

La particella di Higgs: quasi cinquant'anni dall'idea teorica all'osservazione in laboratorio

**Accademia delle Scienze di Torino
15 maggio 2013**

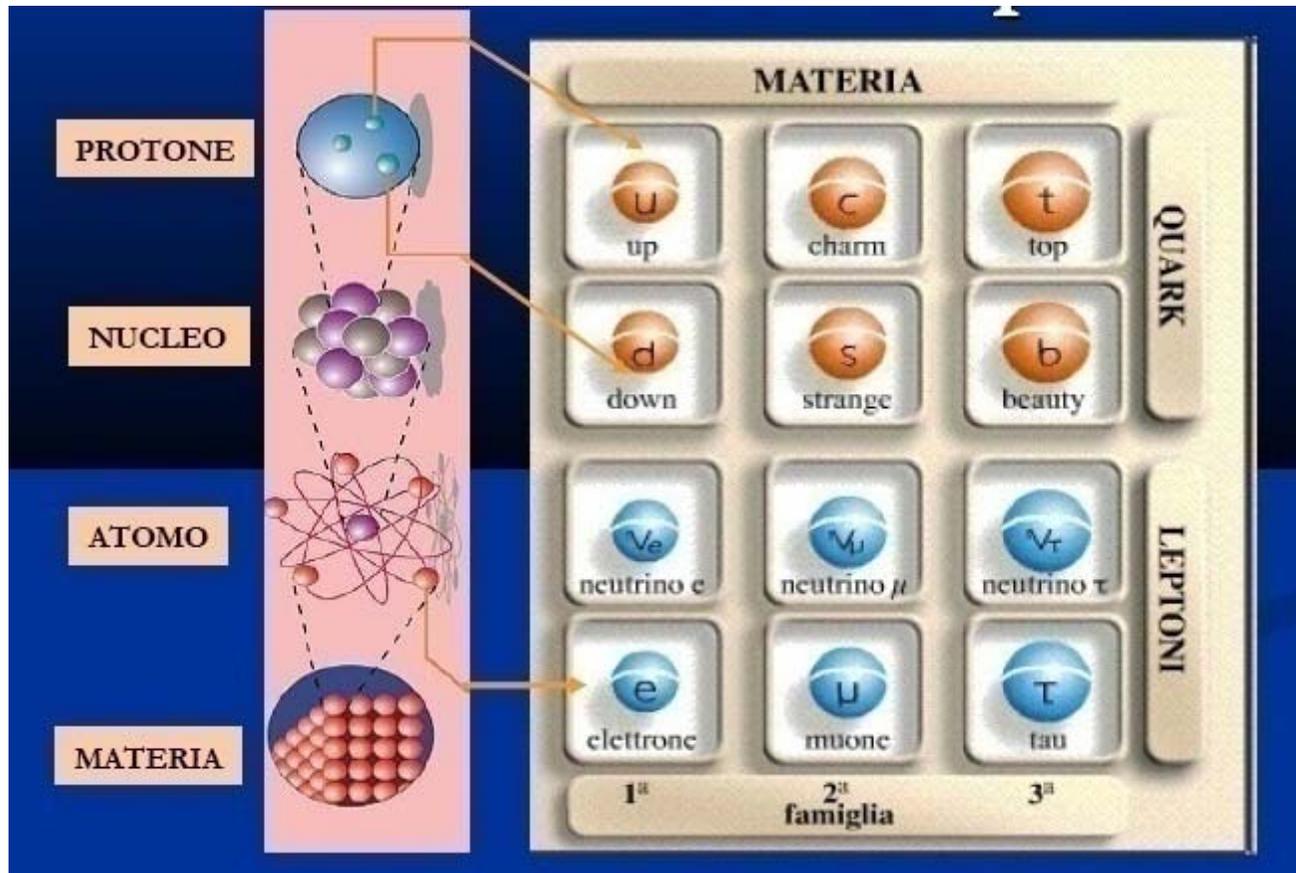
Alessandro Bottino e Nadia Pastrone

Università di Torino e Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Premesse teoriche

- ★ **Il Modello Standard** della fisica delle particelle
- ★ **Campo di Higgs e rottura spontanea di simmetria**
- ★ **Particella di Higgs ed evoluzione dell'Universo**

Tutte le particelle che conosciamo sono riconducibili ai seguenti costituenti (**quarks e leptoni**)



L'interazione debole e' responsabile, per esempio, dei decadimenti beta di nuclei instabili.

L'interazione gravitazionale viene qui trascurata.

Ogni particella e' caratterizzata da:

★ Carica elettrica

★ Massa, ossia grandezza che quantifica l'inerzia di un corpo a passare dallo stato di quiete ad uno stato di moto

$$\text{Newton: } F = m a$$

$$\text{equivalenza energia - massa: } E = m c^2 \text{ (Einstein)}$$

$$\text{(energia di riposo del protone = 1 GeV)}$$

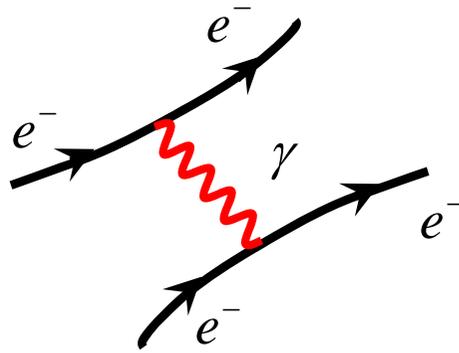
★ Spin: momento angolare intrinseco

$$\text{se } S = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}, \dots \quad \text{fermione}$$

$$\text{se } S = 0, 1, \dots \quad \text{bosone}$$

↑
HIGGS

2 elettroni

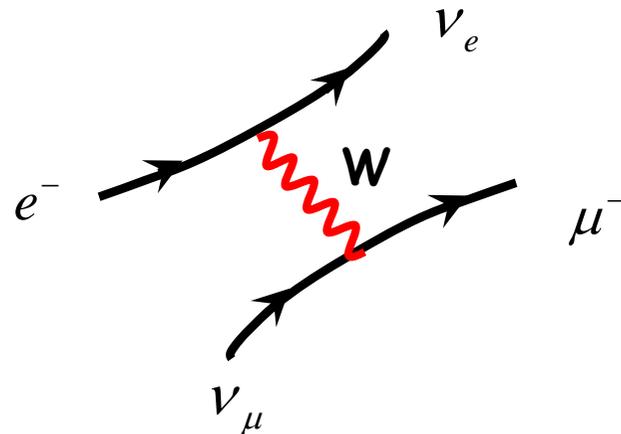


interagiscono tra di loro per il tramite del **campo elettromagnetico**, ossia del **fotone**

il fotone ha massa nulla  l'interazione elettromagnetica si esercita anche a **grandi distanze**

la formulazione matematica dell'elettromagnetismo è semplice
(invarianza di gauge)

un generico **processo debole**, per esempio:



ha come campo "mediatore" dell'interazione il **campo debole**,
ossia il **bosone W**

l'interazione debole si esercita solo a **piccole distanze**
→ **il bosone W ha massa diversa da zero**

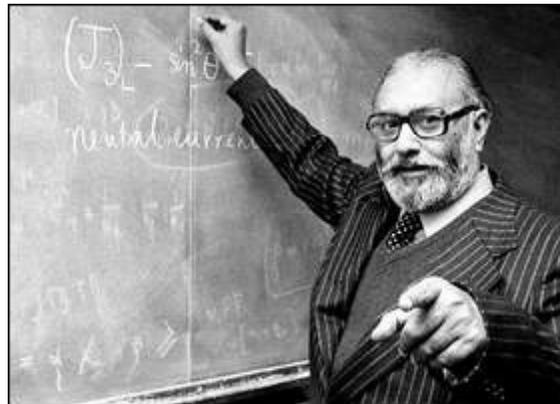
problema per lo sviluppo della teoria
(la teoria non e' invariante di gauge)

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE (unificazione dell'interazione elettromagnetica e di quella debole)

Premi Nobel 1979



Sheldon L. Glashow



Abdus Salam

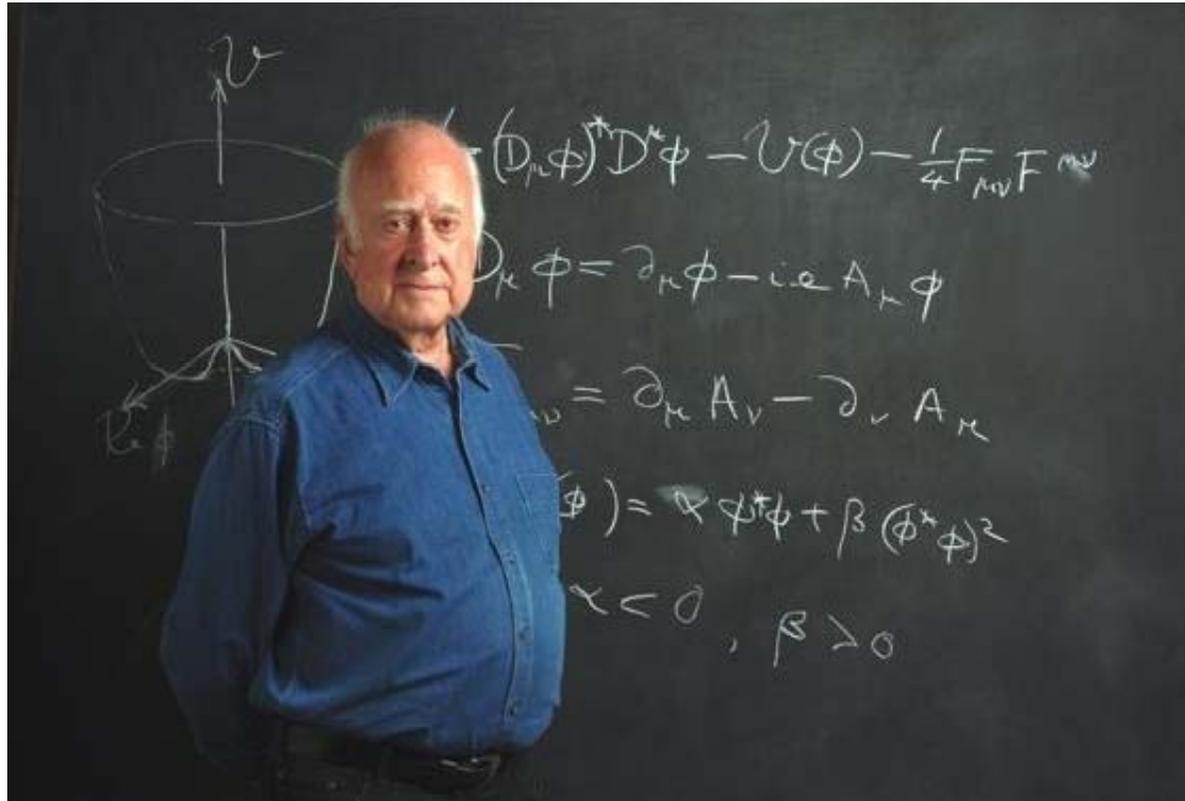


Steven Weinberg

MODELLO STANDARD DELLA FISICA DELLE PARTICELLE

- ★ Teoria dell'interazione elettromagnetica = teoria perfetta
- ★ se vogliamo formulare per l'interazione debole una teoria analoga a quella dell'interazione elettromagnetica **occorre provvisoriamente mettere a zero la massa del mediatore W**
- ★ analogamente vengono provvisoriamente **messe a zero le masse di tutte le particelle (leptoni e quarks)**
- ★ una volta sviluppata la teoria, occorrerà trovare un **"meccanismo" per conferire a tutte le particelle e ai mediatori (campi) di interazione i loro valori fisici di massa**

MECCANISMO DI **HIGGS**



**Peter Higgs e il campo di Higgs
1964**

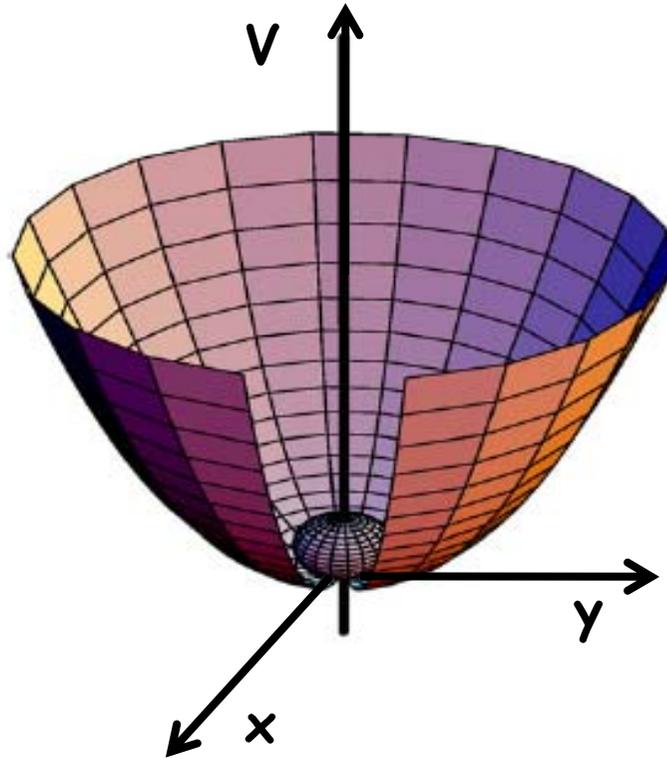


T.W.B. Kibble, G.S. Guralnik, C.R.Hagen, F. Englert, R. Brout
premio Sakurai 2010

Meccanismo di Higgs

- 1) ipotesi: esiste in tutto lo spazio di un campo di Higgs, esso stesso, inizialmente, con massa nulla
- 2) avviene un fenomeno di rottura spontanea di simmetria
- 3) questo fenomeno genera massa per:
 - il campo di Higgs
 - i campi di interazione (salvo il campo elettromagnetico)
 - i campi di materia

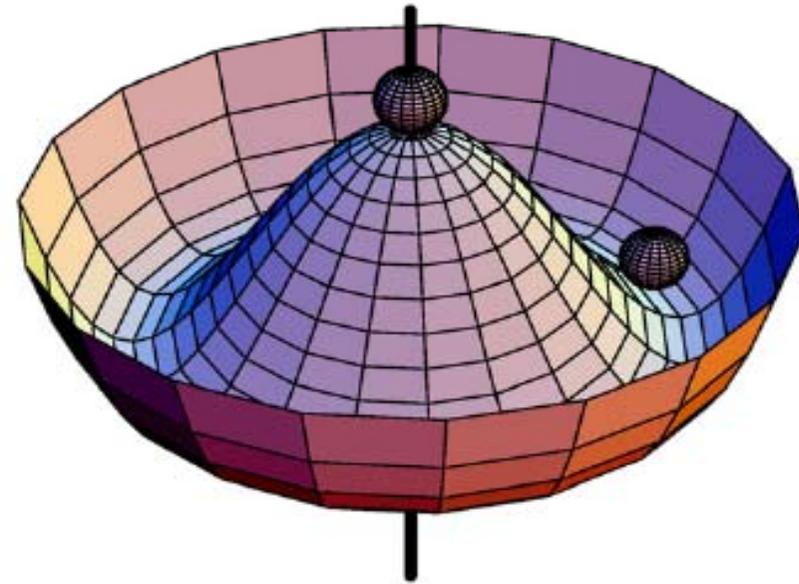
confinamento da superficie
parabolica



potenziale parabolico

esiste una sola configurazione
di energia minima

confinamento da superficie
a forma di "sombbrero"

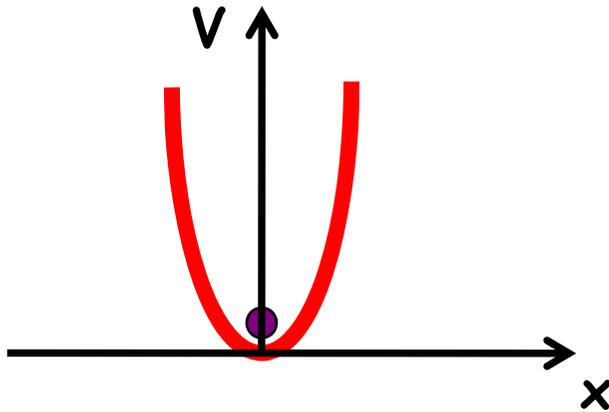


potenziale di Higgs

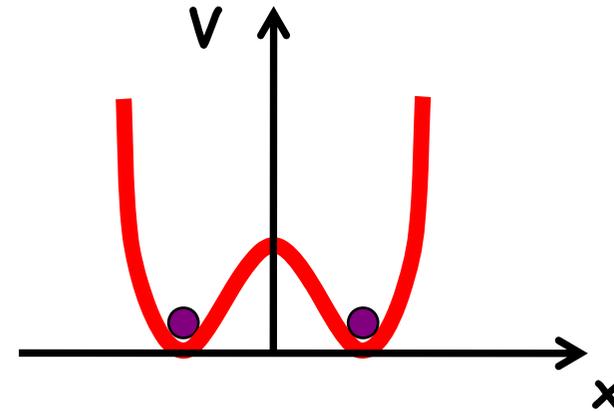
esistono infinite soluzioni di energia
minima - al verificarsi di una di
queste si ha una rottura "spontanea"
di simmetria - ma la simmetria del
potenziale confinante resta inalterata

Caso unidimensionale

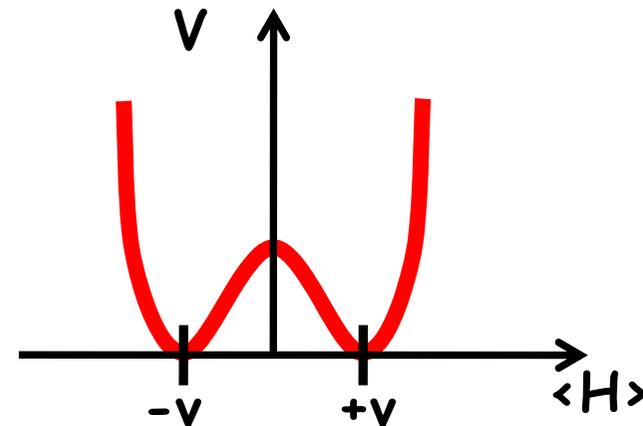
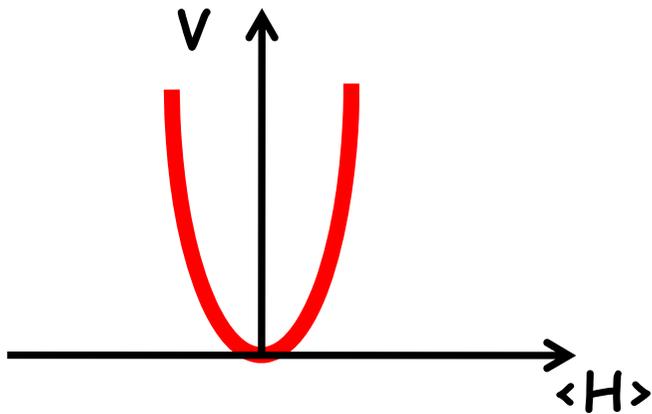
potenziale parabolico



potenziale di Higgs



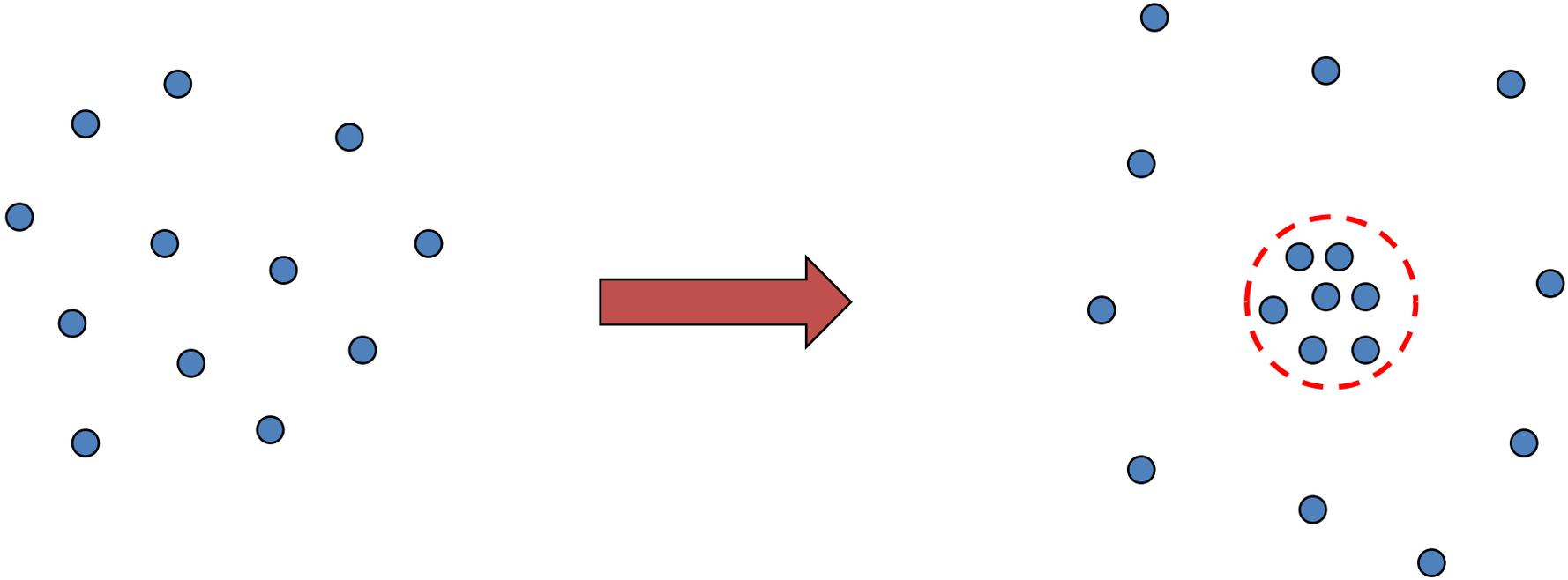
analogamente per il campo di Higgs H



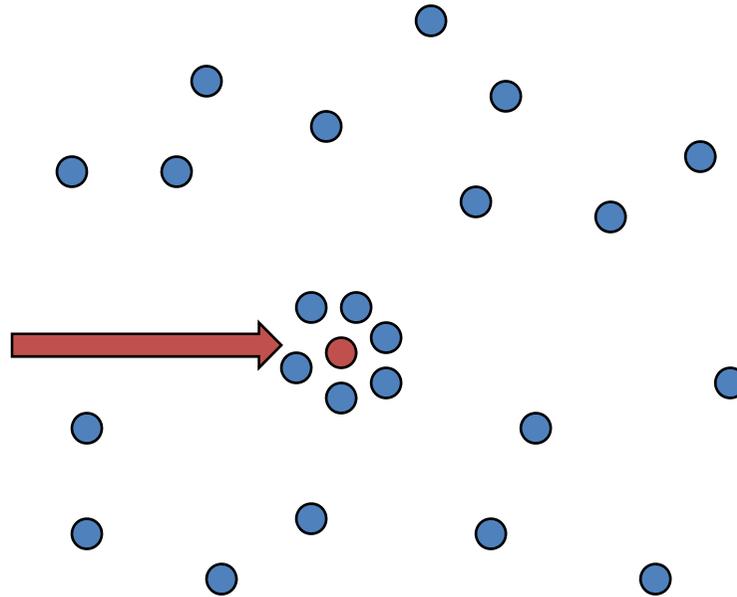
esiste uno stato di energia minima
(stato di vuoto) con $\langle H \rangle_0 = 0$
la particella di Higgs ha massa = 0

esistono 2 stati energia minima
(stati di vuoto) con $\langle H \rangle_0 \neq 0$
la particella di Higgs e' massiva

Il campo di Higgs acquista massa



Le singole particelle **acquistano massa**



quanto maggiore e' la capacita' della particella di interagire con il campo di Higgs **tanto maggiore e' l'inerzia della particella e quindi la sua massa**

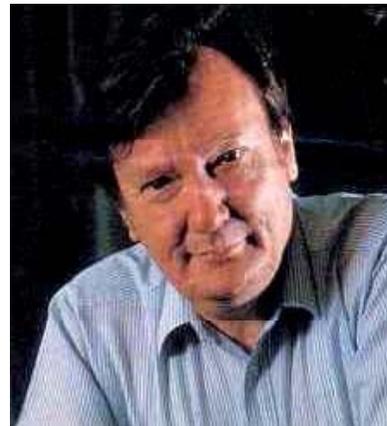
Le simmetrie che collegano l'interazione elettromagnetica con l'interazione debole sono simmetrie esatte del modello (lagrangiana), ma vengono rotte dal vuoto

Il Modello Standard prevede:

massa del bosone W $\approx 80 \text{ GeV}/c^2$

il fenomeno di rottura spontanea di simmetria
avviene all'energia di **200-300 GeV**

Misure della massa del bosone W
(e del bosone Z) al collisore
protoni-antiprotoni del CERN
(1983)



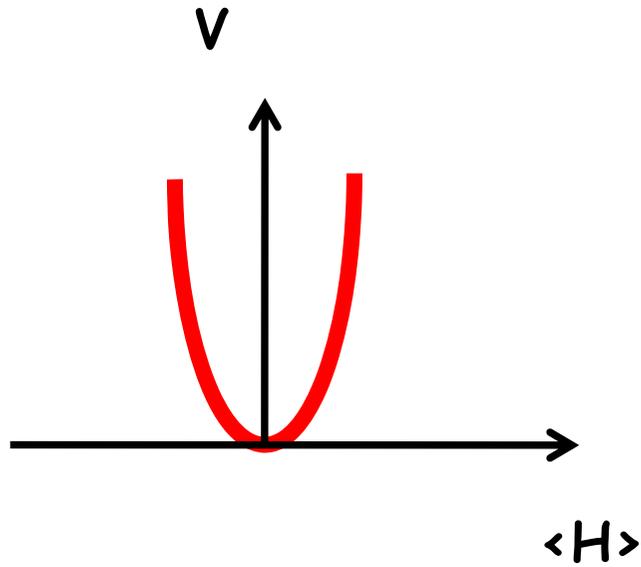
Carlo Rubbia



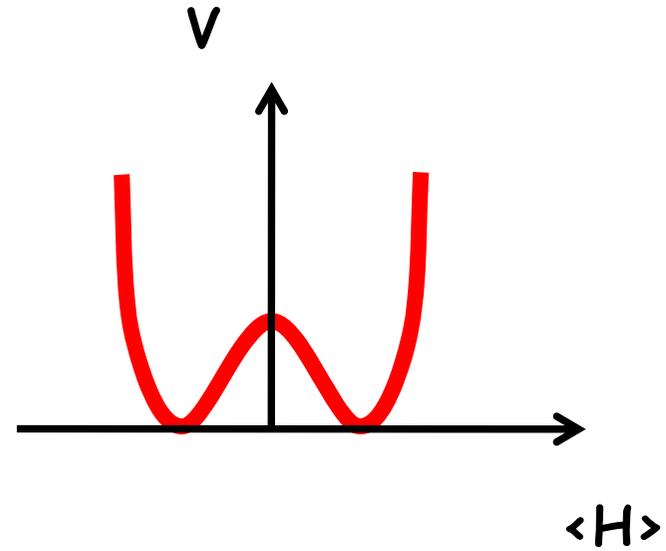
Simon van Der Meer

Rottura spontanea di simmetria in cosmologia

potenziale parabolico

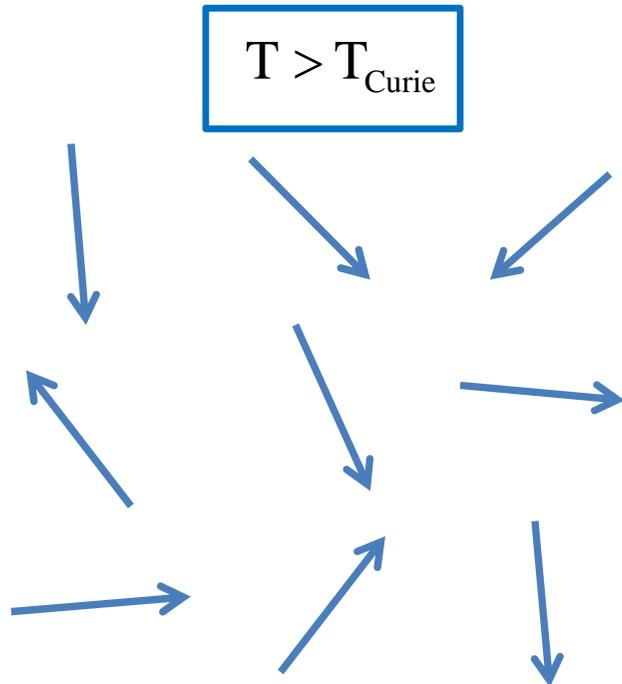


potenziale di Higgs

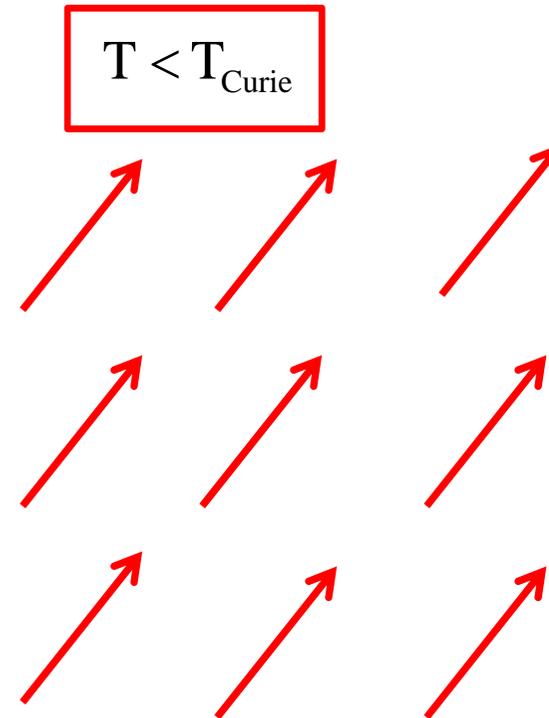


come effetto di **abbassamento di temperatura**

Un esempio di questo fenomeno: raffreddamento di un materiale ferromagnetico

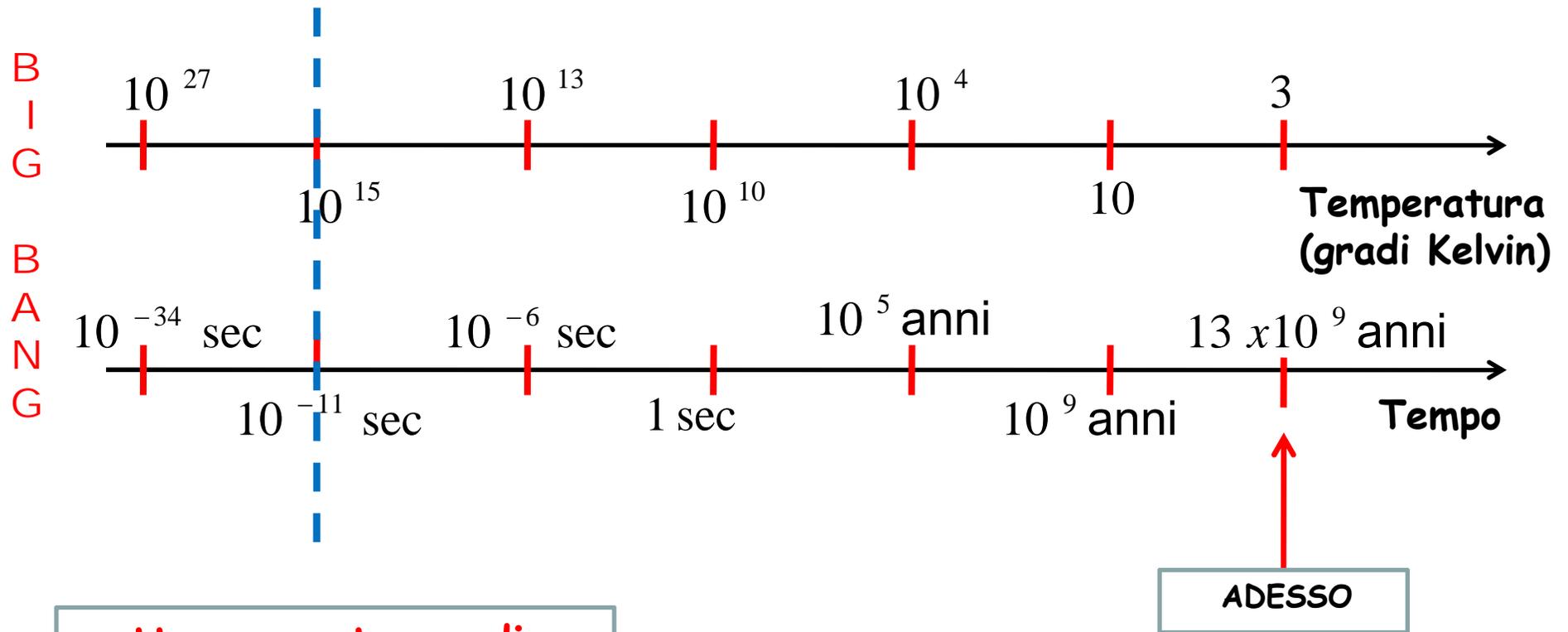


le orientazioni dei momenti magnetici intrinseci degli atomi sono "a caso", non correlate e rapidamente fluttuanti - non vi e' nessuna direzione privilegiata nello spazio: **SIMMETRIA**



i momenti magnetici intrinseci degli atomi si correlano tra di loro e si allineano in una certa direzione (casuale) - **ROTTURA SPONTANEA DI SIMMETRIA**

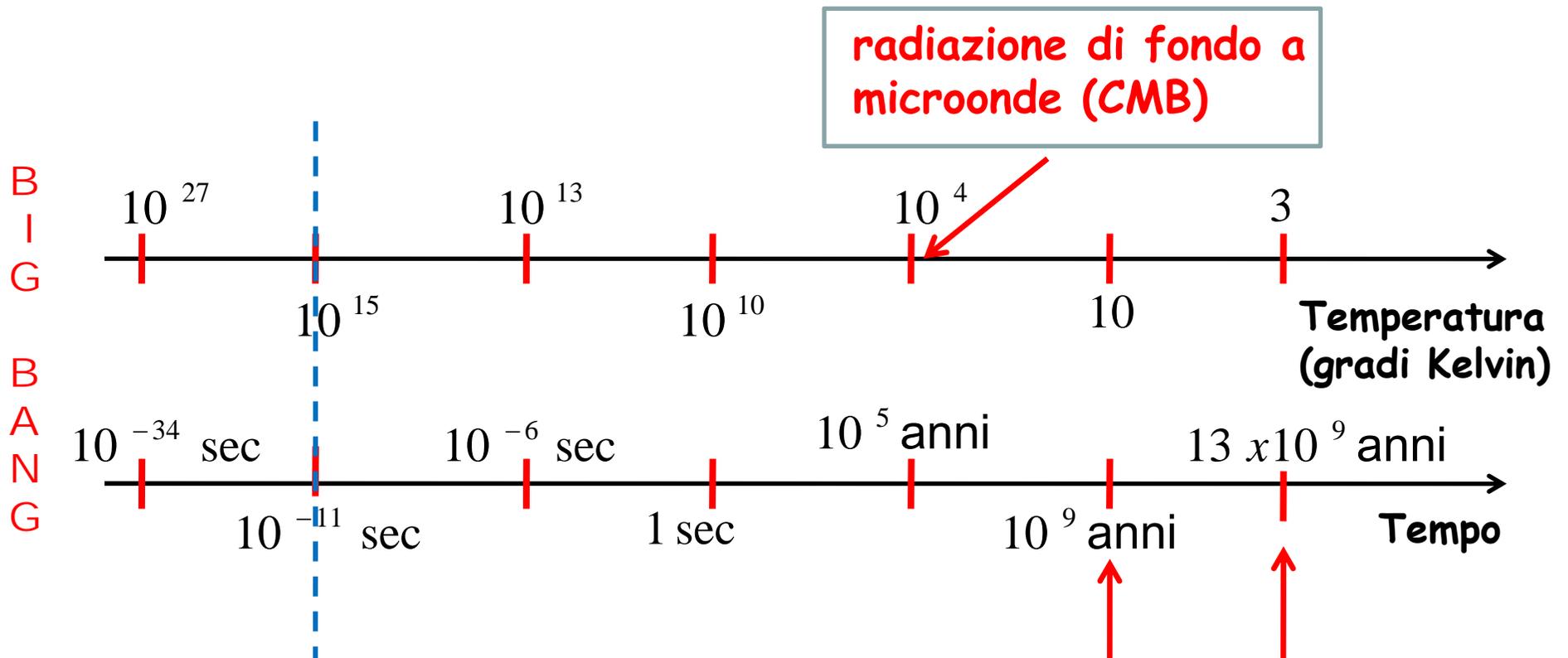
nel corso dell'espansione, l'Universo si raffredda



rottura spontanea di
simmetria elettrodebole

scala di energia: 200 - 300 GeV

1 GeV \cong energia di riposo del protone \longleftrightarrow 10¹³ gradi Kelvin



radiazione di fondo a microonde (CMB)

rottura spontanea di simmetria elettrodebole

ADESSO

formazione della nostra galassia

1 GeV \cong energia di riposo del protone



10^{13} gradi Kelvin

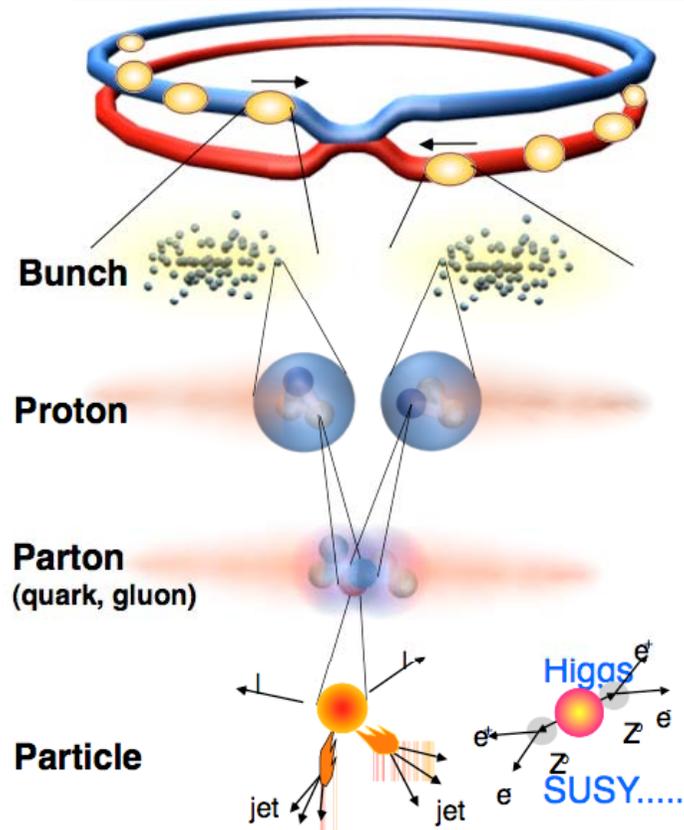
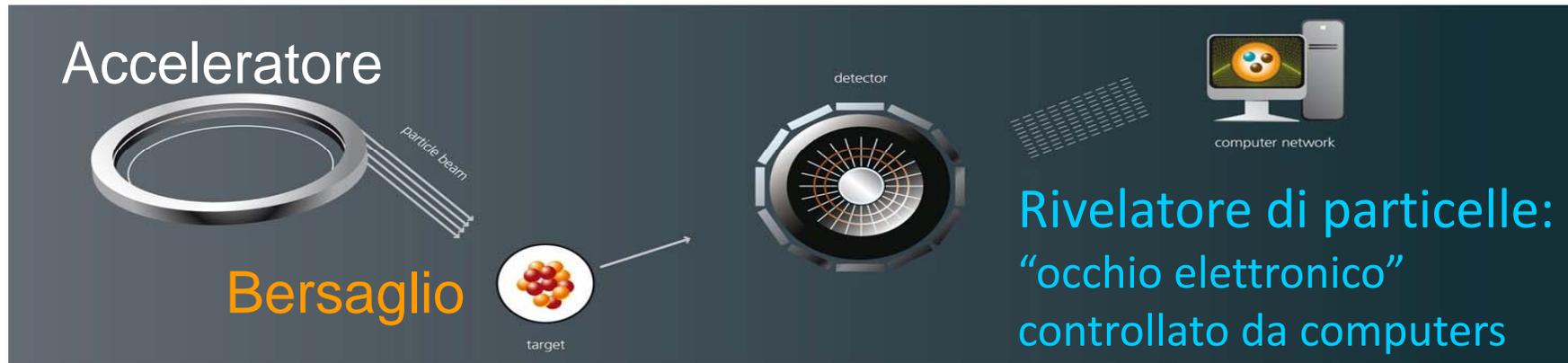
Per arrivare alla scoperta: 30 anni di lavoro!

- ◆ **1982:** Iniziano gli studi preliminari
- ◆ **1994:** il CERN Council approva il progetto LHC (Large Hadron Collider)
- ◆ **1996:** Decisione finale di cominciare la costruzione di LHC
- ◆ **2004:** Inizio dell'installazione dell'acceleratore
- ◆ **2006:** Inizia la messa a punto
- ◆ **2008:** Primi fasci
- ◆ **2009:** Primi dati di fisica
- ◆ **2012:** 1 miliardo di interazioni al sec



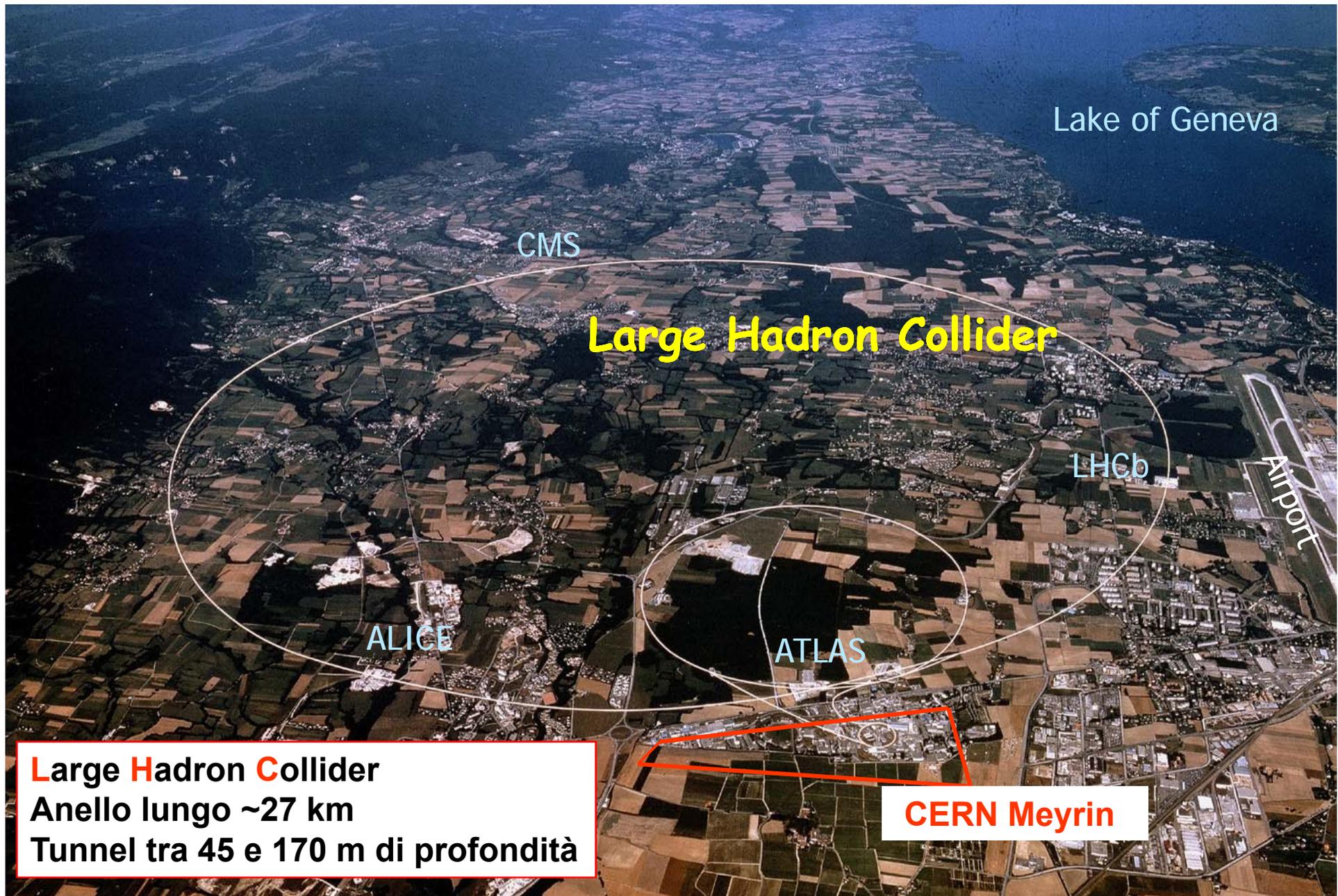
- **Perché e' necessario avere apparati così complessi, collaborazioni così grandi e investire così tanto tempo?**
- **In cosa consistono e come funzionano gli esperimenti?**
- **Come si arriva a dichiarare la scoperta?**

Come si usa un acceleratore?

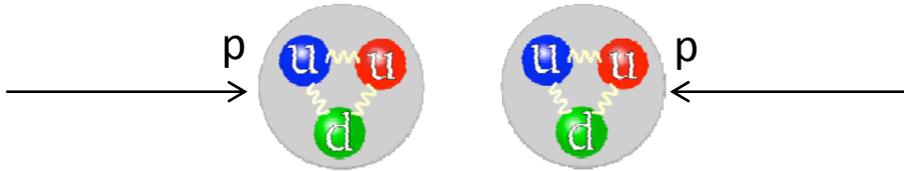


- ✓ Ci permette di ripetere l'esperimento a parità di condizioni iniziali
- ✓ Possiamo scegliere l'energia di lavoro per esplorare la natura a diverse dimensioni
- ✓ Si possono produrre nuove particelle avendo un'energia disponibile $E=mc^2$

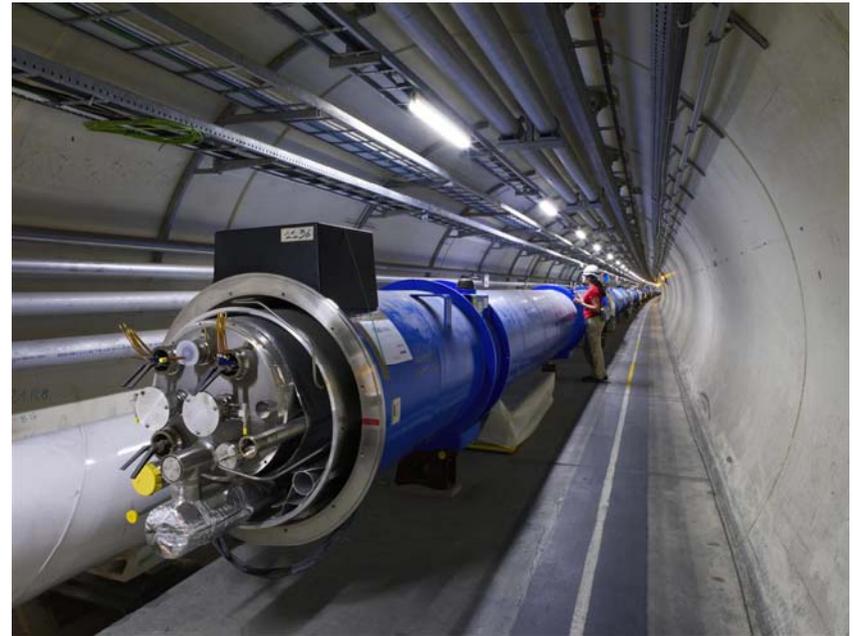
LHC @ CERN di Ginevra



Large Hadron Collider



Un collisore di protoni di altissima energia!



- Tunnel di 27 km di circonferenza
- 1232 magneti superconduttori raffreddati a **-271°**: il luogo più freddo della galassia!
- 9300 magneti in tutto, energia immagazzinata: **~10 GJ** come un Airbus in volo
- I fasci di protoni trasportano la stessa energia di un Frecciarossa a 150 km/h, ma concentrata in una sezione di $\sim 30 \times 30 \mu\text{m}^2$!

Ancora numeri...

**Due fasci circolano in direzioni opposte:
1380 pacchetti per fascio
(ciascuno con 150 miliardi di protoni)**



4 punti di interazione

Nel punto di interazione: ~20-30 protoni collidono

**Un fascio circola per circa 10 ore nella macchina e
percorre 10 miliardi di km (11245 giri al secondo)**

Energia elettrica consumata: 800000 MWh (come citta' di Ginevra)

LHC è costato circa 9 miliardi di euro (dal 1984)

**L'ultimo ordine di aerei militari dello Stato Italiano
supera i 10 miliardi**

E' ricerca fine a se stessa?

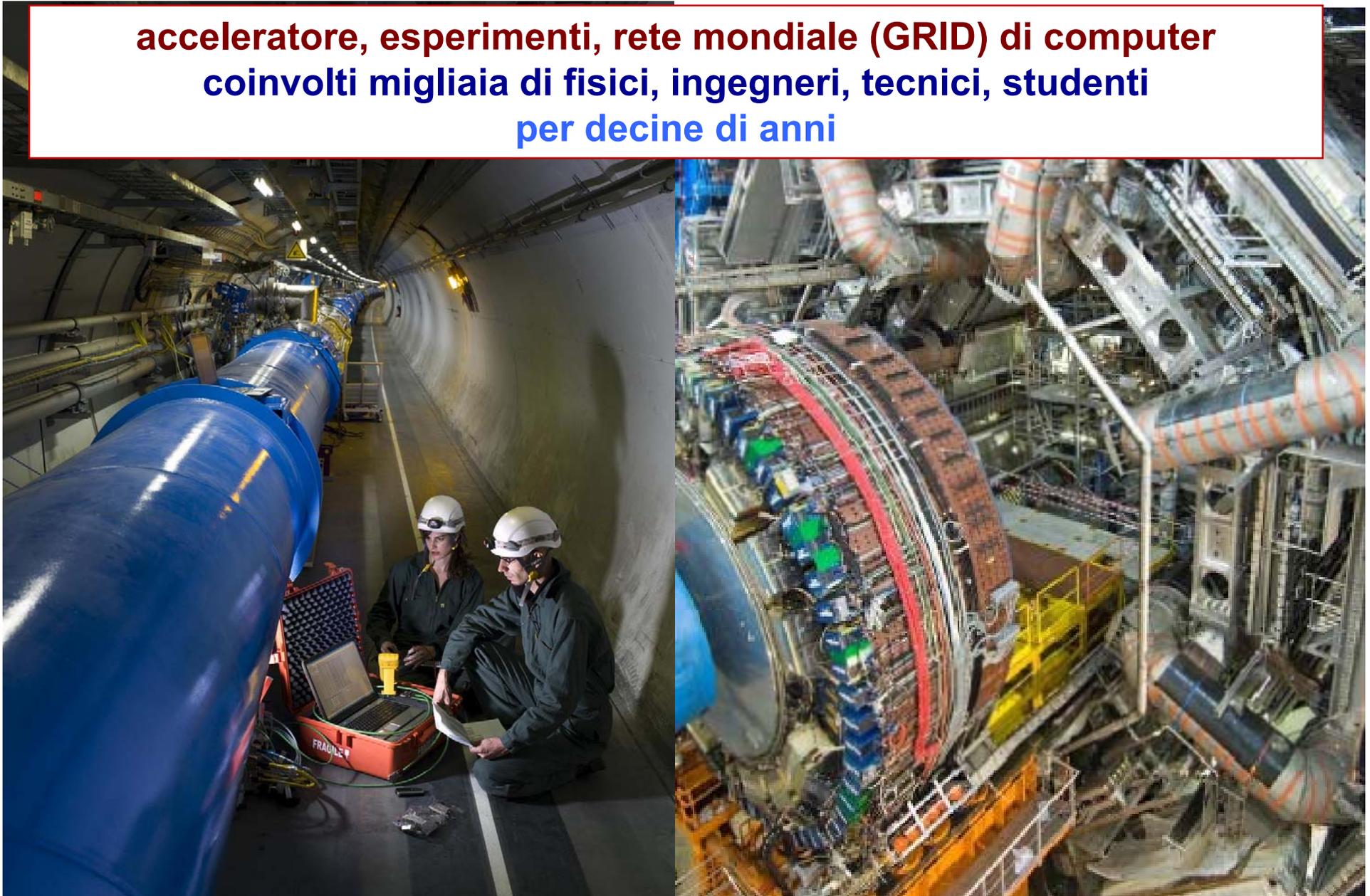
Applicazioni non facili da prevedere a priori...

- Applicazioni pratiche dei rivelatori
 - Diagnostica e terapia medica dei tumori
- Tecnologie
 - Materiali
 - Superconduttività
 - Magneti
 - Criogenia
 - Elettronica
 - Computing
 - Il web!



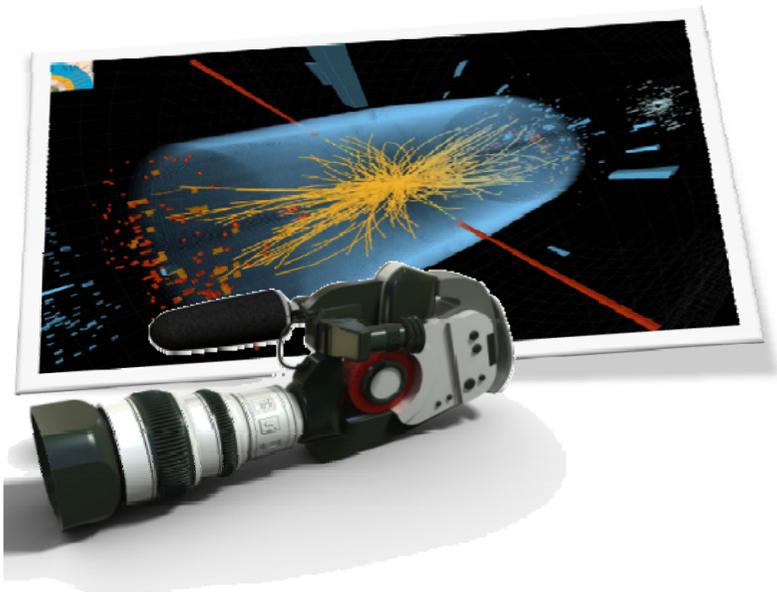
Avventura scientifica globale

**acceleratore, esperimenti, rete mondiale (GRID) di computer
coinvolti migliaia di fisici, ingegneri, tecnici, studenti
per decine di anni**



Come si rivelano le particelle?

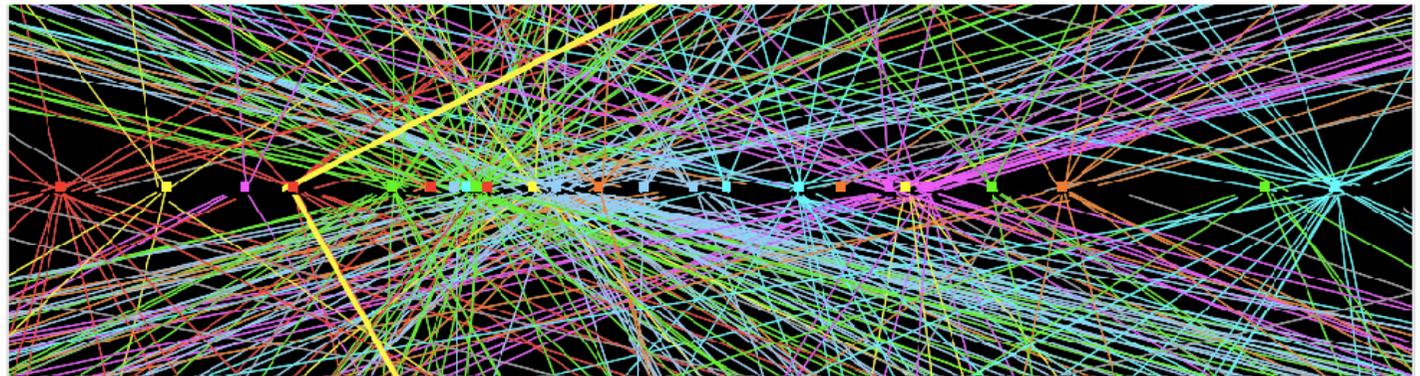
Un rivelatore *non* è una grossa macchina fotografica...



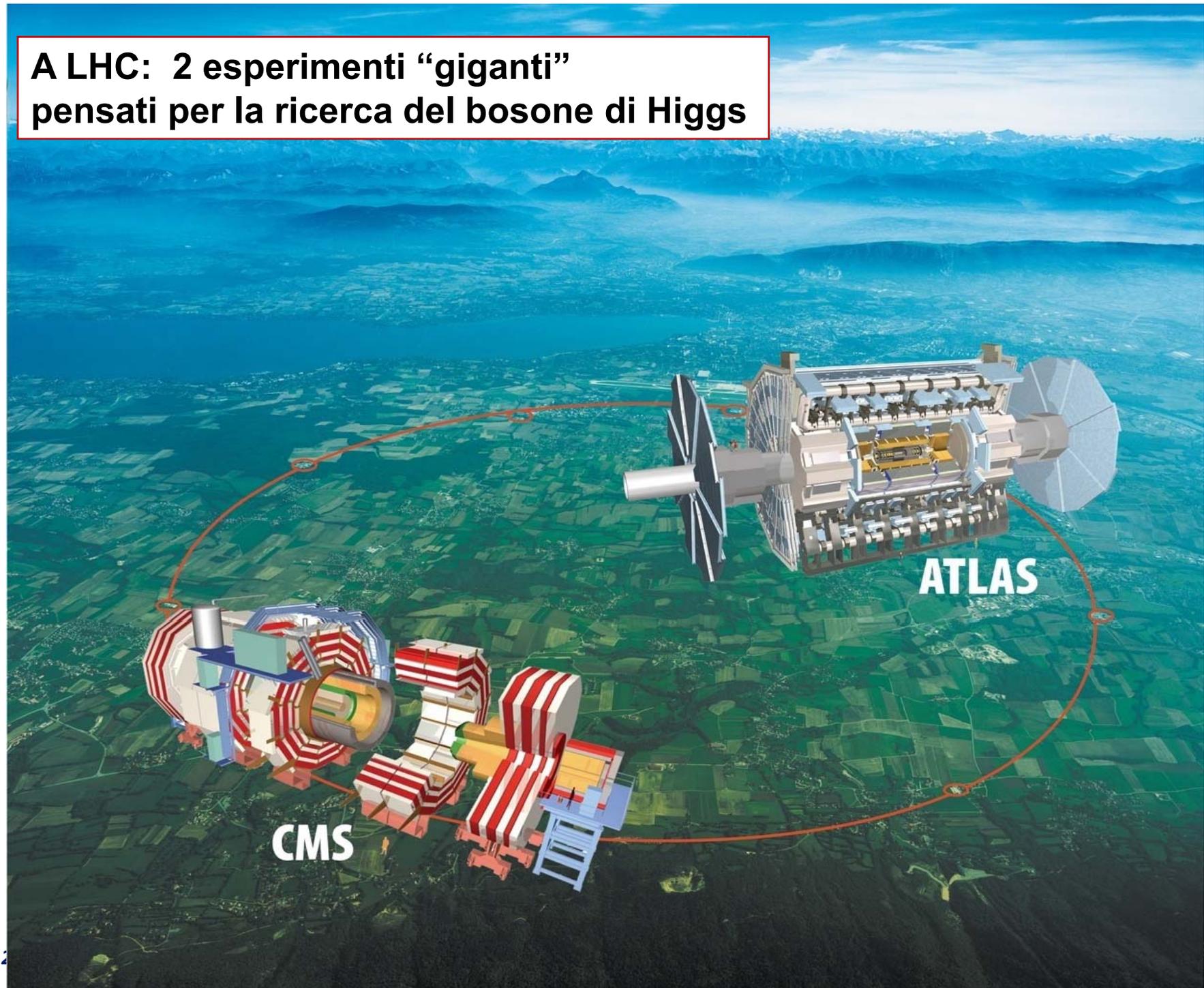
Sistema di **migliaia di sensori specializzati**

- Sfruttano l'interazione delle particelle con la materia per ricavare **misure indipendenti di posizione, energia, quantità di moto**
- Misure che vanno poi correlate per ricostruire cosa è successo nella collisione

$Z \rightarrow \mu\mu$ in un evento con 25 vertici



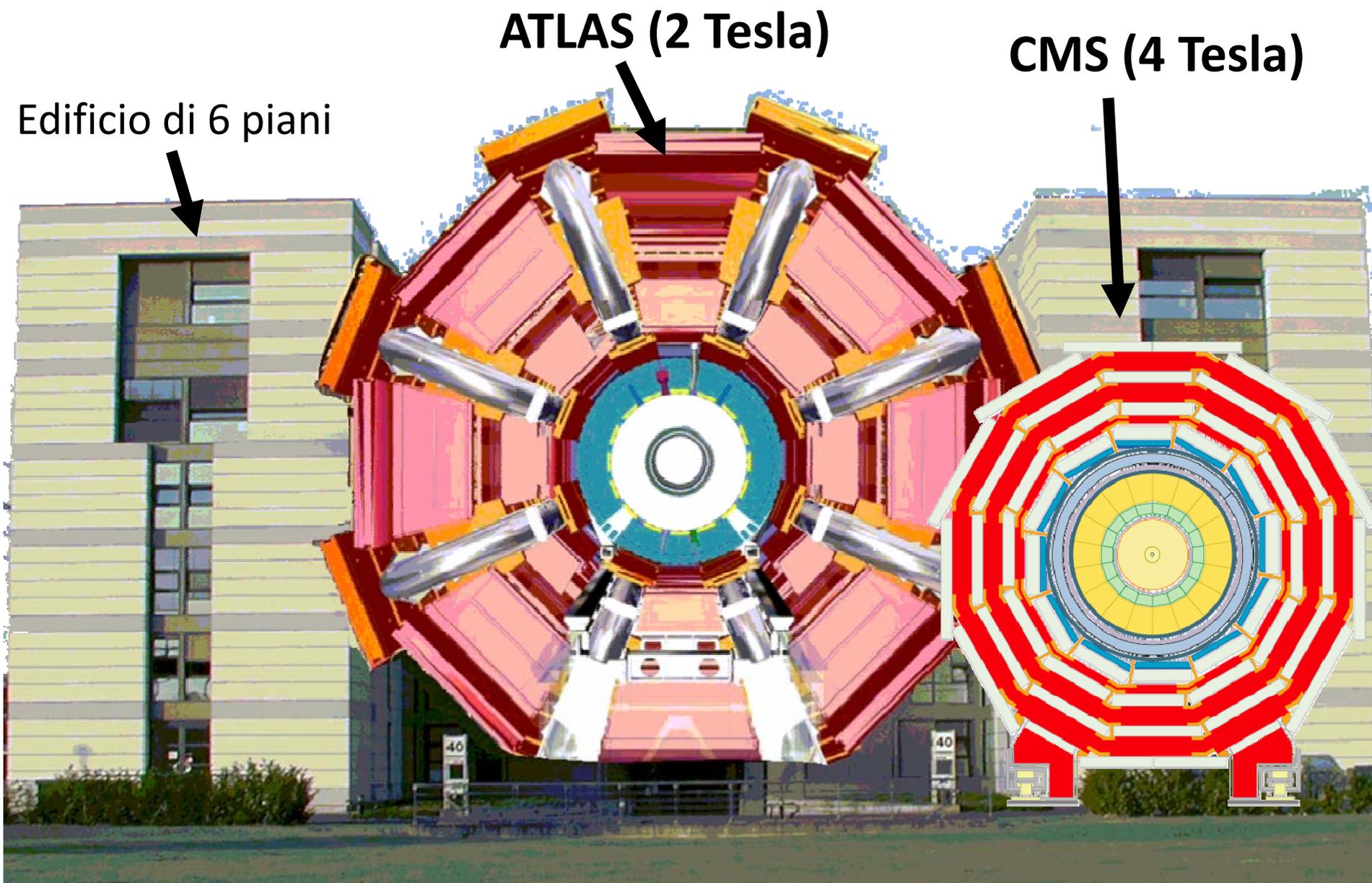
**A LHC: 2 esperimenti “giganti”
pensati per la ricerca del bosone di Higgs**



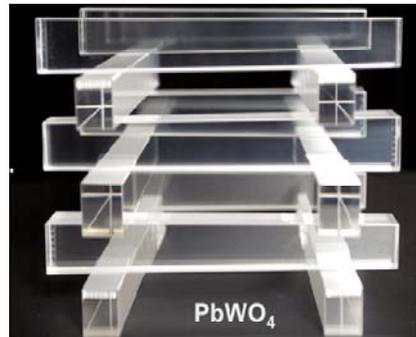
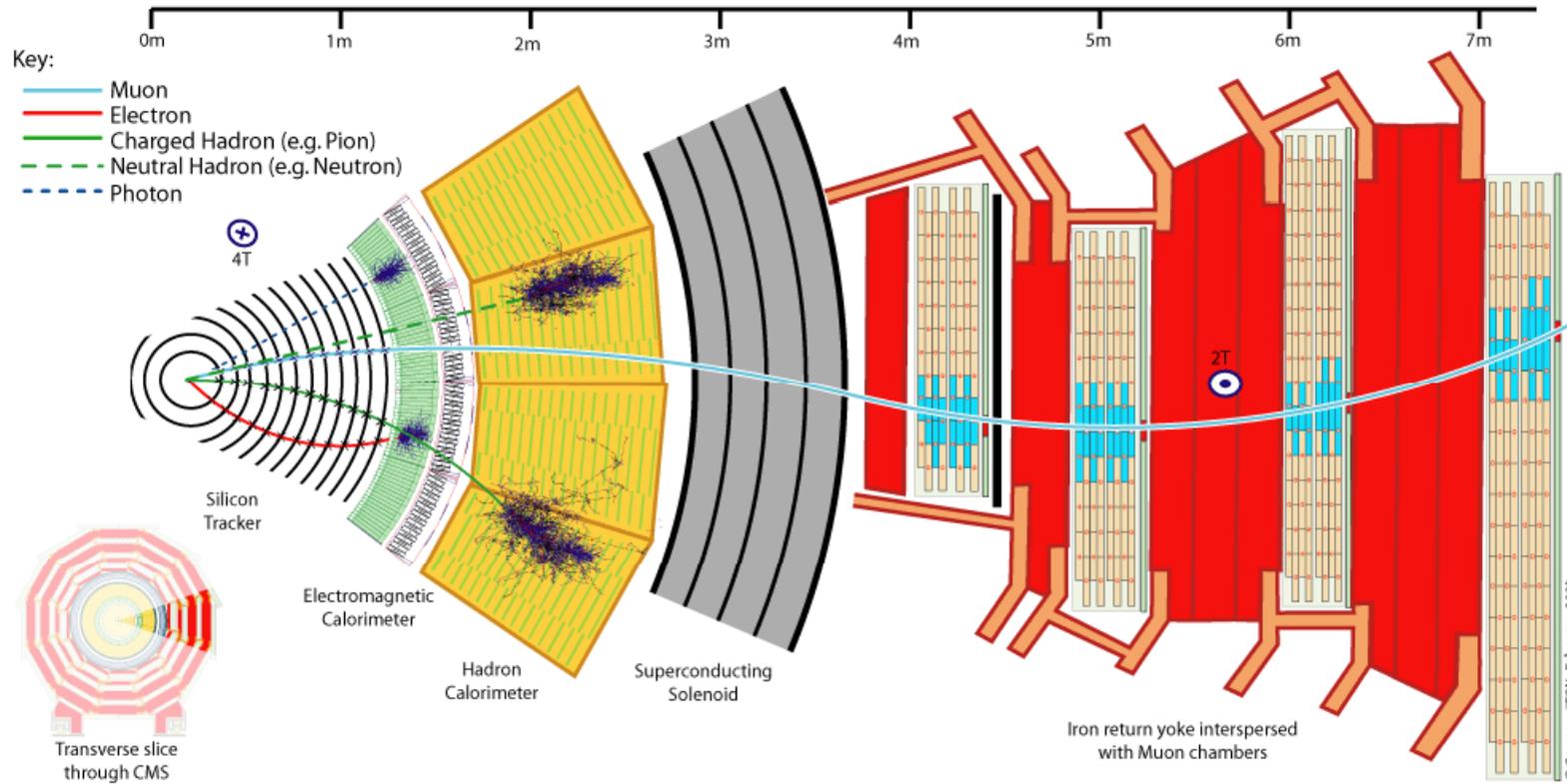
ATLAS

CMS

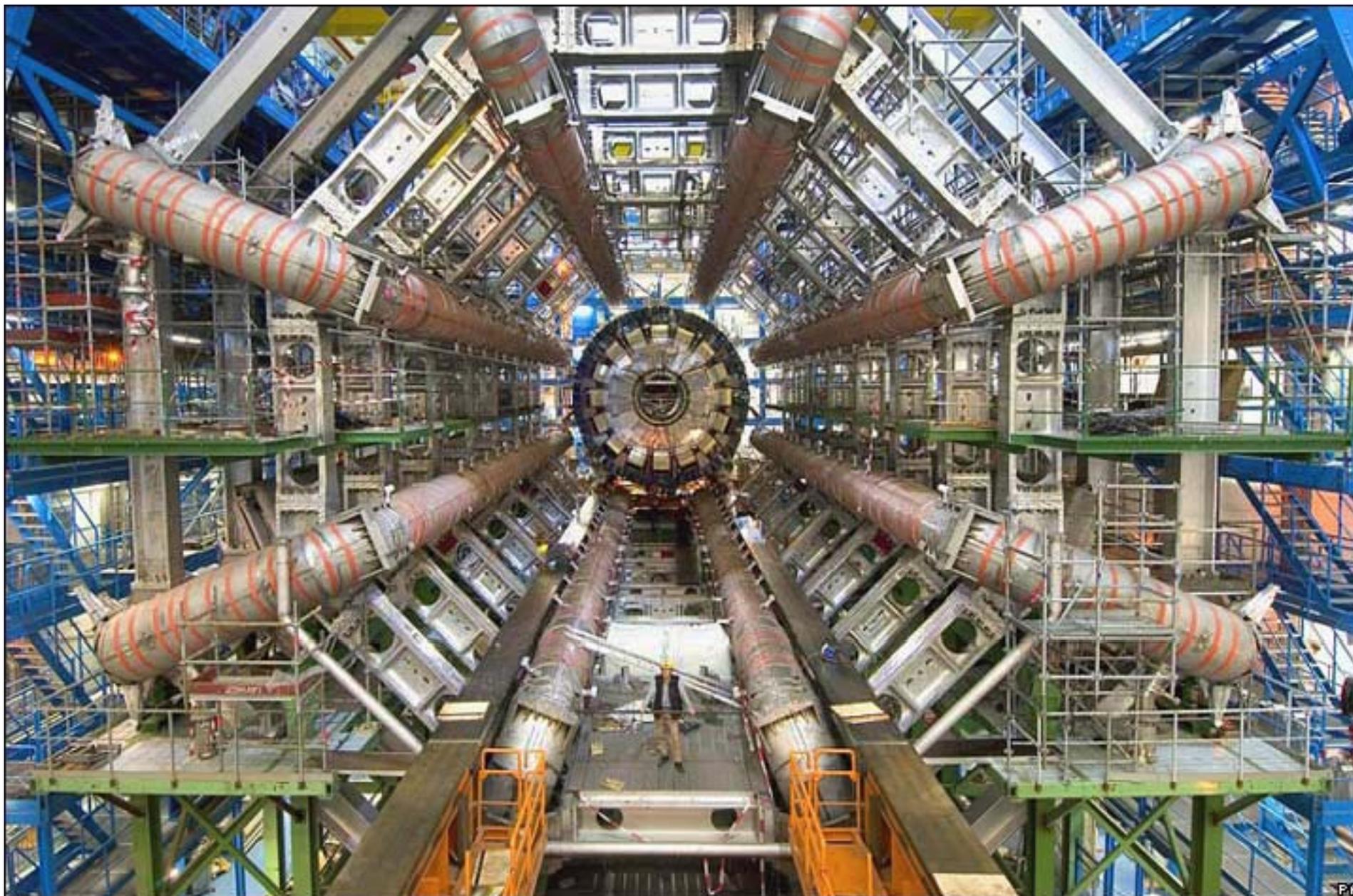
ATLAS 2 volte piu' grande – CMS 2 volte piu' pesante



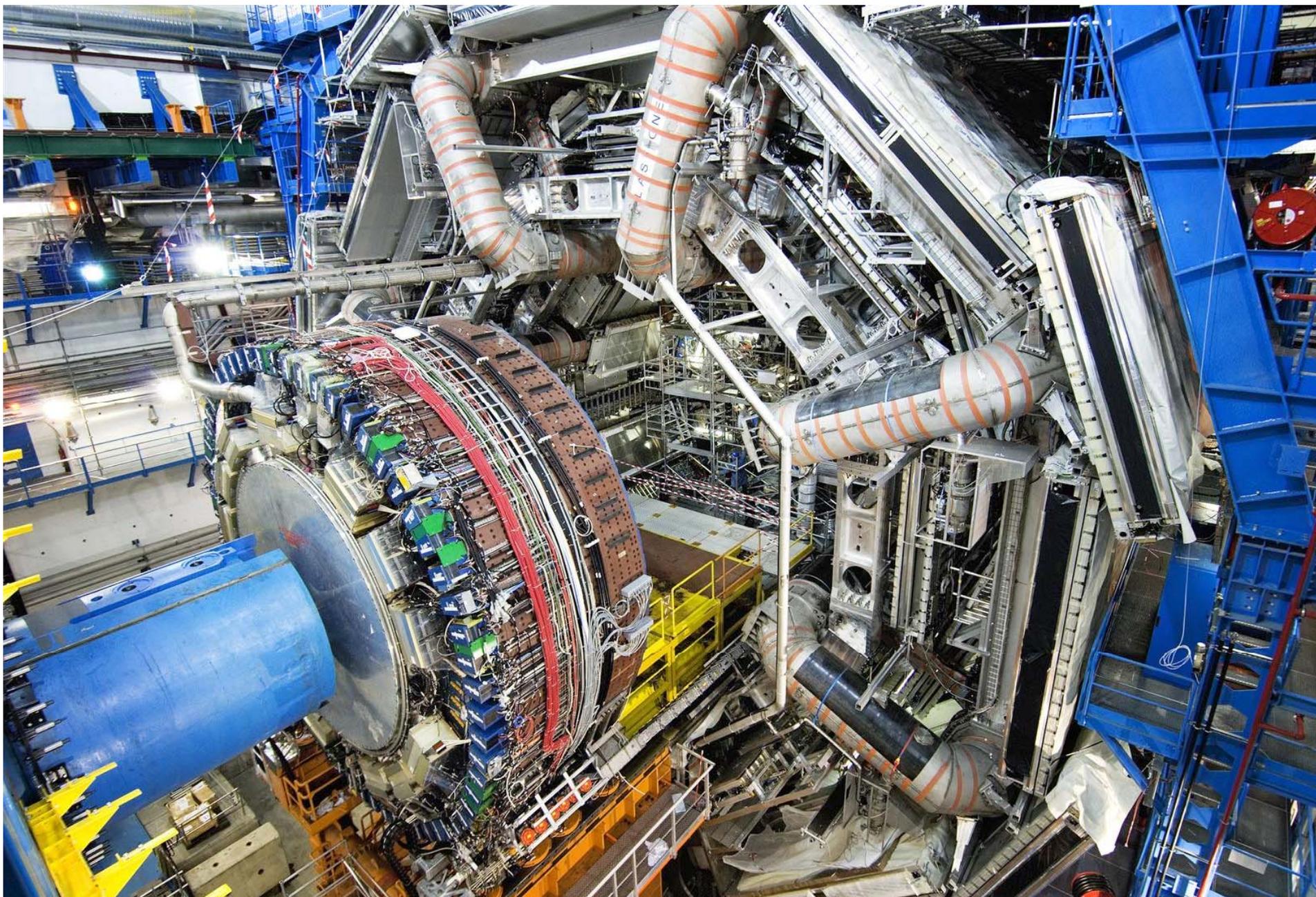
Una sezione di CMS



I magneti toroidali di ATLAS

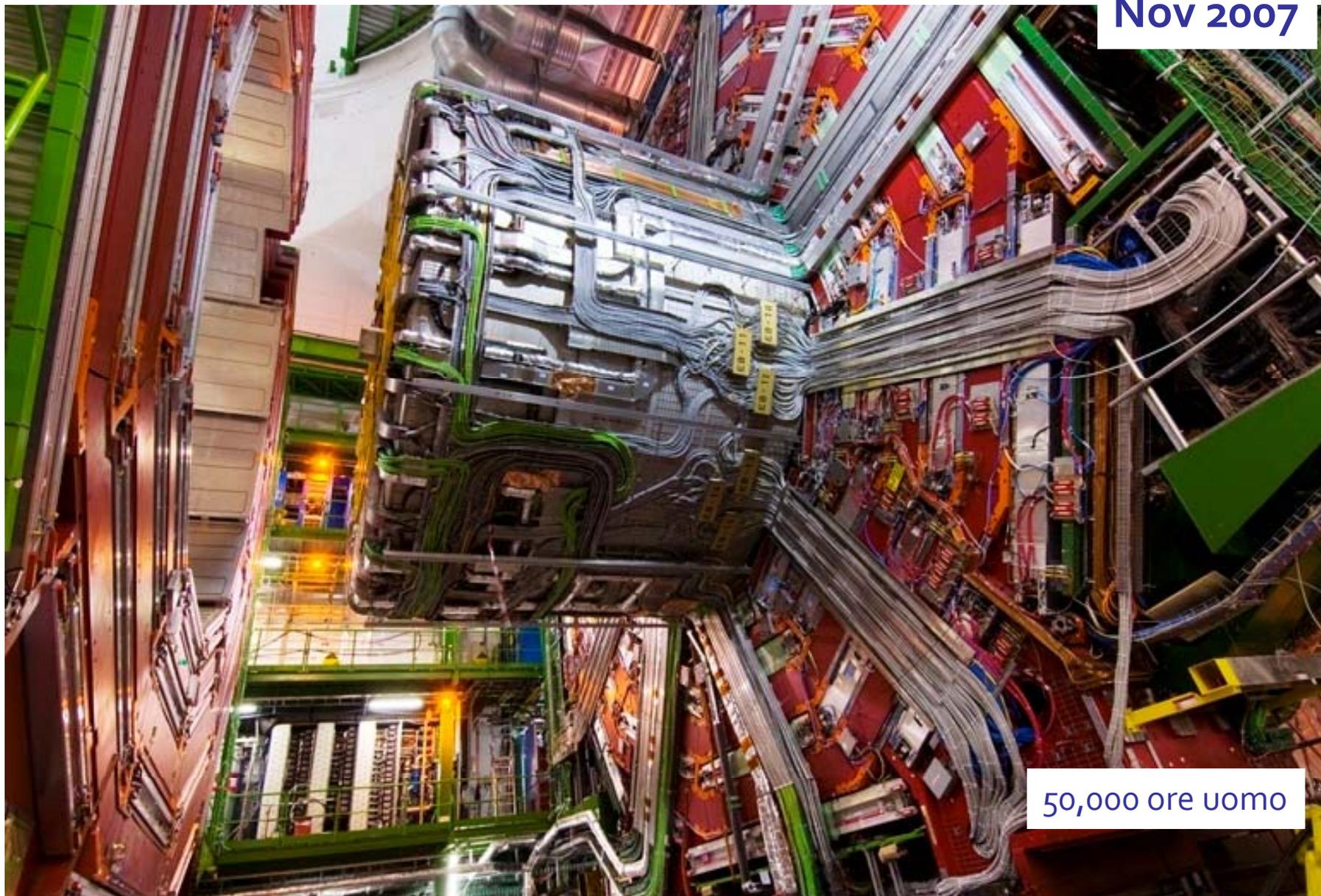


ATLAS: in costruzione



CMS: cavi, tubi, fibre ottiche...

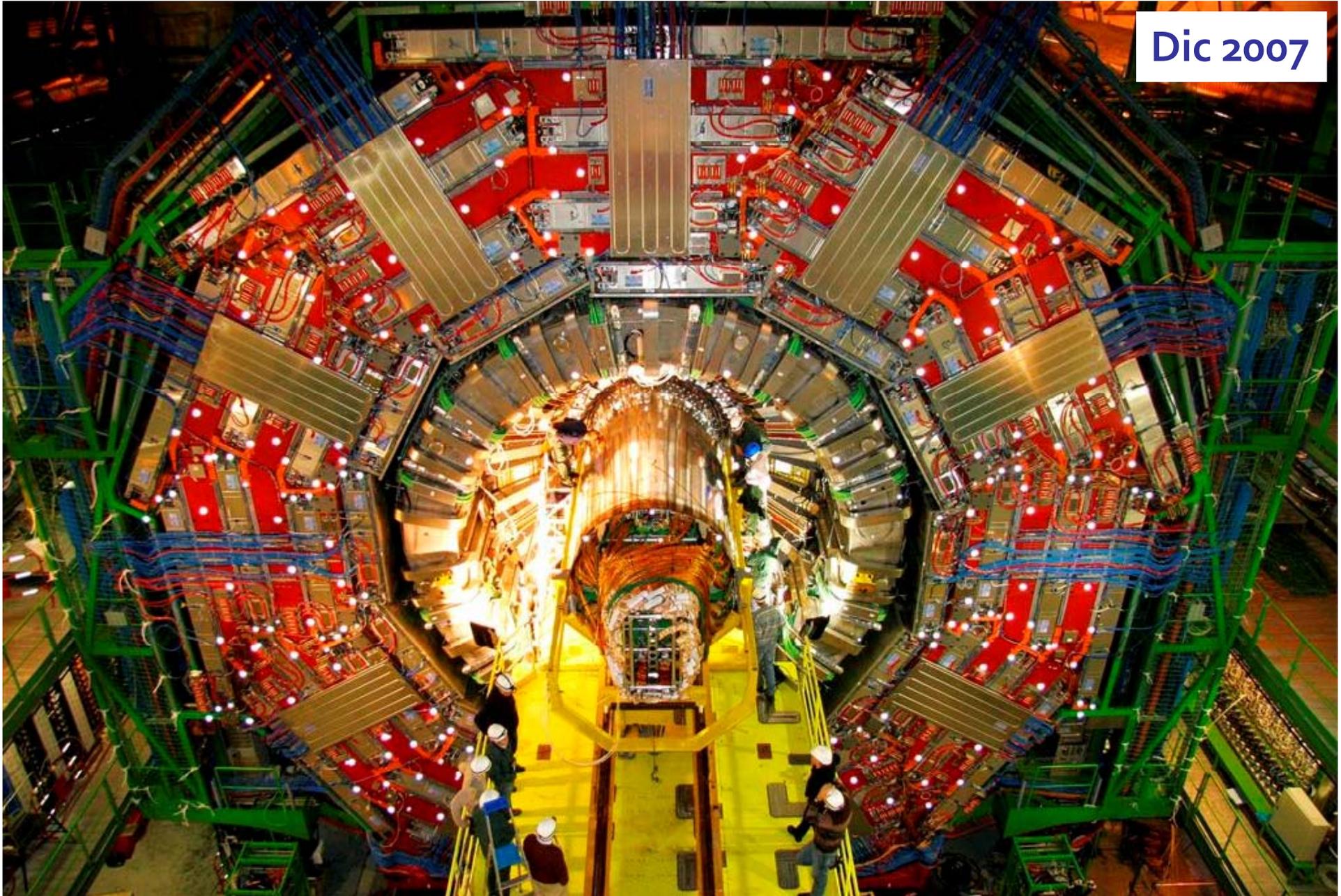
Nov 2007



50,000 ore uomo

Inserimento del tracciatore di CMS

Dic 2007



Il controllo degli esperimenti



Con un insolito Shift Leader....

30 Marzo 2010: prime collisioni pp @ 7 TeV

CMYK

Nxxx,2010-03-31,A,001,Bs-BK,E3

"All the News
That's Fit to Print"

The New York Times

Late Edition

Today, morning showers in spots, then clearing, milder, high 60. Tonight, clear, low 49. Tomorrow, ample sunshine, cooler at the coast, high 69. Weather map, Page A24.

VOL. CLIX . . No. 54,996

© 2010 The New York Times

NEW YORK, WEDNESDAY, MARCH 31, 2010

\$2.00



DENNIS BALBOUCHE/REUTERS

Particles Collide, and Champagne Glasses Clink

In a control room, a scientist toasted the start of the Large Hadron Collider outside Geneva on Tuesday. The \$10 billion collider is designed to smash subatomic particles together at high energy levels, giving insight into the universe's beginnings. Page A11.

Plan to Widen Use of Statins Has Skeptics

Cholesterol Pills Aimed at Healthy People

By DUFF WILSON

With the government's blessing, a drug giant is about to expand the market for its blockbuster cholesterol medication Crestor to a new category of customers: as a preventive measure for millions of people who do not have cholesterol problems.

Some medical experts question whether this is a healthy move.

They point to mounting concern that cholesterol medications — known as statins and already the most widely prescribed drugs in the United States — may not be as safe a preventive medicine as previously believed for people who are at low risk of heart attacks or strokes.

Statins have been credited with saving thousands of lives every year with relatively few side effects, and some medical experts endorse the drug's broader use. But for healthy people who would take statins largely as prevention — which would be the case for the new category of Crestor patients — other experts suggest the benefits may

OBAMA TO OPEN OFFSHORE AREAS TO OIL DRILLING

SEEKS MAJOR EXPANSION

Atlantic, Eastern Gulf of Mexico and Alaska Are in Plan

By JOHN M. BRODER

WASHINGTON — The Obama administration is proposing to open vast expanses of water along the Atlantic coastline, the eastern Gulf of Mexico and the north coast of Alaska to oil and natural gas drilling for the first time, officials said Tuesday.

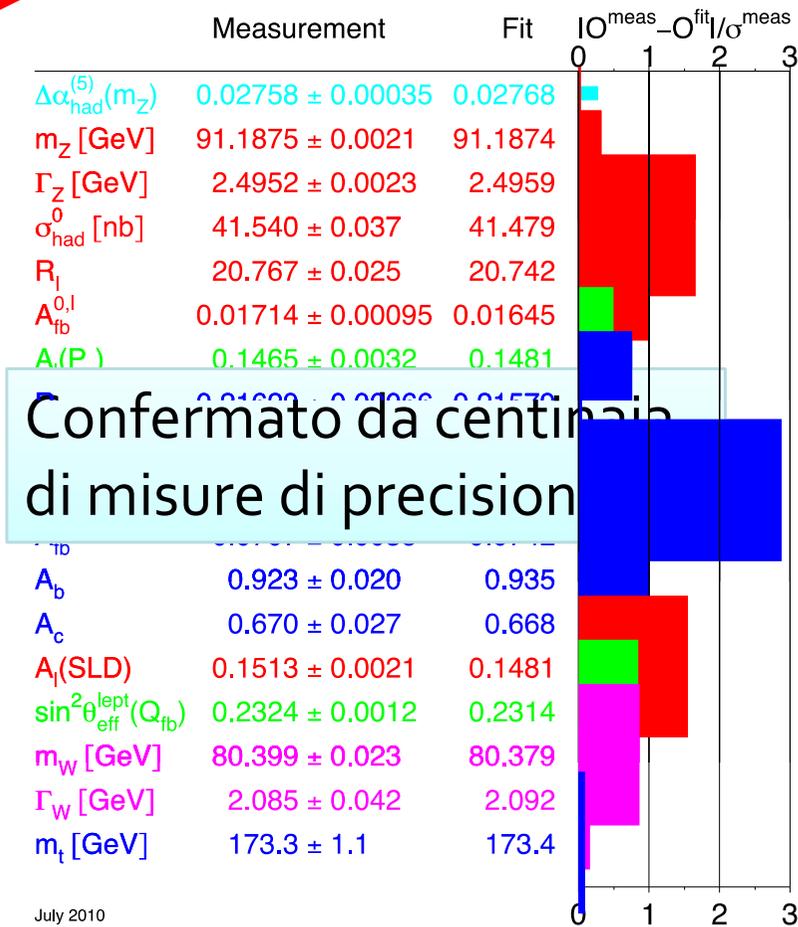
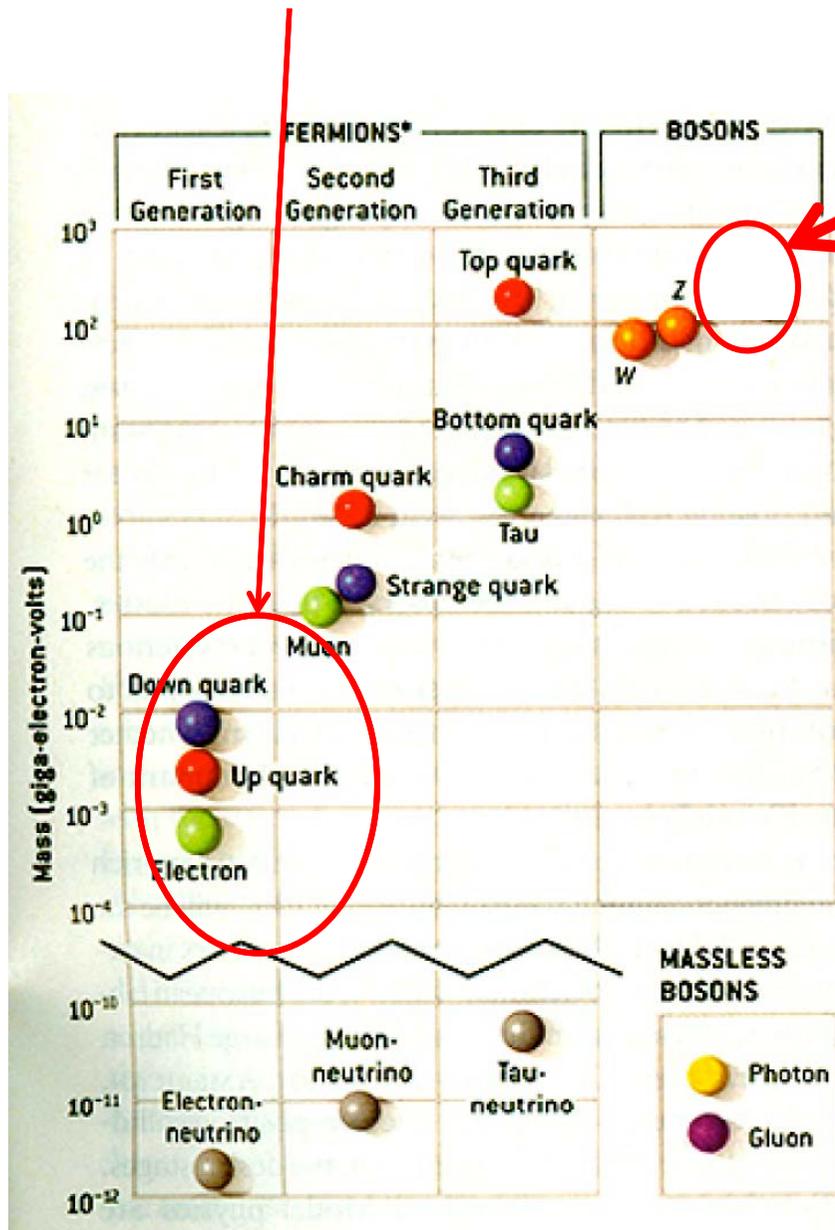
The proposal — a compromise that will please oil companies and domestic drilling advocates but anger some residents of affected states and many environmental organizations — would end a longstanding moratorium on oil exploration along the East Coast from the northern tip of Delaware to the central coast of Florida, covering 167 million acres of ocean.

Under the plan, the coastline from New Jersey northward would remain closed to all oil and

Particelle che 'vediamo'
nella vita di tutti i giorni

Modello Standard

Tassello mancante: Higgs

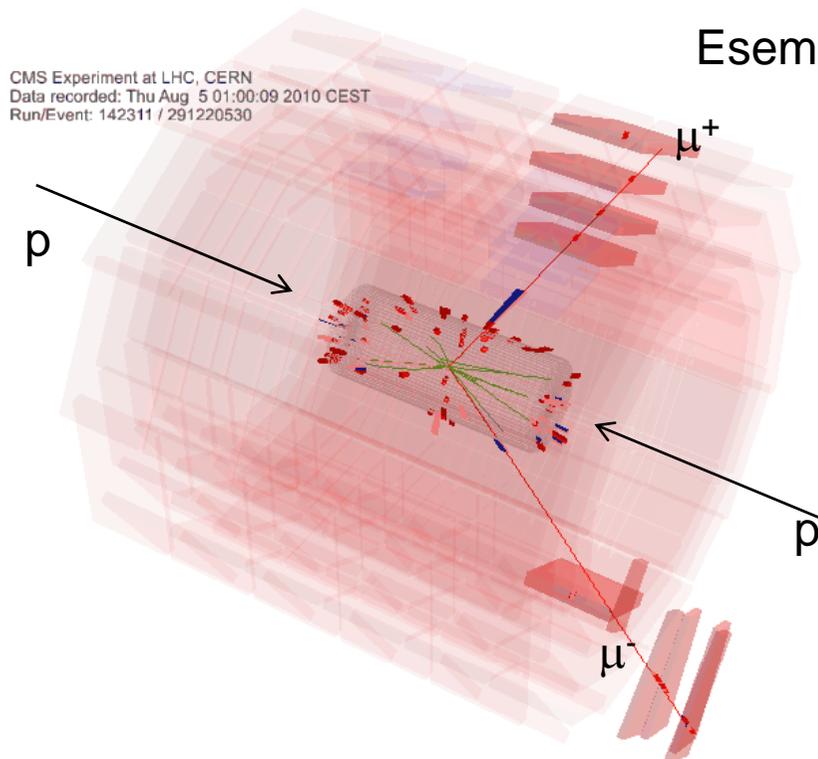


Confermato da centinaia
di misure di precision

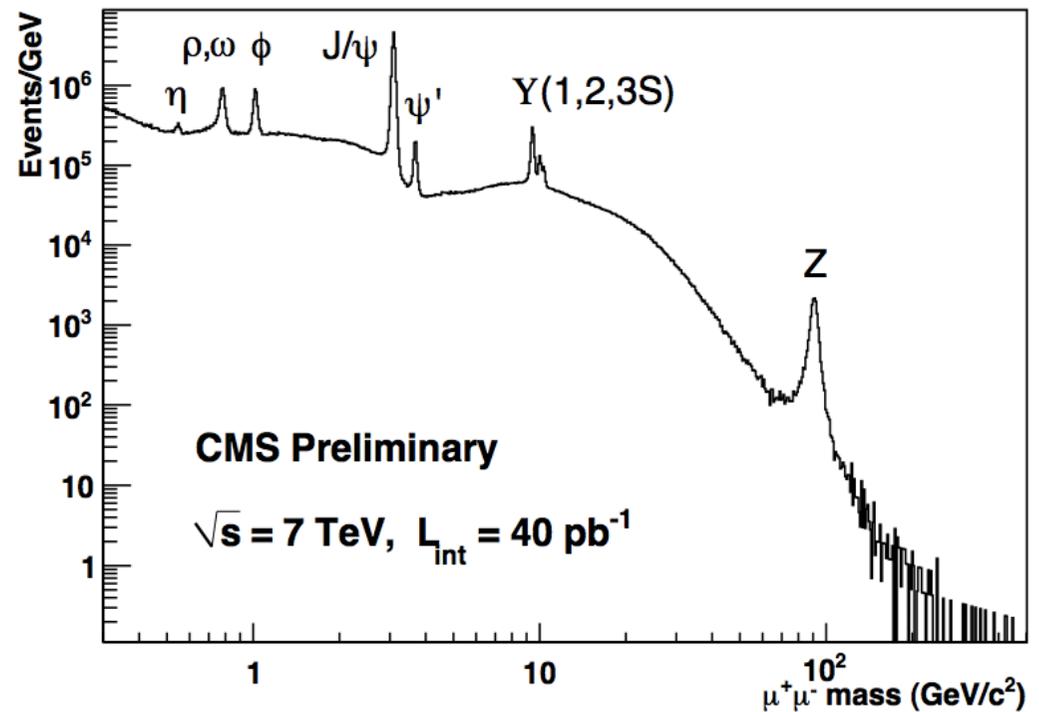
1H/10¹² eventi

Eventi

- Le particelle “interessanti” decadono istantaneamente
 - Dobbiamo cercare i loro prodotti di decadimento
 - Spesso in un fondo (“background”) di eventi simili prodotti per es. da processi già noti



Esempio: risonanze nello spettro $\mu^+\mu^-$ in collisioni pp

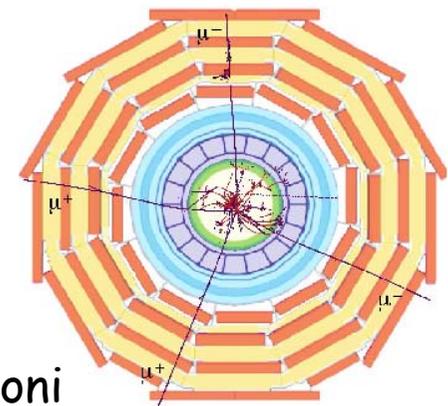
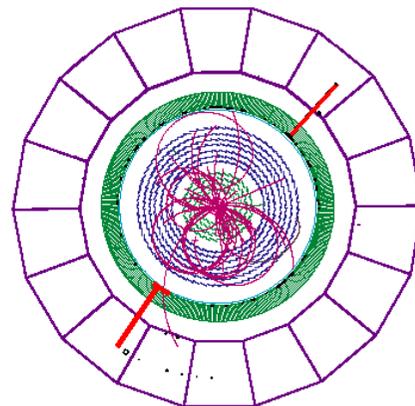


Ricerca dell'Higgs ad LHC

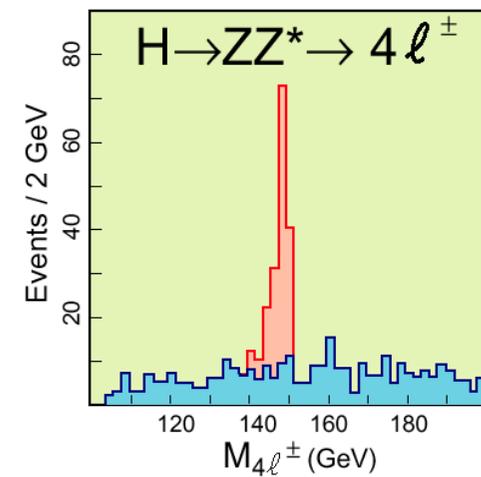
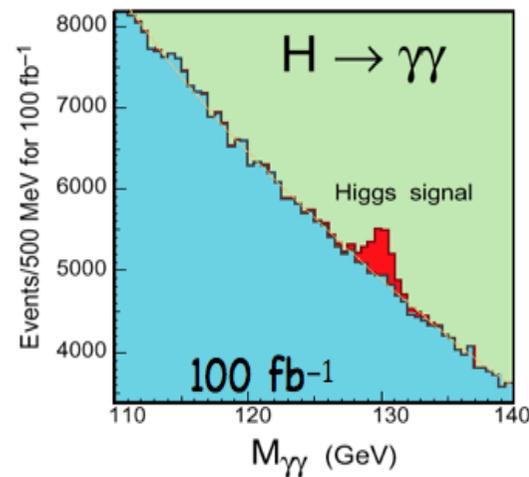
Il bosone di Higgs è altamente instabile ed ha vita brevissima, decadendo appena prodotto in altre particelle, che sono quelle che misuriamo e dalle quali risaliamo all'esistenza ed alla massa del bosone

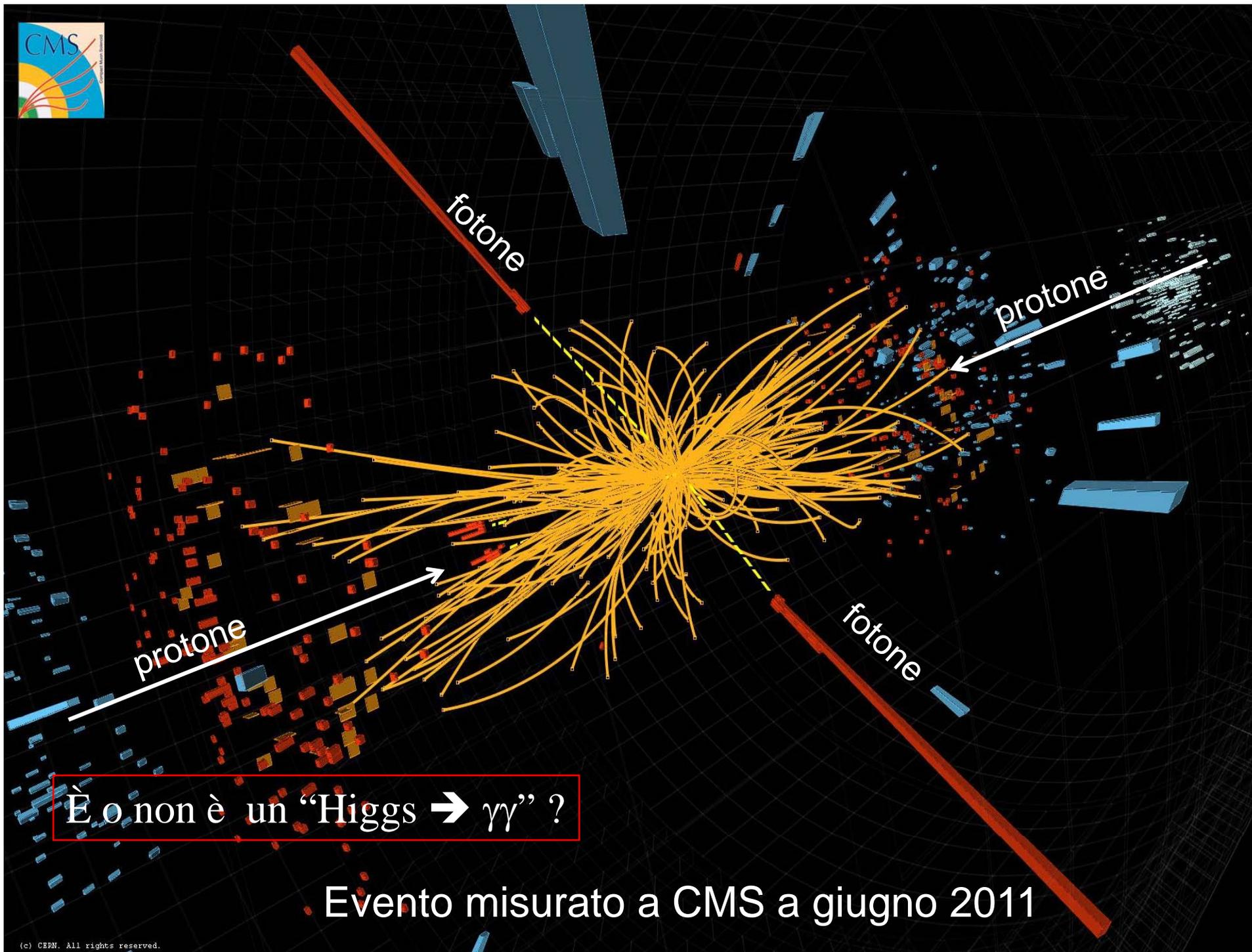
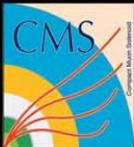
I possibili canali di decadimento sono numerosi

Canali più importanti per $m_H < 140$ GeV, regione favorita da LEP



Simulazioni

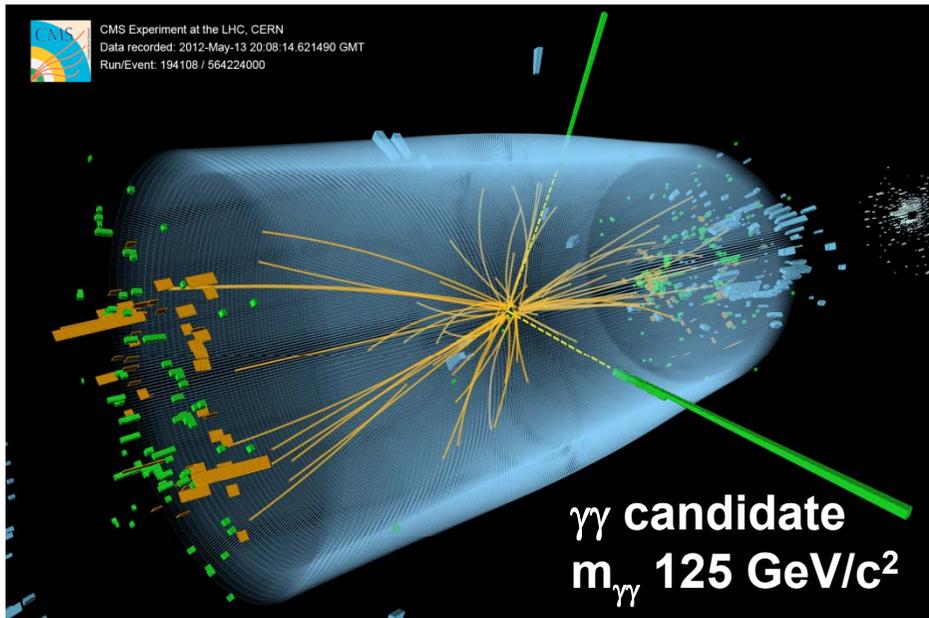




È o non è un “Higgs $\rightarrow \gamma\gamma$ ” ?

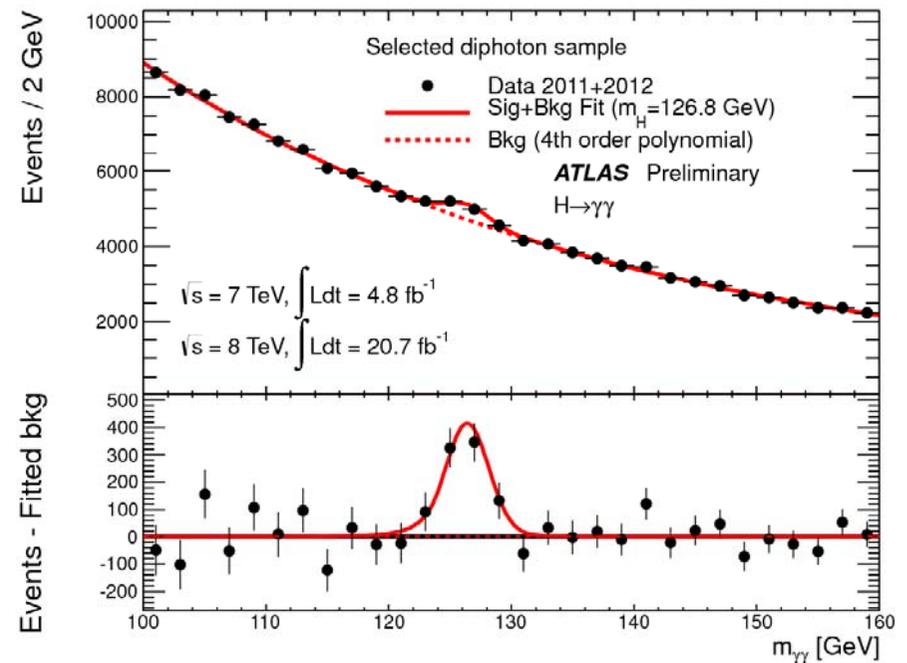
Evento misurato a CMS a giugno 2011

Osservare il Bosone di Higgs: $H \rightarrow \gamma\gamma$

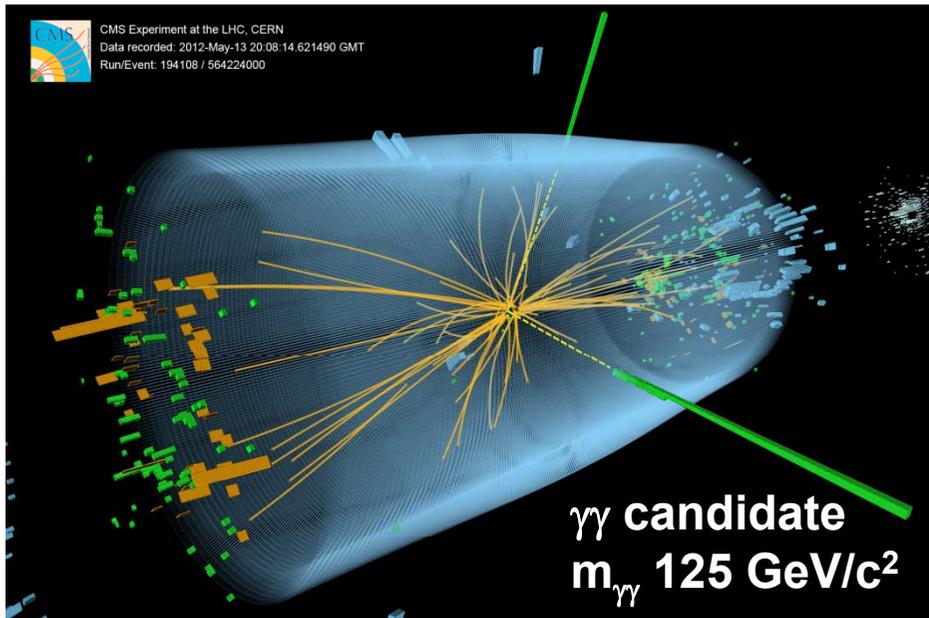


Si studiano eventi con

2 **fotoni**, cercando un **eccesso** nello spettro $m_{\gamma\gamma}$

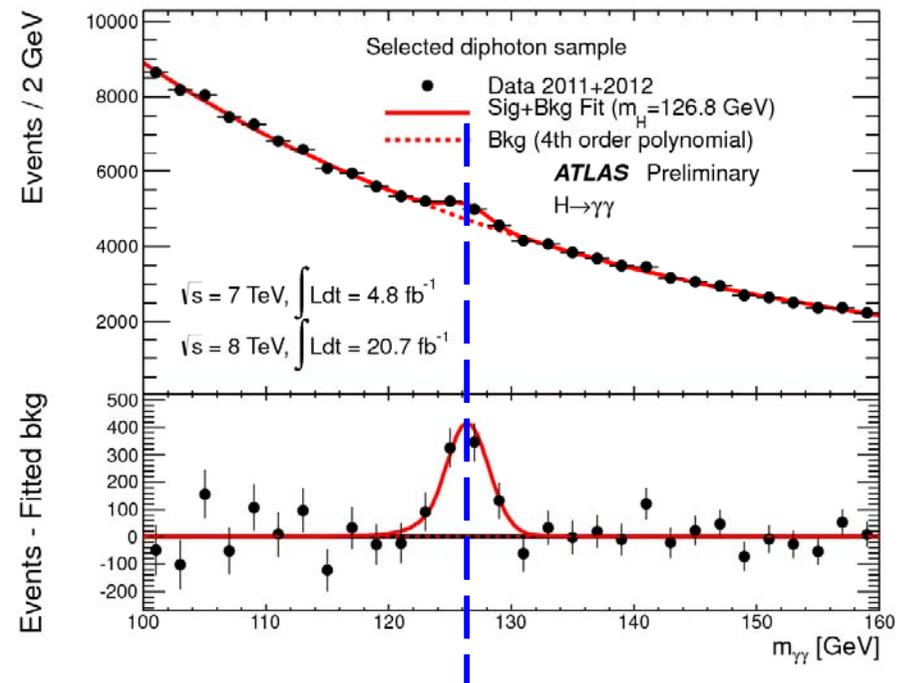


Osservare il Bosone di Higgs: $H \rightarrow \gamma\gamma$

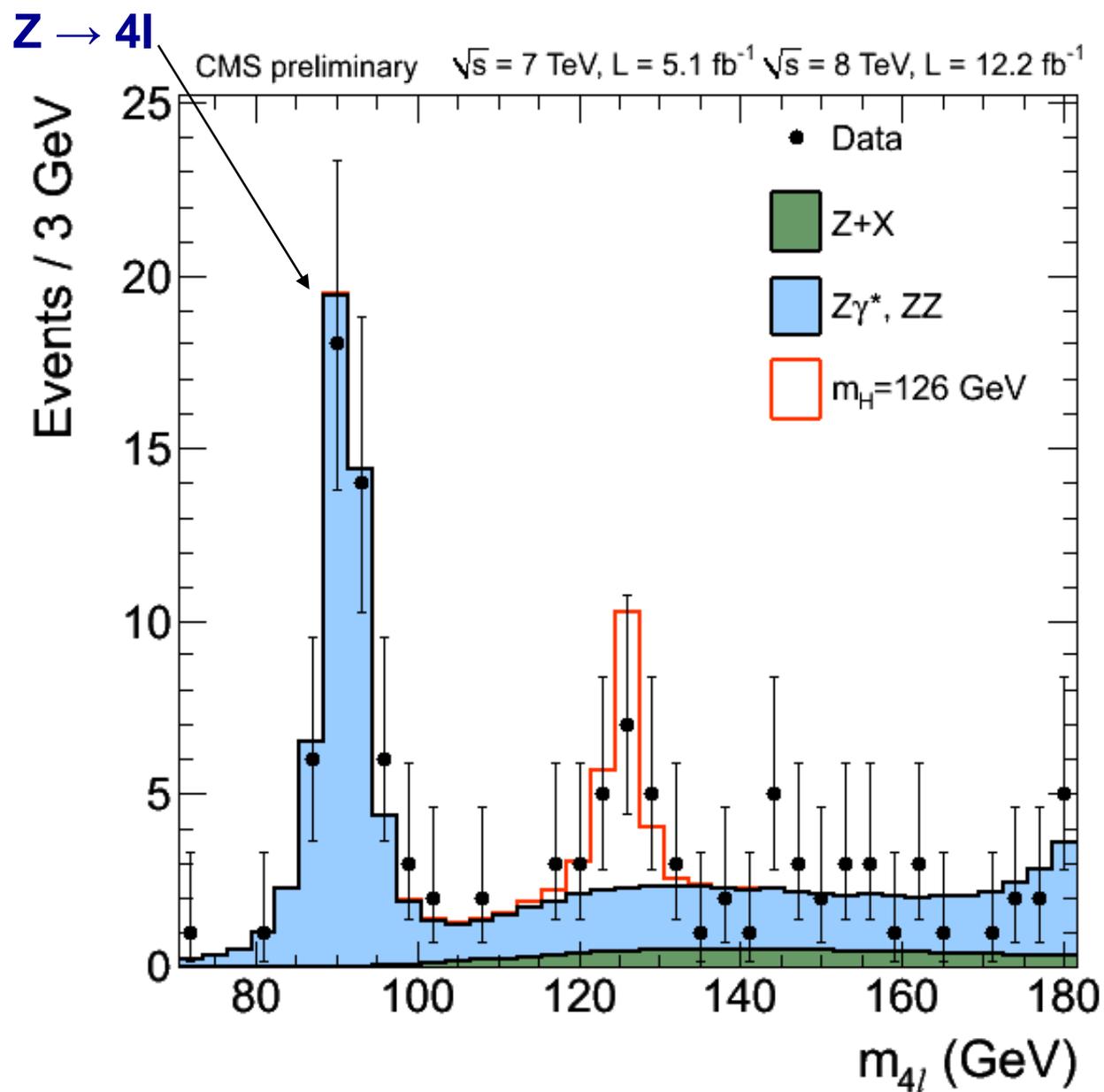


Si studiano eventi con

2 **fotoni**, cercando un **eccesso** nello spettro $m_{\gamma\gamma}$



Canale di decadimento $H \rightarrow 4$ leptoni



4 luglio 2012 al CERN



Eccezionale risonanza mediatica...

The New York Times
Wednesday, July 4, 2012 Last Update: 4:00 AM ET
DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR



New Particle Could Be Physics' Holy Grail
By DENNIS OVERBYE 4 minutes ago
If confirmed to be the elusive Higgs boson, a newly discovered particle named for the physicist Peter Higgs, above in Geneva, could explain the universe's origin.

Le Monde.fr
Mise à jour à 19:02 - Paris
INTERNATIONAL POLITIQUE SOCIÉTÉ ÉCONOMIE CULTURE

EN CIUDADES EUROPEAS EN CIUDADES ESPAÑOLAS

Le boson de Higgs découvert avec 99,9% de certitude

Voilà la confirmation tant attendue : une nouvelle particule a été découverte au Centre de recherche nucléaire (CERN), près de Genève.

Boson de Higgs : la fin de la traque

Le boson de Higgs : les raisons d'une

EL PAÍS
Mise à jour à 19:02 - Paris
INTERNACIONAL POLÍTICA ECONOMÍA CULTURA

Hallada "la más sólida evidencia de la existencia del bosón de Higgs"

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia

"Puedo confirmar que se ha descubierto consistentemente con la teoría del bosón de Higgs. El descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia. Los físicos del CERN celebran sus hallazgos"

- Dificultades para entender en qué consiste la "casa" del bosón de Higgs, por qué se llama así
- Vídeo: Una explicación del bosón de Higgs
- Sigue en directo la conferencia de prensa
- FOTOGALERÍA: Indicios hallados en el experimento
- "Hacia la partícula de Dios", por Peter Higgs

The Independent
www.independent.co.uk
SINCE 1801 NUMBER 1100 THE

HOMOPHOBIA, HIP-HOP AND THE STAR WHO CAME OUT
Trending, pages 26-27

THE L'OREAL FILES: COULD SARKOZY GO DOWN?
News, page 35

MURRAY ONE MAN FROM THE FINAL
Sport, pages 70-

EUREKA!

It has taken nearly 50 years and cost £2.6bn. Now, at last, the Higgs boson particle has been found – and a new chapter in our understanding of the universe can begin

vk.nl
de site van
NIEUWS OPINIE CULTUUR SPORT ECONOMIE REIZEN
BINNENLAND POLITIEK BUITENLAND INTERNET & MEDIA WETENSCHAP & GEZONDHEID OPMERKEL

Higgs of niet, het is een spectaculaire ontdekking
Door: Pieter Sabel - 04/07/12, 11:29

VERWANT NIEUWS

- 'Traan van geluk, Higgs' - 04/07/12
- Higgs-deeltje 'zeer nauw gevonden' - 04/07/13
- 'Maatschappij heeft nu' - 04/07/12

MEER OVER

- Natuurkunde Wetenschap
- Deeltjesfysica wacht op

© EPA. Foto uit 2007 van de supergeleide magneten van de deeltjesversneller van CERN in

the guardian
News Sport Comment Culture Business Money London 2012 Life & style Travel Environment Video
Weather | Lon

News UK World Development US Politics Media Education Society Science Tech Law Data TV R

Breaking news: Weather not limitations end Mount McKinley climb - AP

Diamond set to come out of hiding as he faces MPs
Chief executive to reveal role of City watchdogs and Whitehall in Libor rate-fixing scandal

Key questions for MPs to ponder: rate exchanges that led to Diamond's demise and Miliband clash over inquiry (you likely to balk at vast severance deal) you interpret this as guidance to lower rate? Bank Libor rate submissions 2005-08 or tweets her support; 'Osborne #HMD' coverage of the Libor rate-fixing scandal

The definite particle? Higgs boson discovered? Live coverage

Non senza un po' di confusione...



Abbott to soften IR policy on unfair dismissal exemptions

ward bungles on alleged "collid
Higgs boson to wreck jobs and economy, says report

The taxpayer funded rort behind "new particle"



Si puo' affermare che:

- **ATLAS e CMS hanno osservato INDIPENDENTEMENTE un eccesso a massa~126 GeV**
- **La probabilita' che sia un effetto di fluttuazione del fondo e' $\leq 3 \times 10^{-7}$ (or $\geq 5 \sigma$) \rightarrow e' una SCOPERTA**
- **La nuova particella e' un bosone \rightarrow decade in 2 fotoni**
- **Dalle misure fatte finora ha le proprieta' del bosone di Higgs**



E dopo ?

- ★ Le attuali osservazioni sperimentali certificano la **correttezza della teoria di Higgs** e completano la **verifica del Modello Standard**
- ★ Le **proprietà** della particella di Higgs saranno **ulteriormente indagate**
- ★ Queste proprietà ci daranno informazioni su **ampliamenti del Modello Standard?**