



Un viaggio dentro la scoperta del bosone di Higgs e le sue implicazioni sulla fisica del XXI secolo.

10_Higgs@La_Sapienza Roma 29 Settembre 2022

Guido Tonelli
CERN/INFN/Università di Pisa

Tutto è cominciato circa un secolo fa.

Nel 1918 si presenta alle prove di ammissione della Scuola Normale Superiore di Pisa un ragazzo romano di 17 anni che lascia a bocca aperta tutti gli esaminatori.



Nel 1933, a soli 32 anni, sviluppa una teoria talmente rivoluzionaria, che l'articolo sottoposto a Nature viene rifiutato, perchè “conteneva speculazioni troppo distanti dalla realtà fisica per essere di un qualche interesse per i lettori”.

È la teoria dell'interazione di Fermi.

La teoria di Fermi dell'interazione debole.

Enrico Fermi fu il primo a interpretare il decadimento β , come la manifestazione di un'altra forza, una nuova interazione fino ad allora sconosciuta.

Quella che oggi conosciamo come interazione debole, che gioca un ruolo fondamentale nella dinamica e nell'evoluzione del nostro universo, venne chiamata, per molti anni, interazione di Fermi.

Fermi ne formulò la teoria e calcolò l'intensità della nuova forza sfruttando l'analogia con l'elettromagnetismo, aprendo così la strada a quello che diventerà, trent'anni dopo, il Modello Standard delle interazioni fondamentali.

La Forza Elettro-Debole (1960-67).

- La teoria di Fermi dell'interazione debole fu una pietra miliare per la formulazione del **Modello Standard**.
- Nel 1967 Weinberg e Salam (e Glashow) formulano una teoria unificata delle interazioni elettromagnetica e debole. Si tratta di una teoria di campo quantistica che supera le difficoltà teoriche insite nella teoria del decadimento β di Fermi.
- La teoria prevede come mediatori delle interazioni deboli due bosoni massivi carichi, W^+ e W^- , e un bosone massivo neutro, Z , mentre il fotone, neutro e senza massa, è il mediatore delle interazioni elettromagnetiche.

Da qui nasce il Modello Standard.

La formulazione matematica del Modello Standard potrebbe essere consistente con particelle tutte a massa nulla e invece le particelle di materia (quarks e leptoni) coprono un intervallo compreso fra masse piccolissime, quasi nulle, e masse enormi: nel 1995 si scoprì che il quark top pesa più di 170 GeV!

Come mai i costituenti elementari della materia hanno masse così diverse tra loro?

Lo stesso vale per i campi. Com'è possibile che W e Z, così massicci (80 e 90 GeV), siano portatori della stessa interazione trasmessa dal fotone che è privo di massa?

Tre generazioni della materia (fermioni)

	I	II	III	
massa →	2,4 MeV	1,27 GeV	171,2 GeV	0
carica →	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0
spin →	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
nome →	u up	c charm	t top	γ fotone
	4,8 MeV	104 MeV	4,2 GeV	0
	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	$-\frac{1}{3}$	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Quark	d down	s strange	b bottom	g gluone
	<2,2 eV	<0,17 MeV	<15,5 MeV	91,2 GeV
	0	0	0	0
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
	ν_e neutrino elettronico	ν_μ neutrino muonico	ν_τ neutrino tauonico	Z⁰ forza debole
	0,511 MeV	105,7 MeV	1,777 GeV	80,4 GeV
	-1	-1	-1	± 1
	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1
Leptoni	e elettrone	μ muone	τ tauone	W[±] forza debole

Bosoni di gauge

Cos'è veramente la massa?

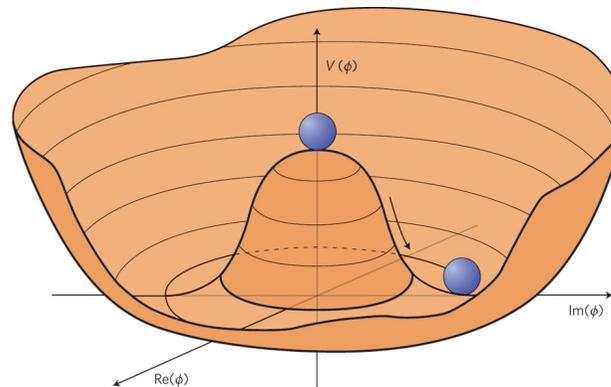
Il meccanismo di Brout-Englert-Higgs.

Nel 1964 due gruppi di scienziati, giovani, intorno ai 30-35 anni, del tutto sconosciuti, propongono una teoria radicalmente nuova per spiegare la rottura spontanea della simmetria elettrodebole.

È il mezzo a fare la differenza.



Robert Brout and Francois Englert
Bruxelles.



$$V(\Phi) = \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda^2 (\Phi^\dagger \Phi)^2$$



Peter Higgs
Edinburgh.

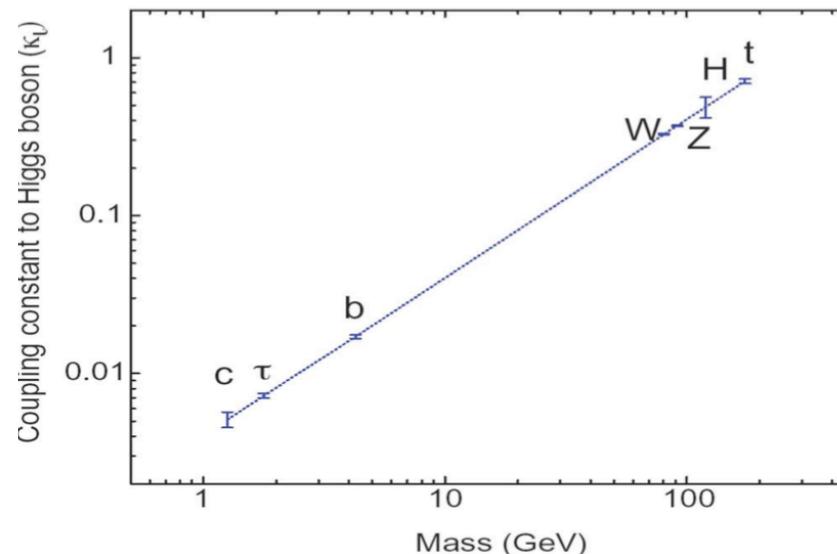
Un nuovo campo scalare pervade ogni angolo del nostro universo. Il “vuoto” non è vuoto. È pieno di un campo scalare che ha un falso minimo diverso da zero.

La massa diventa una proprietà dinamica della materia.

Rottura spontanea della simmetria elettrodebole

Tutte le particelle sono intrinsecamente prive di massa. Acquisiscono la massa dinamicamente dal momento che interagiscono con il nuovo campo scalare.

Più forte è l'interazione, più 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 perciò estremamente massicci.



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

La lunga caccia

Dopo che la teoria di Brout-Englert-Higgs venne incorporata stabilmente nel Modello Standard delle interazioni fondamentali i fisici sperimentali iniziarono la caccia alla nuova particella.

E ci furono immediatamente parecchie “scoperte”.

In Germania qualcuno sosteneva di avere scoperto il bosone di Higgs e che la sua massa era di 9 GeV.

Altri l’avevano visto in decadimenti molto strani che implicavano una massa di 28 GeV.

Alcuni esperimenti negli Stati Uniti suggerivano una massa intorno ai 75 GeV.

Tutti si rivelarono falsi allarmi.

La fantomatica particella si guadagnò ben presto il nomignolo di “araba fenice” della fisica della alte energie.

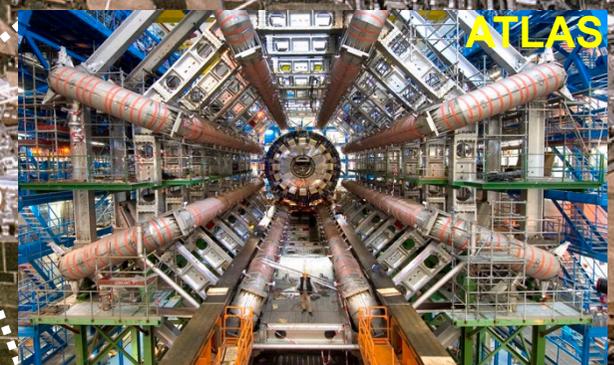
La sfida della ricerca del bosone di Higgs ha richiesto l'impegno di intere generazioni di fisici sperimentali fino a quando non sono state messe a punto le tecnologie più avanzate mai concepite su questo pianeta per costruire LHC e i suoi rivelatori .

Una nuova generazione di giovani scienziati ha osato tentare l'impossibile.

Costruire un apparato avveniristico, mai neanche immaginato fino ad allora, per scoprire il bosone di Higgs o cancellarlo definitivamente dal novero delle teorie plausibili.

È l'avventura di LHC e dei suoi meravigliosi strumenti scientifici.

I nostri *“pendoli e piani inclinati”*: il Large Hadron Collider (LHC) e i suoi esperimenti.



Storia del progetto.

1982 : Primi studi

1983 : Scoperta di W e Z all' SPS proton antiproton collider (SppbarS)

1989 : Inizio delle operazioni di LEP („ fabbrica „ di bosoni Z e W)

1994 : Il Council del CERN approva il progetto.

1996 : Decisione finale di iniziare la costruzione di LHC.

2000 : Chiusura di LEP

2002 : Rimozione dell' ultimo pezzo di equipaggiamento di LEP

2003 : Inizia l' installazione di LHC

2005 : Iniziano i test dell' hardware.

2008 : 10 Settembre Circolano i primi fasci.

2008: 19 Settembre Incidente ai magneti.

2009 : Riparazione dei danni e ripartenza.

2010 : Inizio del run di fisica a energia ridotta (3.5/4 TeV/beam)

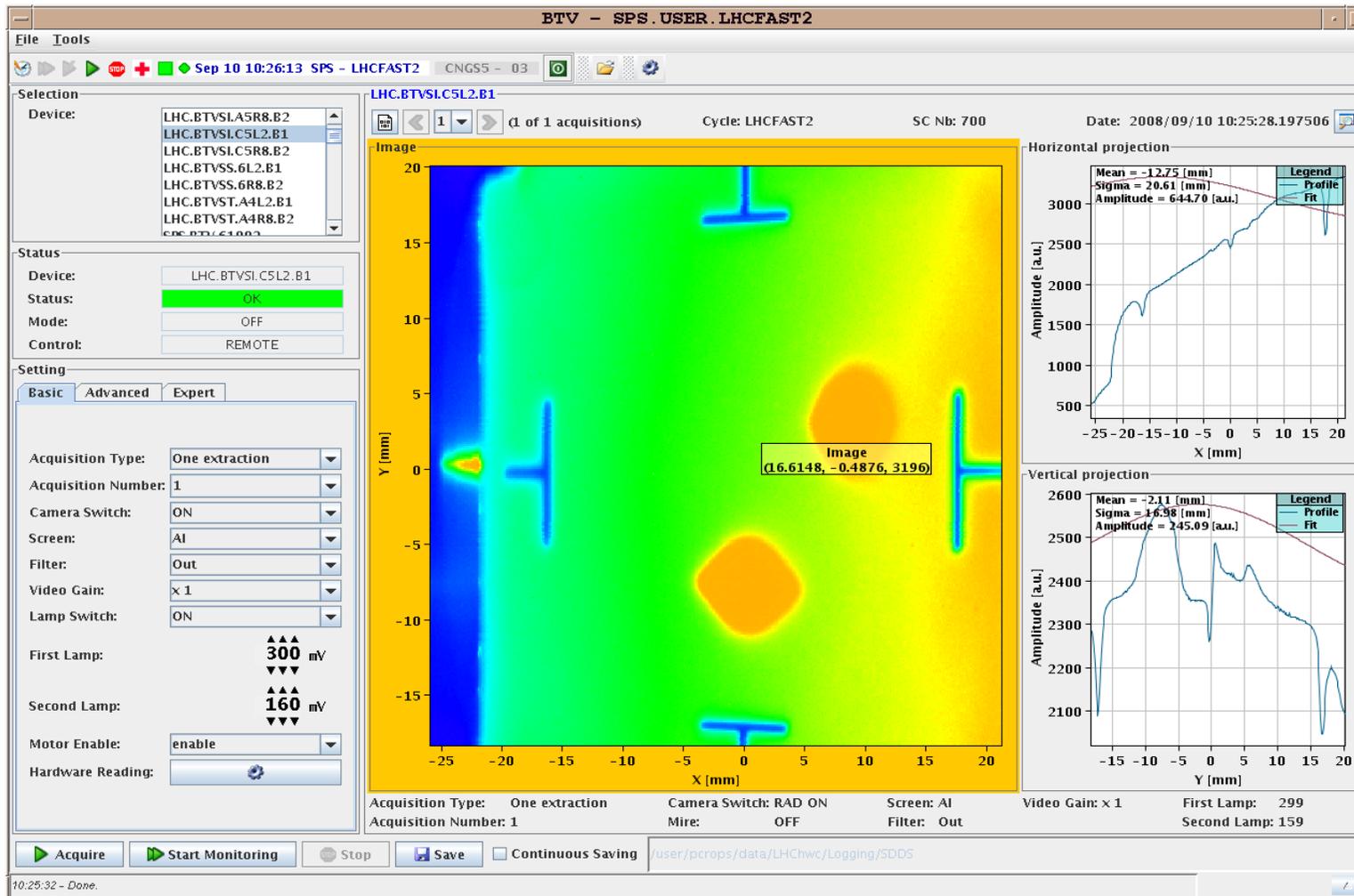
2012 : Annuncio della scoperta dell'Higgs.

**È la storia di molte sfide
tecnologiche.....**

**.....e di tanti momenti in cui ti
senti messo al tappeto.**

10/09/2008: primi fasci in LHC

2 iniezioni di fascio in senso orario 2×10^9 protoni per fascio



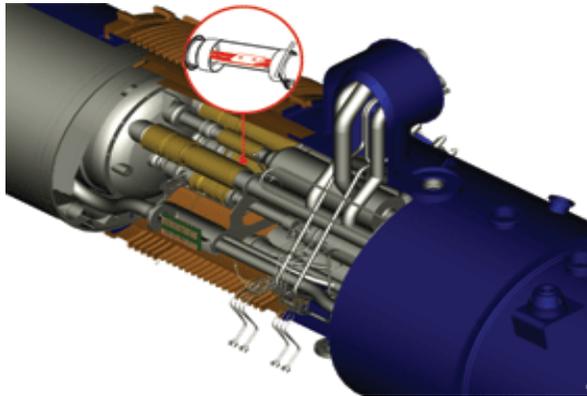
Felicità nella sala di controllo di CMS



9 giorni dopo, il 19/09/2008: il nostro venerdì nero

Qualcosa va storto durante il test di alimentazione dell'ultimo settore di LHC. C'è una perdita massiccia di Elio, si rompe il vuoto e si producono seri danni meccanici a decine di dipoli e quadrupoli.

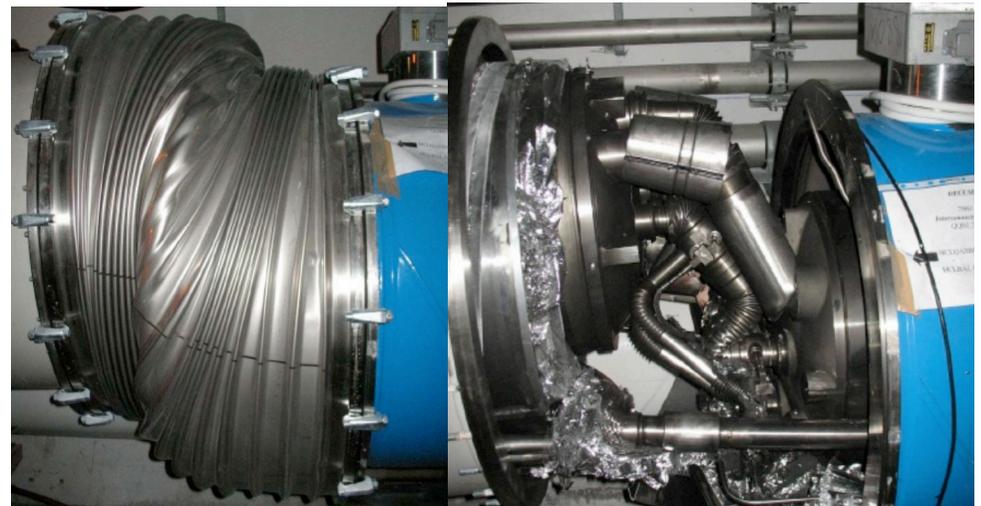
Causa dell'incidente: un difetto nell'interconnessione fra un dipolo e un quadrupolo.



Elio superfluido in espansione rapida può facilmente spostare una stringa di magneti da 20-30 t ciascuno



... e queste sono le conseguenze
~1 anno di lavoro per rimpiazzare 53 magneti e studiare e mettere in opera ogni sorta di test o di azione preventiva per evitare che questo tipo di incidenti si ripeta ancora.



Un nuovo programma per LHC

Si procede con grande cautela.

Si ripartirà con energia 7 TeV, $\frac{1}{2}$ rispetto a quella di progetto, per guadagnare esperienza, mettere in moto azioni di consolidamento prima di arrivare ai valori di progetto.

2010-2011 run at 7 TeV and $\mathcal{L} \approx 10^{32} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

2012: chiusura per riparare tutte le connessioni difettose e preparare la macchina ai 14 TeV.

2013-2014-2015: LHC a **14 TeV** e $\mathcal{L} \approx 10^{33} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$

Altri anni prima di arrivare alla luminosità di progetto $\mathcal{L} \approx 1-2 \times 10^{34} \text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$.

Lasciate ogni speranza di scoprire l'Higgs.

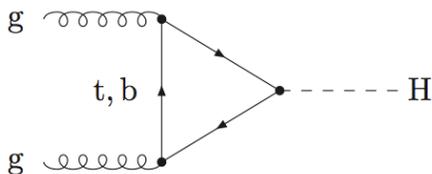
Ma siamo proprio sicuri che ci dobbiamo arrendere?



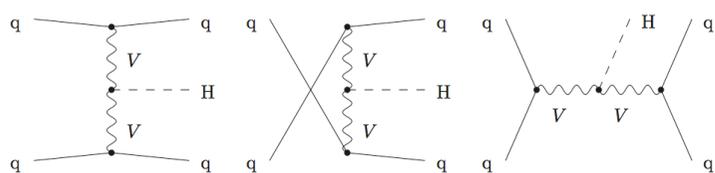
Collaborazioni che possono contare su ~1000 studenti e post-doc possono fare cose incredibili. Non esistono “missioni impossibili” quando si può contare su centinaia di giovani entusiasti.

Produzione dell'Higgs a LHC vs massa

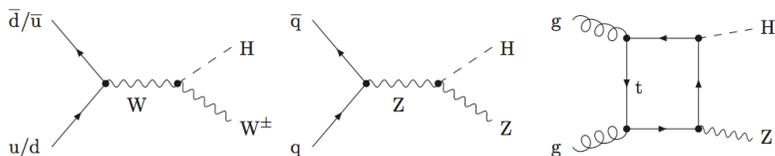
Gluon-gluon fusion



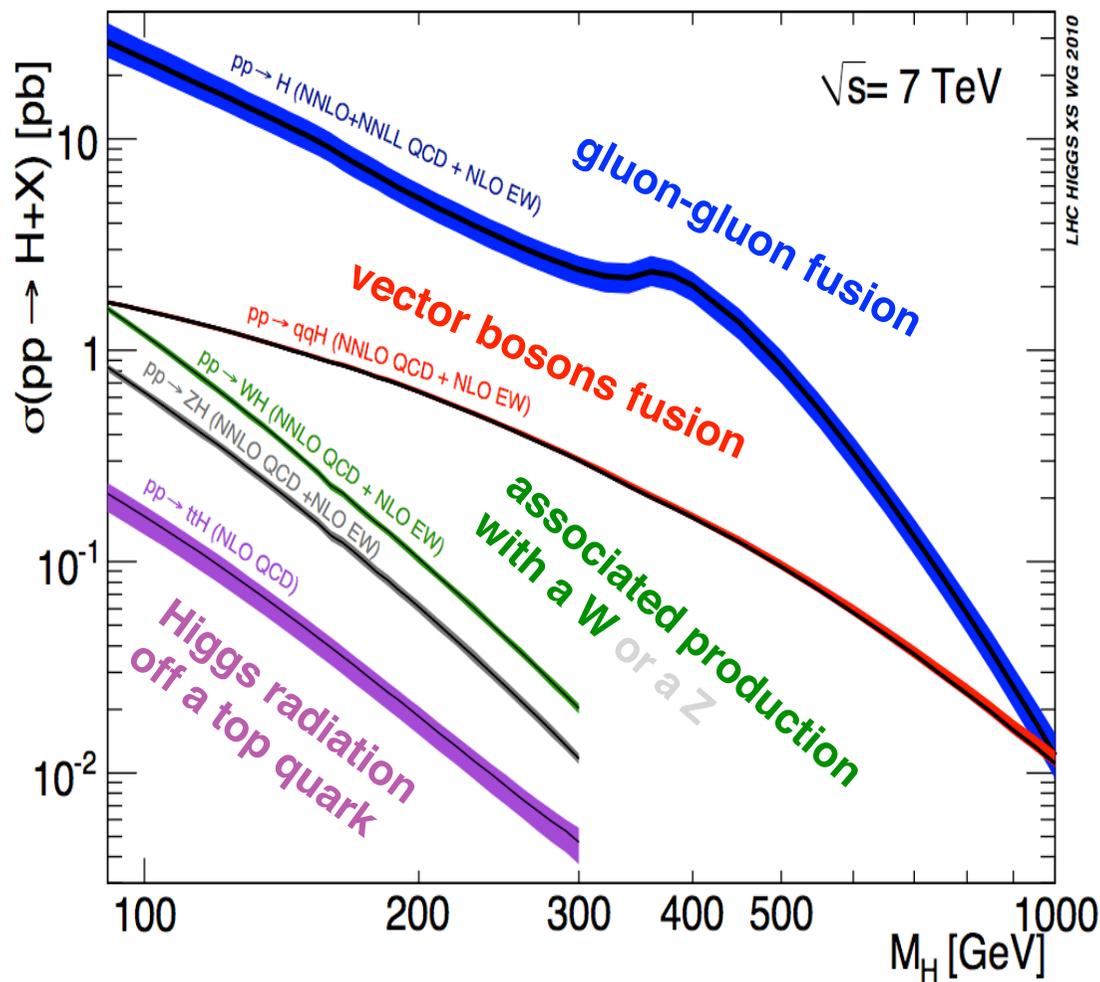
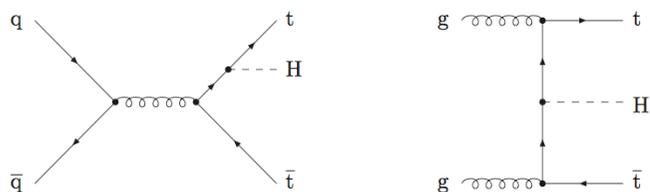
Vector bosons fusion



Associated production with W or Z



Higgs radiation off a top quark



Typical size of the uncertainty (there is also a dependence on the mass)

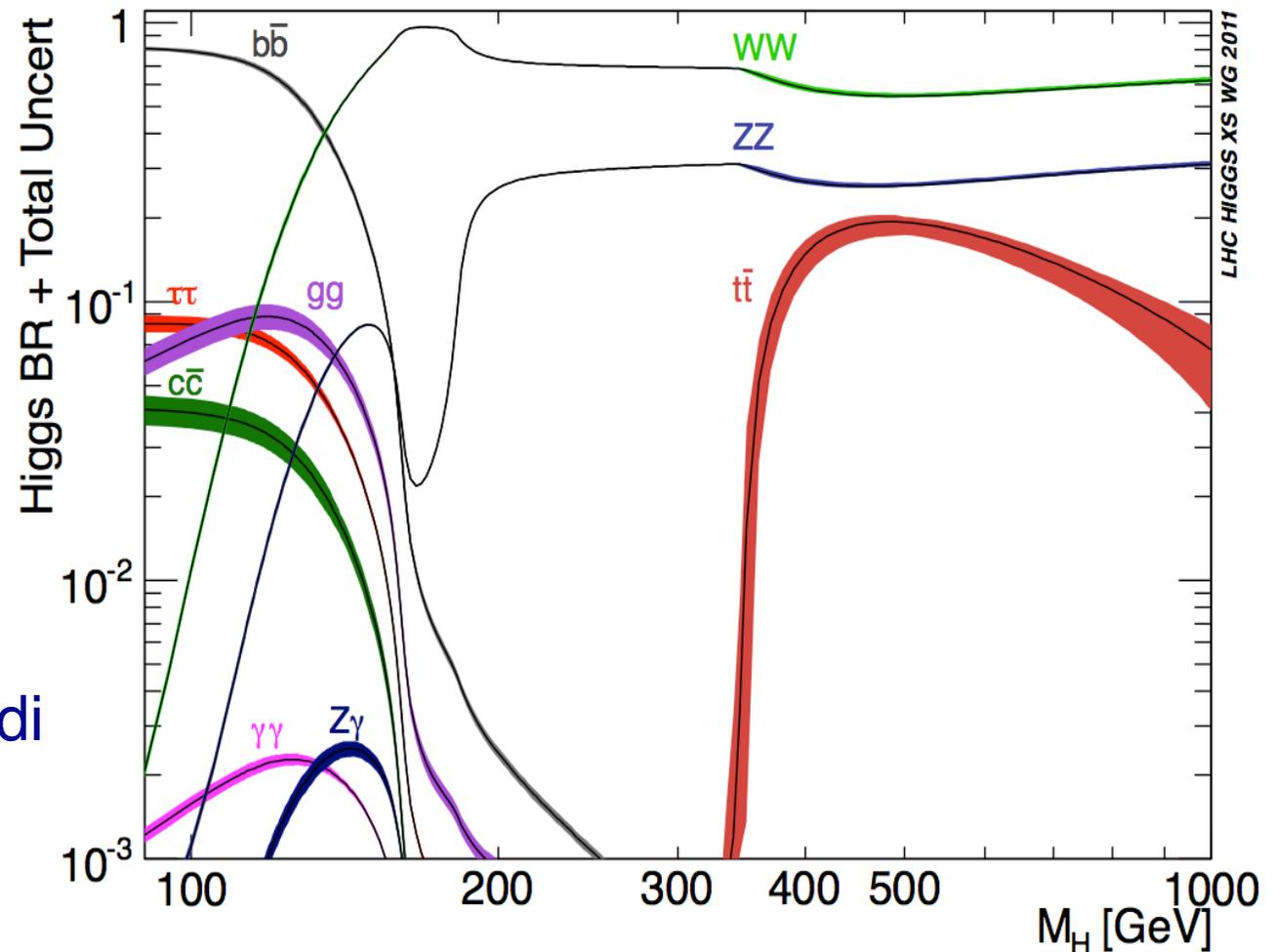
	ggF	VBF	WH/ZH	ttH
QCD scale:	+12% -8%	±1%	±1%	+3% -9%
PDF + α_s :	±8%	±4%	±4%	±8%
Mass line shape:	$(150\%) \times \left(\frac{M_H}{\text{TeV}}\right)^3$			

Modi di decadimento in funzione della massa

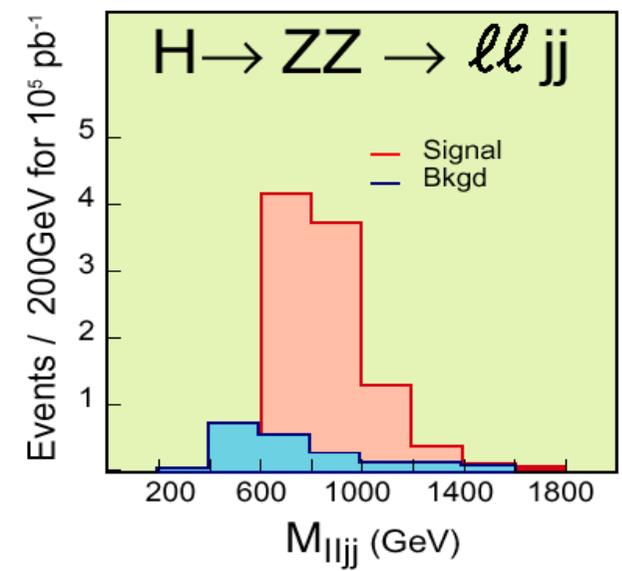
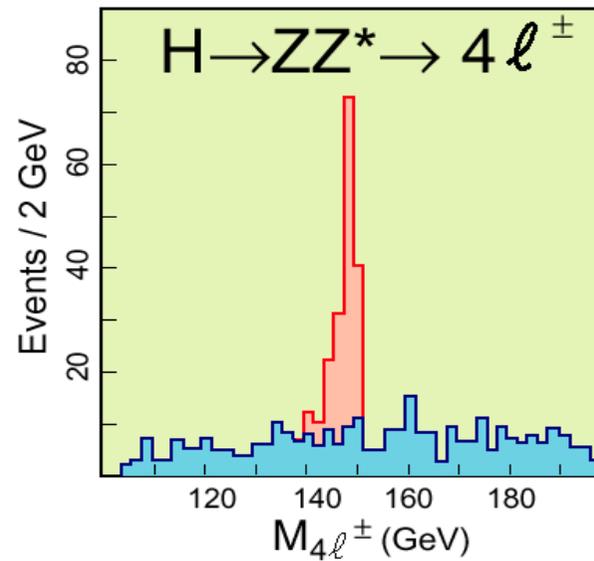
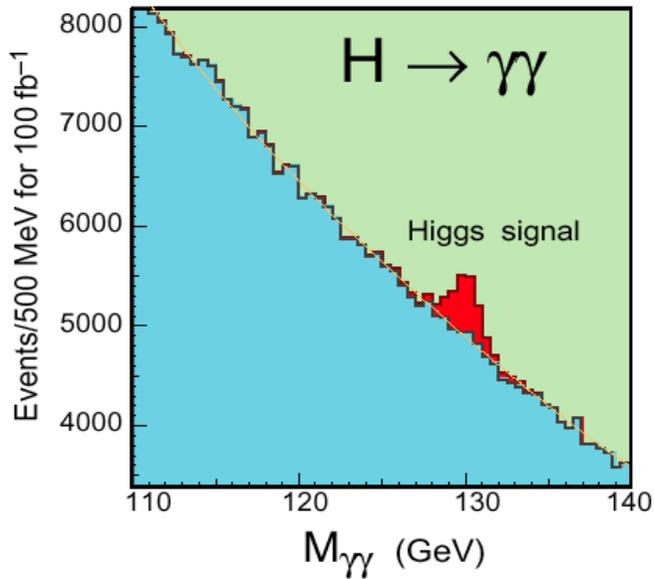
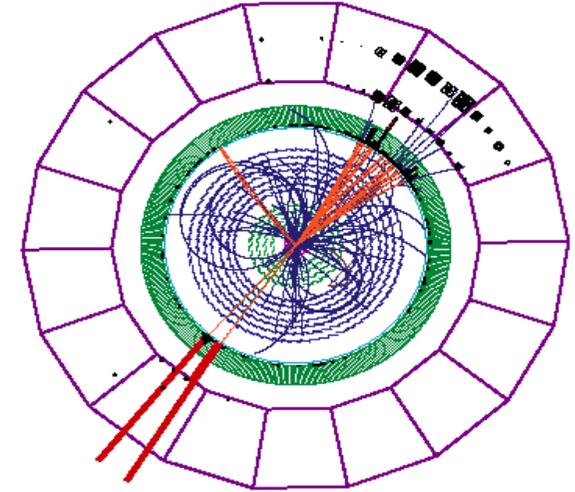
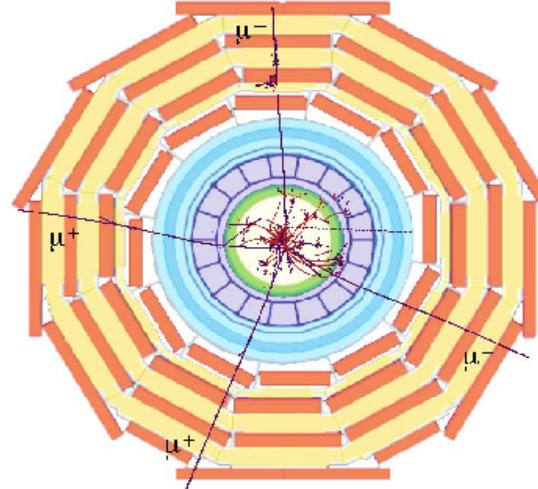
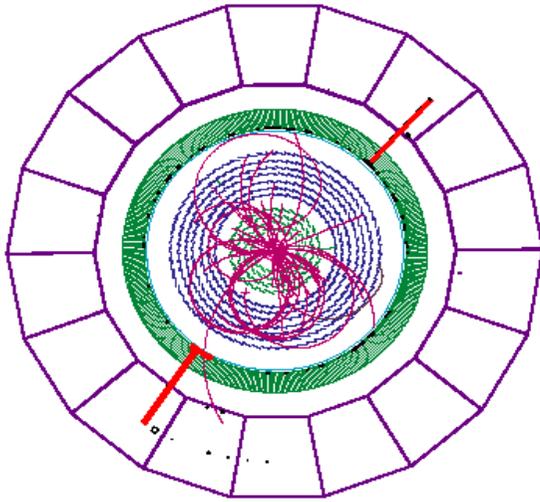
$$\Gamma_{Hff} \sim m_f^2$$
$$\Gamma_{HVV} \sim m_V^4$$

Nella teoria la massa dell'Higgs è un parametro libero.

Bisogna esplorare tutta la regione: da 114GeV, limite di Lep, fino a 1TeV.

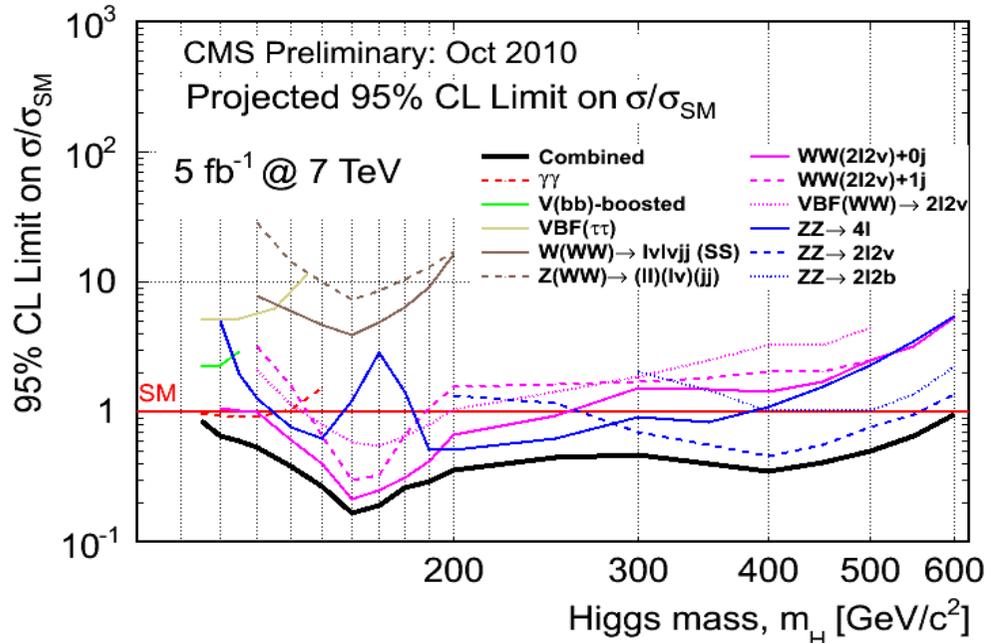


La vecchia strategia

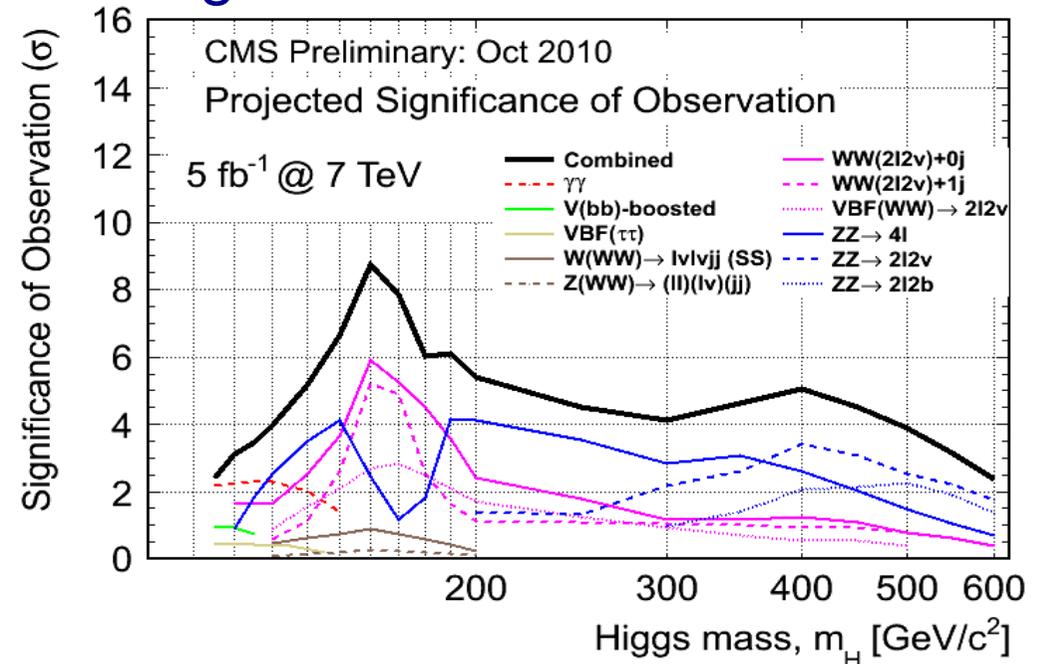


La missione impossibile.

Sensibilità @5fb⁻¹



Significatività @5fb⁻¹



Ottobre 2010: con 5fb⁻¹ potremo raggiungere una sensibilità al di sotto dello SM nell'intero range di massa.

Se il bosone di Higgs si fosse nascosto nella regione di bassa massa avremmo visto degli eccessi con significatività di 2-3 sigma. Ogni singolo canale andava esplorato con attenzione per avere speranza di scoprire l'Higgs nella regione più difficile.

Nuovo piano per LHC

2010: primo run di fisica, 7TeV, $L > 2 \times 10^{32} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$, (40pb⁻¹)

2011: 7TeV, $L > 3.5 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (>5.5fb⁻¹)

2012: 8TeV, $L \approx 7 \times 10^{33} \text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (>15fb⁻¹)

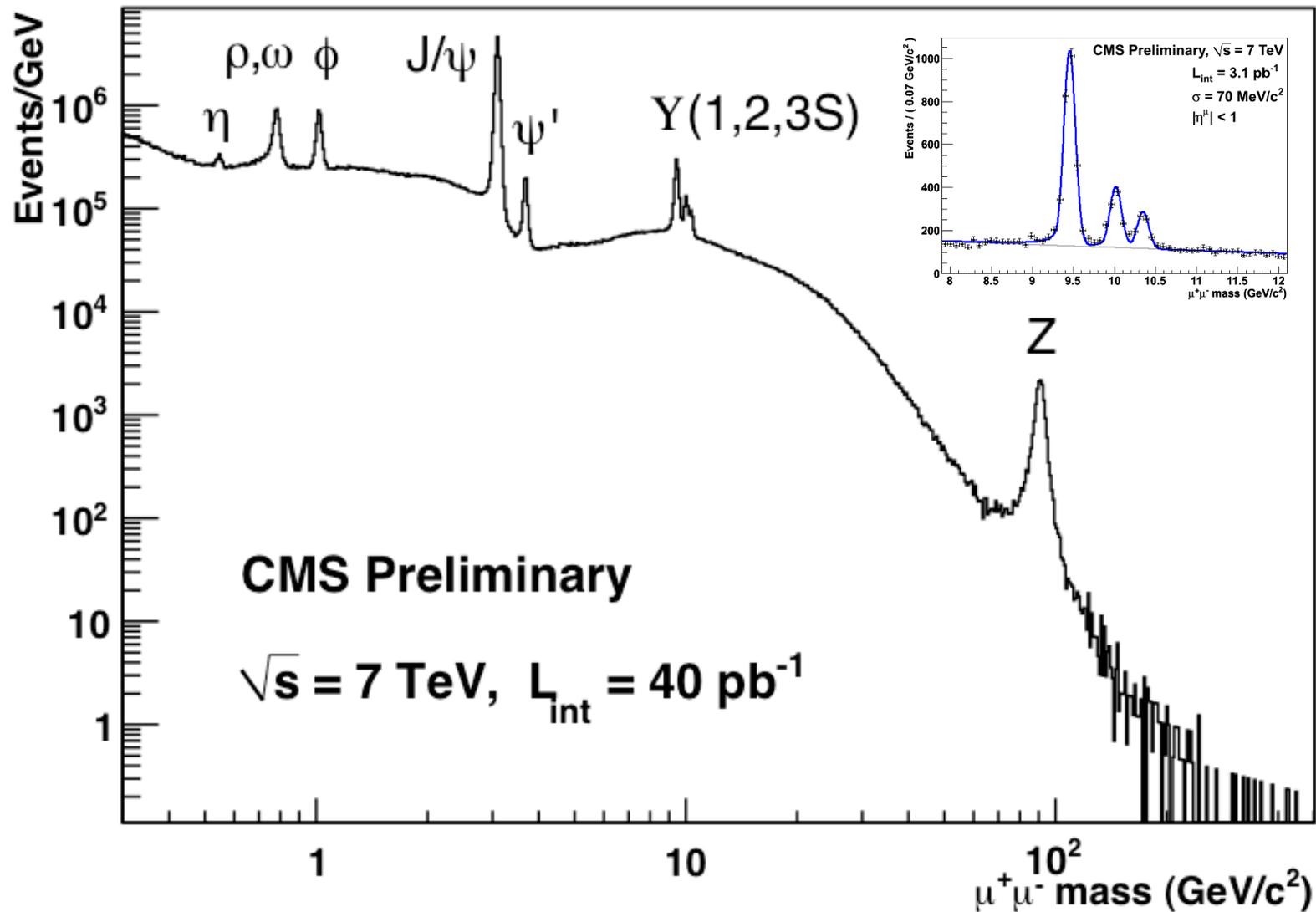
Estendere il primo run di fisica di LHC di un anno.

Aumentare la luminosità della macchina fino a $5-7 \times 10^{33}$

in maniera da poter accumulare da 10 a 20fb⁻¹ e scoprire l' Higgs

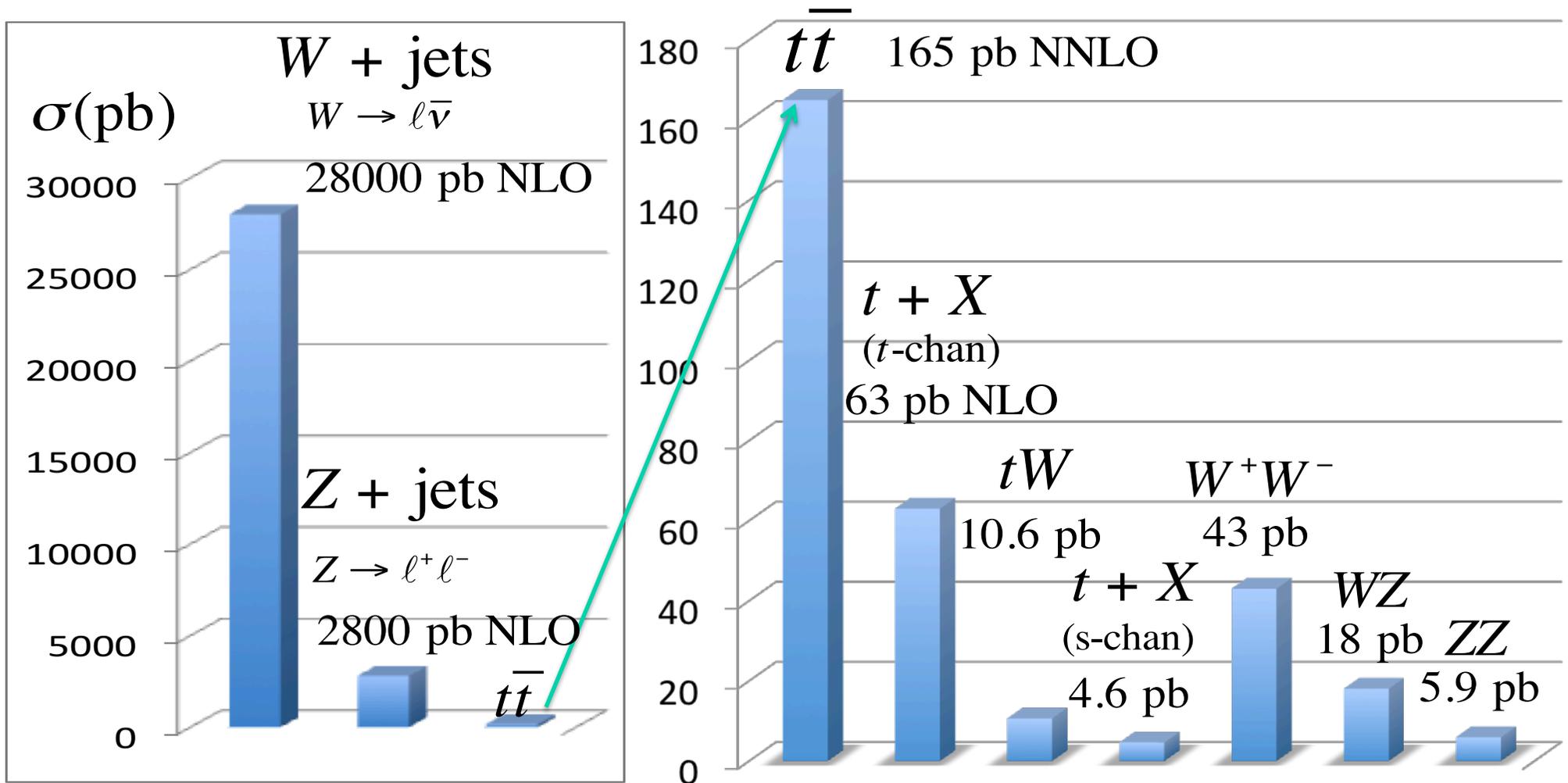
Rinviare al 2013-14 la lunga interruzione per riparare completamente le interconnessioni difettose e preparare la macchina ai 13-14 TeV e la luminosità di progetto.

Esempio di calibrazione dei rivelatori: si ri-scoprono tutte le particelle conosciute.



Misurare con precisione tutti i processi SM.

$$\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$$



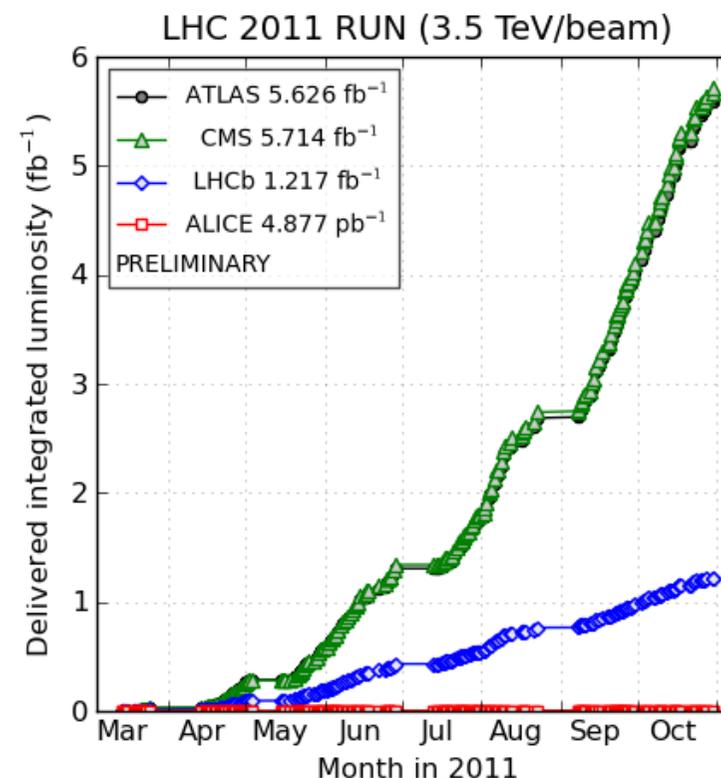
La prima grande sorpresa.

Nel 2011 la macchina produce una luminosità integrata $>5.5 \text{ fb}^{-1}$ (l'obiettivo ufficiale era 1 fb^{-1}).

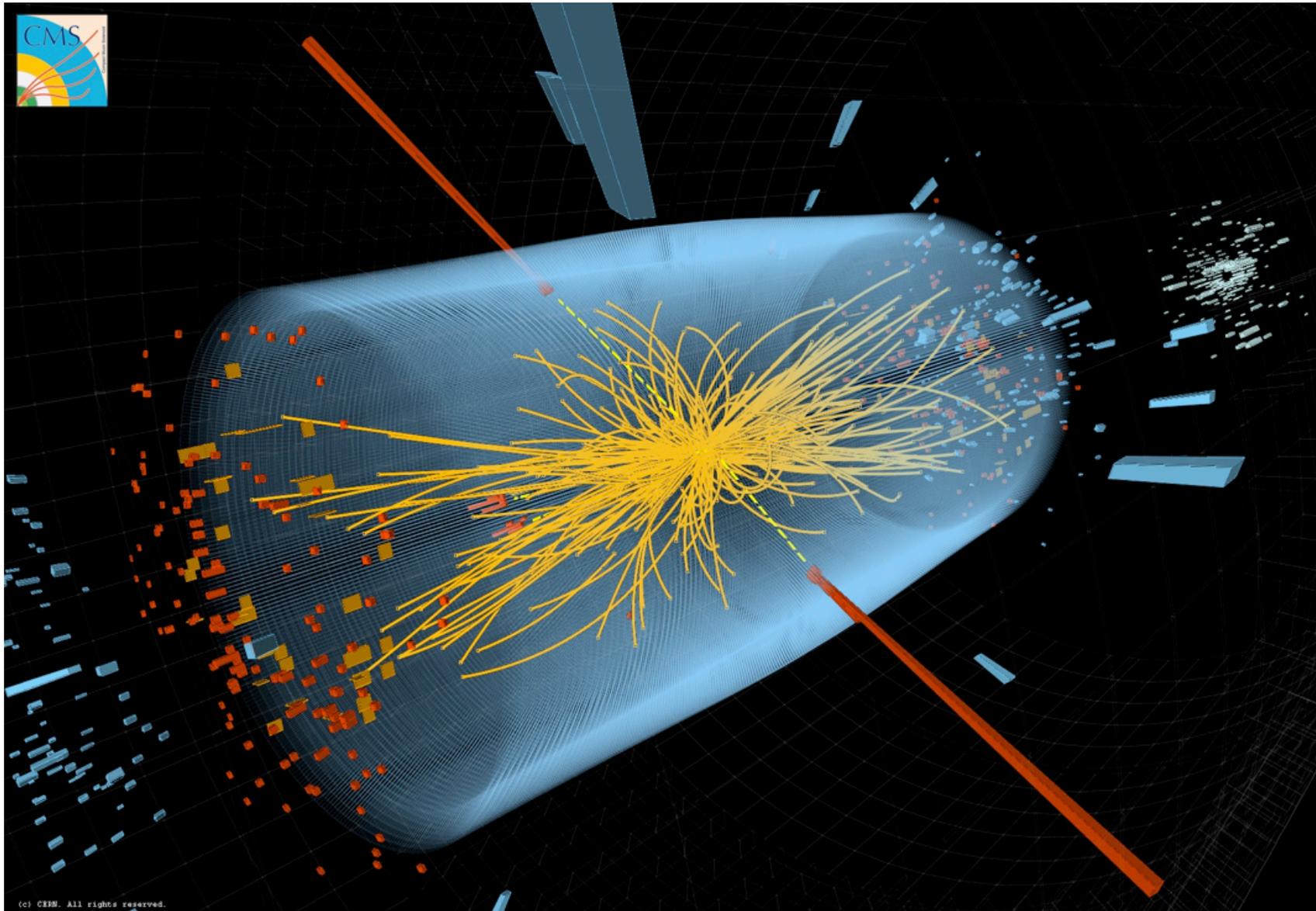
I rivelatori ATLAS e CMS registrano tipicamente il 90-95% della luminosità totale e l'85-90% dei dati è utilizzabile per la fisica.

La frazione media dei canali funzionanti è $>98\%$.

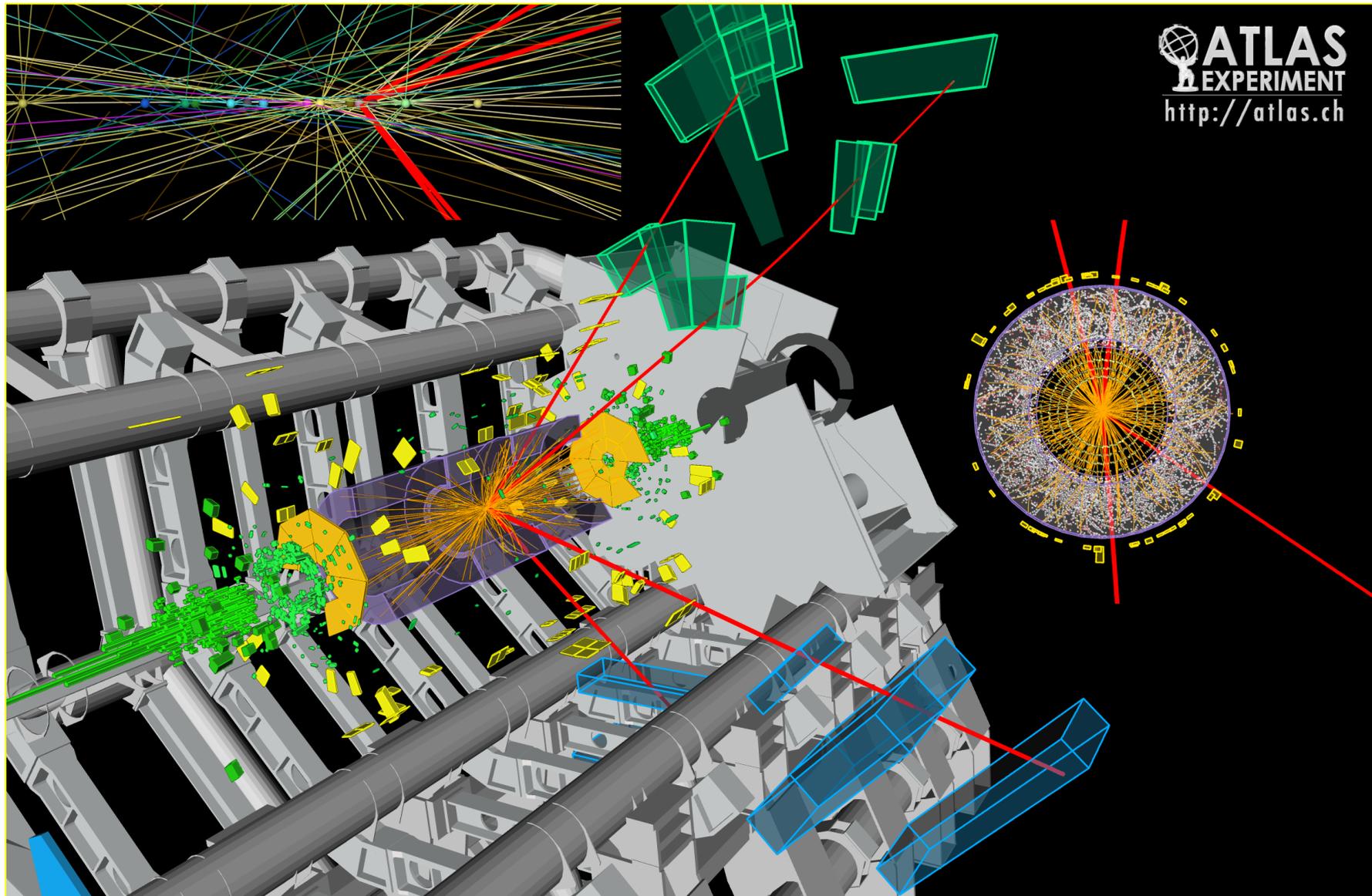
Per la prima volta la quantità di dati era grande a sufficienza per permetterci di dire qualcosa di significativo sul bosone di Higgs nell'intera regione di massa.



$$H \rightarrow \gamma\gamma$$



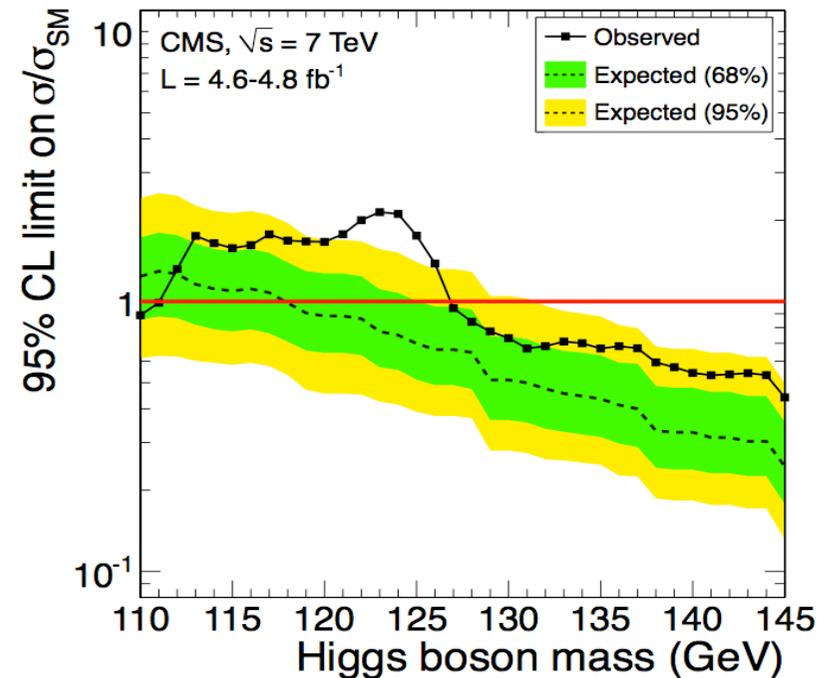
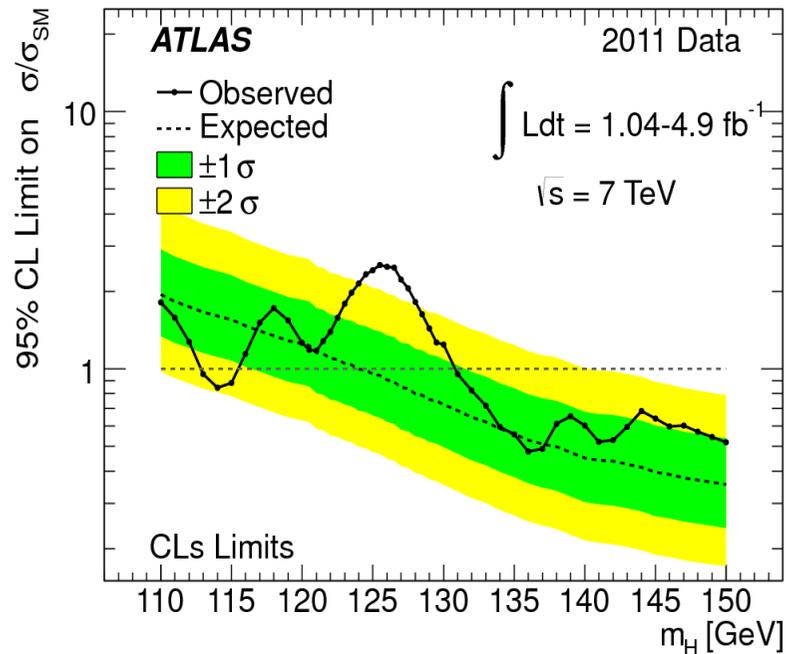
$H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 \text{ leptoni}$.



CERN: 13 Dicembre 2011 **1° seminario speciale del CERN: un momento cruciale.**



Prima evidenza del bosone di Higgs a 125 GeV.



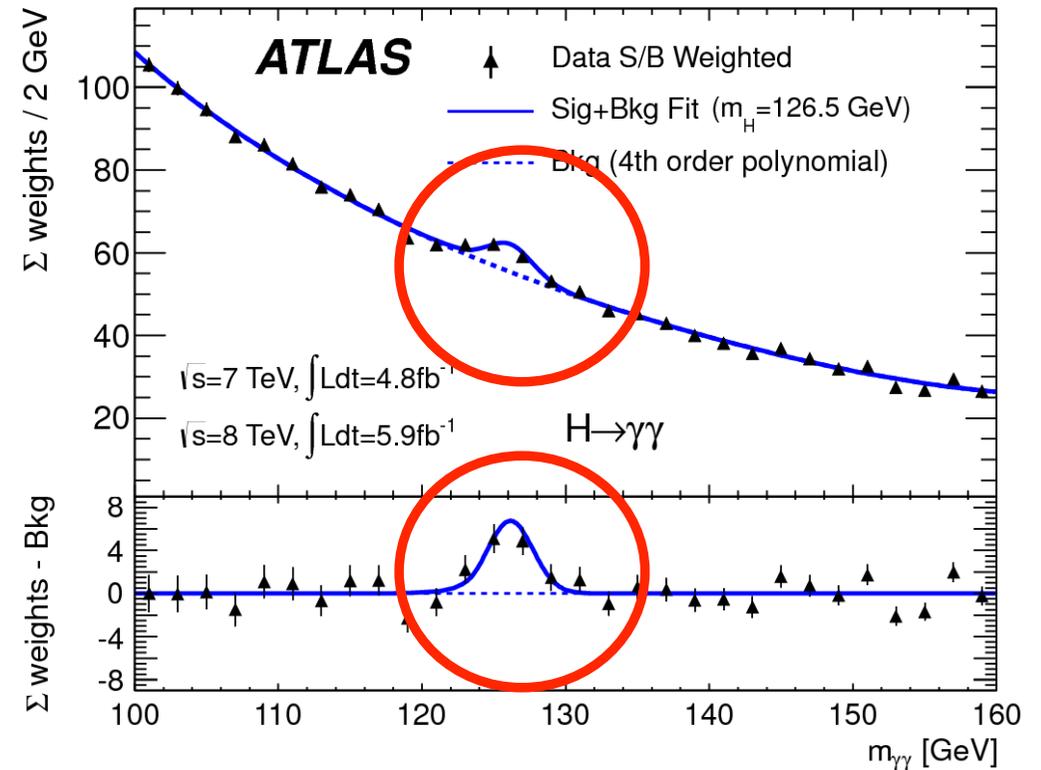
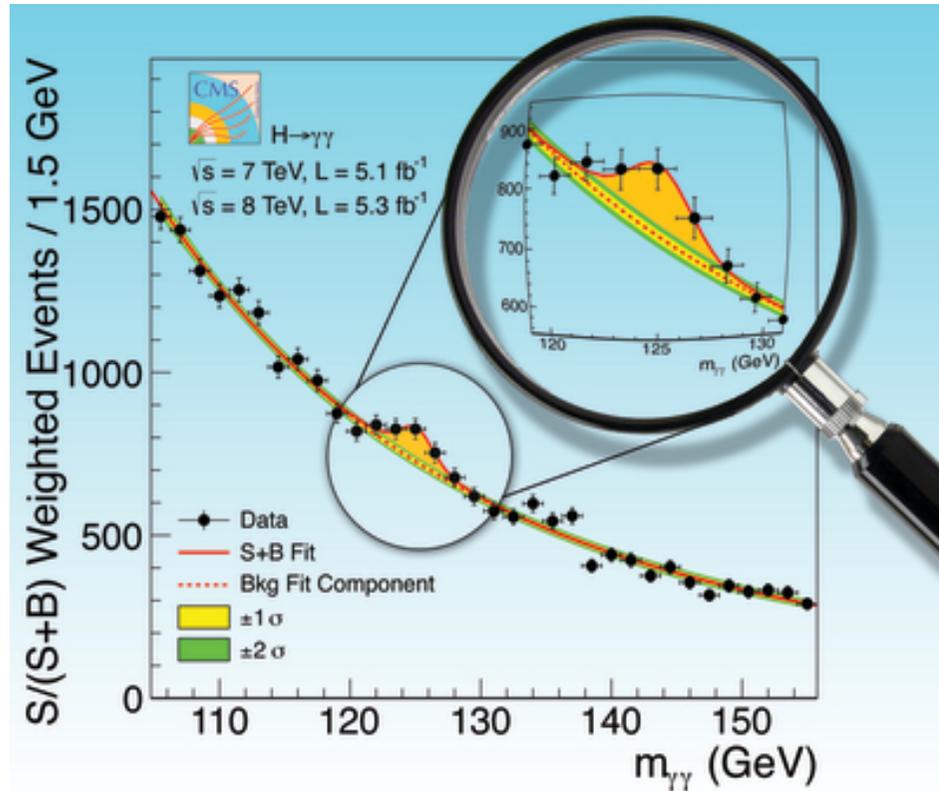
Entrambi gli esperimenti vedono un eccesso di eventi intorno a 125 GeV. È la prima volta che si presenta questo tipo di coincidenza. Potrebbe essere il primo indizio del bosone ma potrebbe ancora essere una maligna fluttuazione statistica. **Prudenza e pazienza: i nuovi dati che prenderemo nel 2012 ci 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.

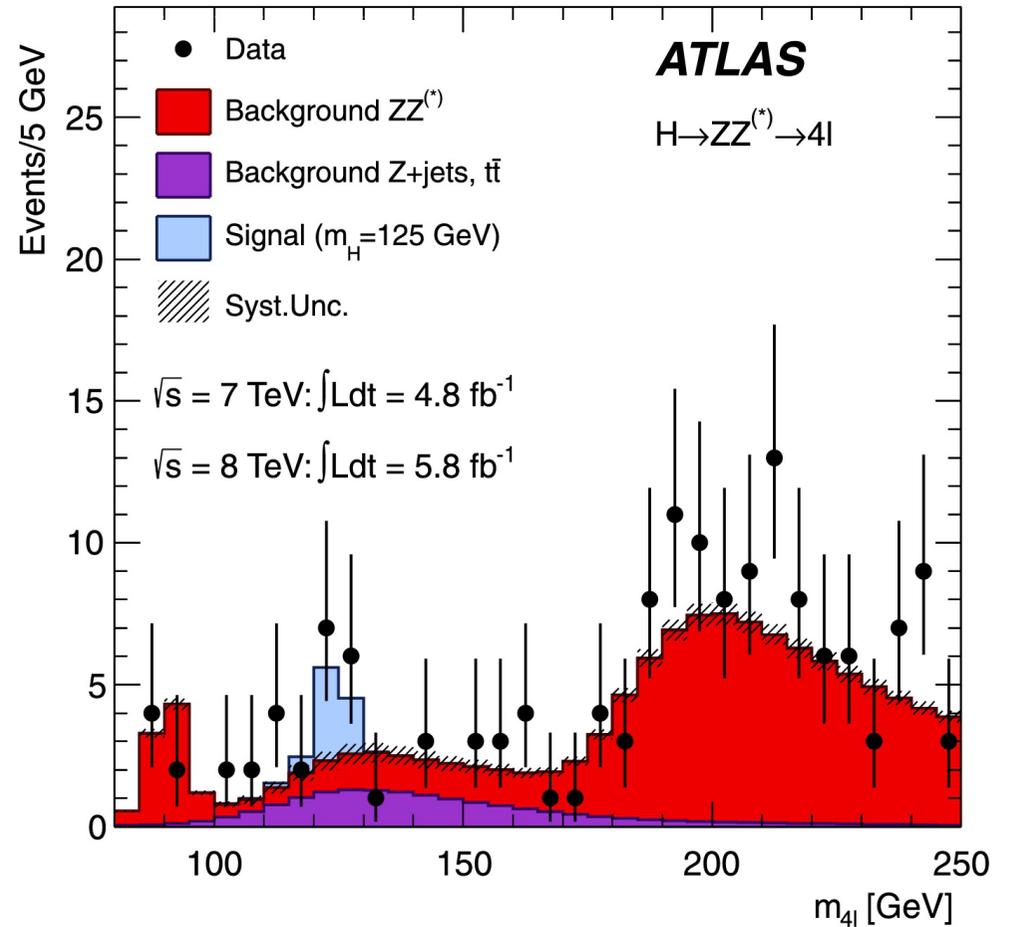
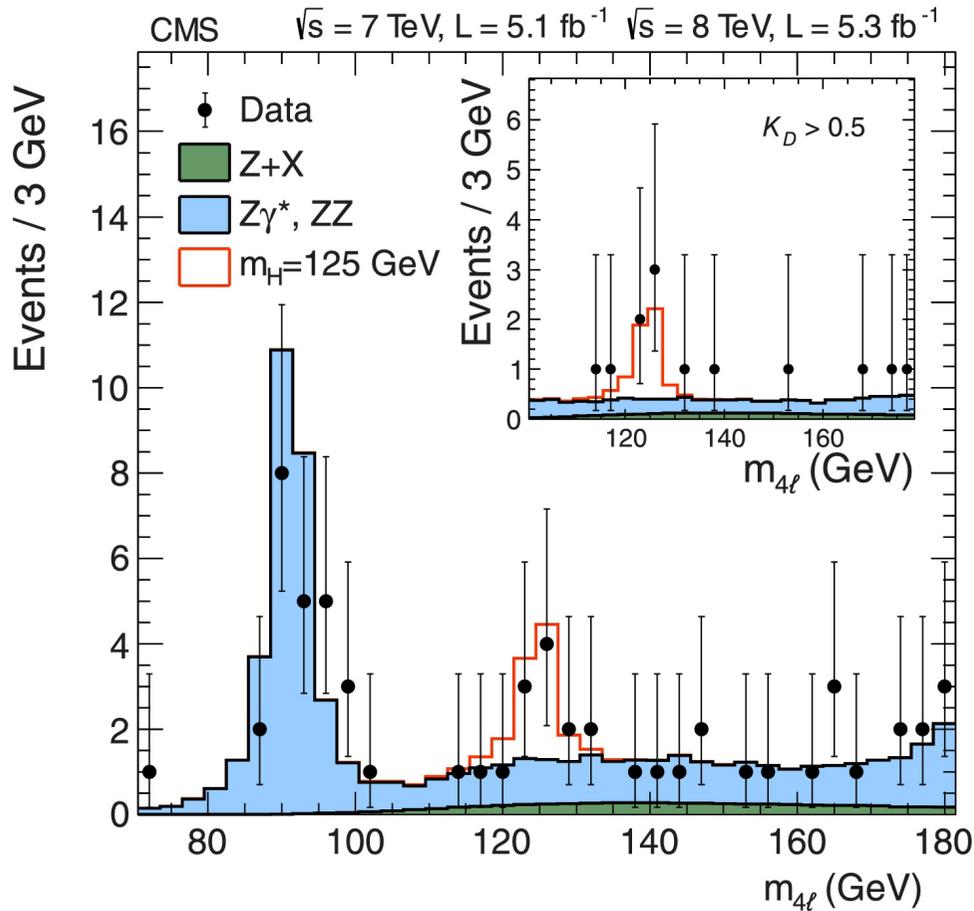


$H \rightarrow \gamma\gamma$



A 125 GeV compare un eccesso di eventi $> 4\sigma$

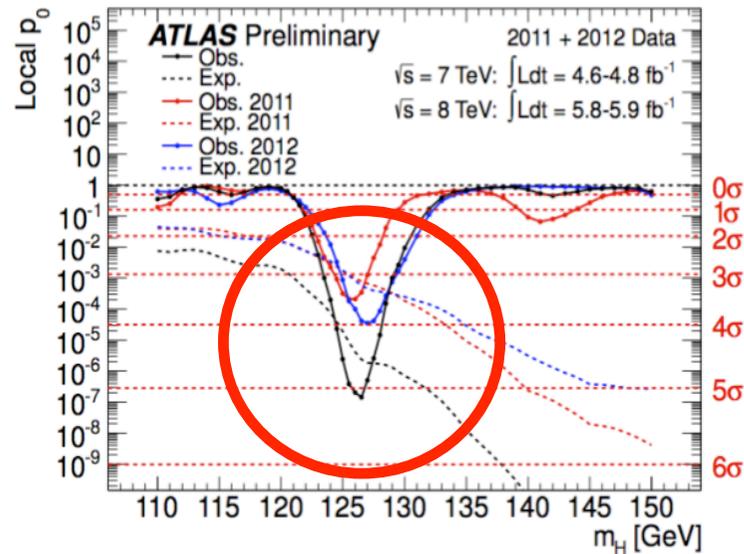
H → ZZ → 4 leptoni.



Anche qui, a 125 GeV compare un eccesso di eventi $> 3\sigma$.

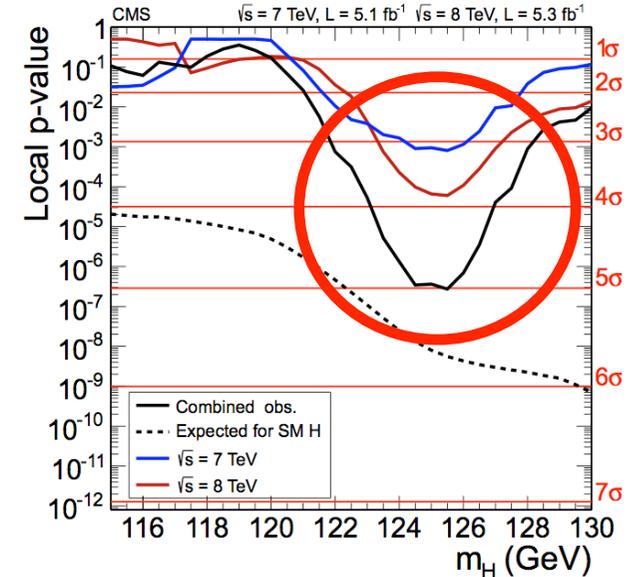
July 4th 2012: Higgsdependence day.

Scoperta di un bosone di tipo Higgs ad LHC



Secondo Seminario Speciale al CERN

Significatività combinata 5.0 σ a 125-126 GeV per ciascun esperimento.



Observation of a New Particle in the Search for the Standard Model Higgs Boson with the ATLAS Detector at the LHC

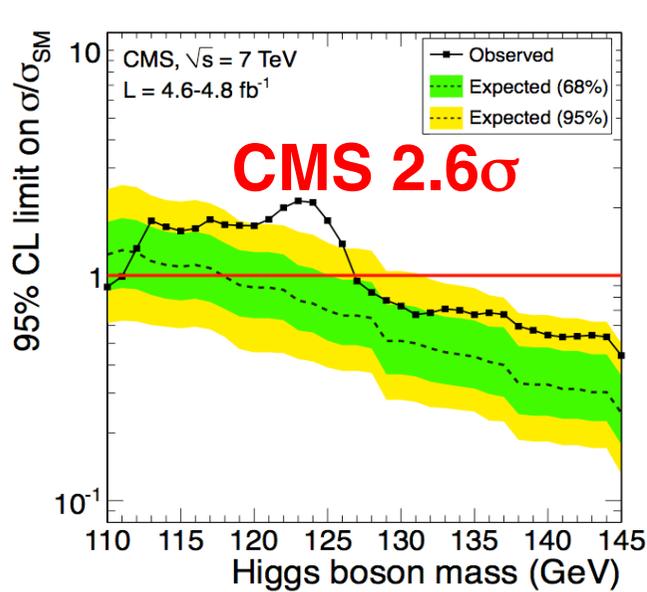
arXiv: 1207.7214v1.



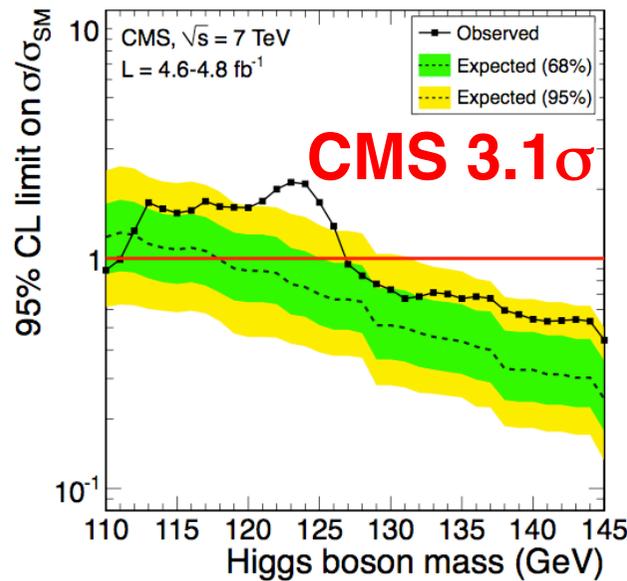
Observation of a New Boson at a Mass of 125 GeV with the CMS Experiment at LHC

arXiv 1207.7235v1

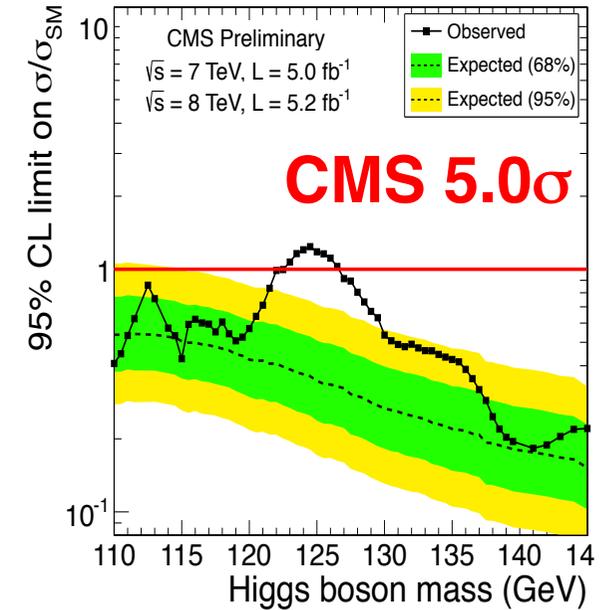
I sette mesi che hanno cambiato la nostra fisica



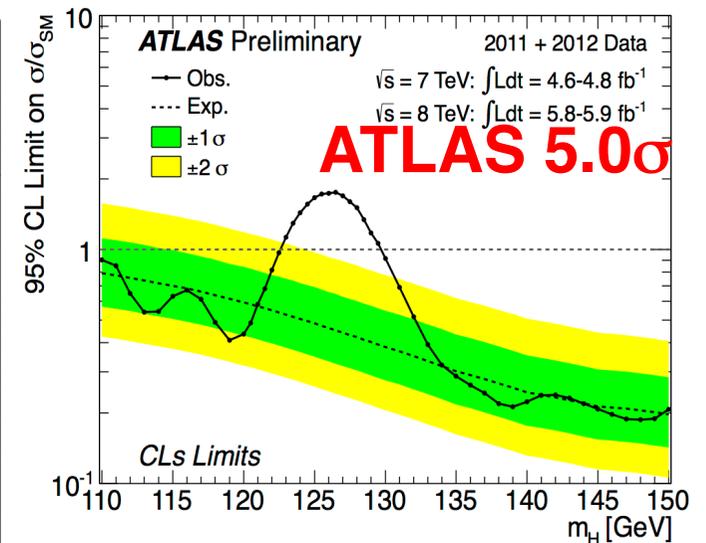
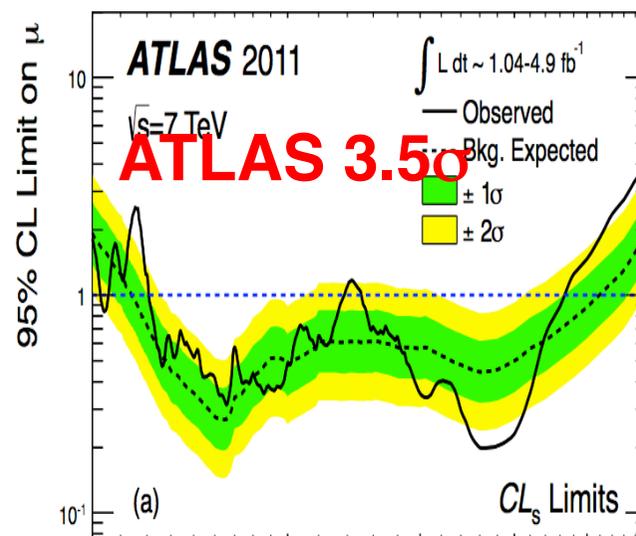
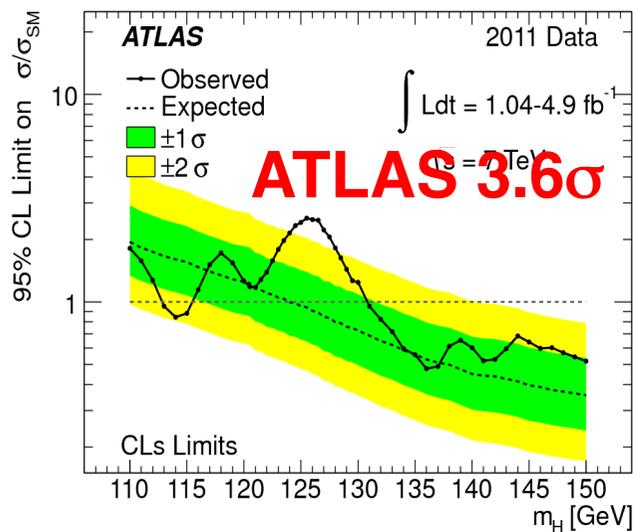
13 Dic 2011 il I seminario



7 Feb. 2012 gli articoli



4 Lug 2012 il II seminario



Nota bene

- Questa scoperta è arrivata con LHC che operava a **7/8 TeV: 1/2 della sua energia di progetto !!!**
- La scoperta è stata annunciata quando ATLAS e CMS avevano raccolto **$\sim 10\text{fb}^{-1}$: 1/3 della quantità minima di dati considerati necessari ai tempi del nostro Physics TDR 2007!!!**

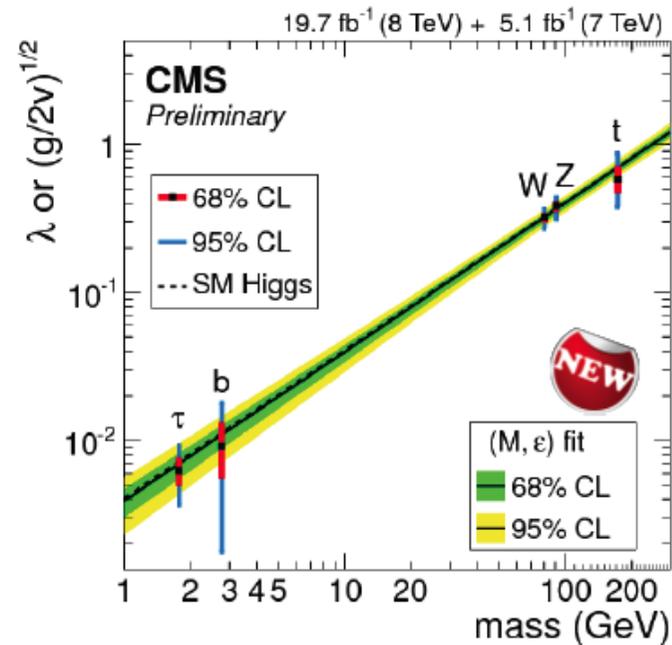
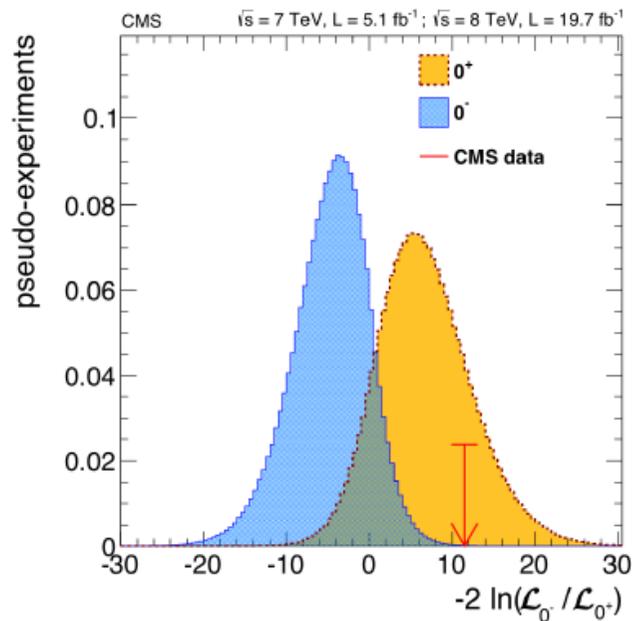
È il risultato della “missione impossibile” messa in piedi nel 2010:

“Scopriremo il bosone di Higgs –o lo escluderemo per sempre- prima del lungo shut-down necessario per portare LHC a 14TeV”

Componenti decisivi del successo: rivelatori che hanno funzionato meravigliosamente, un acceleratore estremamente affidabile e centinaia di giovani fisici entusiasti di partecipare alla grande sfida.

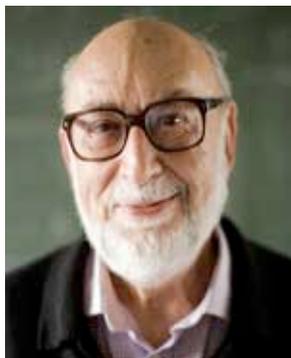
È realmente il bosone di Higgs?

- È davvero uno scalare?
- L'intensità delle sue interazioni con bosoni e fermioni è davvero quella prevista dal Modello Standard?

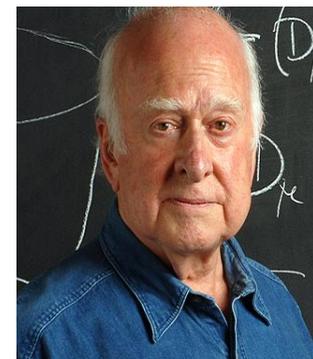


Si! È proprio lui !!!!

Premio Nobel per la fisica 2013



Francois Englert



Peter Higgs

assegnato congiuntamente a François Englert e Peter W. Higgs "per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla nostra comprensione della massa delle particelle subatomiche, e che è stato recentemente confermato dalla scoperta della fondamentale particella da parte degli esperimenti ATLAS e CMS al Large Hadron Collider del CERN "

Ho dovuto comprare abiti molto più eleganti di quelli che ero solito indossare .



Cosa abbiamo imparato sulla nascita del nostro Universo

10^{-11} secondi dopo il Big-Bang, un campo invisibile ha occupato ogni angolo dell'universo assegnando una specifica massa a 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 si riuscirebbe a capire nulla dell'Universo che ci circonda.

Stiamo cominciando a capire la trama sottile che da forma al nostro universo.

Dobbiamo ri-scrivere i libri di fisica

Siamo nel bel mezzo di una rivoluzione scientifica le cui conseguenze saranno, forse, più evidenti fra qualche decennio.

Il bosone di Higgs è una particella davvero speciale.

Poiché da la massa a tutte le particelle, le sue caratteristiche sono sensibili sia alle particelle conosciute-quelle previste dal Modello Standard- sia a quelle eventualmente non ancora scoperte.

Ecco che con la scoperta del nuovo bosone è nato un vero e proprio nuovo campo di ricerca.

Il Modello Standard prevede con grande accuratezza TUTTE le caratteristiche del bosone di Higgs. Se si misurasse anche la più piccola delle anomalie, questa sarebbe la prima evidenza della presenza di nuove particelle previste dalle teorie di nuova fisica (SUSY, EXTRAD o ALTRO) e avremmo anche un'indicazione chiara della scala di energia relativa.

Qui ci potrebbero essere sorprese.

Il bosone di Higgs è una particella molto strana.

- Per certi versi è la più semplice fra tutte le particelle. **Una specie di prototipo semplificato.** Ma siamo sicuri che sia davvero elementare? E se fosse uno stato composito di una nuova interazione?
- Essendo scalare non può contare sulla protezione di alcuna simmetria conosciuta. Quali particelle virtuali non ancora scoperte proteggono la sua massa e la bloccano a 125GeV?
- È solo o è accompagnato da una famiglia di nuove particelle? Ogni scoperta di un nuovo scalare a qualunque massa farebbe crollare di colpo il Modello Standard.

Rimanete sintonizzati: le sorprese potrebbero non essere finite.

Il Modello Standard teoria del tutto?

- 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 incompleta perché la lista dei fenomeni che non spiega è ormai imbarazzante.

Materia oscura.

Energia oscura.

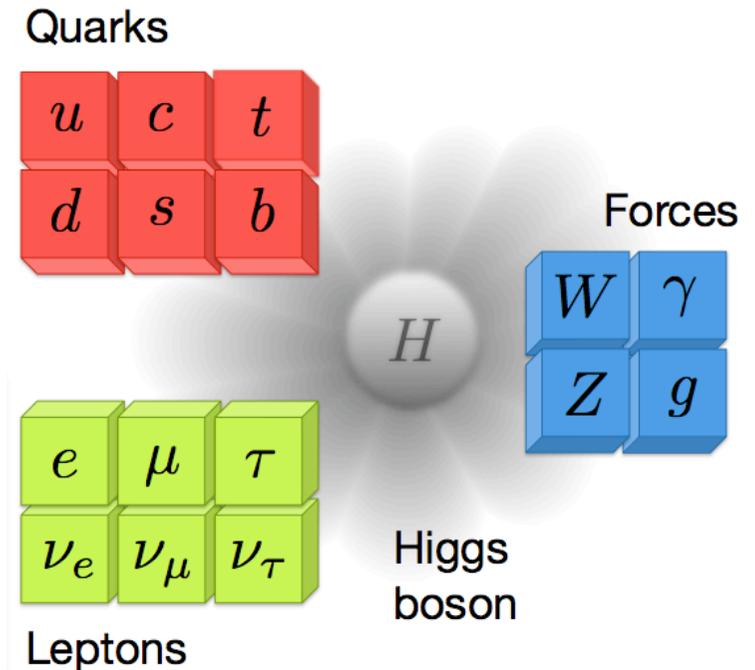
L'unificazione delle forze e il ruolo della gravità.

Masse e gerarchia dei neutrini.

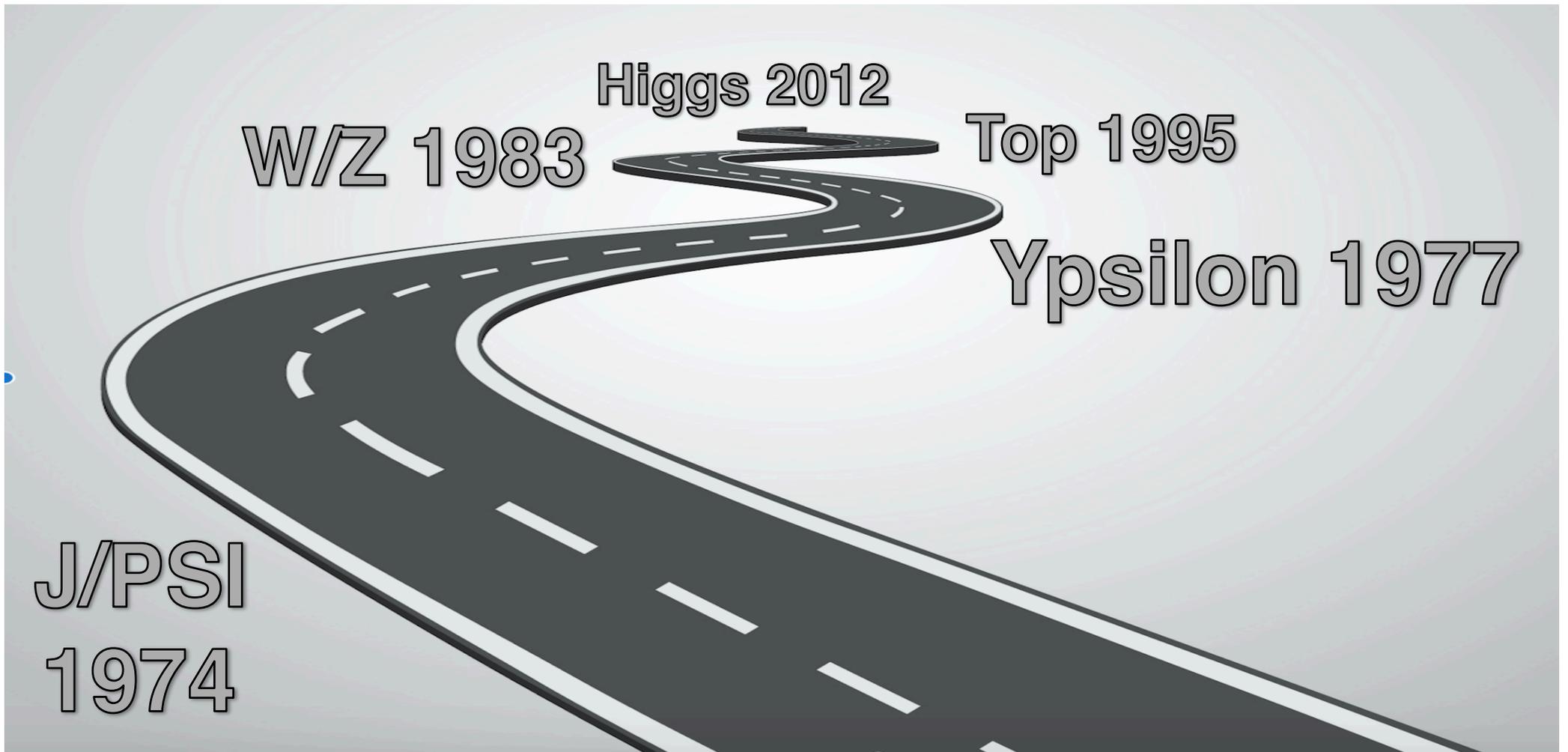
Asimmetria fra materia e antimateria.

.....

**Dobbiamo cercare la fisica oltre il modello standard.
Ma a quale scala di energia?**



La fisica negli ultimi ~50 anni.



La fisica nei prossimi ~50 anni.



Higgs 2012

Nuove sfide.

Come se fossimo ritornati al periodo eroico dell'
esplorazione di mari sconosciuti.

Non sappiamo **in quale direzione** avremo maggiori
chances di successo.

Non sappiamo **dove e quando** ci sarà una nuova,
sensazionale scoperta.

Siamo sicuri tuttavia che il bosone di Higgs sarà un nuovo
strumento, estremamente sensibile, per la rivelazione
indiretta di nuove particelle massicce o nuove interazioni.

Due approcci del tutto complementari

Low-Energy: $\Delta\mathcal{O}/\mathcal{O} \sim m_{EW}^2/\Lambda^2$

- require **accuracy**: large lumi, low syst. and th. err

High-Energy: $\Delta\mathcal{O}/\mathcal{O} \sim E^2/\Lambda^2$

- benefit from high **energy and high accuracy**

Dalla ricerca alle misure di precisione.

Le ricerche attuali si concentrano sulle misure di precisione delle caratteristiche dell'Higgs.

Modi di decadimento rari.

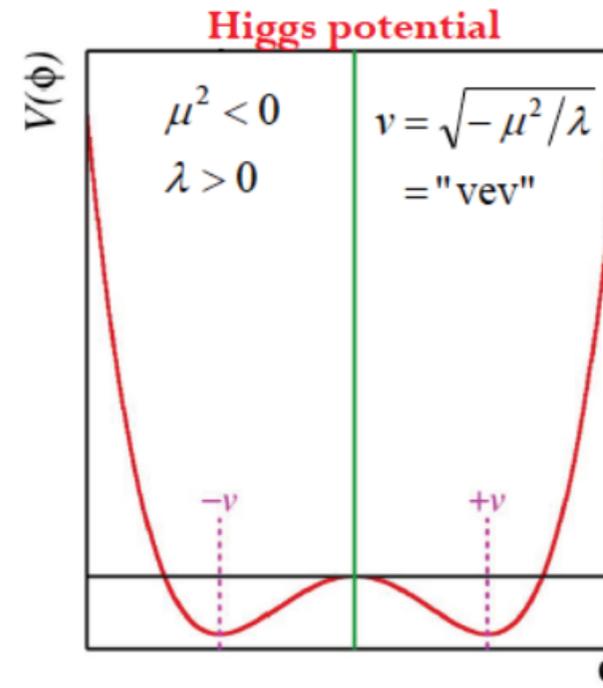
Accoppiamenti con le altre particelle.

Massa.

Spin e Parità.

Larghezza e vita-media.

Auto-accoppiamento.



$$g_{HVV} = 2 \frac{m_V^2}{v} \quad g_{Hff} = \frac{m_f}{v}$$

$$L = (D_\mu \phi)^* (D^\mu \phi) - (\mu^2 \phi^2 + \lambda \phi^4) - \frac{1}{4} F^{\mu\nu} F_{\mu\nu}$$

$$m_H = \sqrt{2\lambda} v$$

λ, μ unknown $\rightarrow m_H$ is a free parameter of the SM

Uno sguardo sul futuro

Mentre LHC continua la sua esplorazione.

Nuovi acceleratori allo studio.

Vicini a definire la strategia.

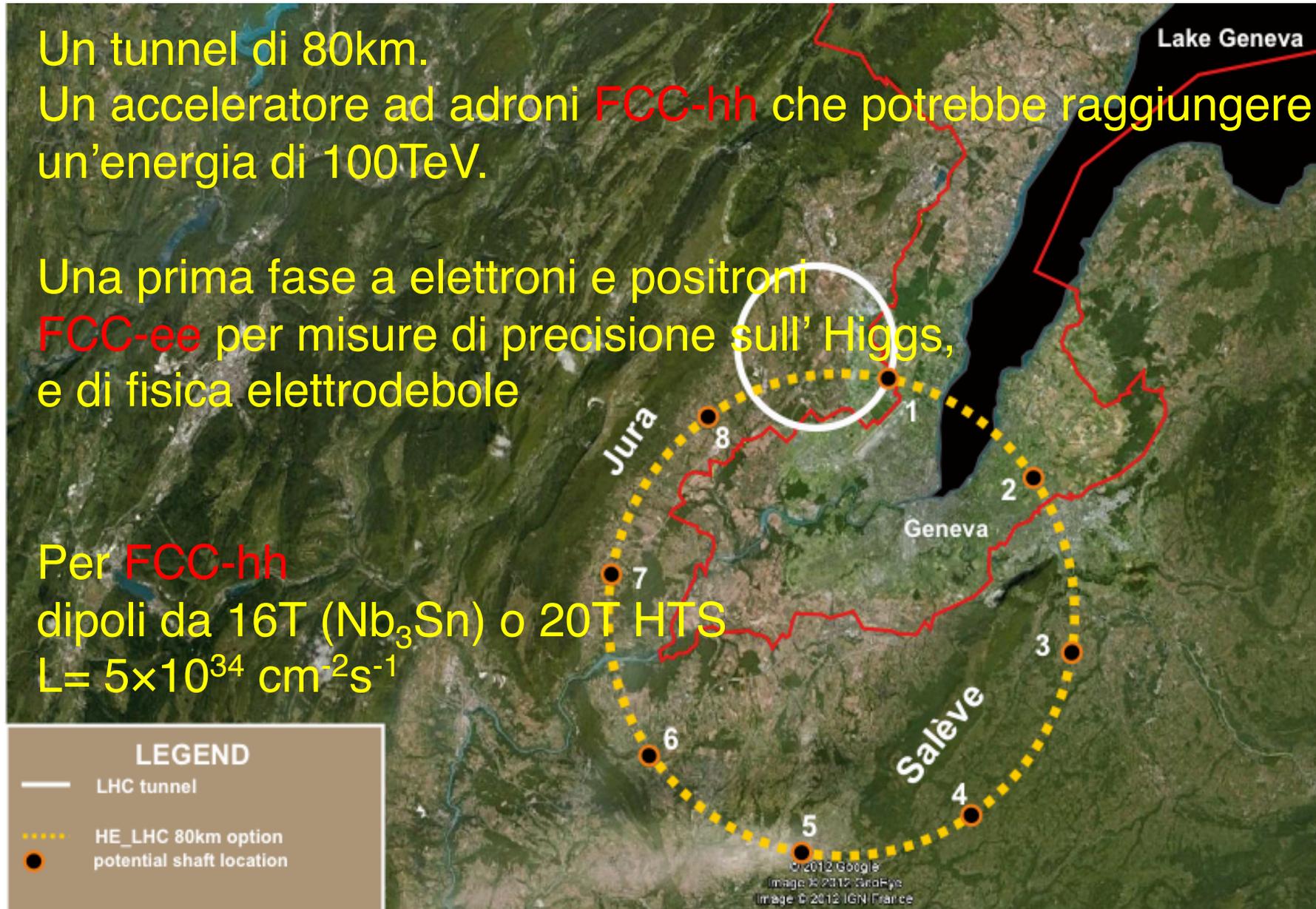
FCC: un collider davvero grande.

Un tunnel di 80km.

Un acceleratore ad adroni FCC-hh che potrebbe raggiungere un'energia di 100TeV.

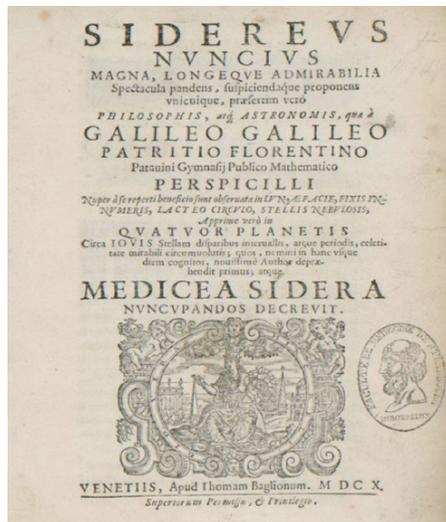
Una prima fase a elettroni e positroni FCC-ee per misure di precisione sull' Higgs, e di fisica elettrodebole

Per FCC-hh
dipoli da 16T (Nb_3Sn) o 20T HTS
 $L = 5 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



Abbiamo bisogno di voi, una nuova generazione di giovani scienziati, per continuare un cammino iniziato più di 400 anni fa.

Nuove idee, nuovo slancio, nuove energie per affrontare le grandi sfide della fisica contemporanea.



Sidereus Nuncius 1610

Guido Tonelli CERN/INFN/UNIFI

