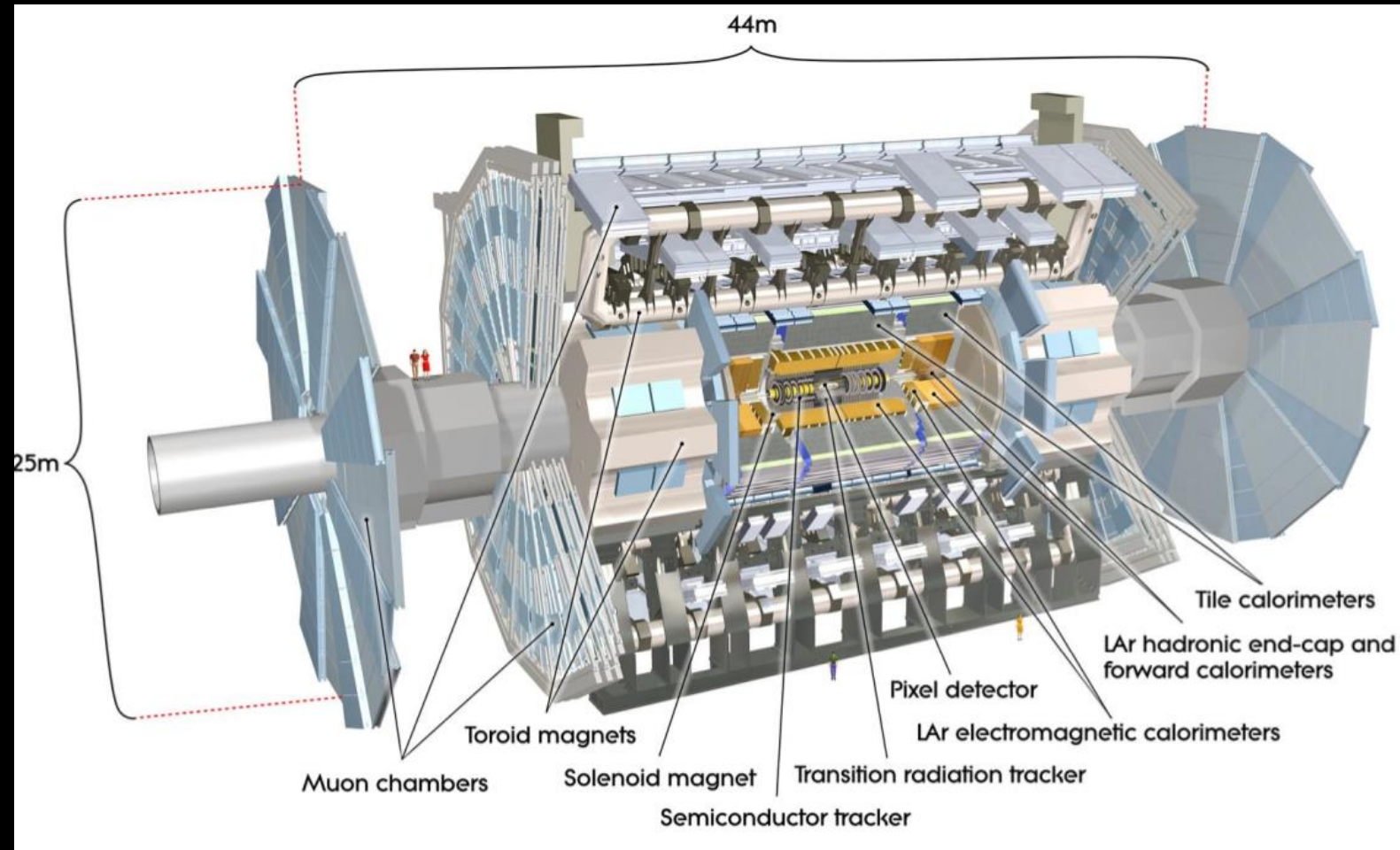
Ogni vera avventura richiede una attrezzatura adeguata (ed anni di addestramento).



Per registrare e studiare le particelle prodotte nelle collisioni di LHC occorrono enormi apparati: i nostri rivelatori.



Il “gigante” di LHC: ATLAS

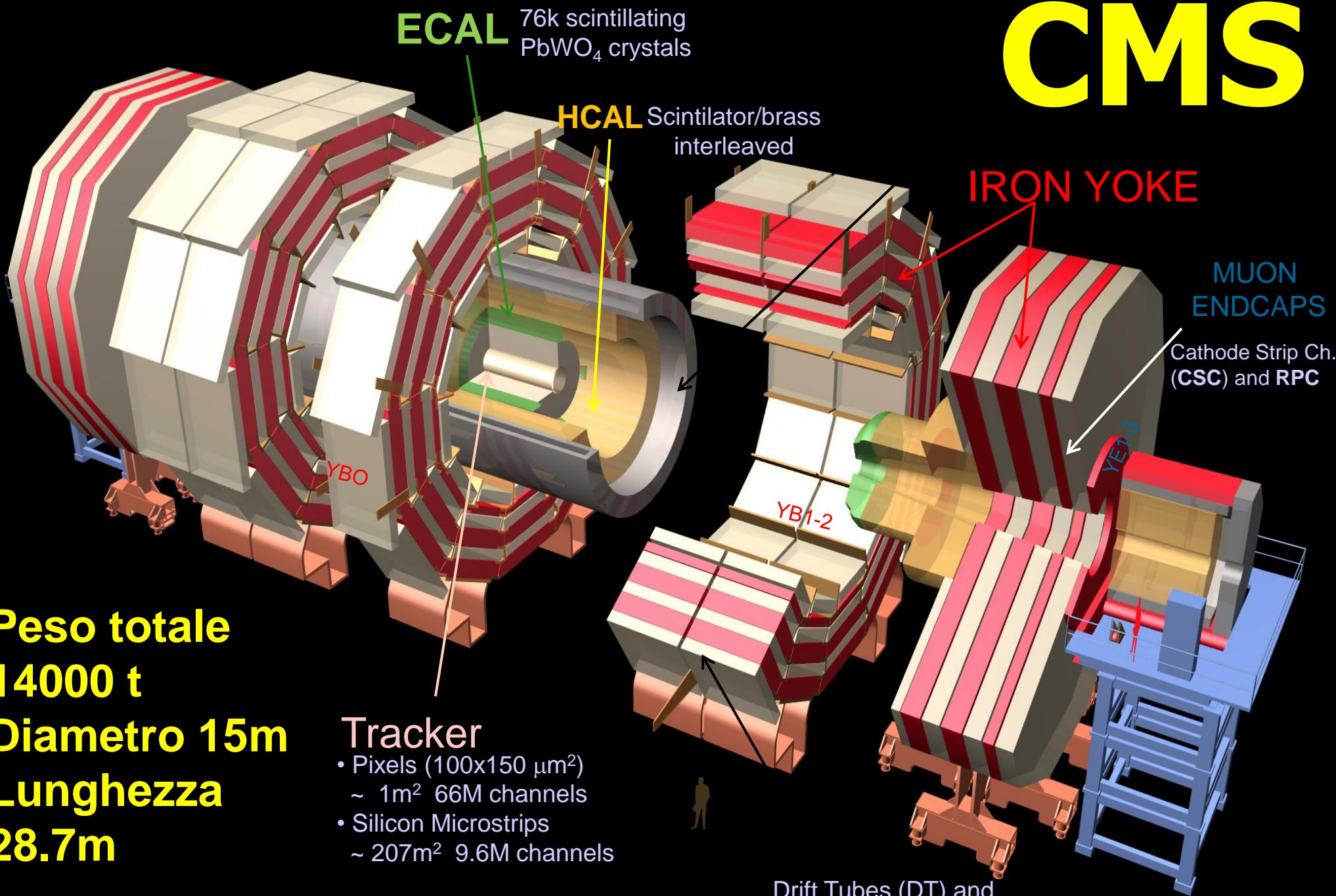


IL RIVELATORE
ATLAS
44 m di lunghezza
25 metri di altezza
7500 tonnellate di
peso



Fabiola Gianotti, scienziata
italiana per anni alla guida
di ATLAS

CMS



Peso totale
14000 t
Diametro 15m
Lunghezza
28.7m

In cui lavorano migliaia di scienziati



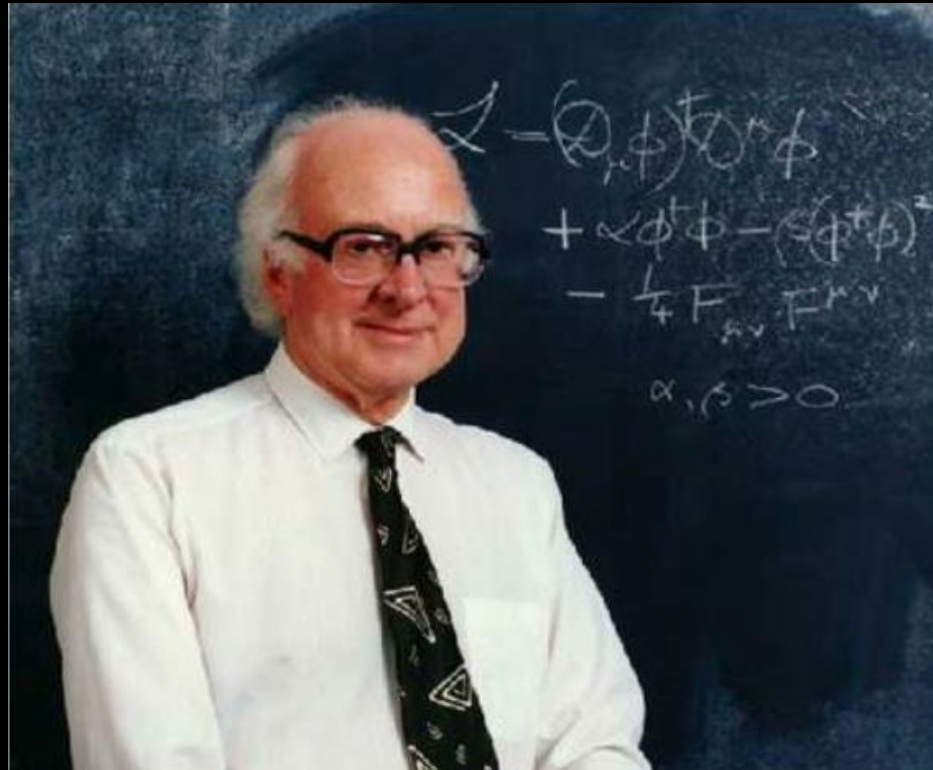
CMS: ~3300 scienziati ed ingegneri (compresi ~900 studenti) provenienti da 193 istituti di 40 paesi.

Collaborazioni che possono contare su ~1000 studenti e post-doc possono fare cose incredibili. Non esistono “missioni impossibili” quando si puo’ contare su centinaia di giovani entusiasti.

Dopo tre anni di presa dati a che punto siamo arrivati ?

- **Nessuna traccia di SUSY (per ora)**
- **Ne' tantomeno segni di nuova fisica come extra-dimensioni et al.**

.....ma sul bosone di Higgs



L'elusiva particella, che e' stata ipotizzata per spiegare l'origine della massa, e' sta ricercata senza successo, per decenni, da migliaia di ricercatori di tutto il mondo e... quando molti cominciavano a dubitare della sua esistenza.....

Corso ultra-concentrato per cacciatori di nuovi bosoni.

Stiamo cercando la piu' elusiva delle particelle elementari, un fenomeno rarissimo: la prima raccomandazione e' fare di tutto per evitare errori.

La paura dell'errore, la nostra piu' cara compagna di viaggio.

Se si trova nei dati una anomalia che potrebbe indicare la presenza di un fenomeno nuovo , come si fa ad essere sicuri della scoperta?

Fare gli scienziati vuol dire dubitare, sempre e di tutto.

Partire sempre dall'ipotesi che ci stia sfuggendo qualcosa di importante. Prima cerchiamo l'errore all'interno della collaborazione. Se non riusciamo a trovarlo pubblichiamo tutti i dati in maniera che ci possano provare tutti gli altri scienziati.

Gli scienziati considerano una scoperta valida quando

a) e' stata verificata da due o piu' esperimenti ed e' riproducibile

b) la probabilita' di errore statistico in ciascun esperimento e' stata ridotta ben al di sotto di una parte per milione (standard di 5σ).

Come ci si protegge?

Non esiste una ricetta sicura al 100%.

Calibrazioni, calibrazioni, calibrazioni.

Non trascurare mai anche il minimo dettaglio.

Essere paranoici nel cercare di considerare tutte le possibili cause di errori strumentali.

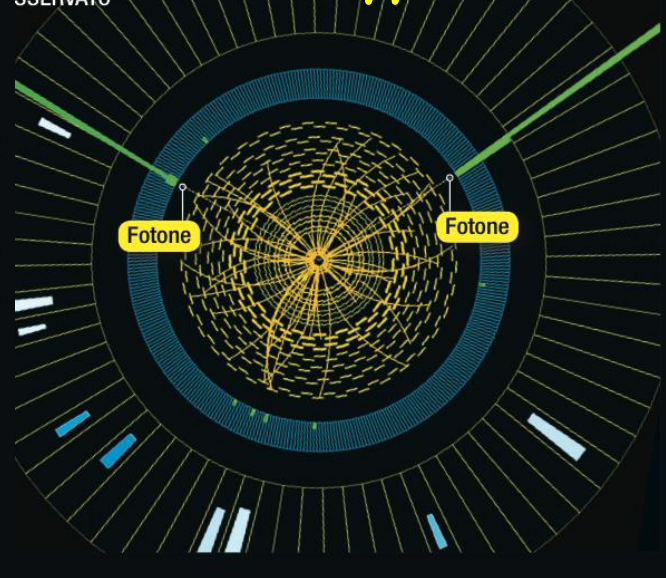
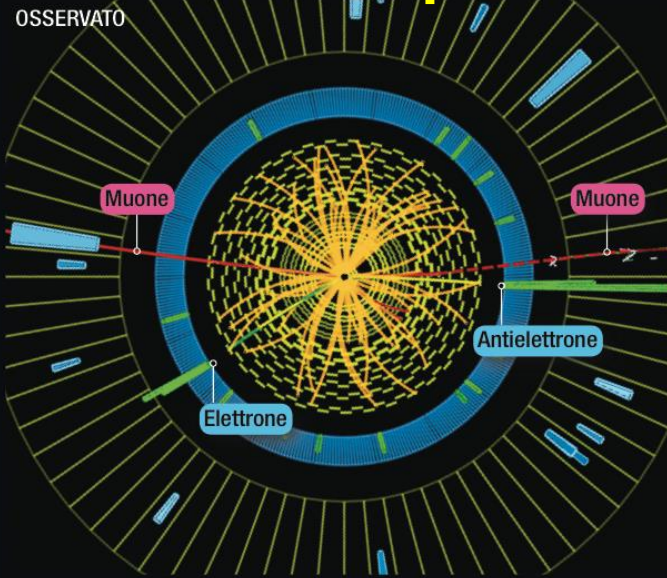
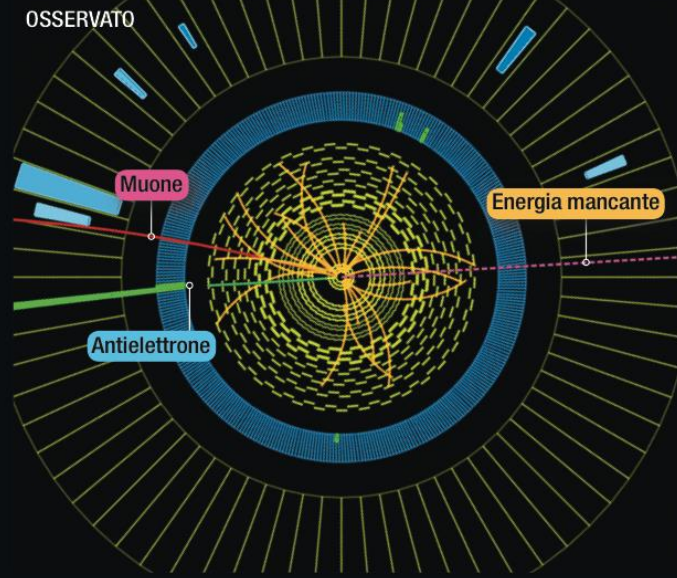
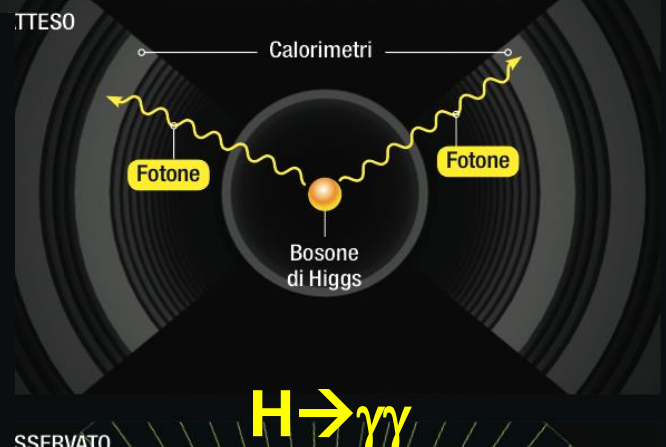
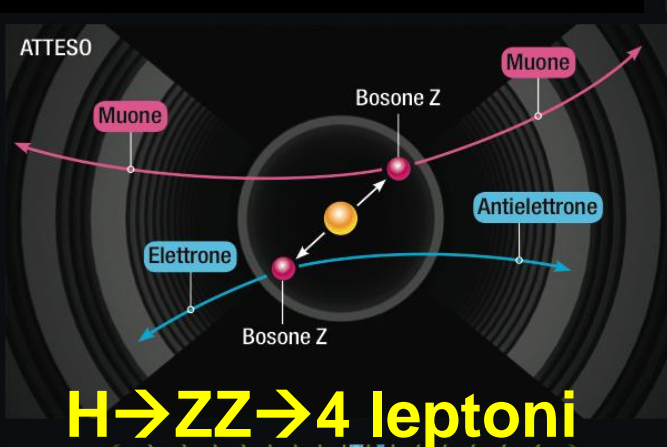
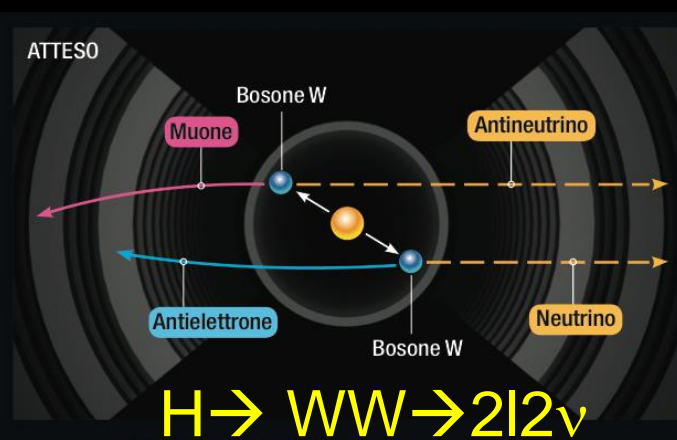
Chiedere a gruppi diversi nello stesso esperimento di fare la stessa misura usando programmi e selezioni diverse.

Ripetere le prove piu' e piu' volte per verificare che si riproducono gli stessi risultati : accumulare statistica.

Avere altri esperimenti che ripetono la stessa misura con apparati e persone completamente diversi.

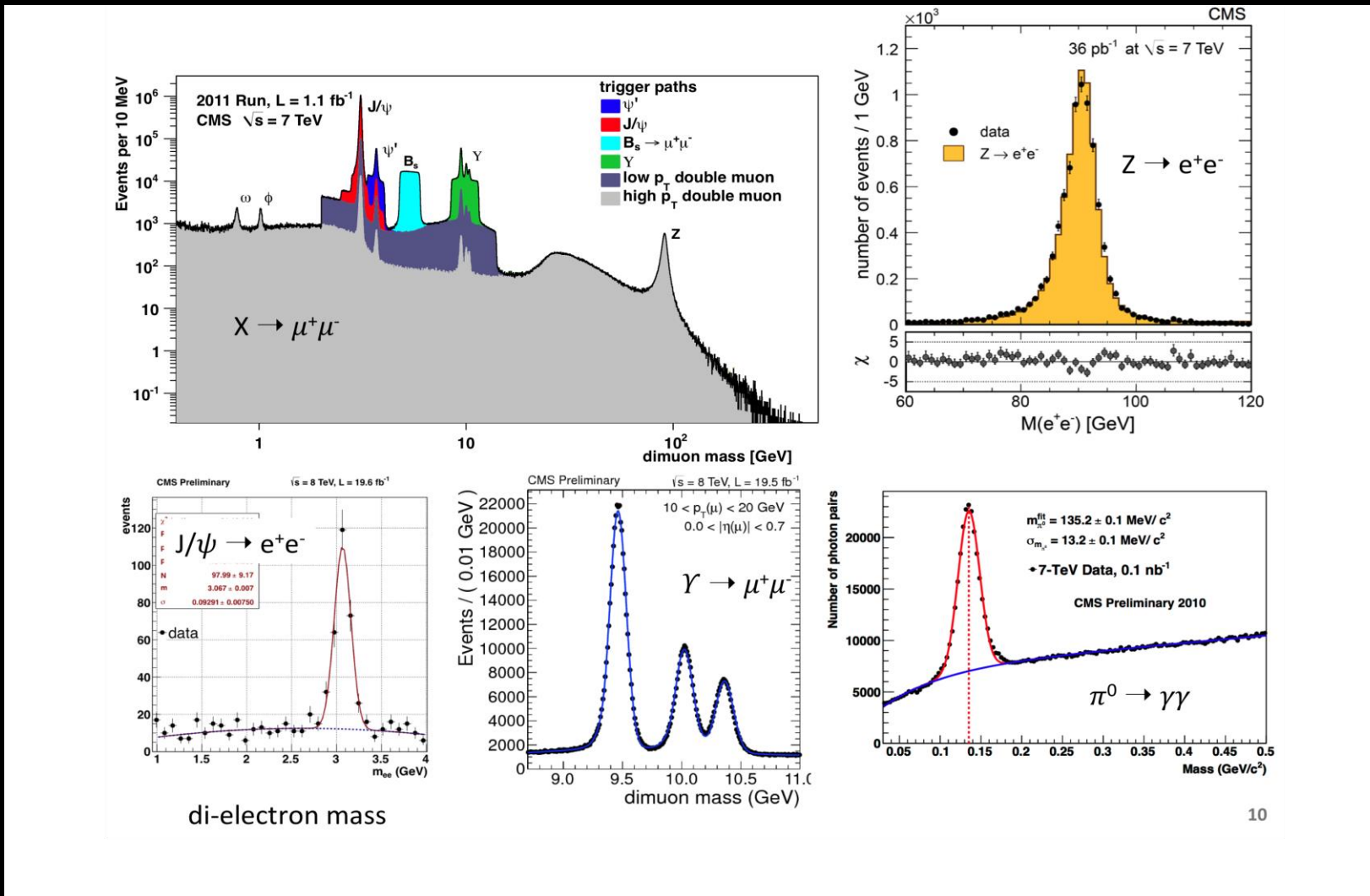
Cosa ci aspettiamo di vedere.

Il bosone di Higgs e' una particella instabile, che non puo' essere osservata direttamente perche' decade immediatamente in altre particelle. I modi di decadimento piu' utili, ai fini della scoperta nella regione di bassa massa, sono i tre schematizzati qui sotto.

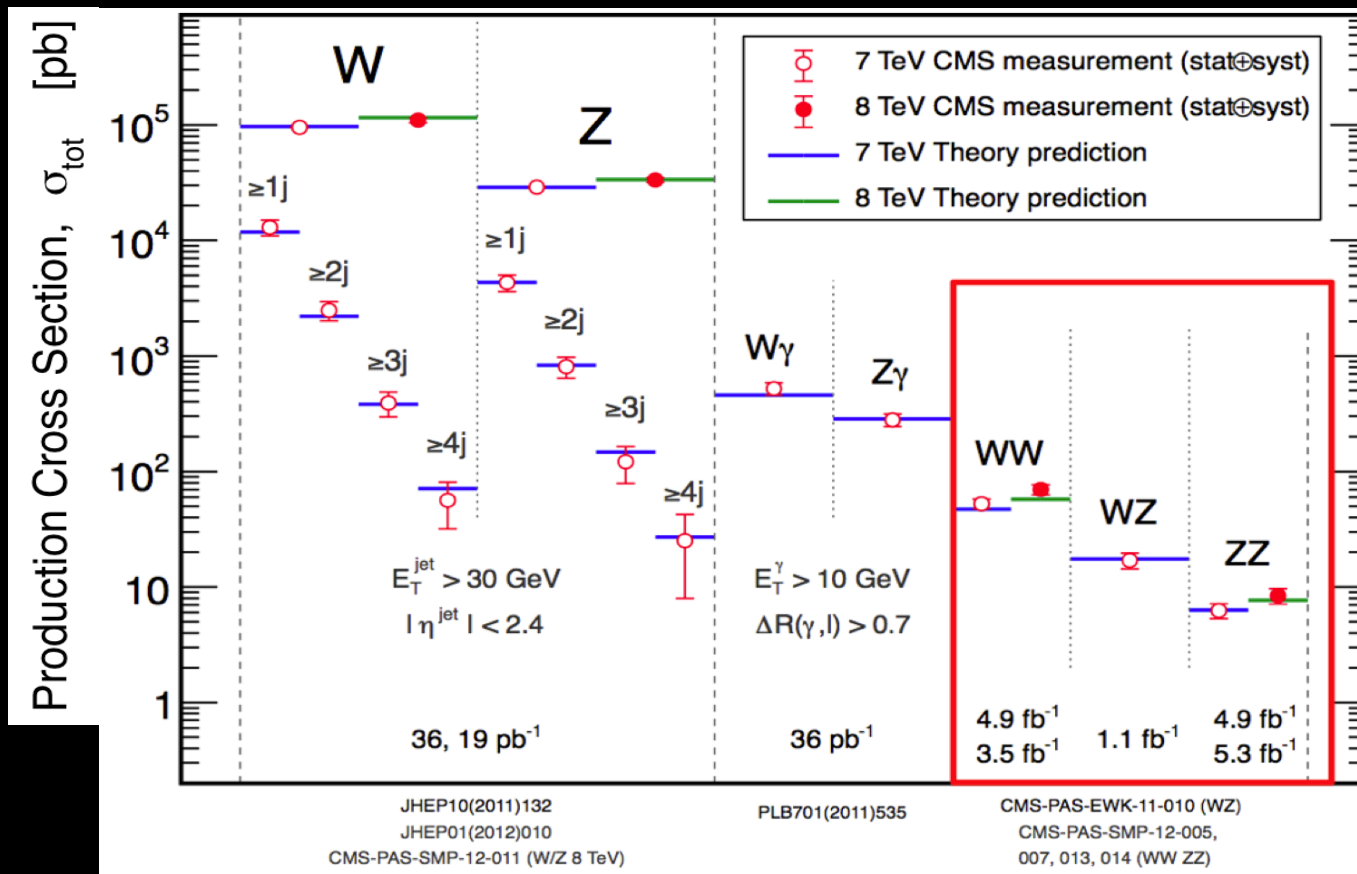


Si misurano con precisione tutte le particelle conosciute:

- a) si calibrano i nostri rivelatori; b) si affinano gli strumenti che ci servono ad identificare i decadimenti del bosone: elettroni, muoni, fotoni, tau, getti di b etc.



Si misurano tutti i processi conosciuti del Modello Standard: il rumore di fondo dietro il quale si puo' nascondere la nuova particella



Quando si e' capaci di misurare fenomeni rarissimi come la produzione di coppie di Z si e' pronti per dare la caccia al bosone di Higgs.

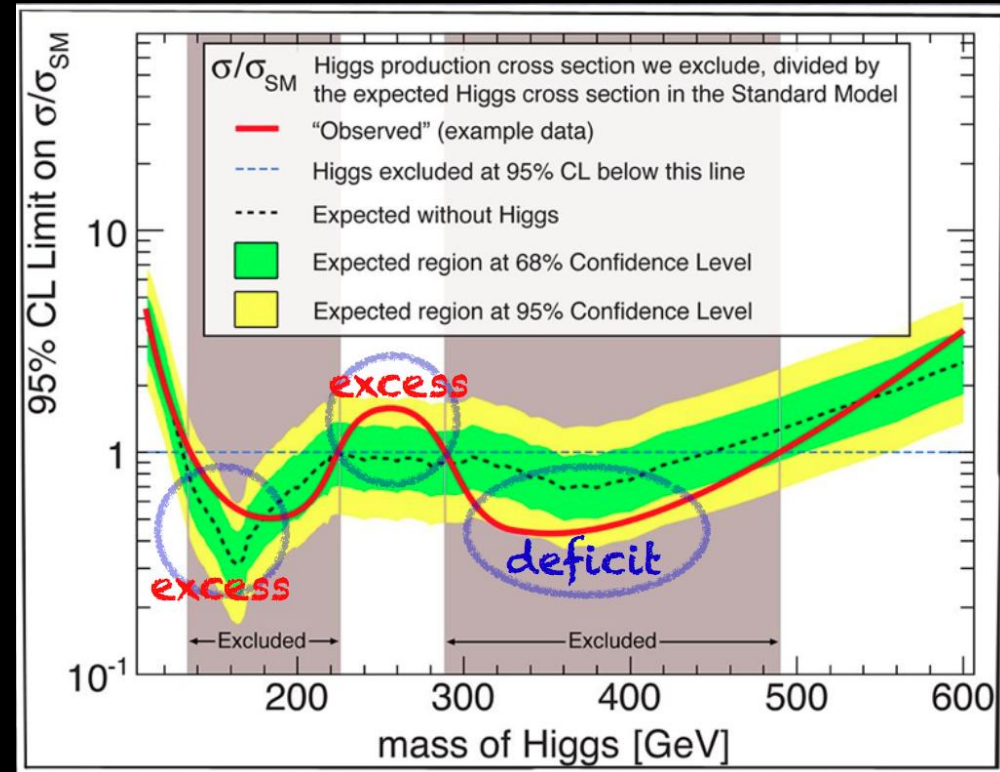
Si fa di tutto per escludere la presenza del bosone di Higgs (il famoso plot coi colori della bandiera del Brasile).

Il bosone di Higgs puo' avere una qualunque massa.

Per ogni punto di massa si mette insieme l'informazione proveniente da diversi canali di decadimento.

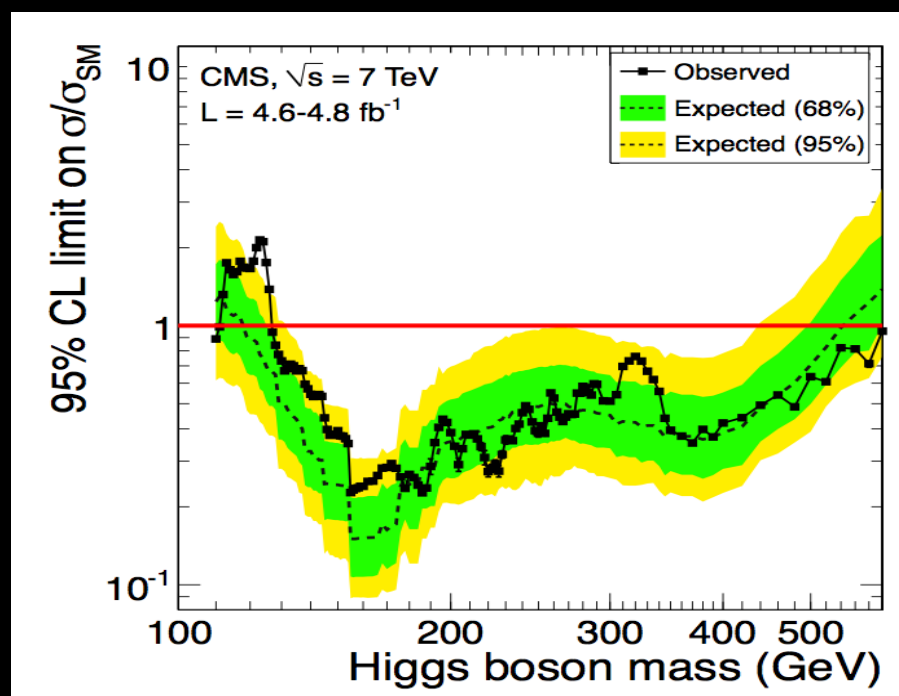
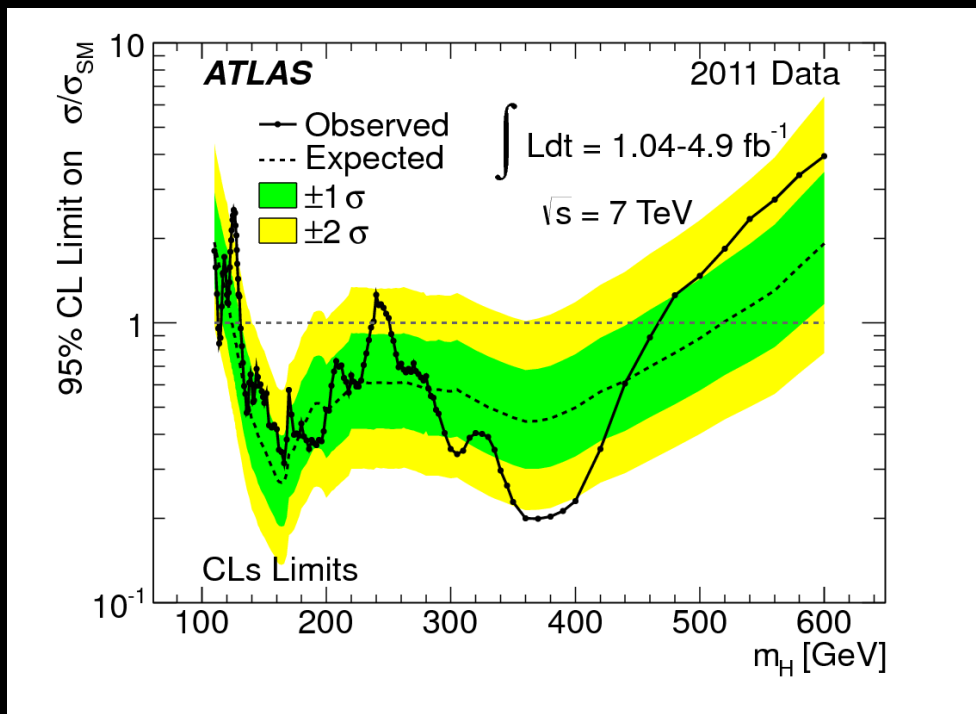
Si confrontano i rate misurati di eventi con quelli che ci si aspetta in presenza del bosone.

Quando si va sotto 1 si esclude la presenza del bosone di Higgs a quella massa.



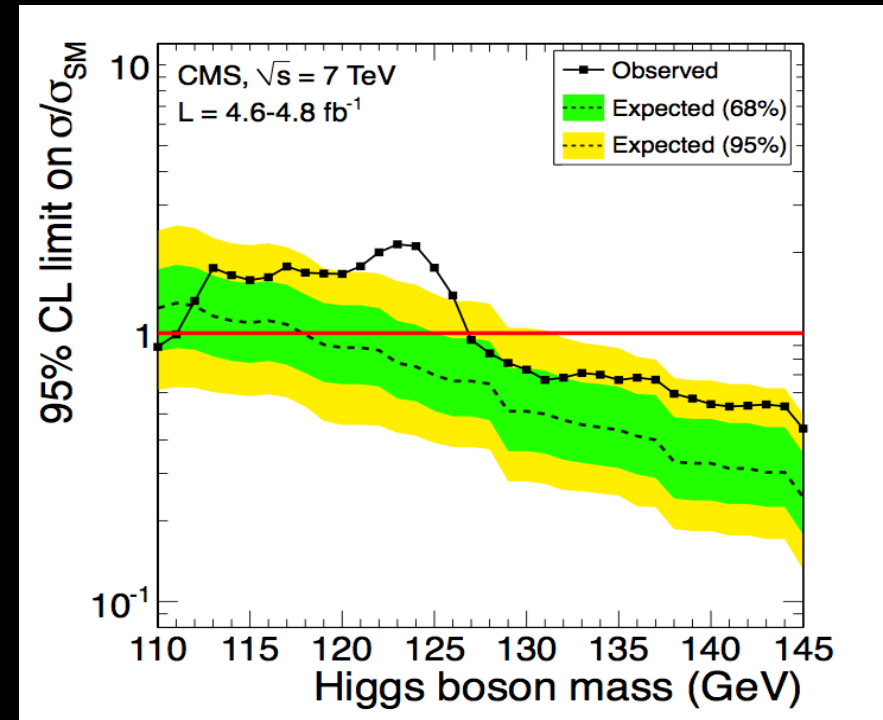
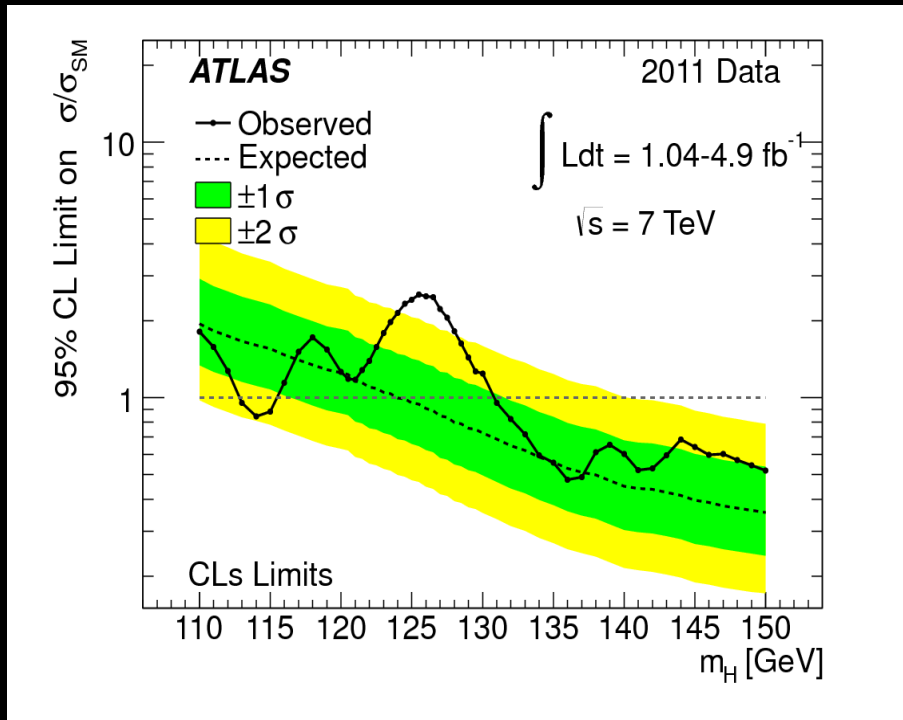
Se si vede un eccesso di eventi sopra 1 quando la sensibilita' e' alta, puo' essere ancora una fluttuazione statistica del fondo ma potrebbe anche essere "lui".

CERN: 13 Dicembre 2011: il momento cruciale.



Si esclude la presenza del bosone di Higgs da circa 600 GeV fino a 127-130 GeV. Non si riesce ad andare al di sotto perche' li' sta succedendo qualcosa.

Prima evidenza del bosone di Higgs a 125 GeV.



Entrambi gli esperimenti vedono un eccesso di eventi intorno a 125 GeV. E' la prima volta che si presenta questo tipo di coincidenza. Potrebbe essere il primo indizio del bosone ma potrebbe ancora essere una maligna fluttuazione statistica.

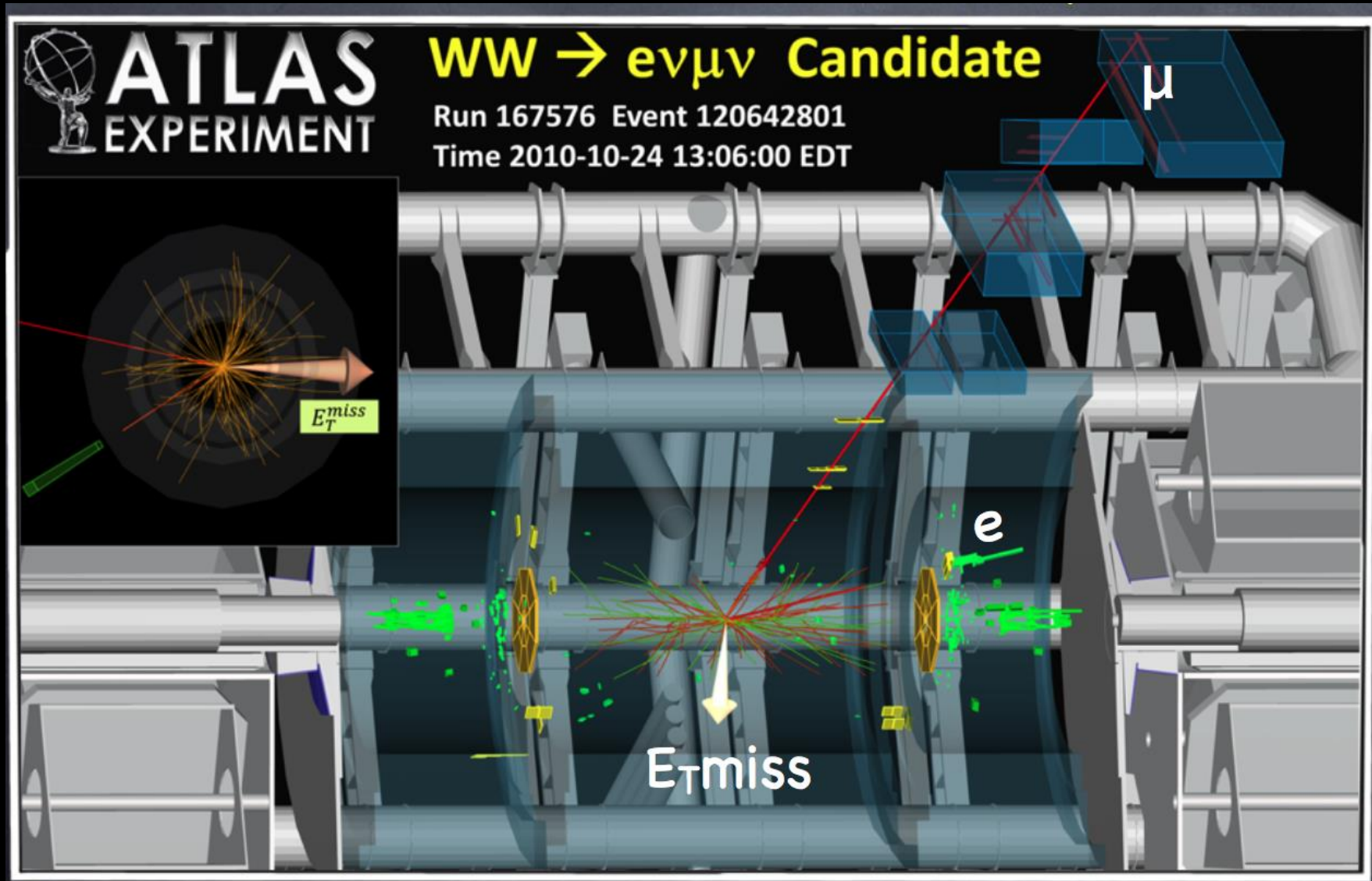
Prudenza e pazienza: i nuovi dati che prenderemo nel 2012 ci permetteranno di capire meglio cosa succede esattamente.

Analisi alla cieca dei nuovi dati ad 8 TeV , per evitare ogni forma di condizionamento. Fino al 15 Giugno 2012.

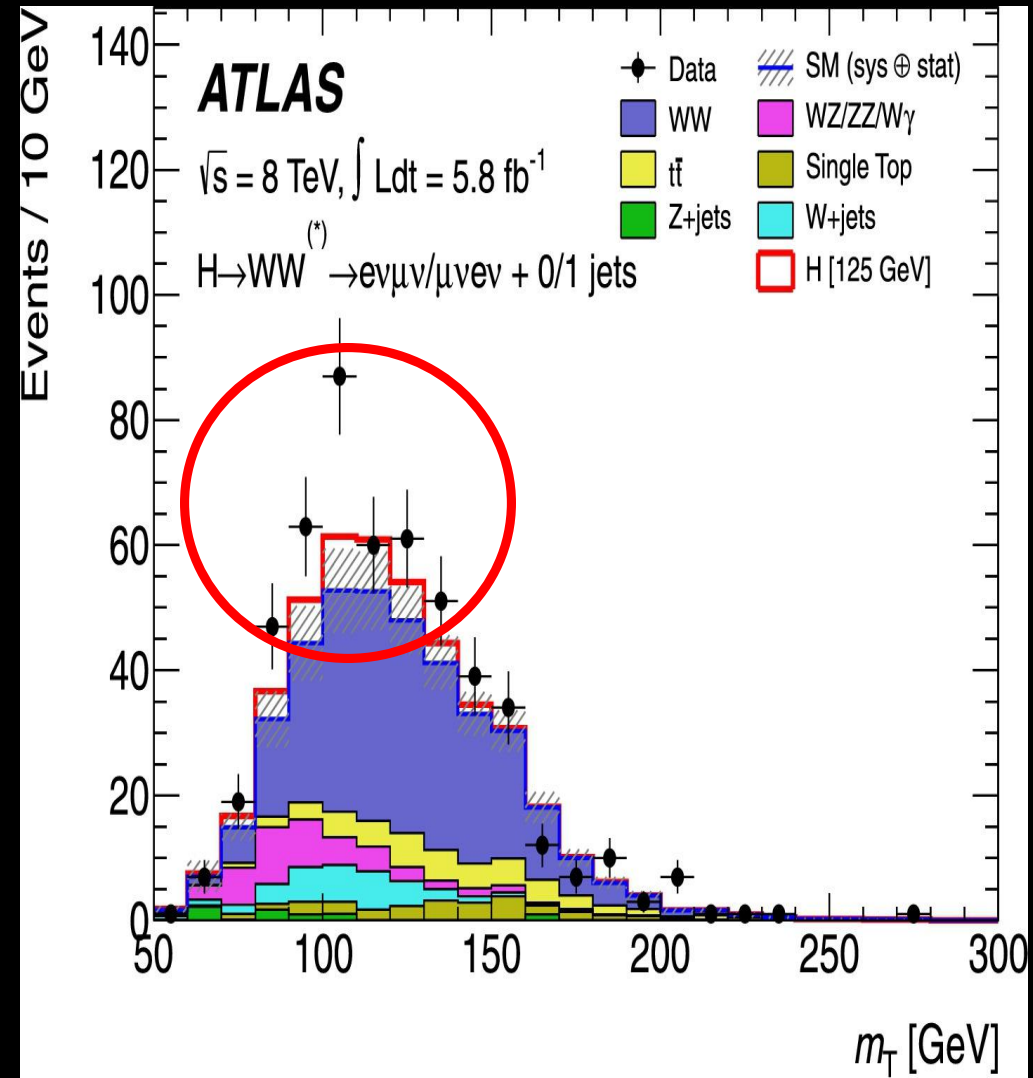
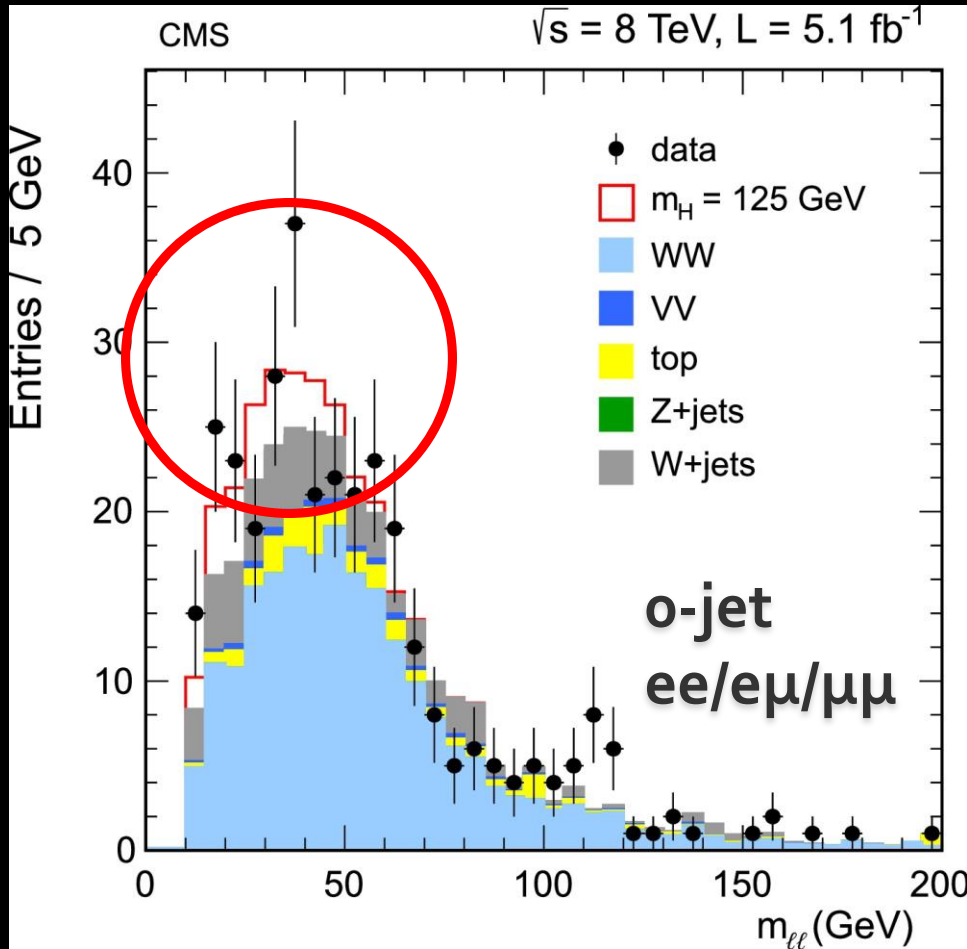
Circa 700 fisici partecipano alla riunione decisiva in CMS:
~ 400 al CERN, stipati in una sala da 250 posti,
> 300 ai quattro angoli del pianeta collegati in video interattivo.



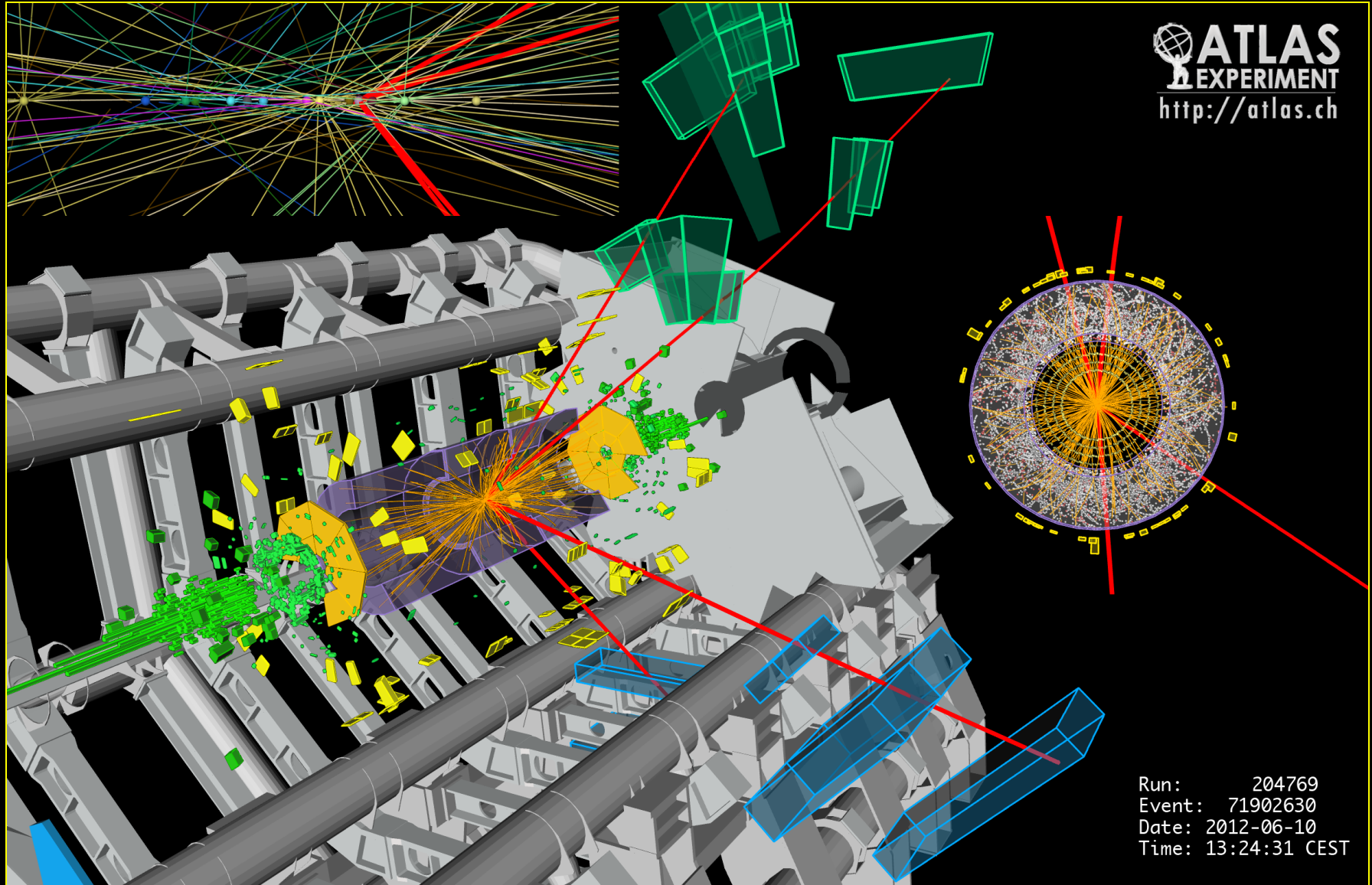
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$: il “cavallo da fatica”



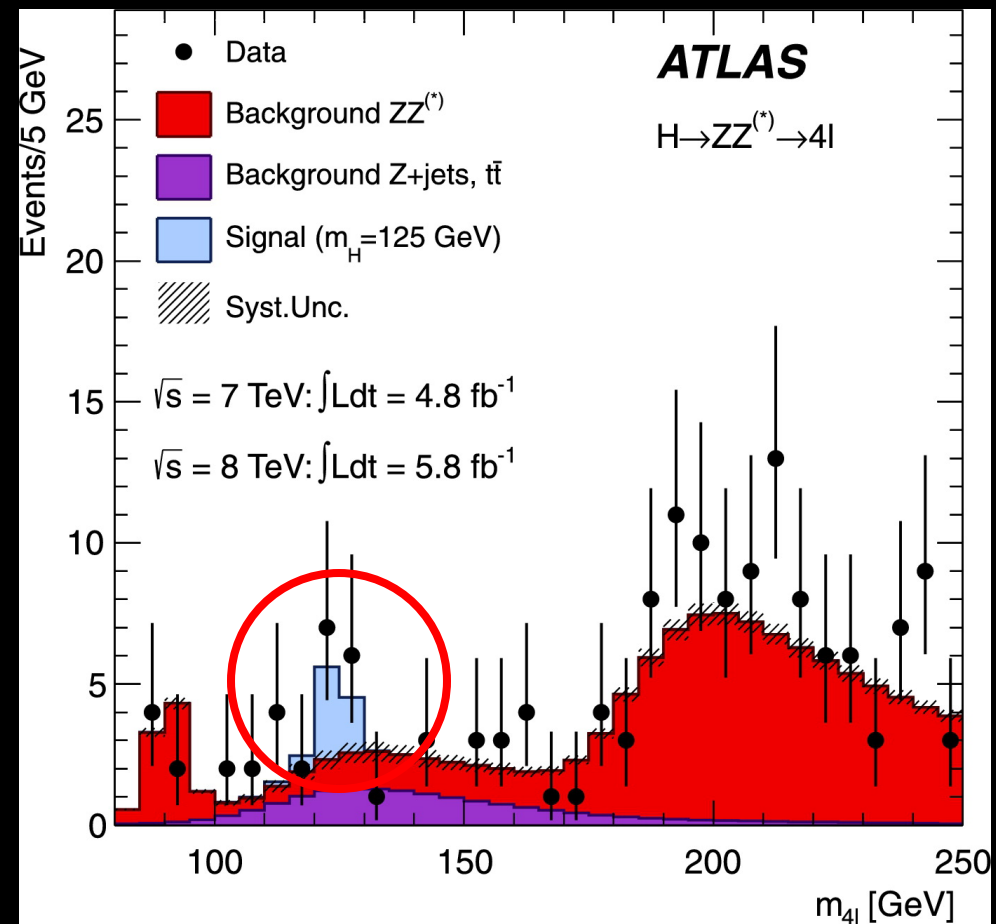
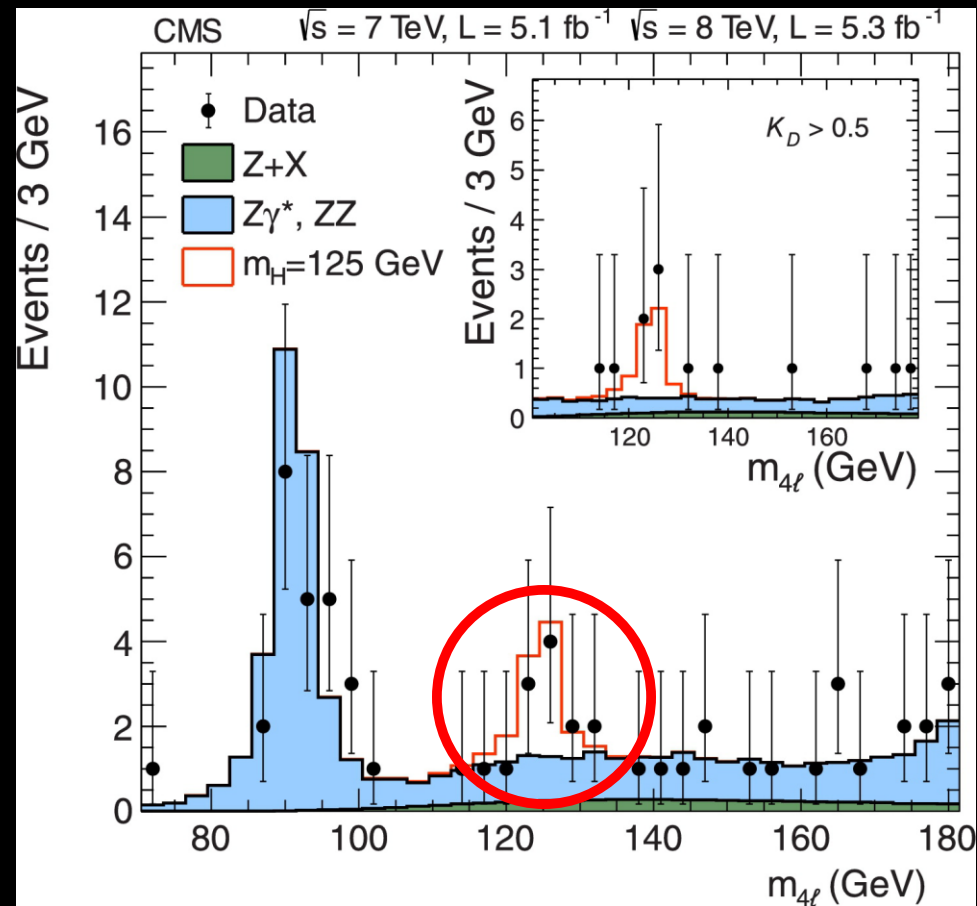
$H \rightarrow WW \rightarrow 2l2\nu$: il “cavallo da fatica”



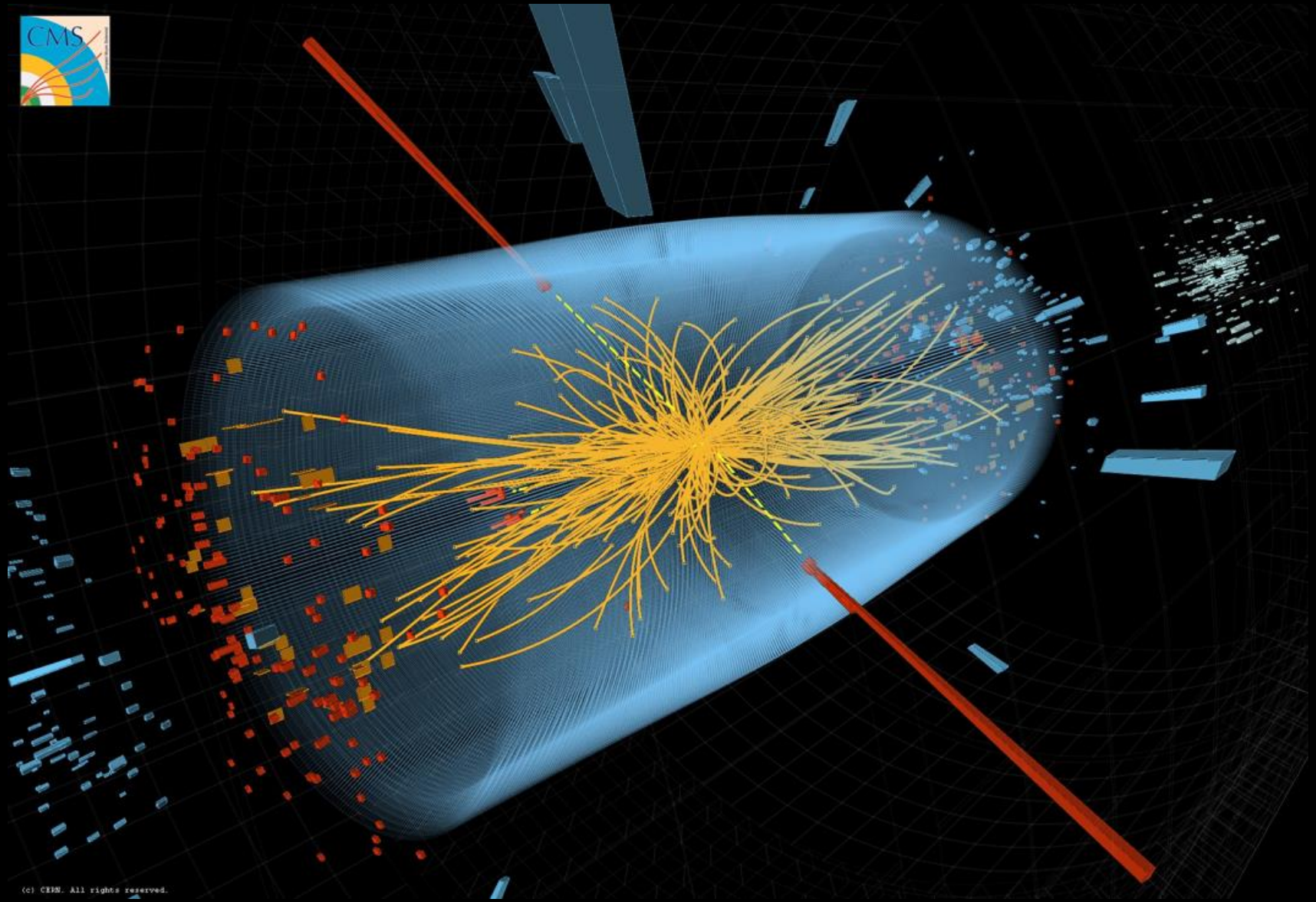
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$: il canale d'oro.



H → ZZ → 4 leptoni: il canale d'oro.

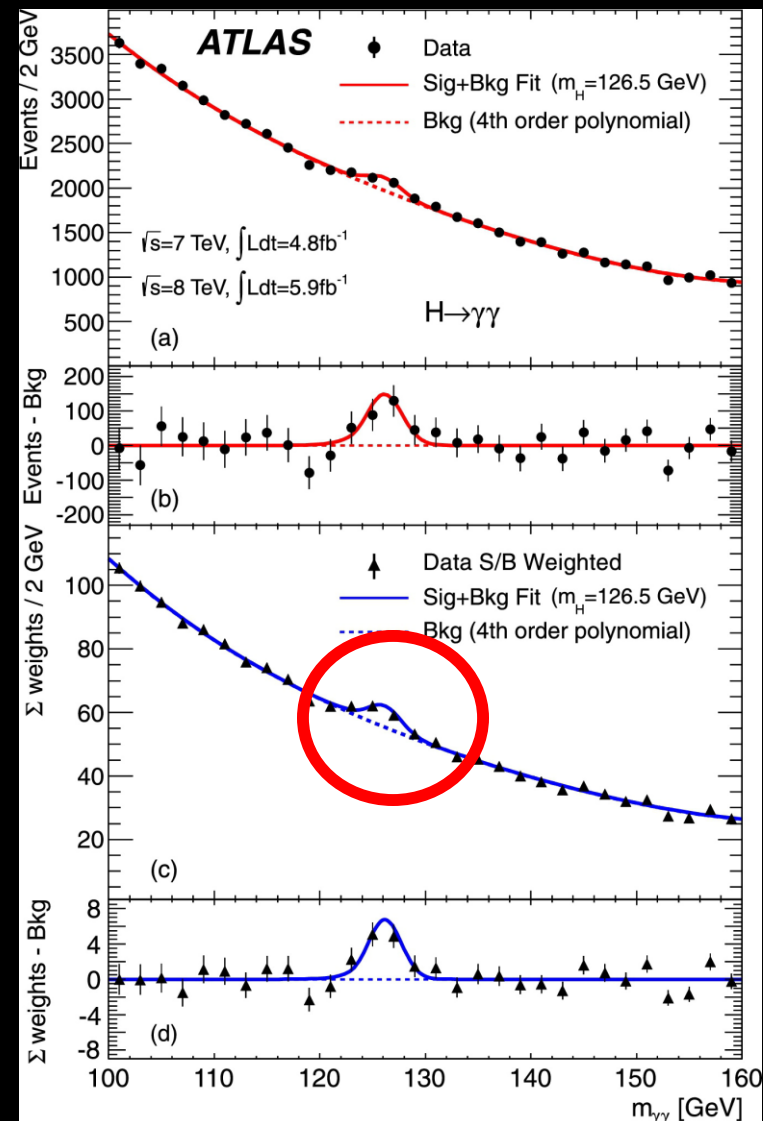
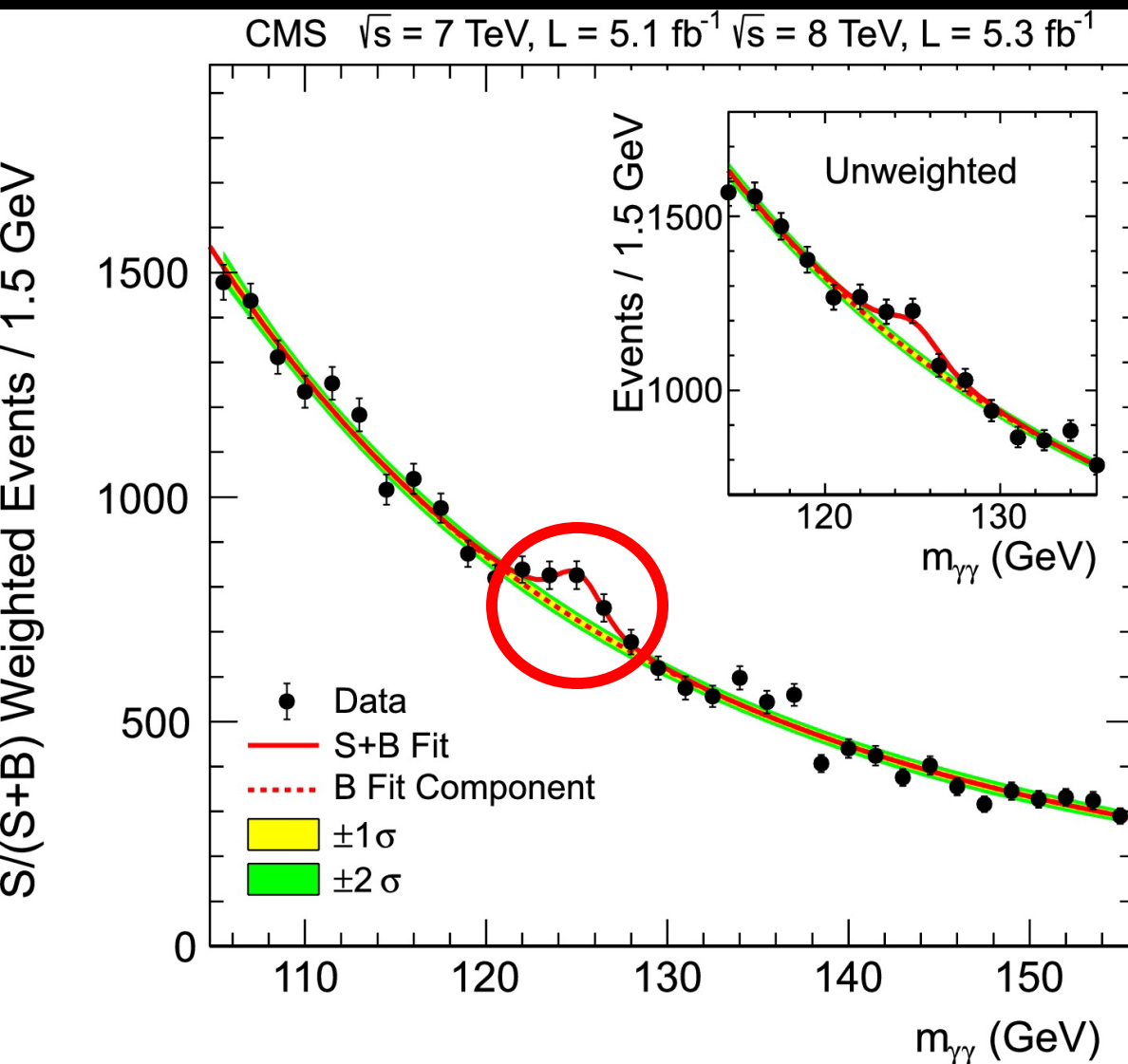


$H \rightarrow \gamma\gamma$: il canale chiaro come un cristallo

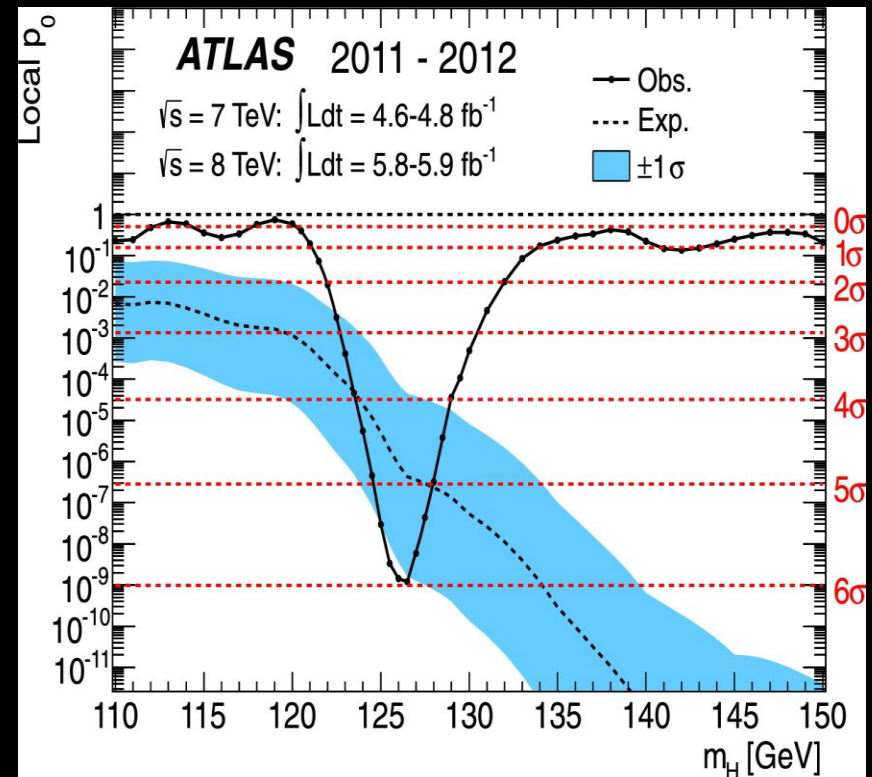
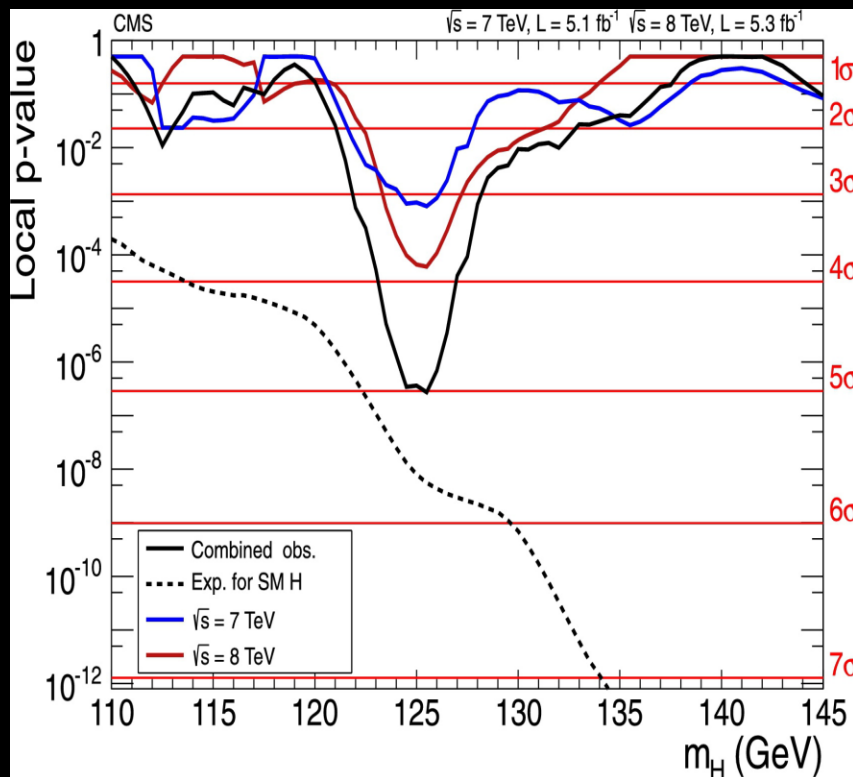


(c) CERN. All rights reserved.

H → $\gamma\gamma$: il canale chiaro come un cristallo



Scoperta di un nuovo bosone “di tipo Higgs”.

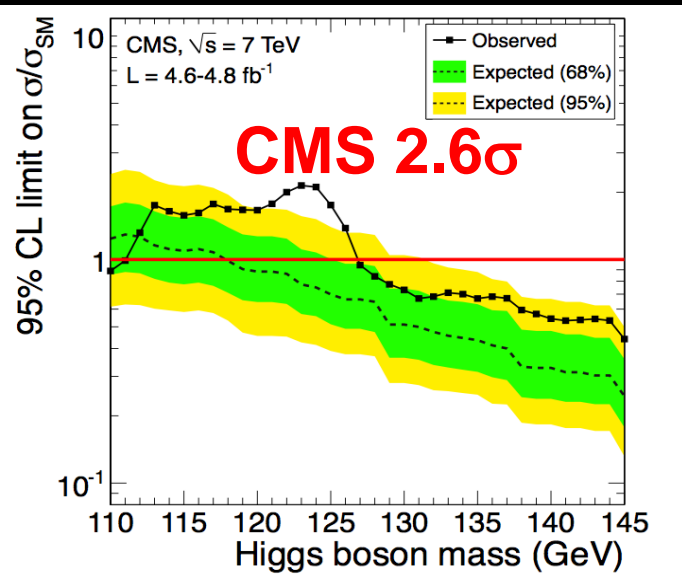


July 4 Seminar at CERN: <https://cms-docdb.cern.ch/cgi-bin/PublicDocDB/ShowDocument?docid=6125>

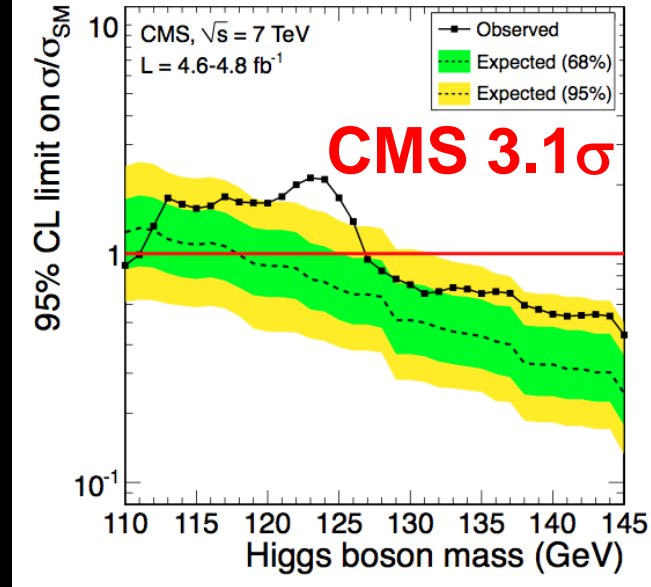
Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC arXiv: 1207.7214v1.

Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at LHC arXiv 1207.7235v1

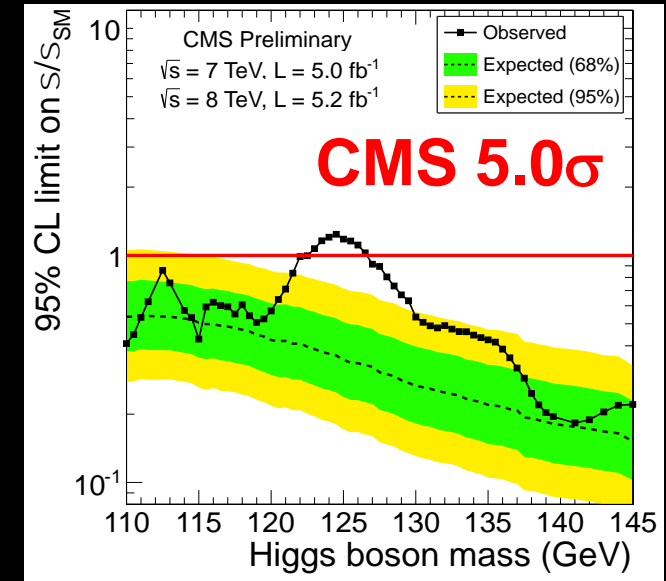
I sette mesi che hanno cambiato la nostra fisica



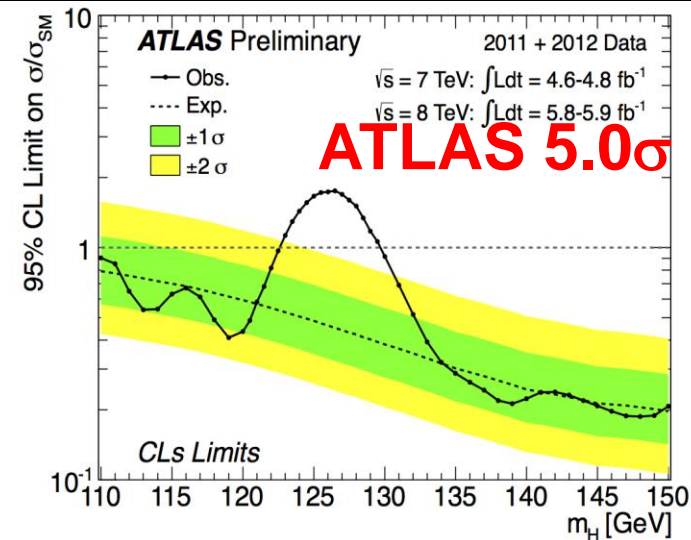
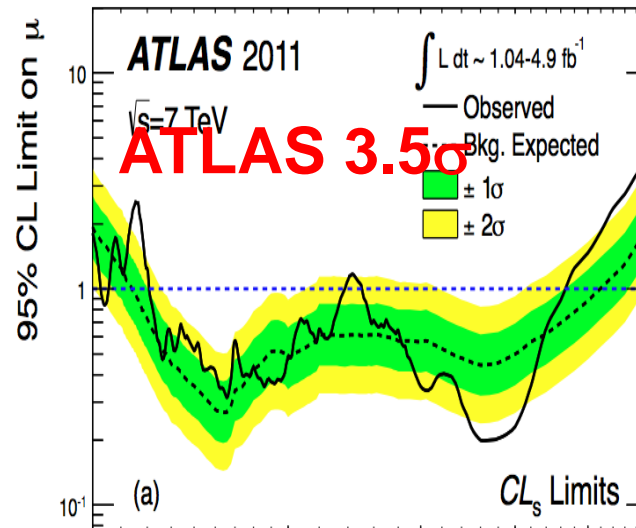
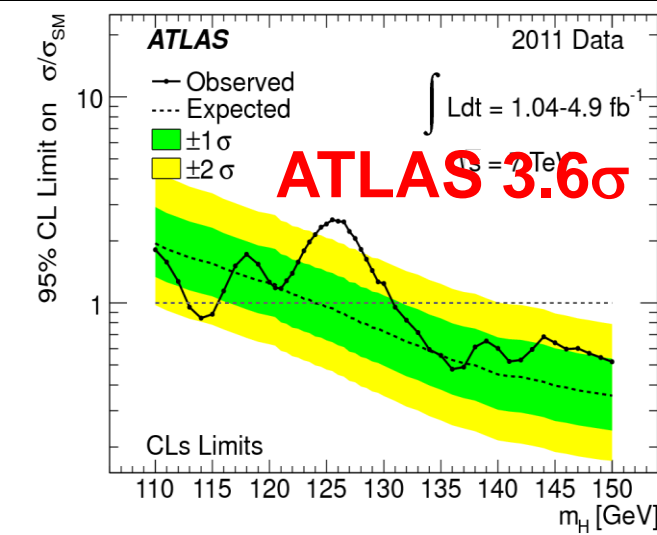
13 Dic 2011 il I seminario



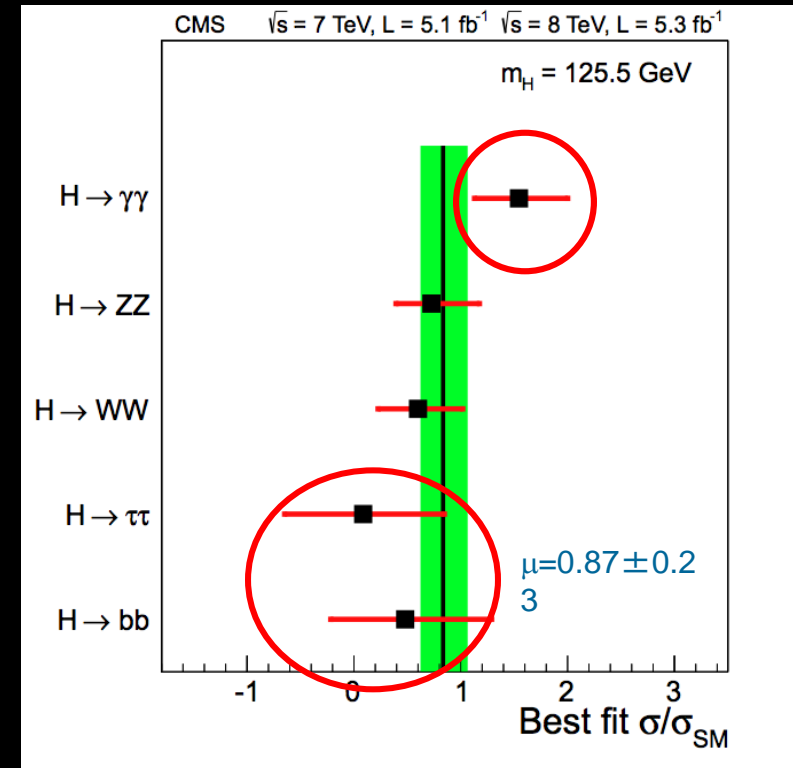
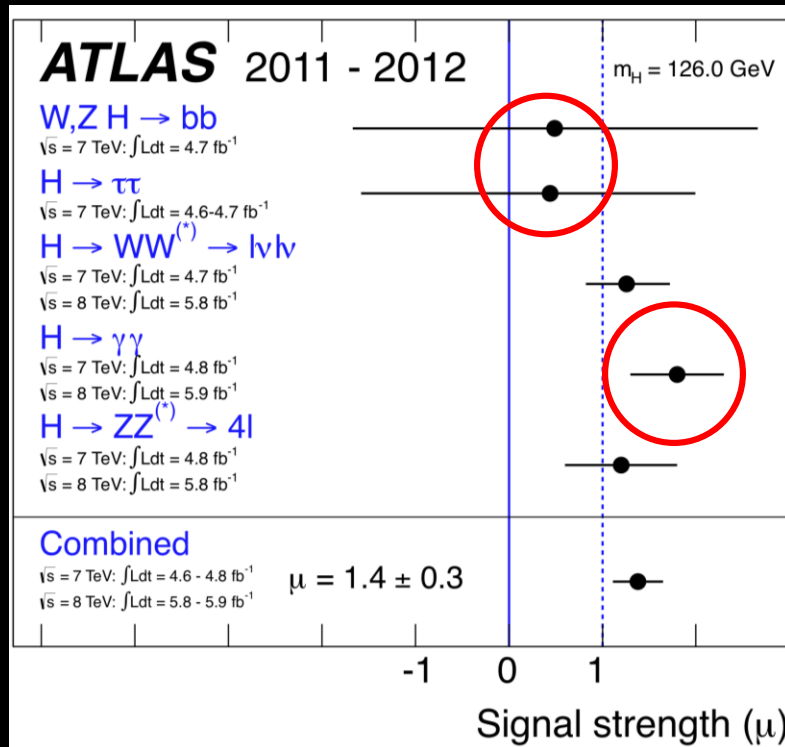
7 Feb. 2012 gli articoli



4 Lug 2012 il II seminario

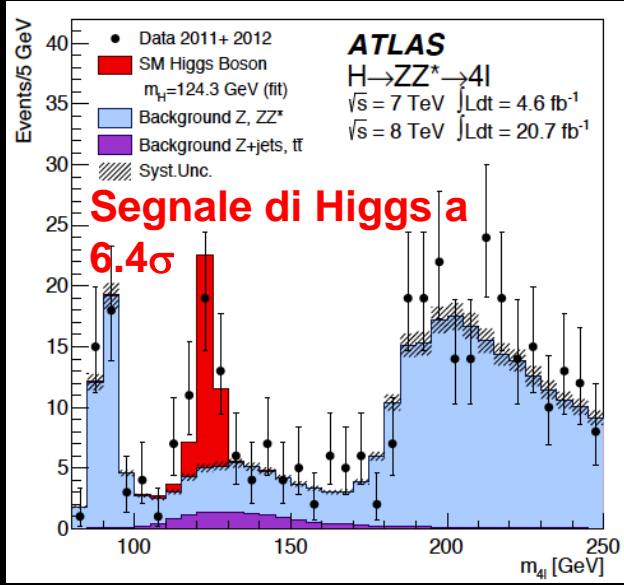
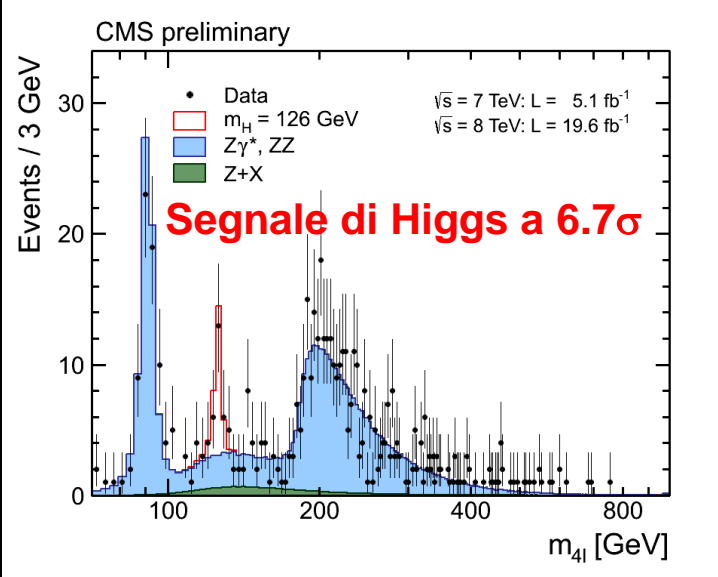


Questioni aperte al momento della scoperta



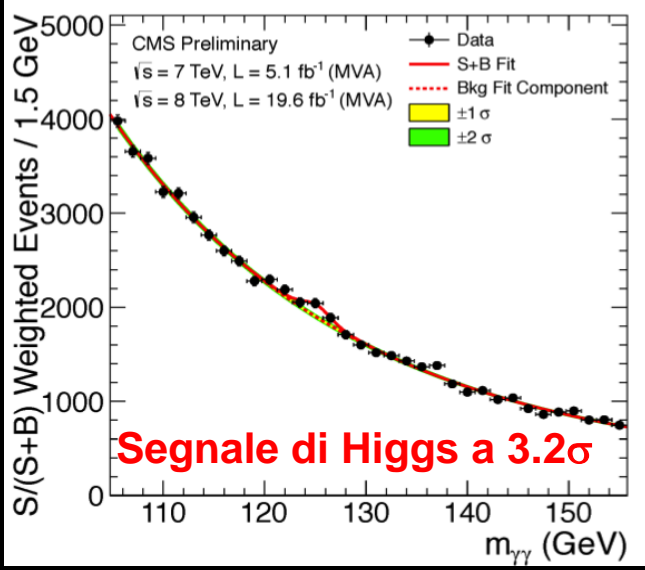
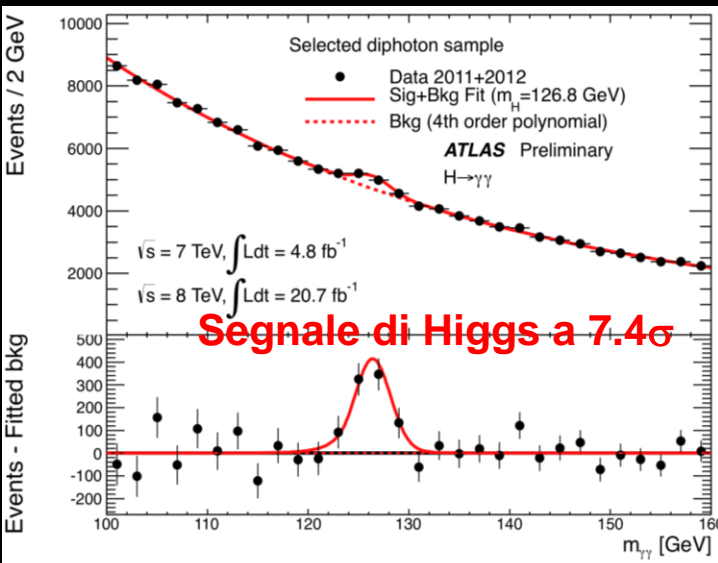
- 1) Siamo sicuri che e' uno scalare (spin 0)?
- 2) Non abbiamo visto alcun segnale nei decadimenti in fermioni ($\tau\tau$, bb): c'e' solo bisogno di nuovi dati o e' una vera anomalia?
- 3) Sembra esserci un eccesso di $H \rightarrow \gamma\gamma$ in entrambi gli esperimenti: e' uno scherzo della statistica o e' nuova fisica ?

Nuovi risultati in $H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$ ed $H \rightarrow \gamma\gamma$



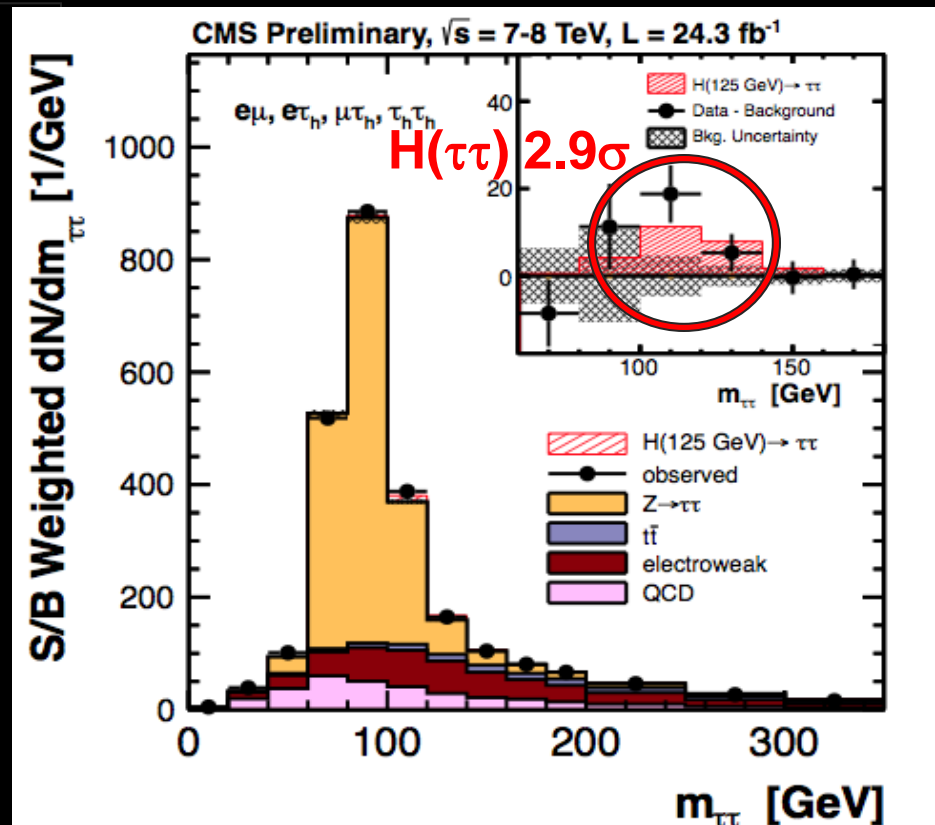
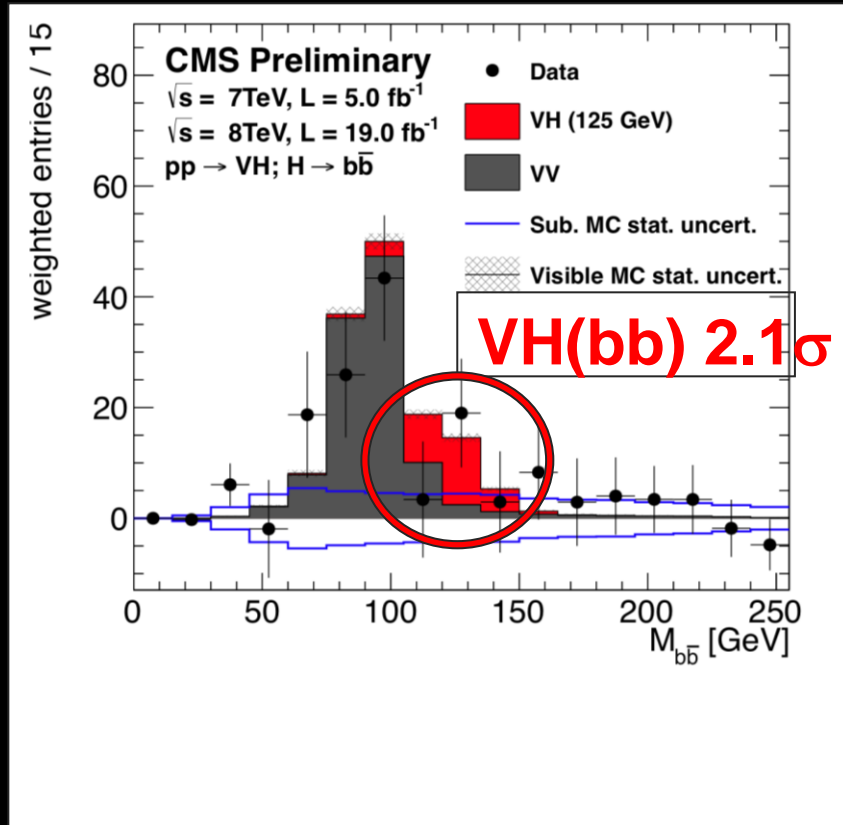
La nuova particella e' sempre li'.

Buone notizie!



ATLAS continua a vedere un segnale $H \rightarrow \gamma\gamma$ piu' forte del previsto mentre CMS ora la trova piu' debole del previsto: statistica.

Decadimento in fermioni: $H \rightarrow b\bar{b}$ ed $H \rightarrow \tau\tau$

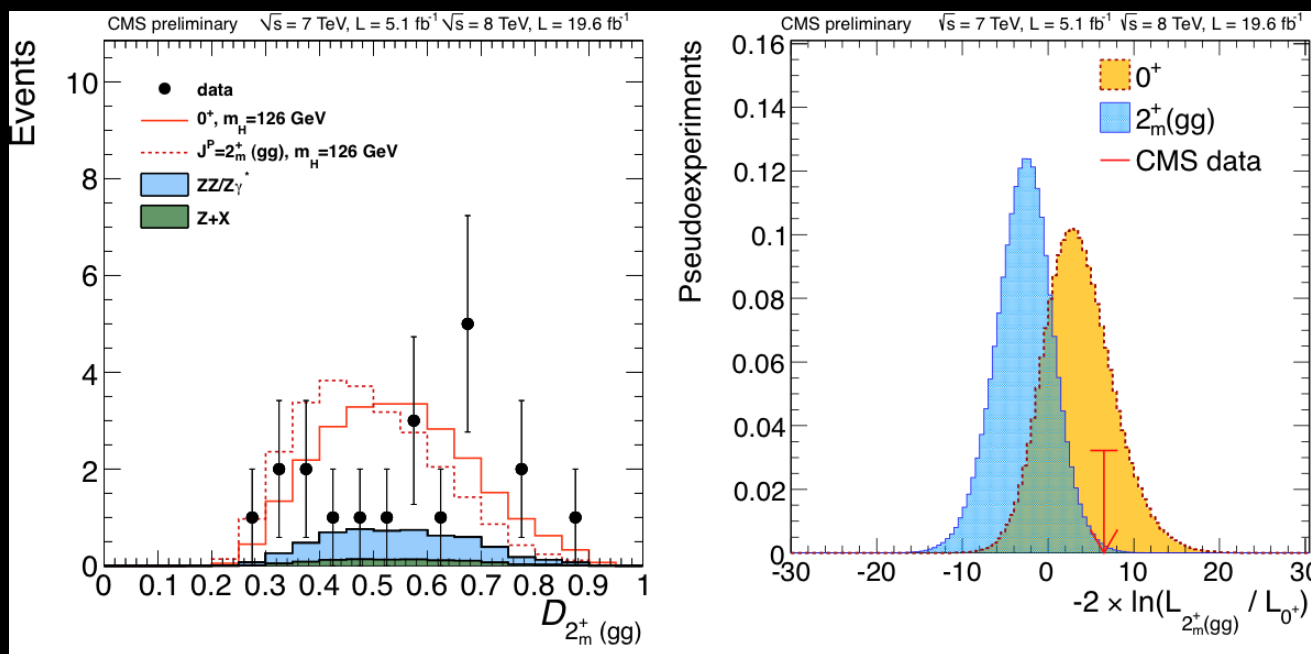


Con i nuovi dati si comincia a vedere qualcosa anche nei decadimenti con fermioni.

Non ci sono importanti anomalie nell'accoppiamento del nuovo bosone con b e con tau.

Ma e' veramente uno scalare?

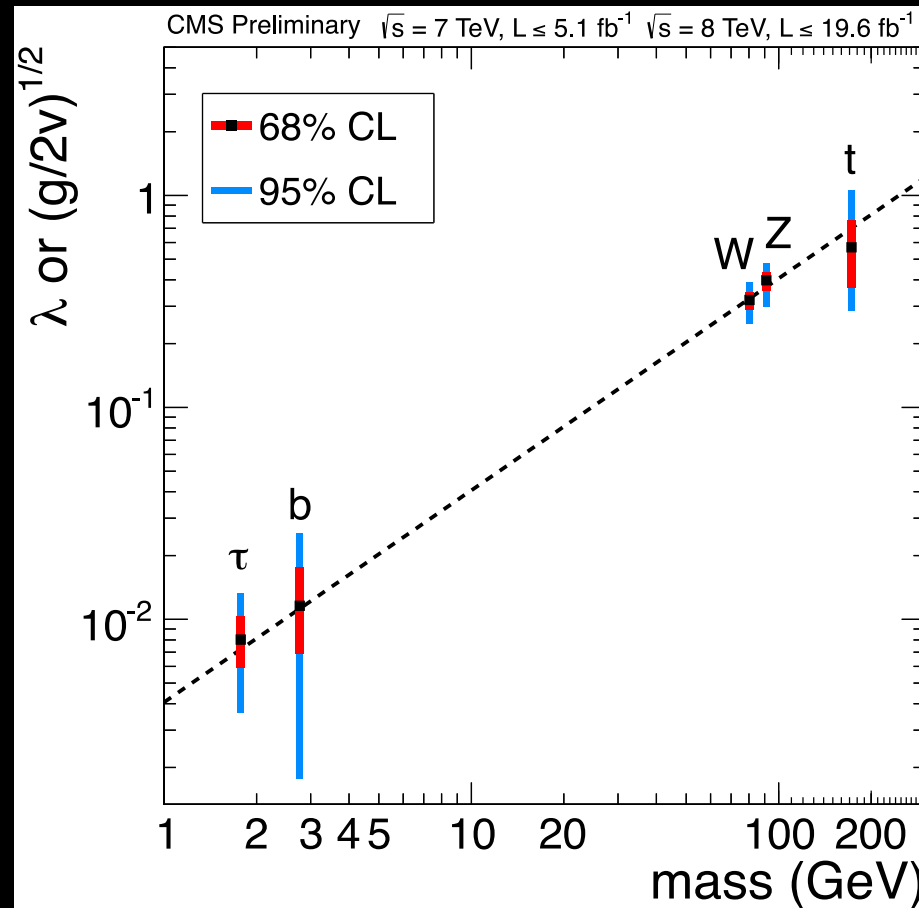
Per misurare spin e parita' della nuova particella si studiano le distribuzioni angolari dei prodotti di decadimento.



L' ipotesi che il nuovo bosone abbia spin 2 e' esclusa al 99,9% di probabilita'.

Tutti i dati che abbiamo sono consistenti con l' ipotesi che la nuova particella sia uno scalare.

“Continua a camminare come un’ anatra, a starnazzare come un’anatra.....”



Tutti i dati raccolti fino ad ora sono consistenti con l’ ipotesi che la nuova particella sia in effetti un (il) bosone di Higgs.

Cosa abbiamo imparato sulla nascita del nostro Universo

10^{-11} secondi dopo il Big-Bang, quando la temperatura era intorno ai 100GeV, un campo invisibile ha occupato ogni angolo dell' universo assegnando una specifica massa ad ogni altra particella.

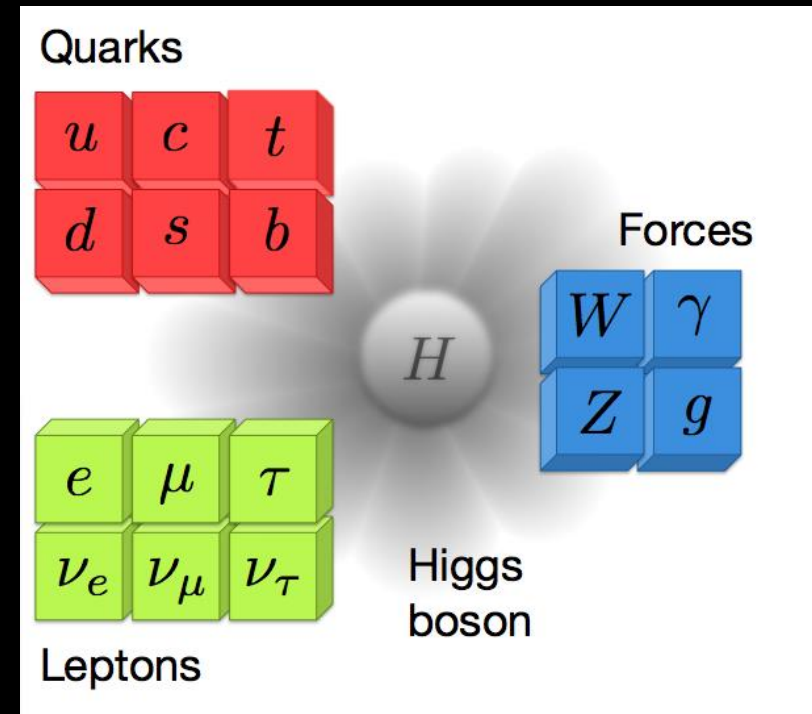
Come conseguenza di questo meccanismo gli ingredienti caotici dell' universo primordiale hanno cominciato ad attrarsi l'un l'altro per formare atomi, gas, galassie, pianeti e, in ultima analisi, anche noi.

Senza il bosone di Higgs non solo il Modello Standard non starebbe in piedi ma non si riuscirebbe a capire nulla dell' Universo che ci circonda.

Dobbiamo ri-scrivere i libri di fisica

Il problematico trionfo del Modello Standard

- La scoperta del bosone di Higgs segna il trionfo del Modello Standard.
- Ma anche con l'inclusione dell'Higgs sappiamo già che lo SM è una teoria non completa dal momento che non spiega molte, importantissime osservazioni.



L' esistenza della materia oscura.

L' energia oscura.

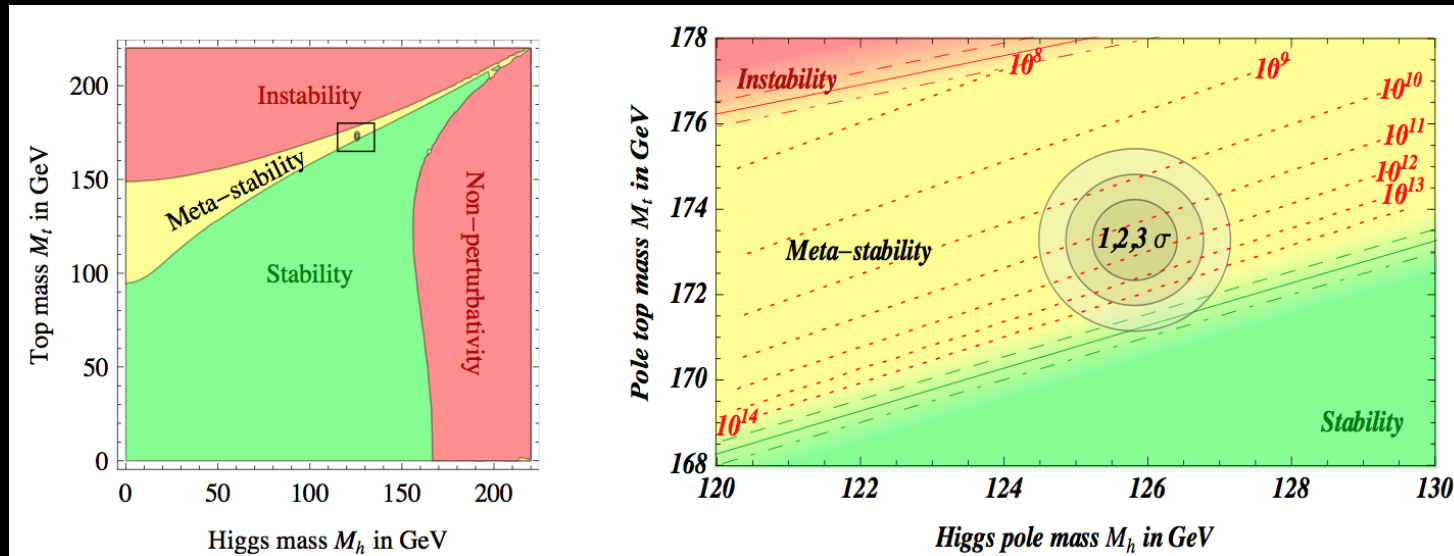
L' unificazione delle forze ed il ruolo della gravita'.

Masse e gerarchia dei neutrini.

Asimmetria fra materia ed antimateria.

Siamo nel bel mezzo di una vera rivoluzione scientifica le cui implicazioni saranno, forse, piu' chiare solo fra qualche decennio.

Un esempio delle nuove domande: il vuoto elettrodebole e' stabile ?



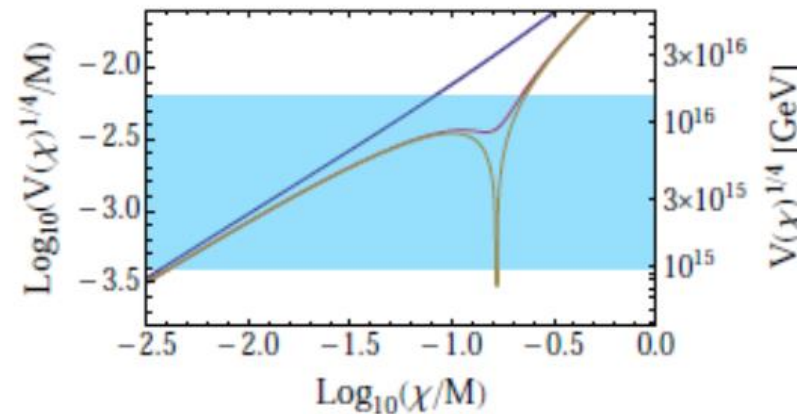
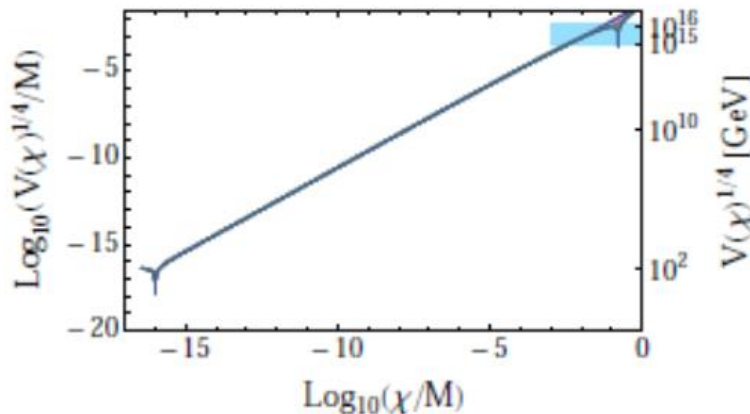
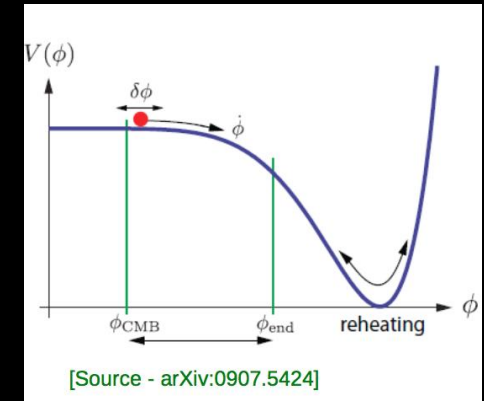
Con un top quark così pesante ed un Higgs così leggero, il vuoto elettrodebole, cioè questa fragile impalcatura che regge il tutto da 13.8 miliardi di anni, sembra essere in un equilibrio meta-stabile, appesa fra l'instabilità che non avrebbe consentito all'Universo di vivere così a lungo e la noiosa stabilità che, forse, non avrebbe consentito quella dinamica che ha portato fino a noi.

Ma c'è di più: se $m_H > m_{\text{stabilita}}$, l'Higgs potrebbe avere avuto un ruolo nell'inflazione.

Potremo, forse, cominciare a capire l'inflazione, cioè la nascita del nostro universo.

L'inflazione è scatenata da una particella scalare; l'Higgs è la prima particella scalare che gioca un ruolo fondamentale e per di più, il suo potenziale ha un andamento che è molto simile, vicino alla scala di Planck a quello che sarebbe necessario per scatenare l'inflazione.

Tutto molto suggestivo ma saranno necessari altri studi per trarre conclusioni definitive.



Higgs potential as function of Higgs field value, $m_t=171.8$ GeV, $m_h=125.2, 125.158, 125.1577$ GeV

Conclusioni.

Analizzando i dati presi ad LHC nel 2011 e nel 2012, gli esperimenti ATLAS e CMS hanno scoperto un nuovo bosone di massa intorno a 125GeV . Il risultato sembra essere consistente con le caratteristiche previste dallo SM per il bosone di Higgs.

L'analisi di nuovi dati ci permetterà un test più rigoroso di queste conclusioni ed uno studio dell'ipotesi che ci siano anomalie in alcune delle proprietà della nuova particella che potrebbero indicare la presenza di fisica oltre il modello standard.

Siamo solo all'inizio dell'esplorazione della scala di energia di LHC che durerà almeno altri 20 anni.

Oggi abbiamo a disposizione una nuova finestra per capire meglio la materia e l'universo che ci circonda.

Rimanete in ascolto!