



Come scoprire il bosone di Higgs e altri racconti: l'esperimento CMS a LHC

Alice Magnani & Ilaria Vai

I seminari del Martedì - 24/05/2016

In uno dei laboratori di ricerca più grandi al mondo...



...è ospitato l'acceleratore di particelle più grande al mondo: il Large Hadron Collider LHC

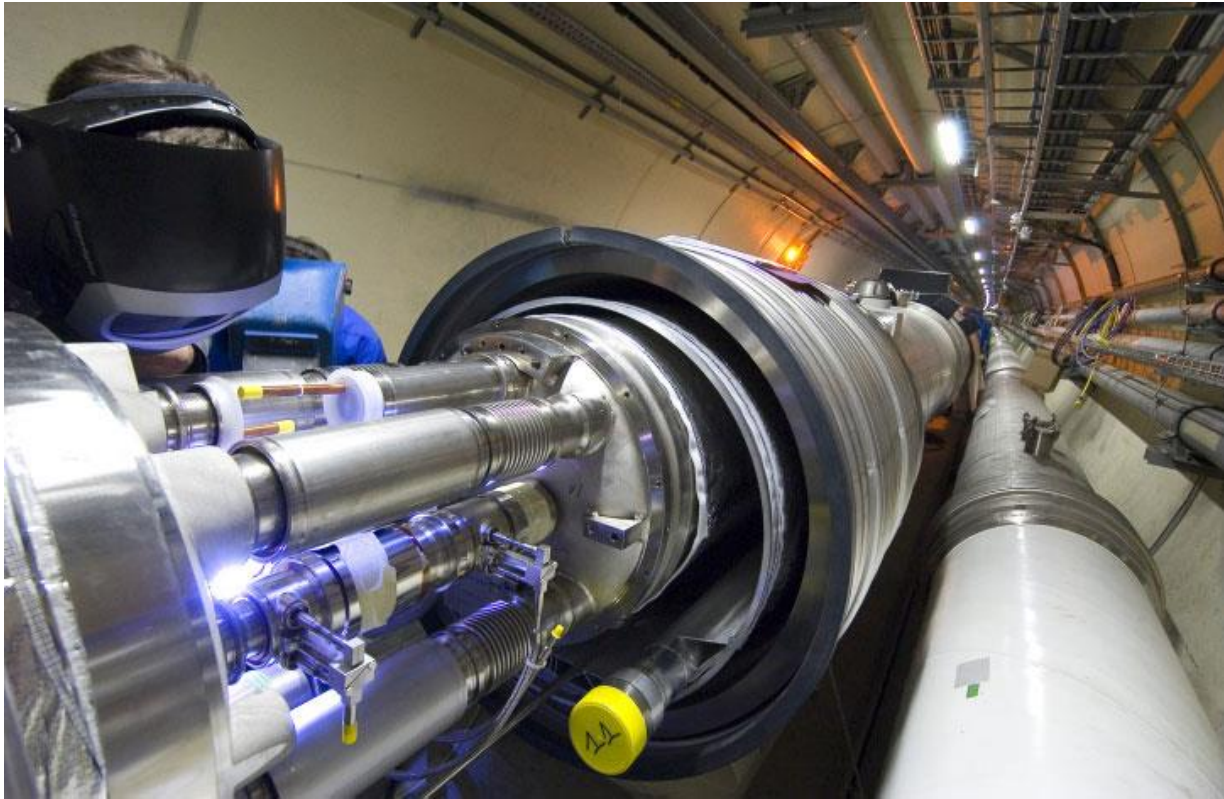
Accelera 2 fasci di protoni ognuno ad un'energia di 7 TeV = 7 Tera eV = 7 000 000 000 000 eV (1 eV = energia acquisita da un elettrone accelerato da una differenza di potenziale di 1 V)



I protoni raggiungono
quasi la velocità della
luce: circa **c - 10 km/h**
($c = 299782 \text{ km/s}$
 $= 1\,080\,000\,000 \text{ km/h}$)

I protoni hanno altissima
densità di energia:
 $4,6 \cdot 10^{53} \text{ TeV/m}^3$
($7,4 \cdot 10^{46} \text{ J/m}^3$)

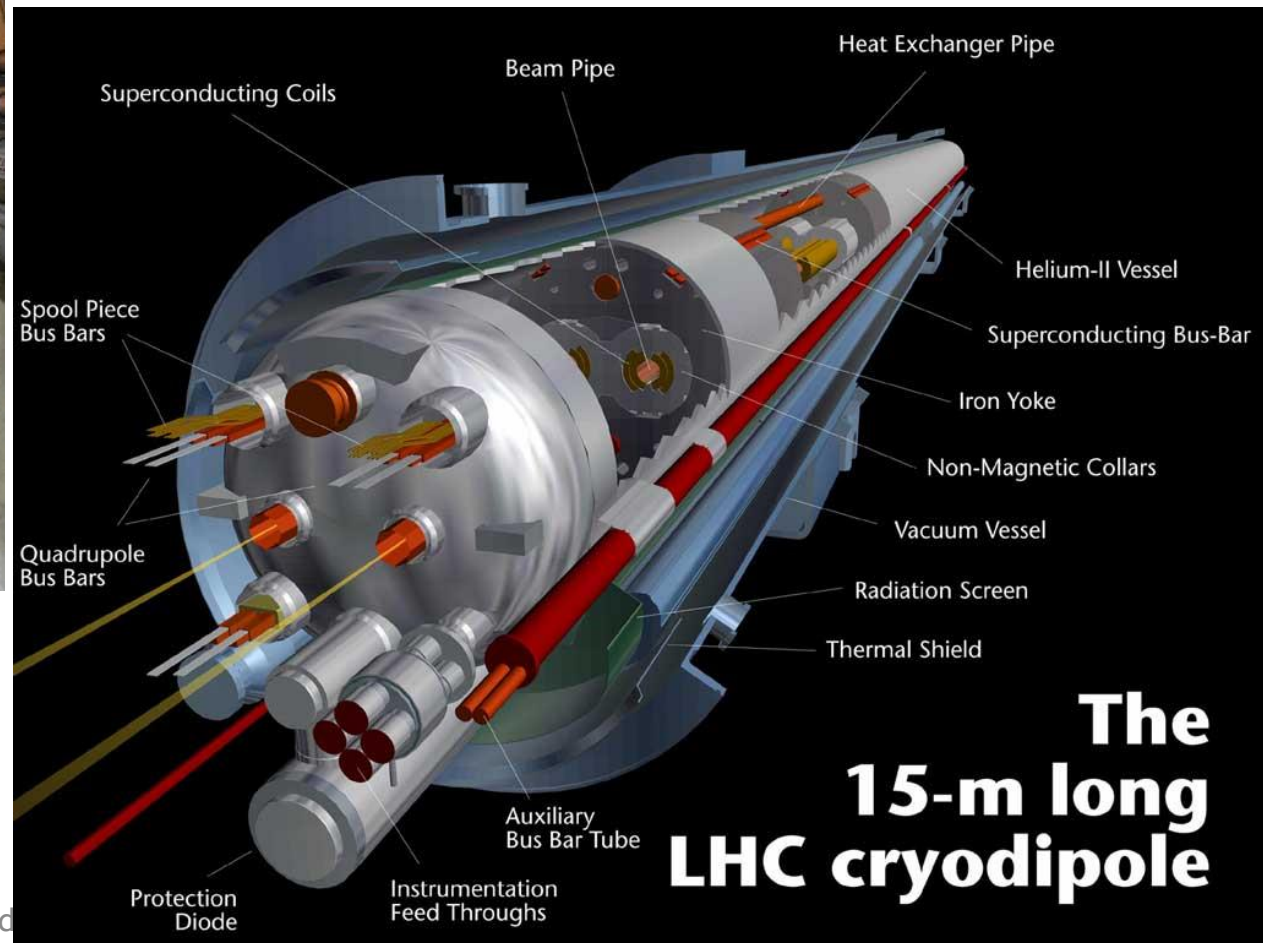
E' lo spazio più vuoto del sistema solare...



La *beam pipe* viene portata ad un vuoto pari a quello dello spazio interplanetario
La pressione è 1/10 di quella sulla superficie lunare

24/05/2016

I seminari d



...e una delle regioni più fredde dell'universo



I magneti superconduttori e l'elio liquido sono mantenuti a 1.9 K (-271.3 C)...

...un pochino più freddo dello spazio interstellare.

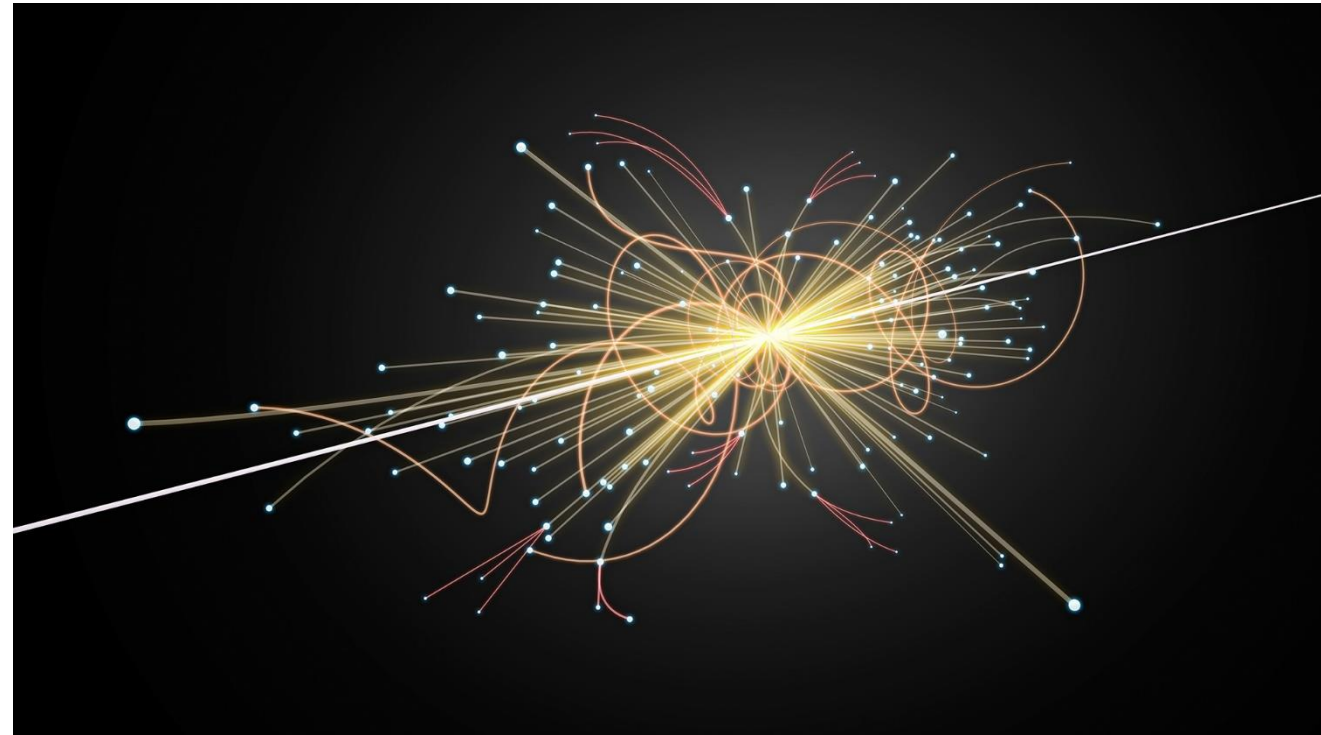
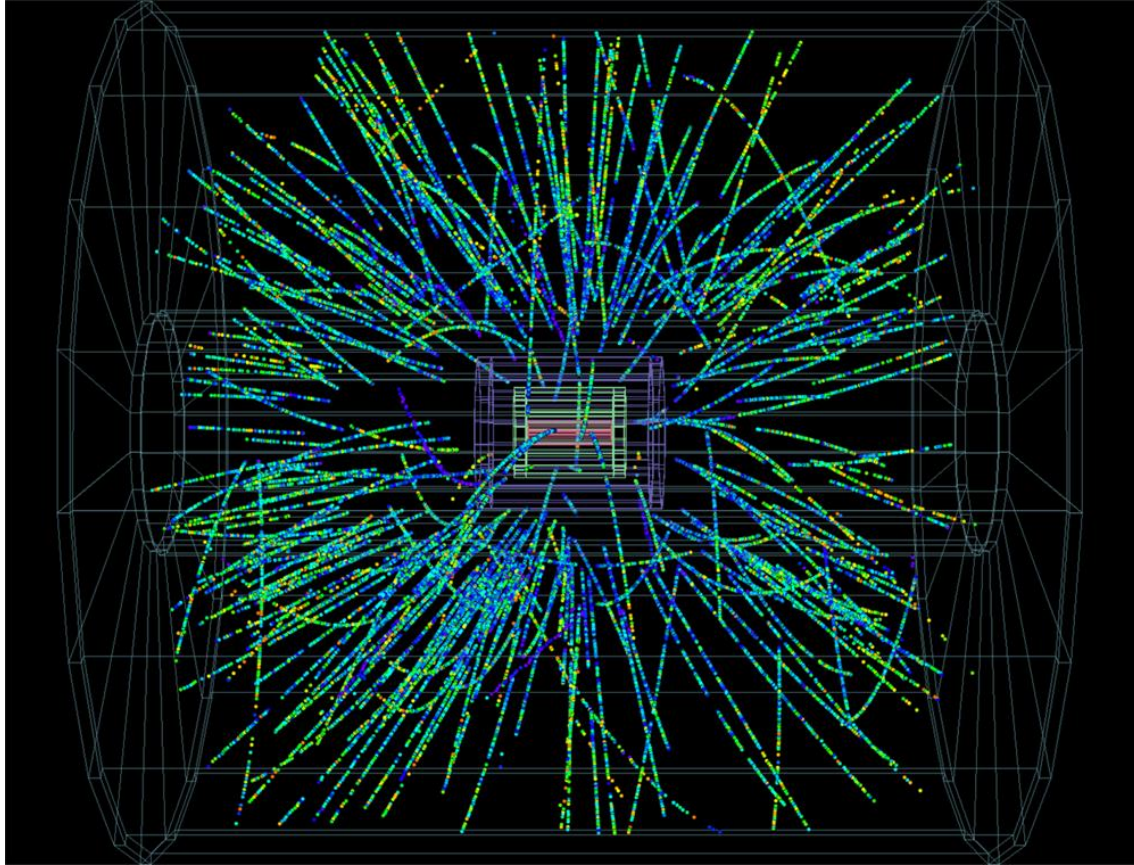


<http://cerncourier.com/cws/article/cern/29074>

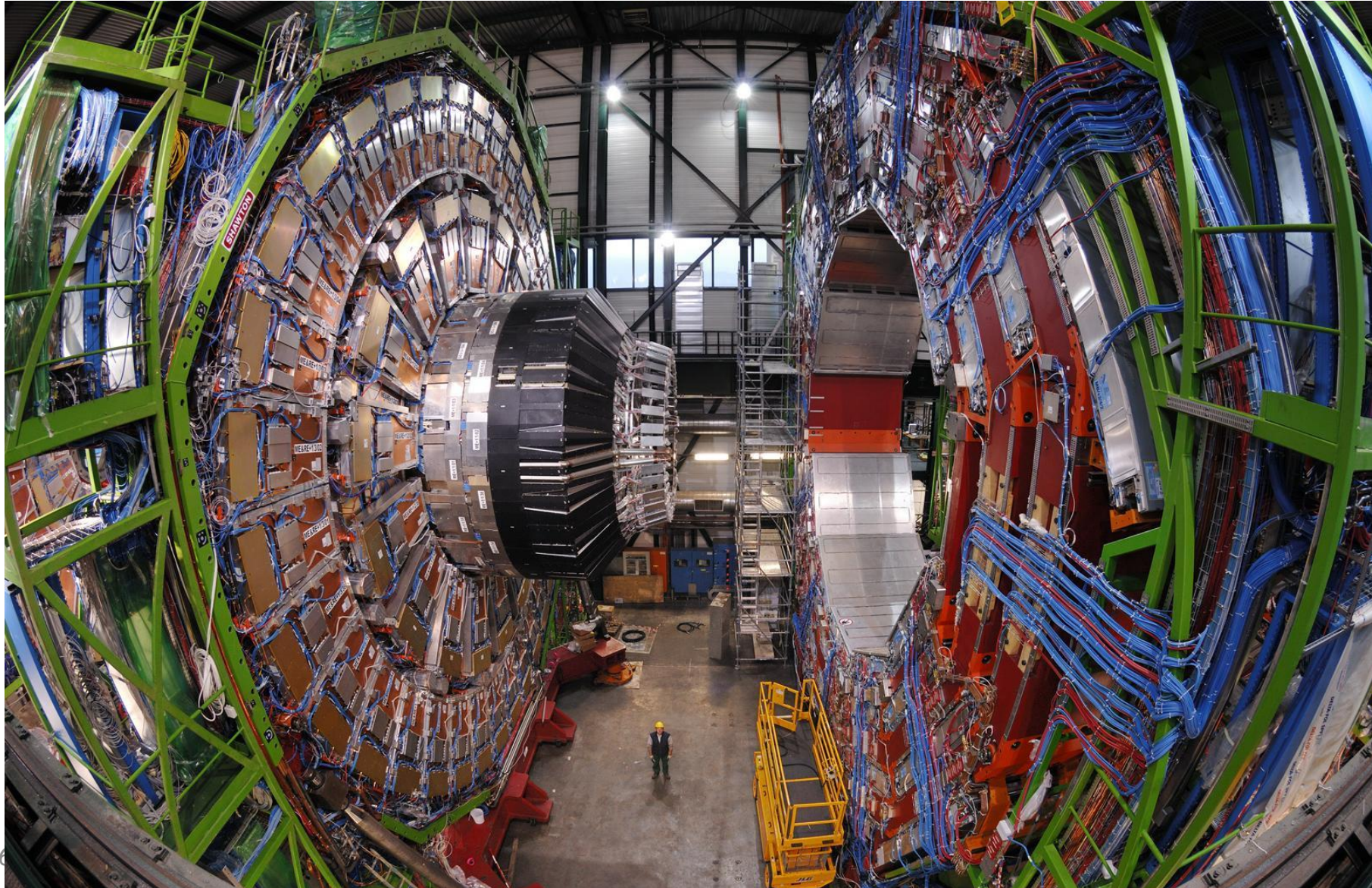
24/05/2016

I seminari del Martedì

Qui accadono alcune delle reazioni più energetiche della nostra galassia...



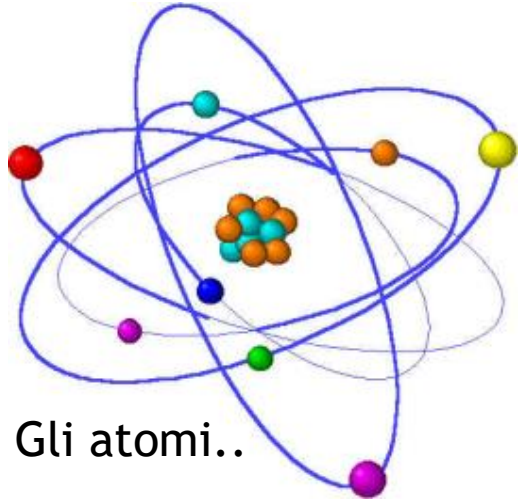
...che vengono osservate da alcuni dei più complessi “occhi”
mai costruiti



Ma perché ci
interessa tutto
questo?



Di cosa siamo fatti?

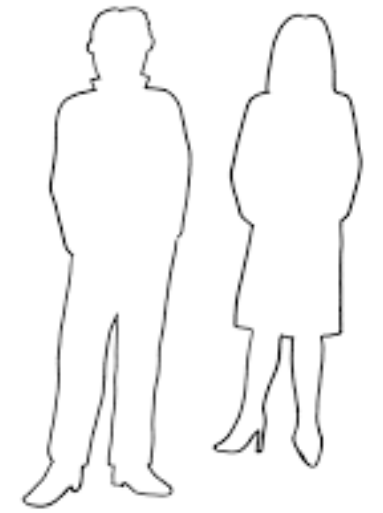


Gli atomi..

...formano il DNA...

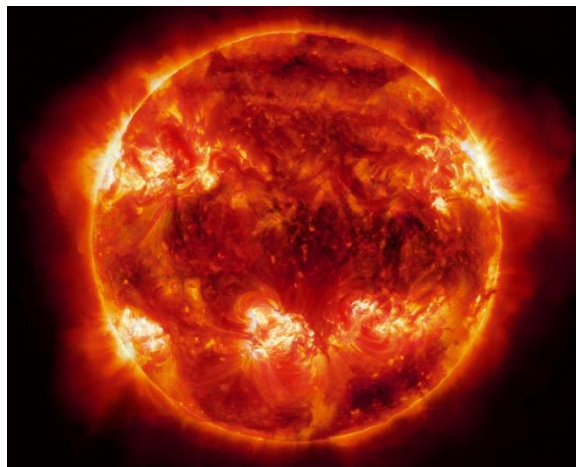


...che è la base della vita.



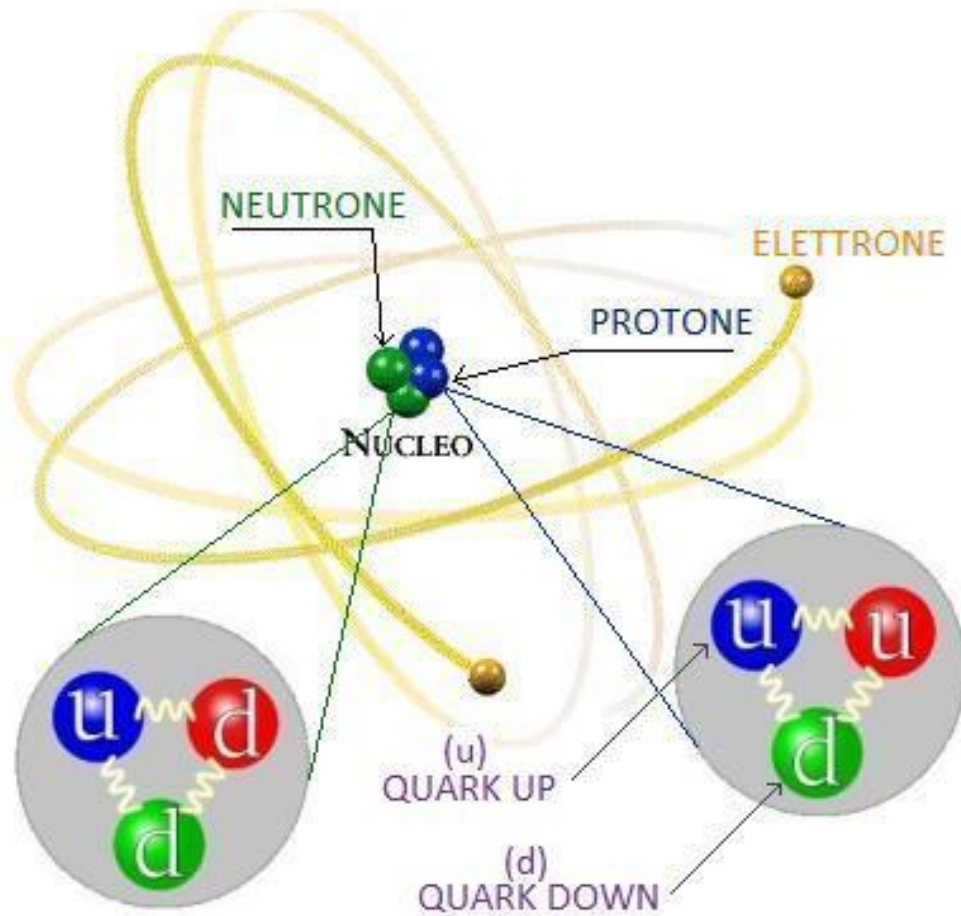
...formano i pianeti...

...le stelle...



...le galassie.

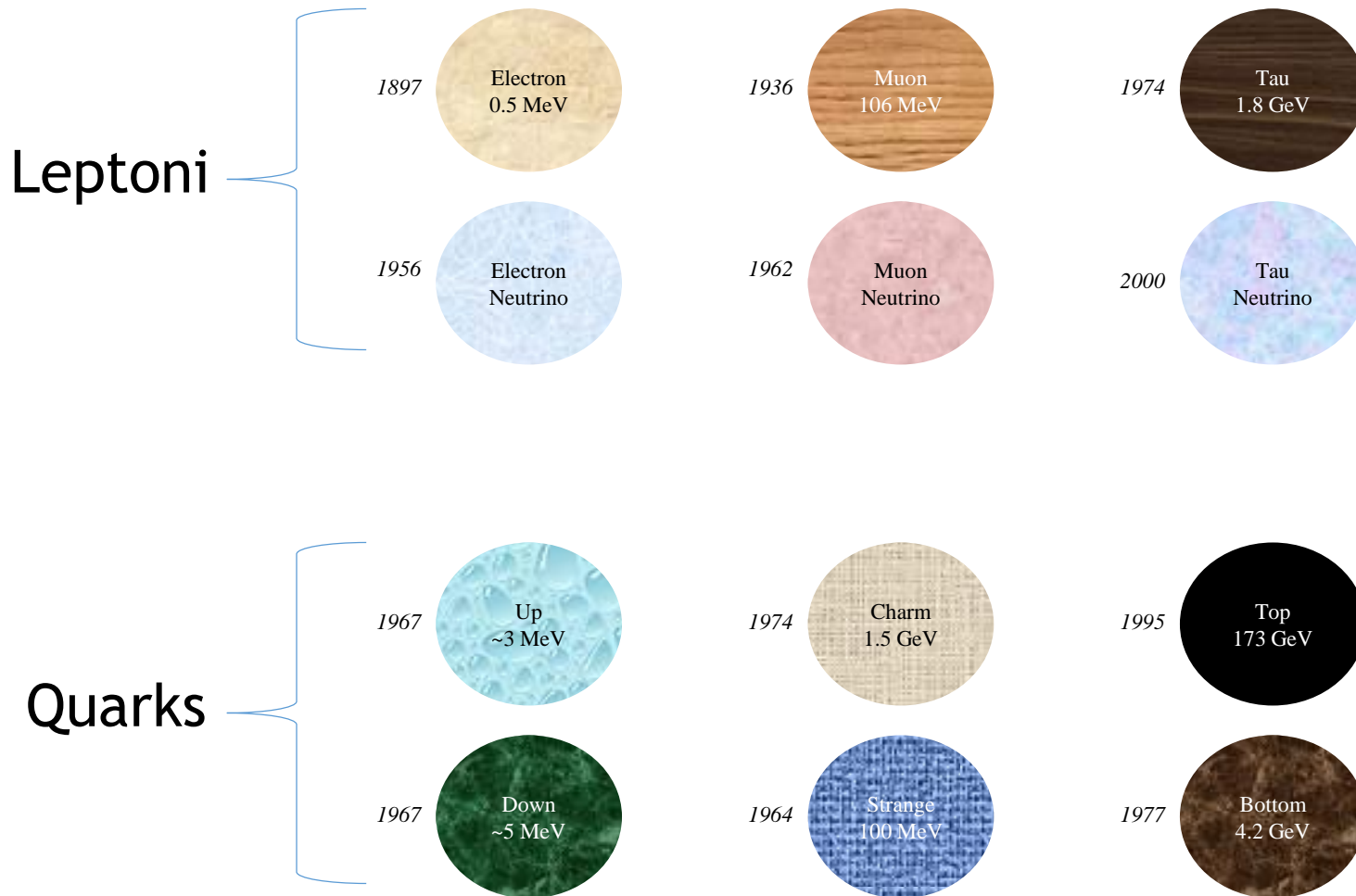
Ma anche l'atomo ha una struttura...



Ci sono gli *elettroni*, che ruotano intorno al nucleo.

Il nucleo è formato da *protoni* e *neutroni*, a loro volta composti da *quark*.

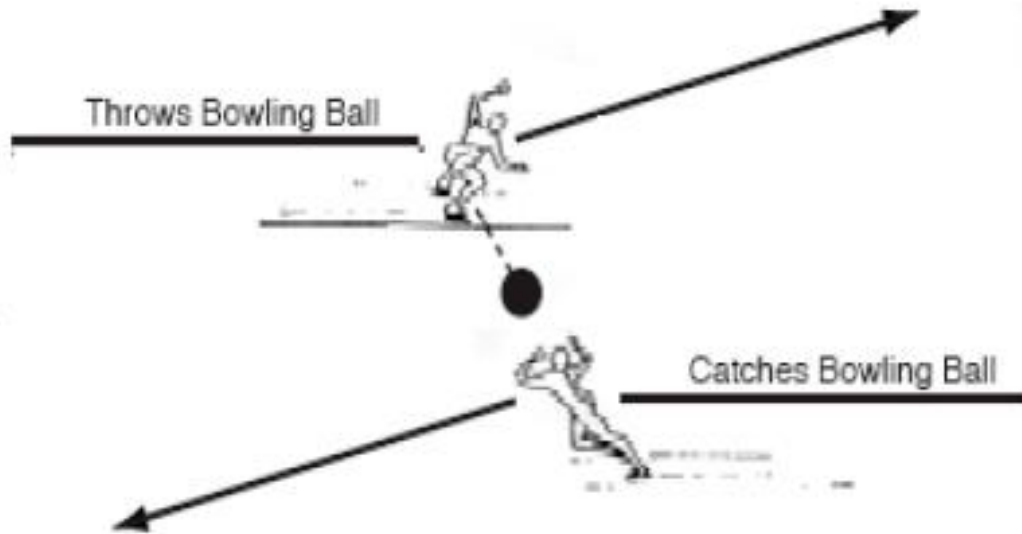
Le particelle elementari



Il principio di equivalenza massa-energia ci permette di esprimere la massa in termini di energia: la massa delle particelle elementari è espressa in eV, MeV, GeV...

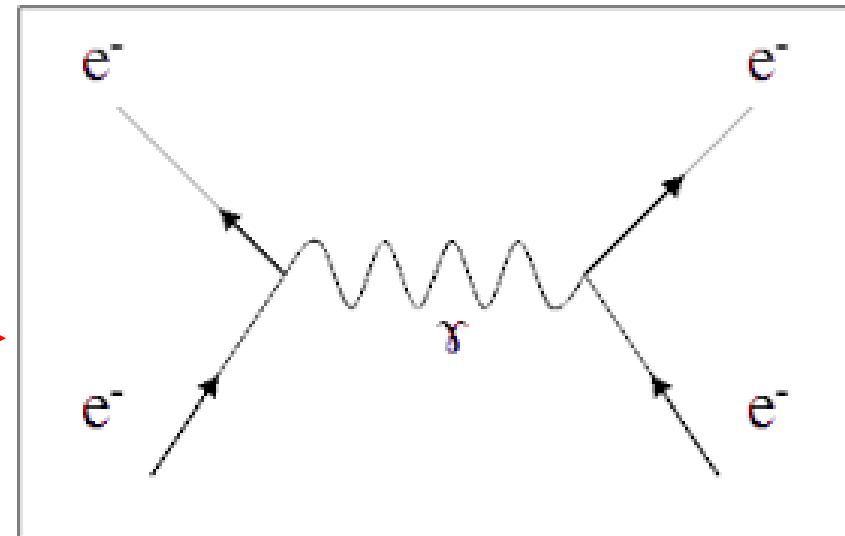
Es. Massa del protone = $1.67 \times 10^{-27} \text{ kg} = 938 \text{ MeV}/c^2 \approx 1 \text{ GeV}$

Che cosa tiene tutto insieme? Le forze come interazioni tra particelle elementari



Tutte le interazioni avvengono tramite un *mediatore*.

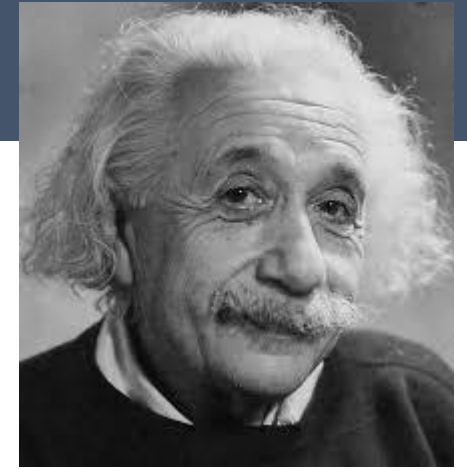
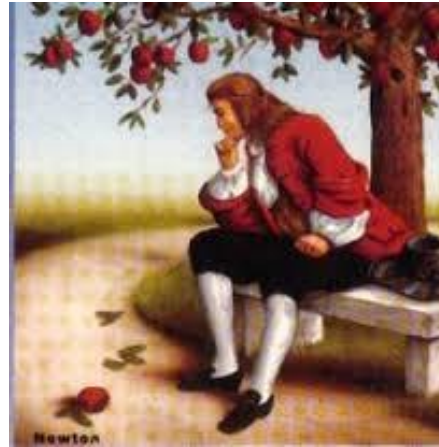
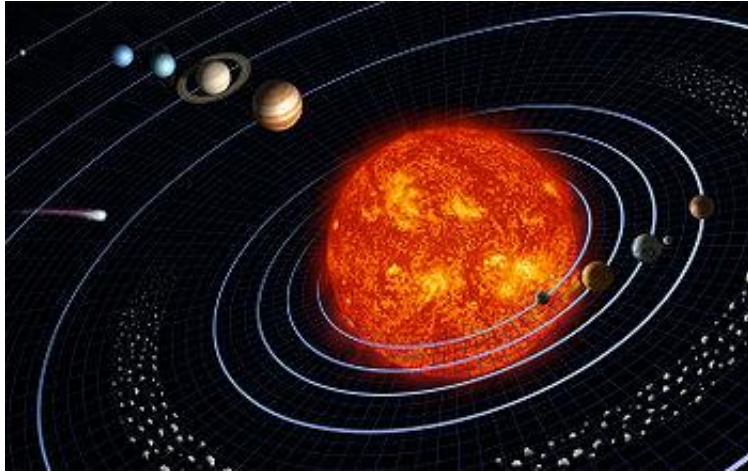
Diagramma di Feynman



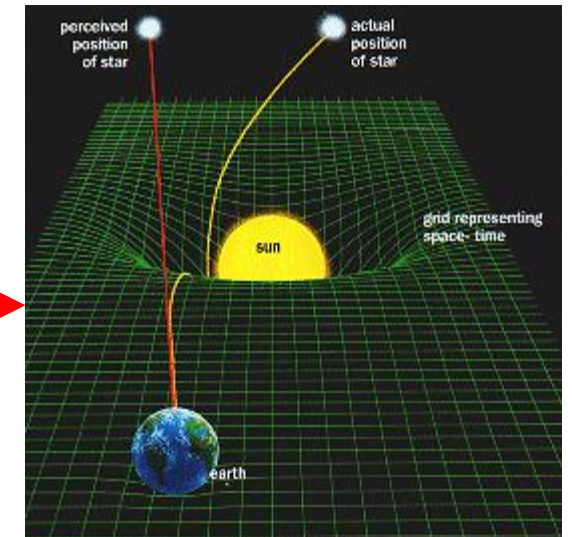
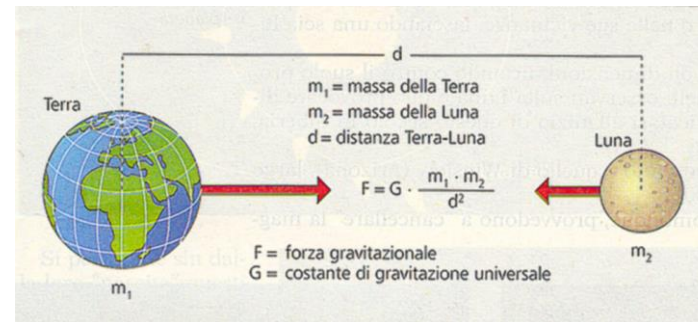
Le quattro interazioni fondamentali

	Gravity	Weak	Electromagnetic	Strong
Carried By	Graviton <small>(not yet observed)</small>	W^+ W^- Z^0	Photon	Gluon
Acts on	All	Quarks and Leptons	Quarks and Charged Leptons and W^+ W^-	Quarks and Gluons

L'interazione gravitazionale



Il moto dei pianeti e la caduta dei gravi vengono spiegati...



...prima, dalla legge della Gravitazione Universale

...poi dalla teoria della Relatività Generale

L'interazione elettromagnetica

La conosciamo grazie a tanti fenomeni, ad esempio:



L'elettricità



La luce

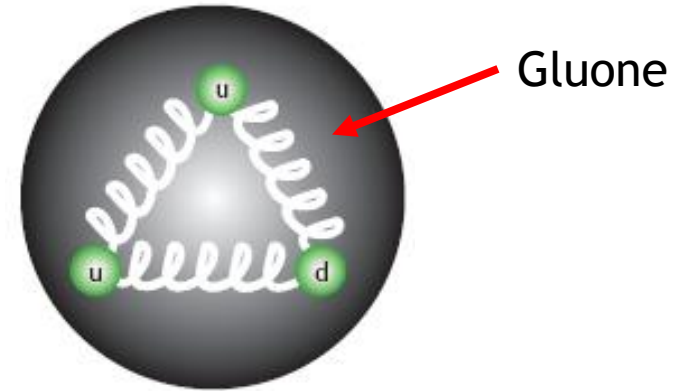
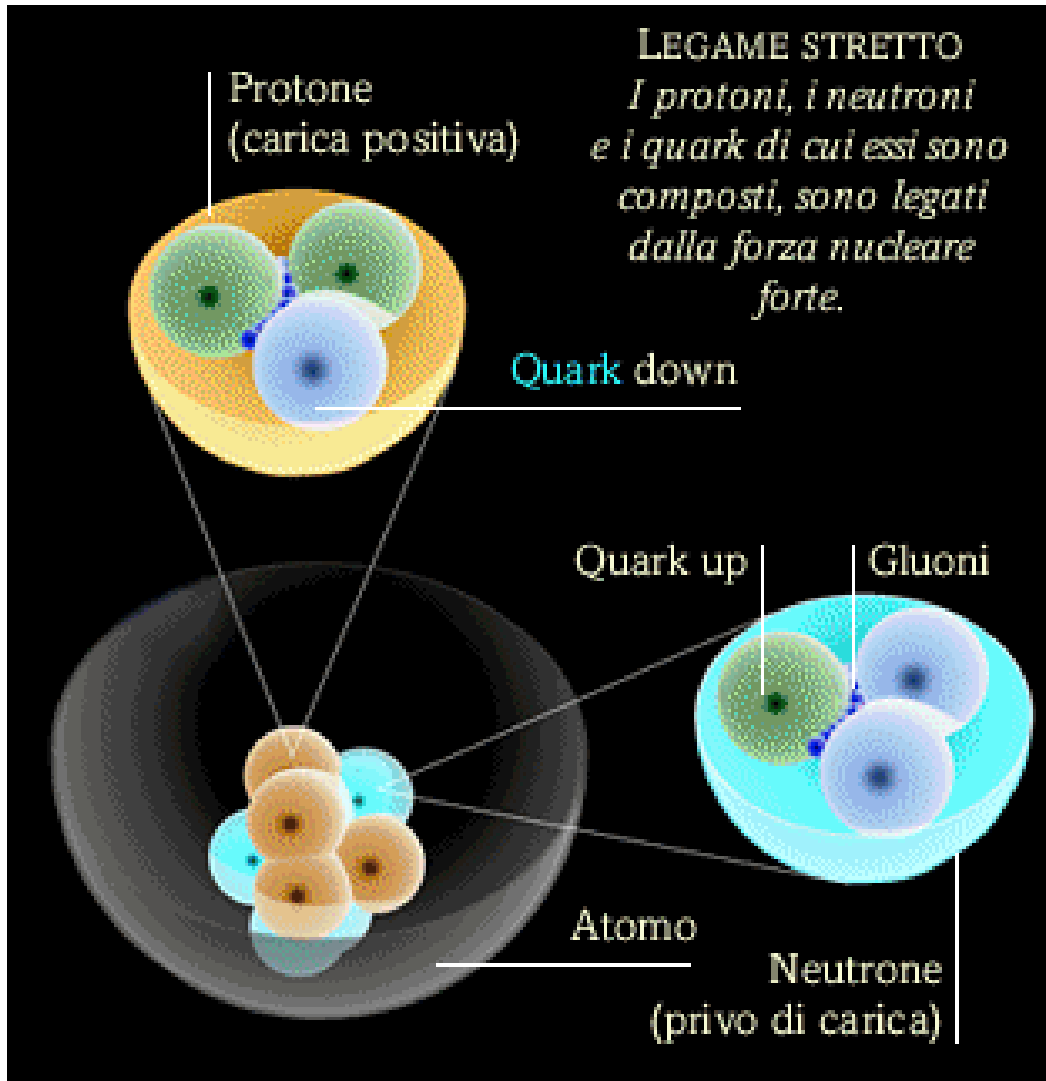


Il magnetismo

Tutte le particelle cariche risentono dell'interazione elettromagnetica.

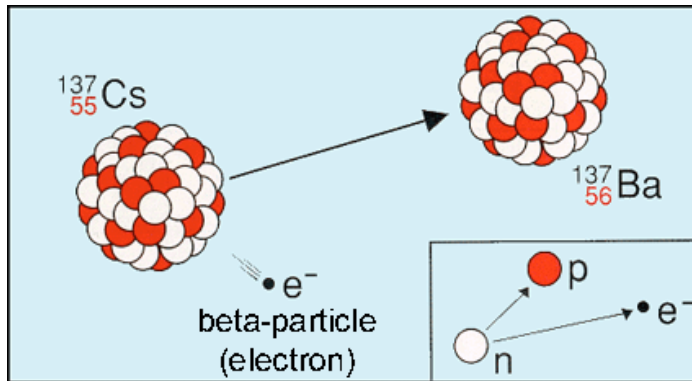
Il mediatore di questa forza è il *fotone*, una particella neutra e con massa nulla.

L'interazione forte



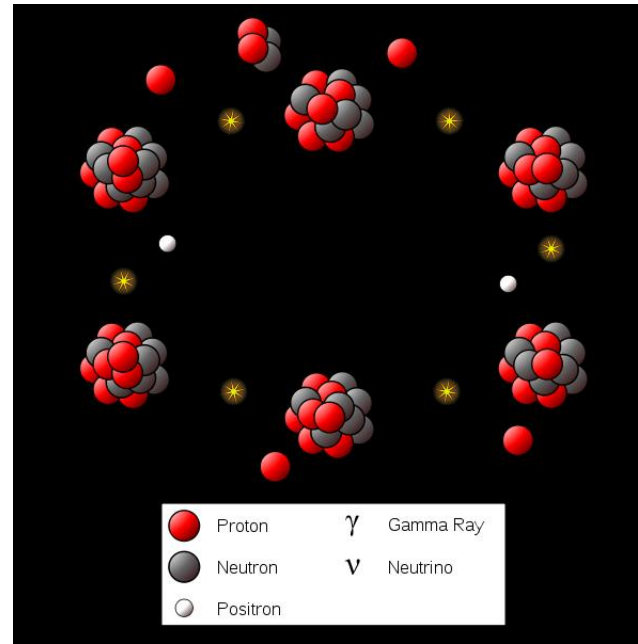
- Tiene uniti quark all'interno dei nucleoni e i nucleoni all'interno dei nuclei.
- Quark e gluoni risentono di questa forza
- Il mediatore della forza è il *gluone*
- Agisce a corto range

L'interazione debole

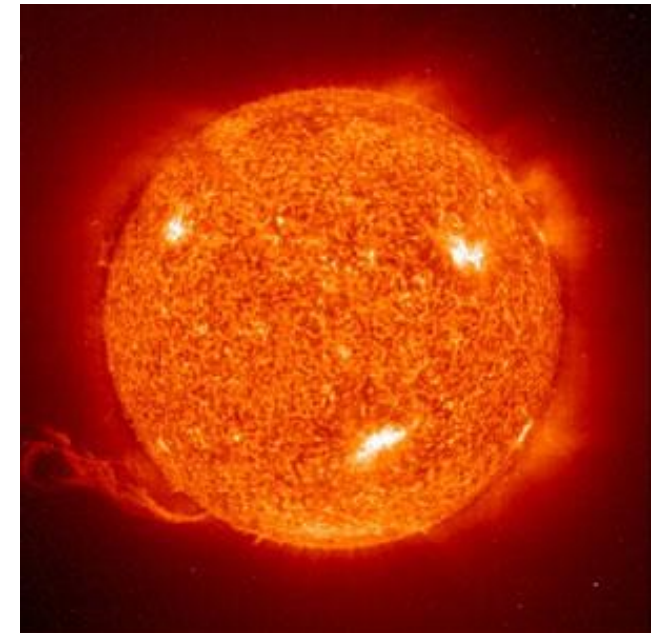


E' responsabile del decadimento beta...

- Tutte le particelle della materia ne risentono
- E' mediata dai bosoni W e Z
- E' a corto range

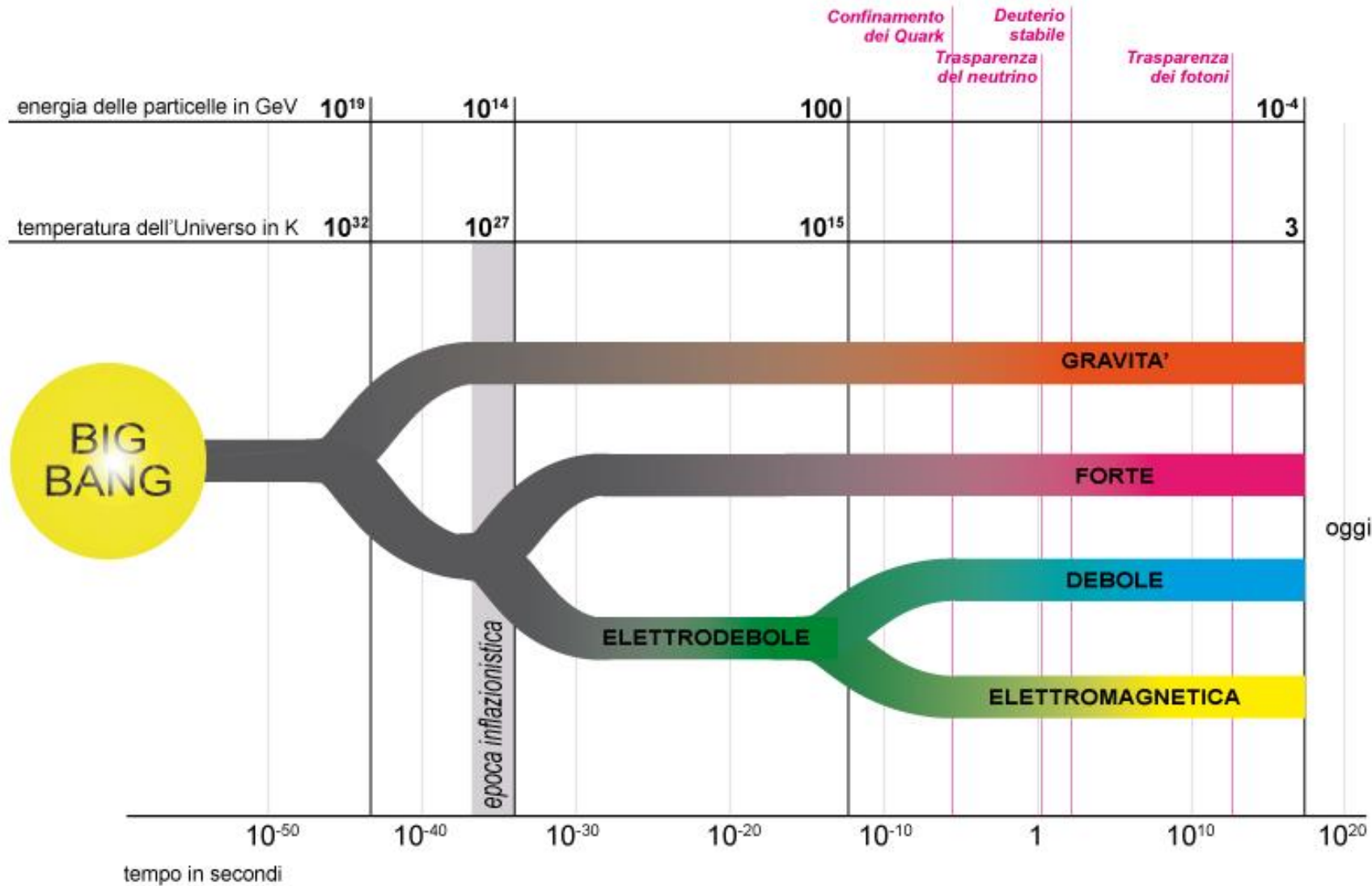


...provoca i cicli nucleari..



... che alimentano il sole e le altre stelle.

L'unificazione delle forze



Con LHC stiamo andando indietro nel tempo...

Il Modello Standard



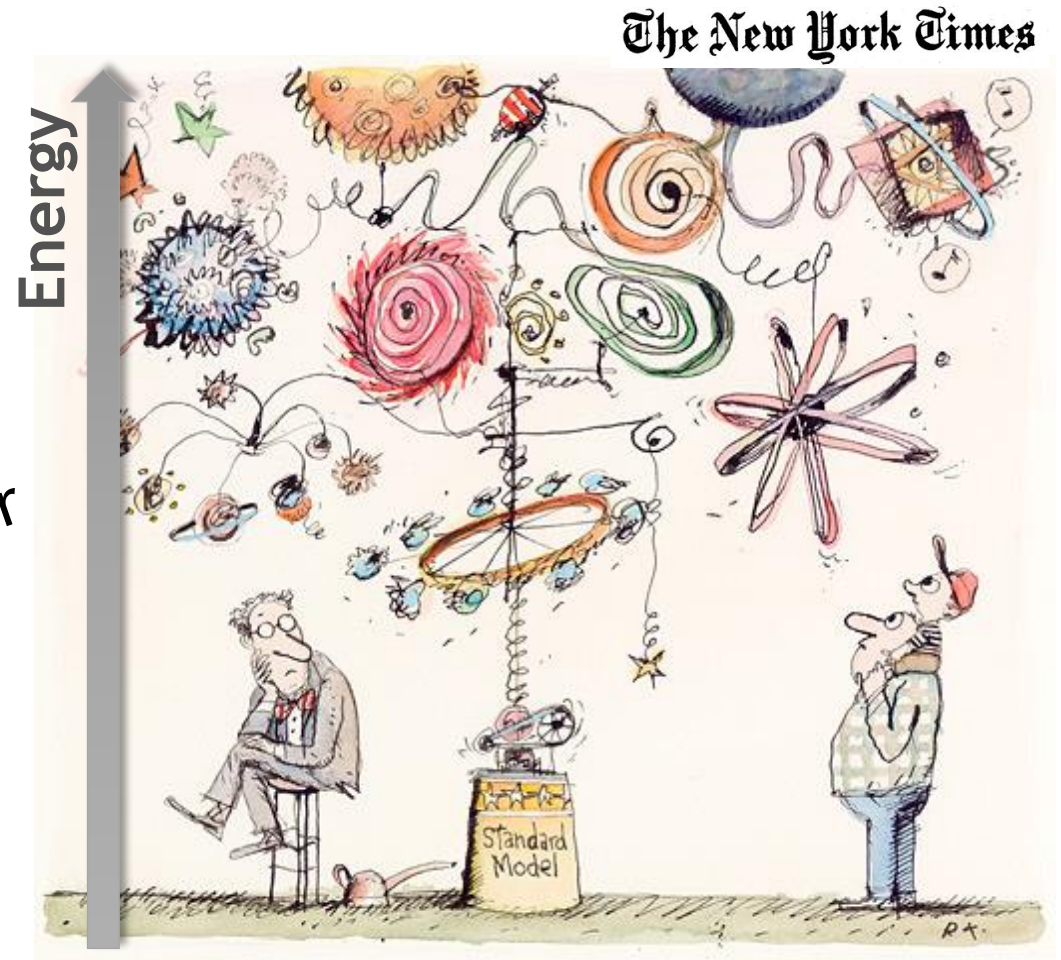
Estensioni del Modello Standard

Il Modello Standard è in grado di spiegare tutti i dati raccolti ai colliders

Comunque, abbiamo molti indizi che ci suggeriscono che sia solo una teoria approssimata, ad esempio...

No candidati dark matter

Nessuna spiegazione per l'asimmetria particelle-antiparticelle



Ma ritorniamo a LHC...

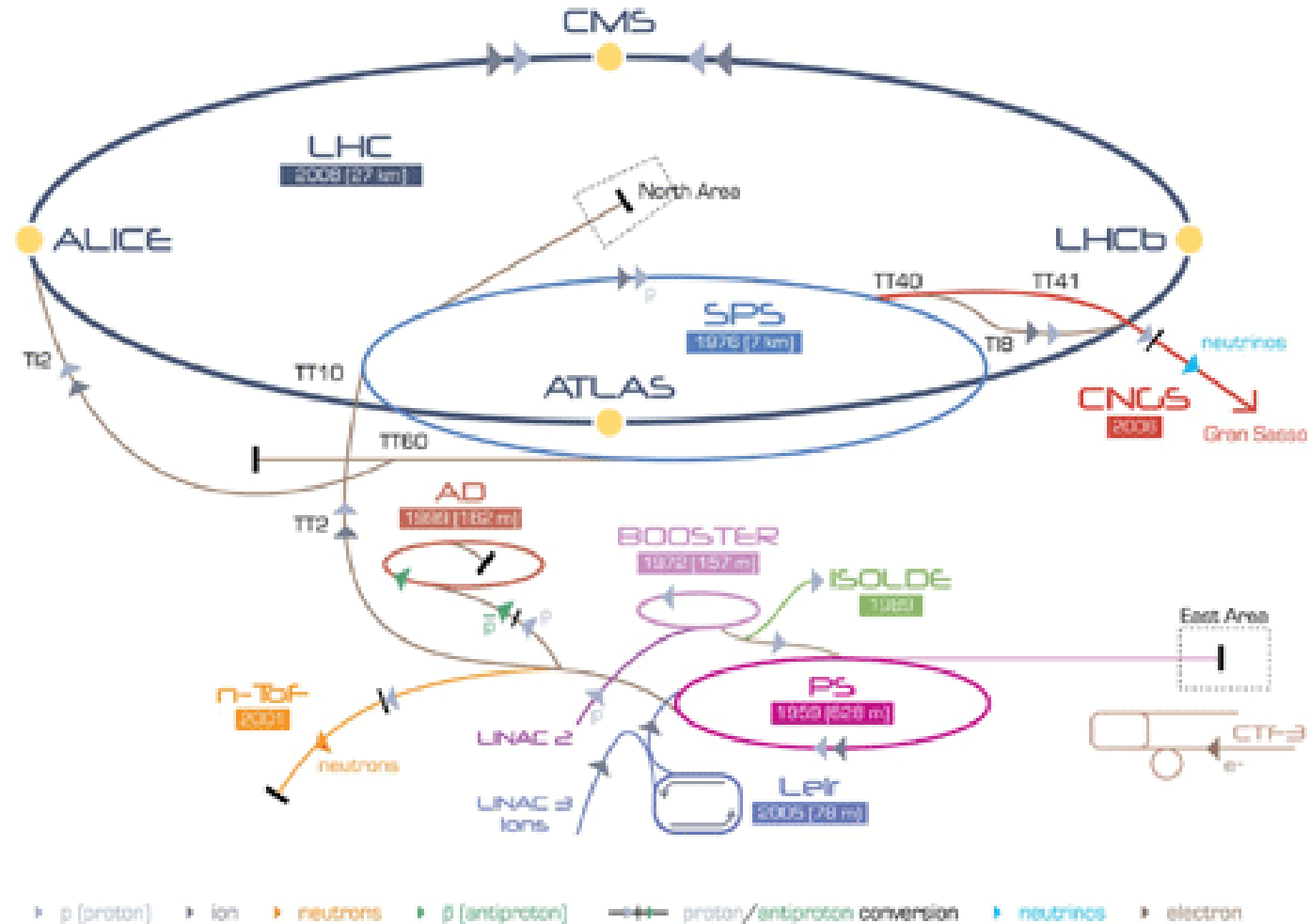
<https://www.youtube.com/watch?v=qQNpucos9wc>



Tutto inizia da una bombola di idrogeno...

...i protoni vengono mandati nella catena di iniezione di LHC, un insieme di acceleratori che li accelera progressivamente...

...in LHC vengono poi portati fino all'energia di 7 TeV e i due fasci vengono fatti collidere..

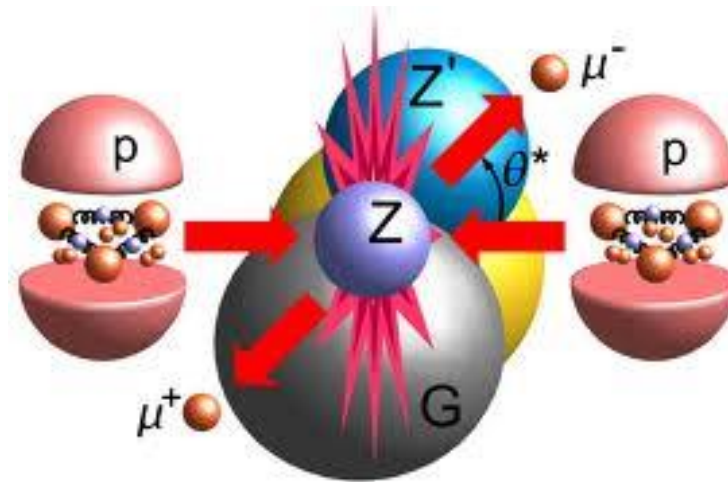


LHC Large Hadron Collider SPS Super Proton Synchrotron PS Proton Synchrotron
 AD Antiproton Decelerator CTF-3 Clio Test Facility CNCS Corn Neutrinos to Gran Sasso ISOLDE Isotope Separator OnLine DEvice
 LEIR Low Energy Ion Ring LINAC LINear ACcelerator n-Tbf Neutrons Time Of Flight

I due fasci di protoni che si muovono in direzione opposta si scontrano in alcuni punti lungo l'anello



Nelle collisioni vengono prodotte nuove particelle

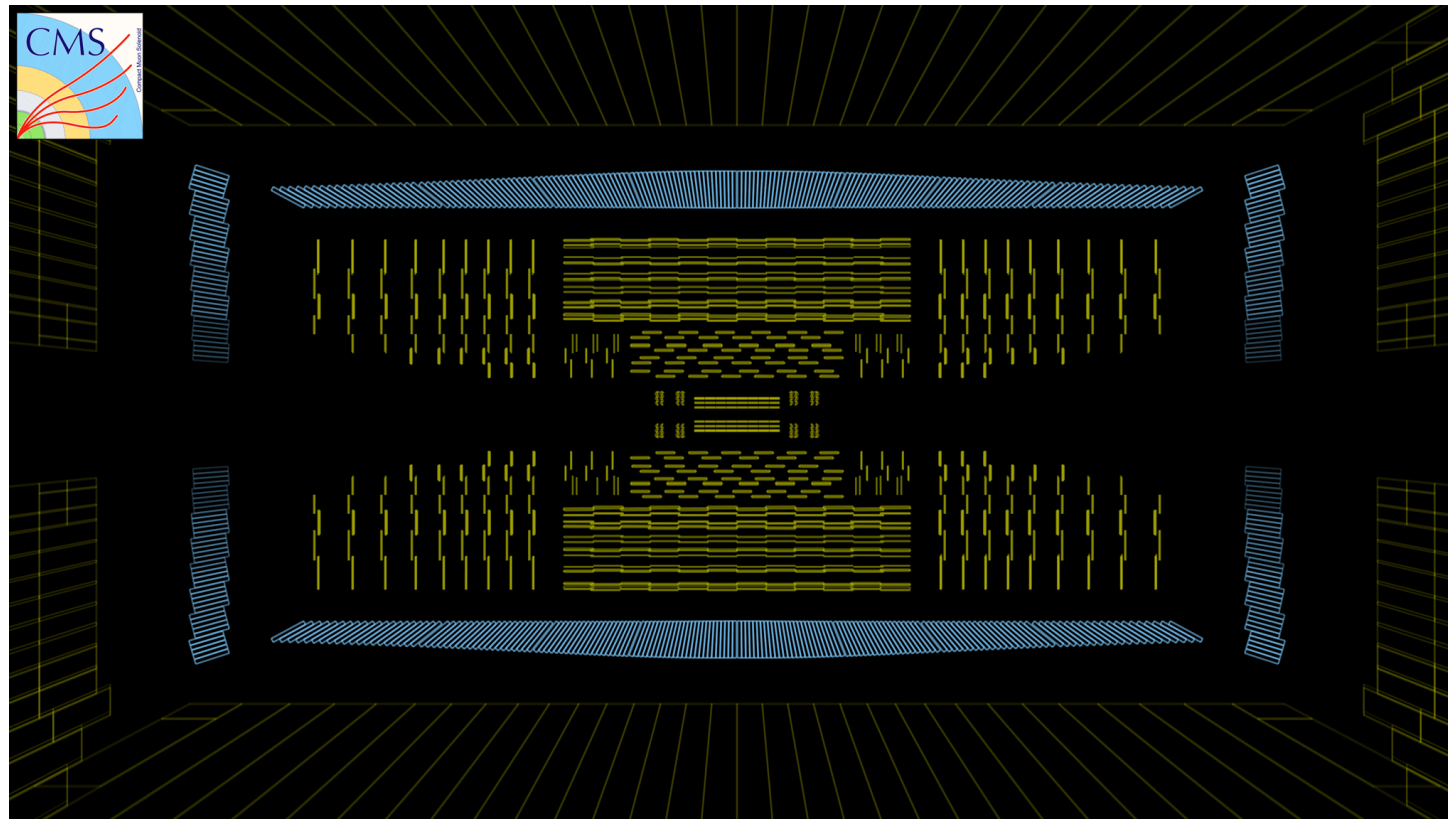


Considerando che in LHC:

- Ci sono 2 Fasci di protoni da **7 TeV**
- Ogni fascio è composto da **2832 «pacchetti»** di protoni
- Ogni «pacchetto» contiene **10^{11} protoni**

Si hanno 40 000 000 interazioni al secondo

→ La situazione realistica diventa

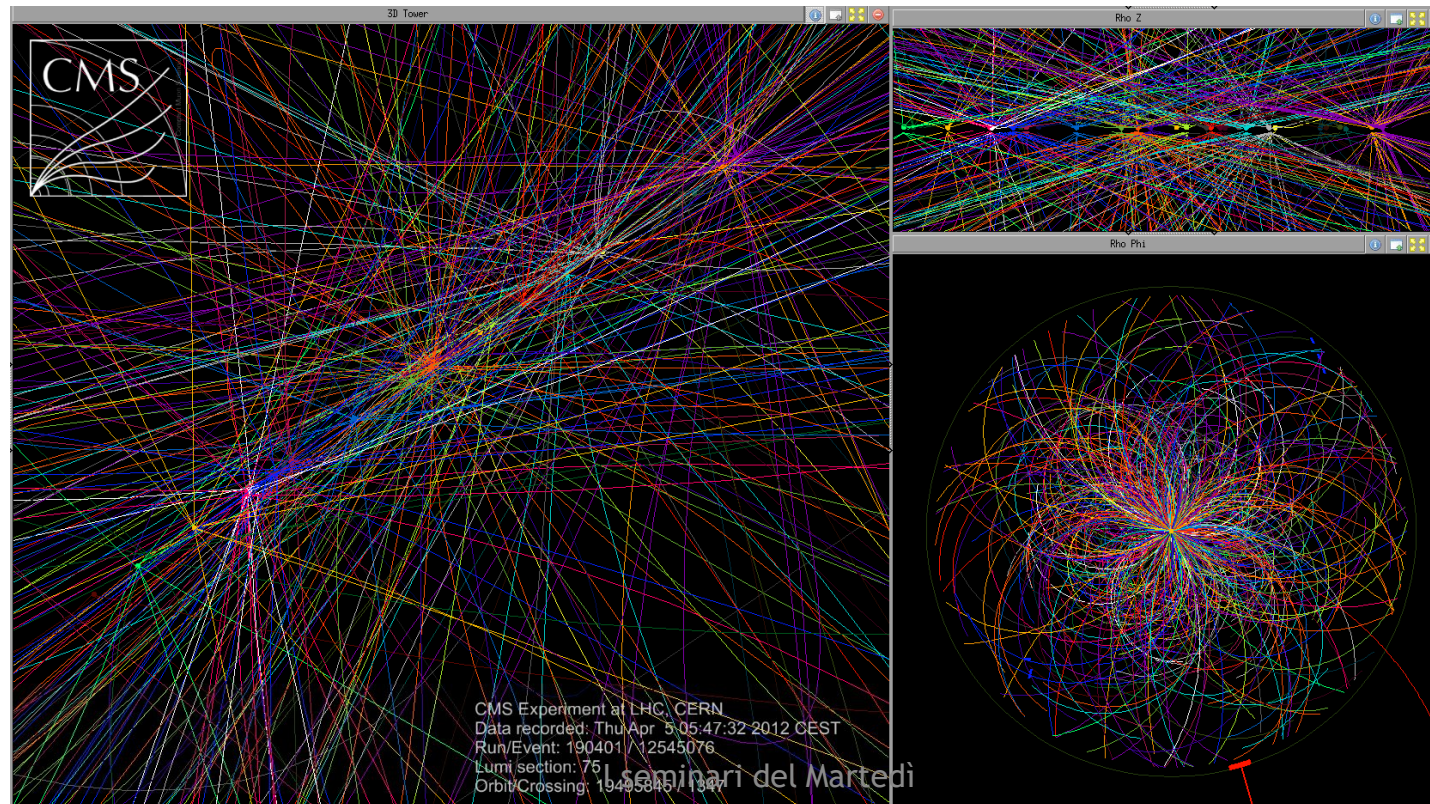


Considerando che in LHC:

- Ci sono 2 Fasci di protoni da **7 TeV**
- Ogni fascio è composto da **2832 «pacchetti»** di protoni
- Ogni «pacchetto» contiene **10^{11} protoni**

Si hanno 40 000 000 interazioni al secondo

→ La situazione realistica diventa



Nei punti in cui i due fasci di protoni si scontrano sono posizionati
dei rivelatori di particelle

Il loro ruolo è quello di identificare le particelle e misurare la loro energia e
direzione



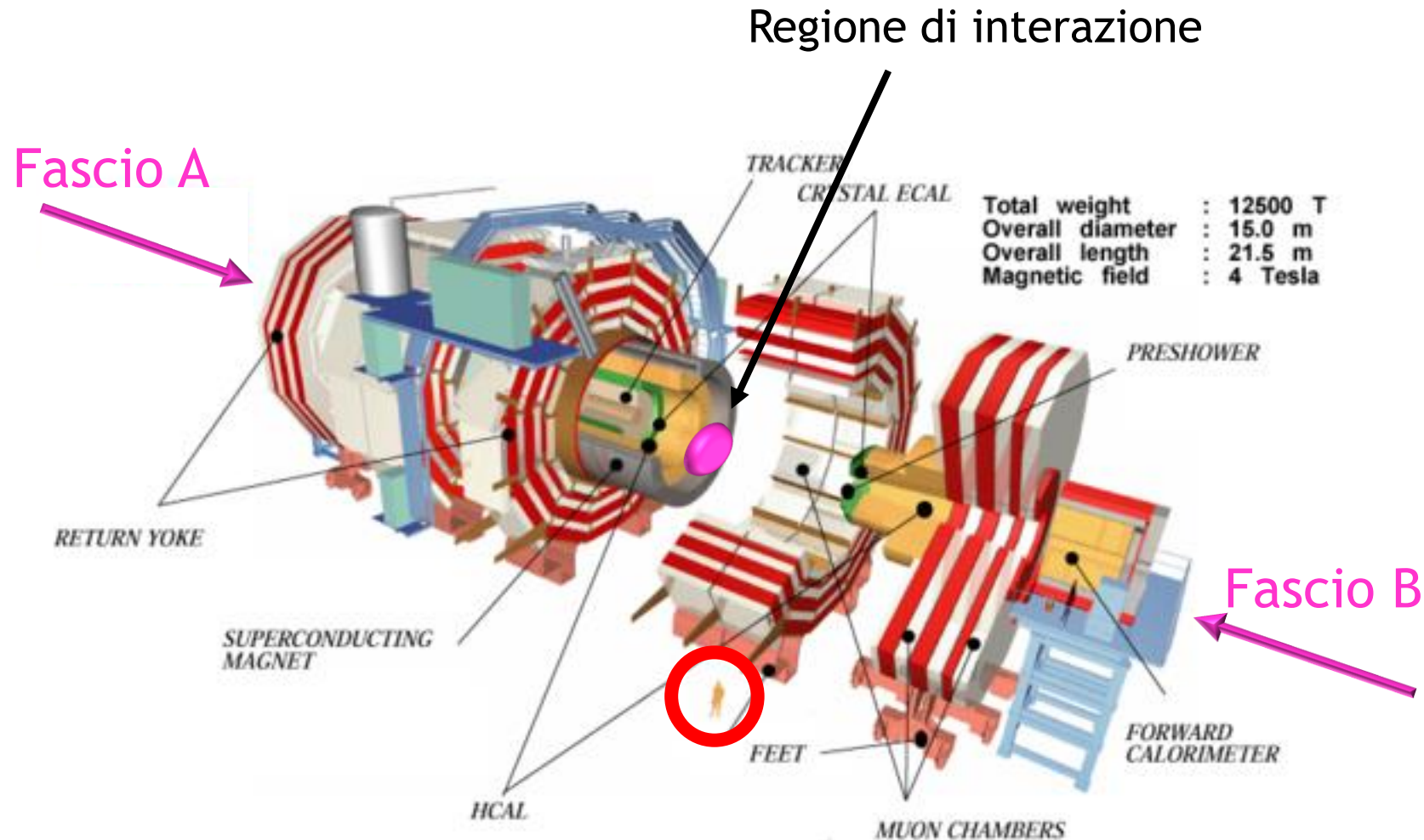
Oggi ci concentreremo sull'esperimento **CMS**

CMS = Compact Muon Solenoid

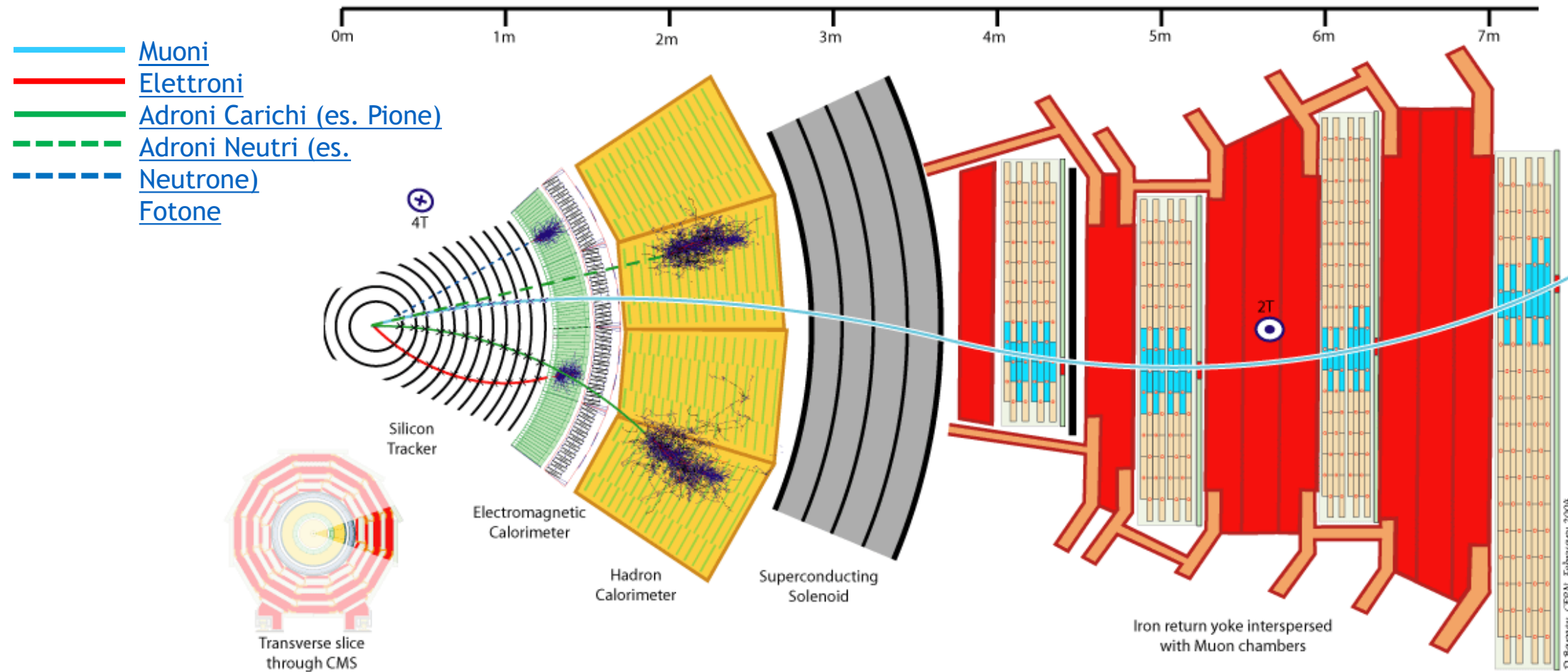
Compact → rivelatore compatto per rivelare le particelle emesse in ogni direzione, senza lasciare zone scoperte

Muon → la particella più importante per la fisica di CMS è il muone

Solenoid → il campo magnetico di 4 T è solenoidale



Come è fatto CMS?



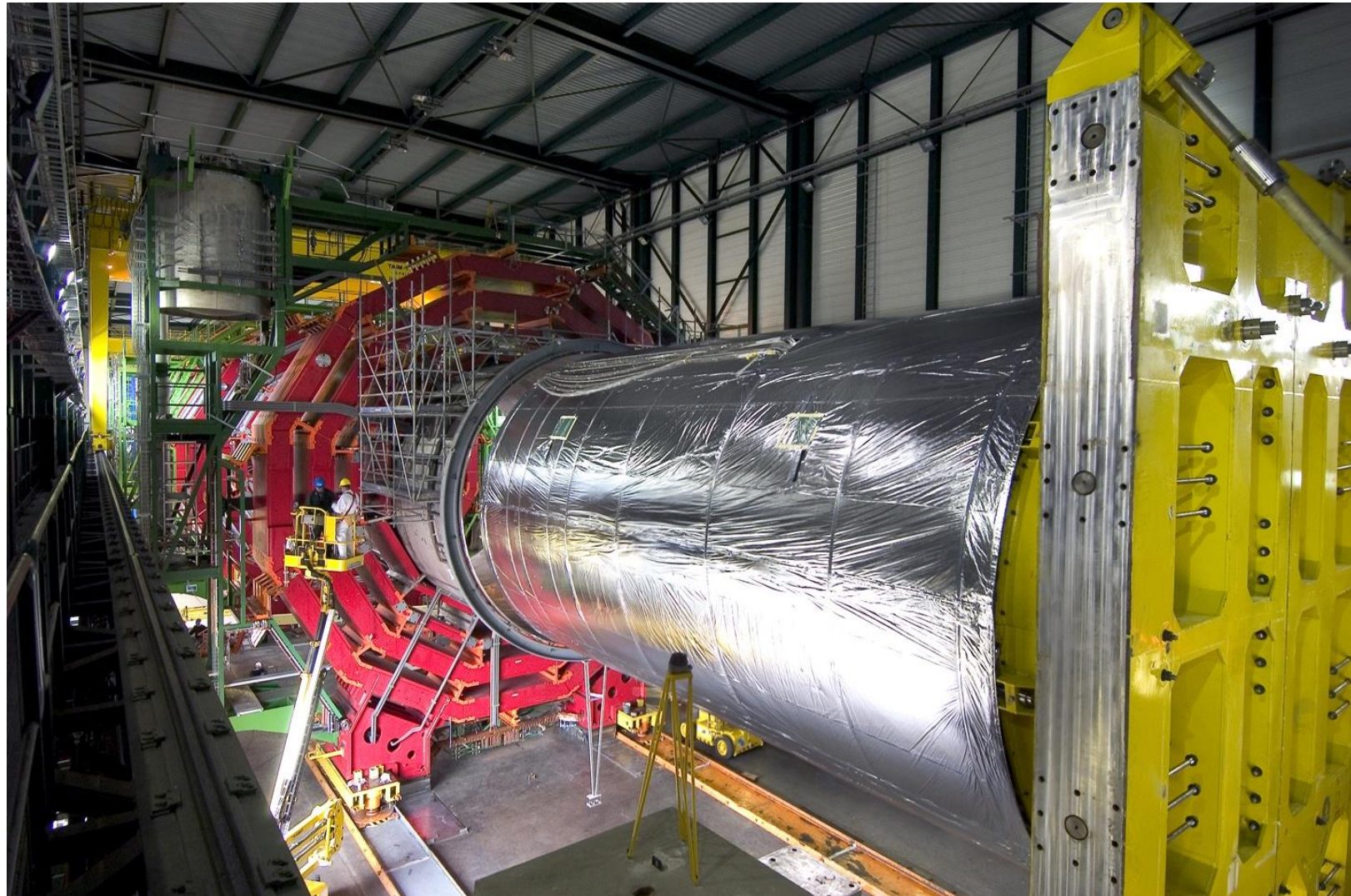
Il magnete solenooidale

Settembre 2005



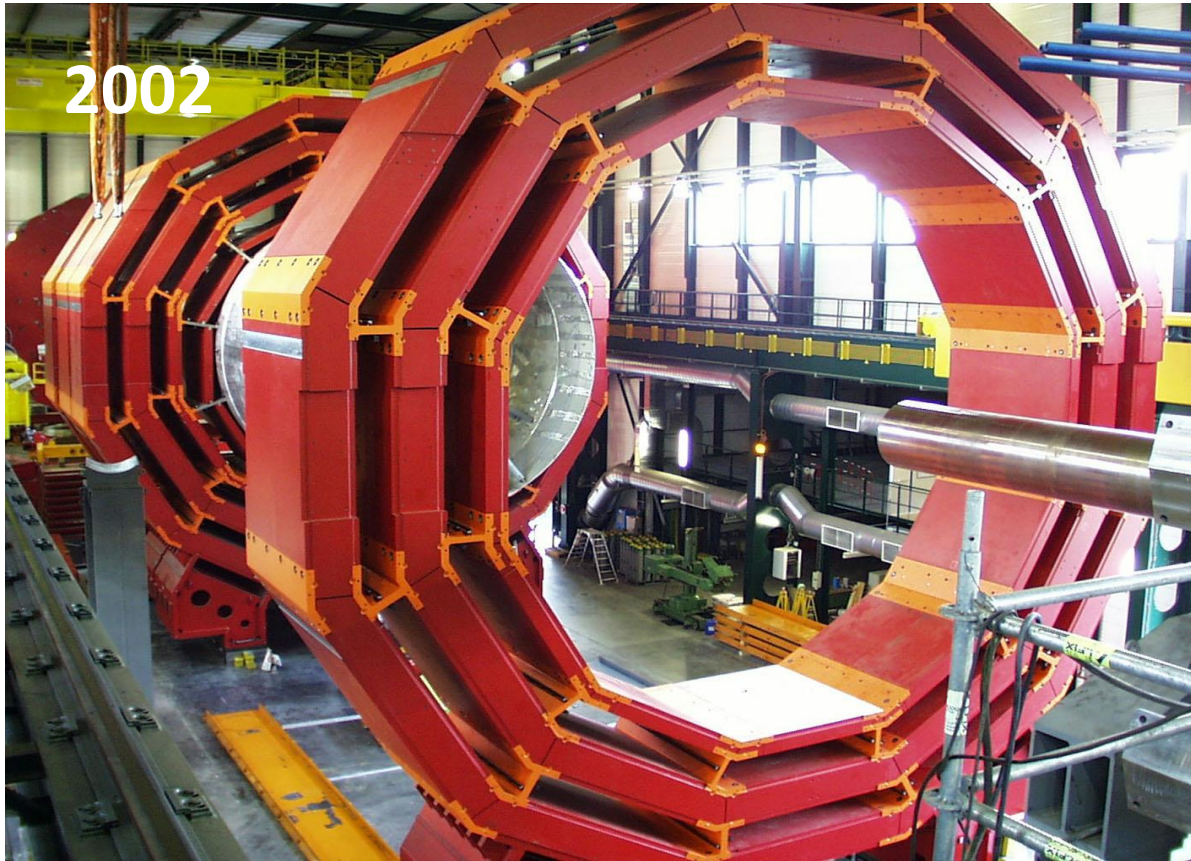
$B = 4 \text{ T}$
Coil: 230 t
Vacuum tank esterno: tubo
stainless steel lungo 13 m, $\phi=7.6 \text{ m}$

Il solenoide produce un campo magnetico assiale...



Assemblaggio dell'Iron Yoke

http://www.lhc-closer.es/taking_a_closer_look_at_lhc/0.magnets__detectors_i



...l'iron yoke è responsabile del ritorno del campo magnetico...

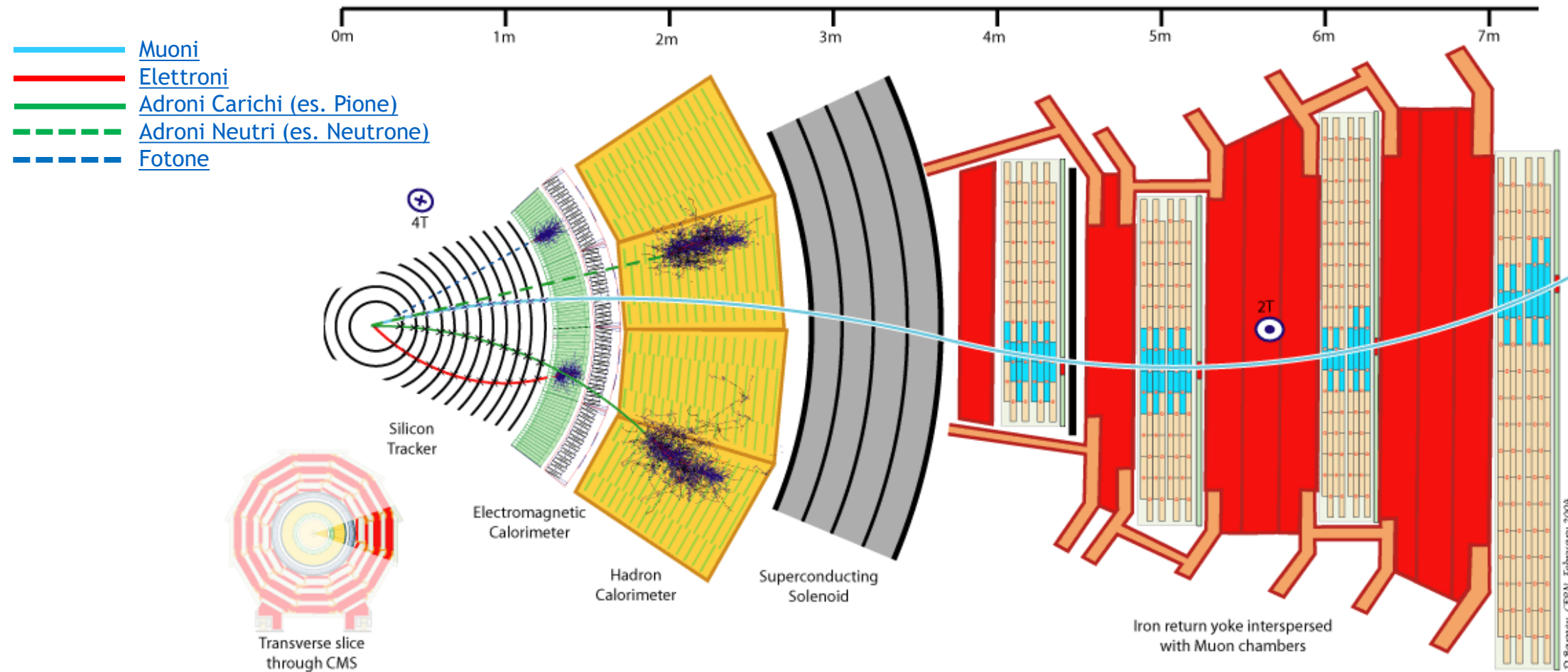


E' diviso in una parte cilindrica centrale, il barrel, e le due estremità, gli endcaps, composti da dischi spessi 600 mm.

24/05/2016

I seminari c

Rivelare le particelle cariche: il tracciatore



Il tracciatore



...i pixels, che sono posizionati nella zona più interna del rivelatore e devono gestire la densità più alta di particelle...

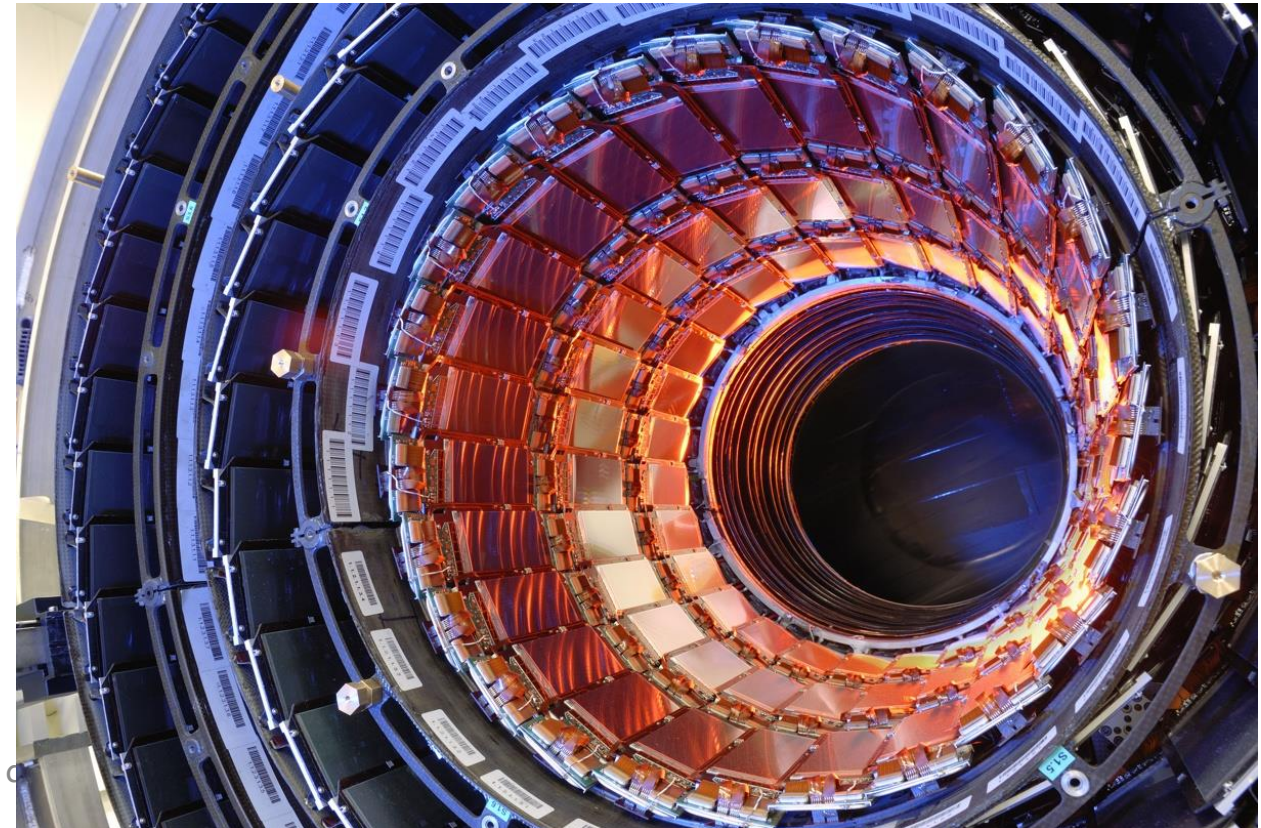
...e le silicon microstrip che li circondano.

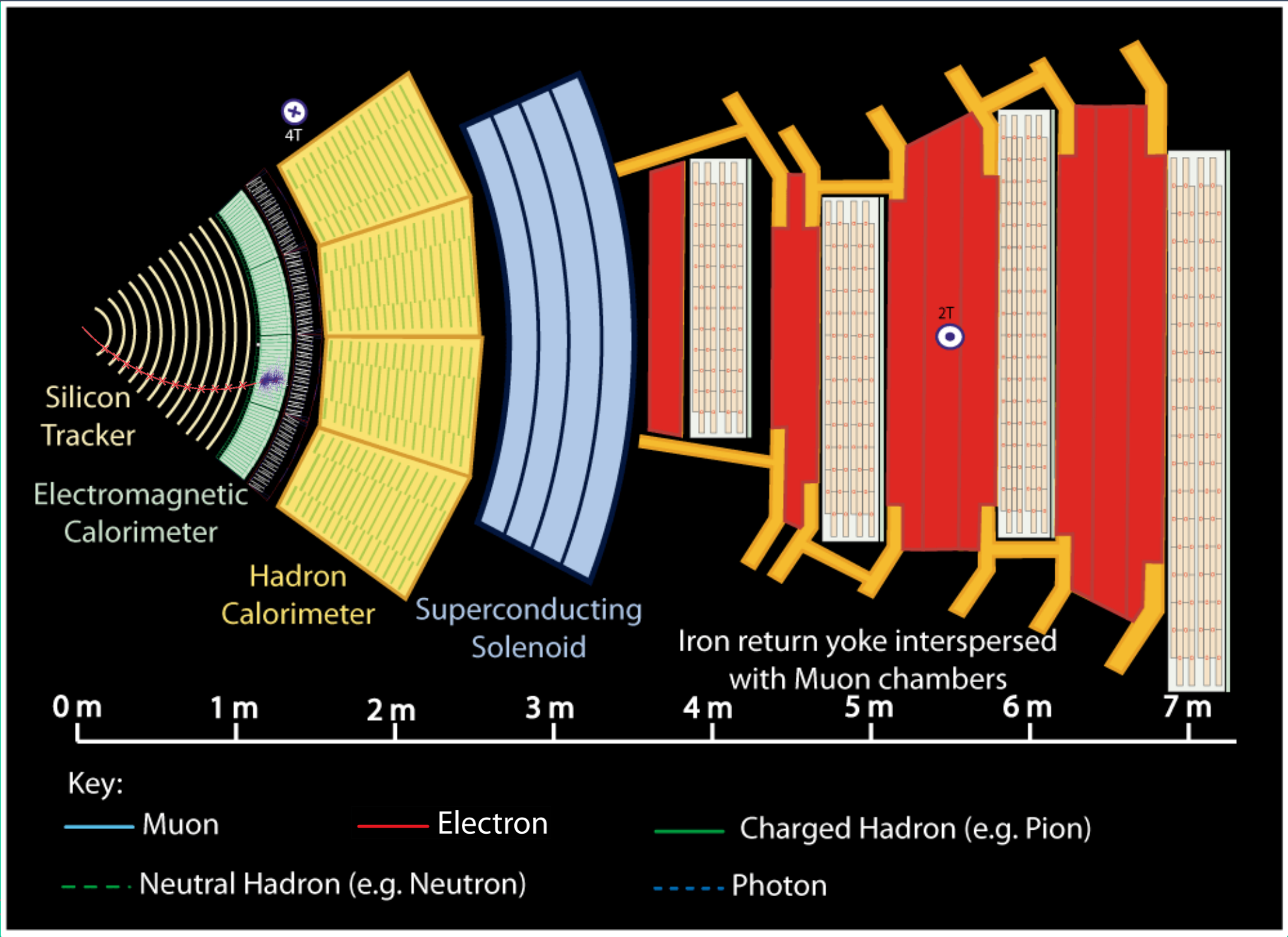
Quando una particella attraversa il tracker, i pixels e le microstrips producono un segnale elettrico che è poi amplificato e rivelato.

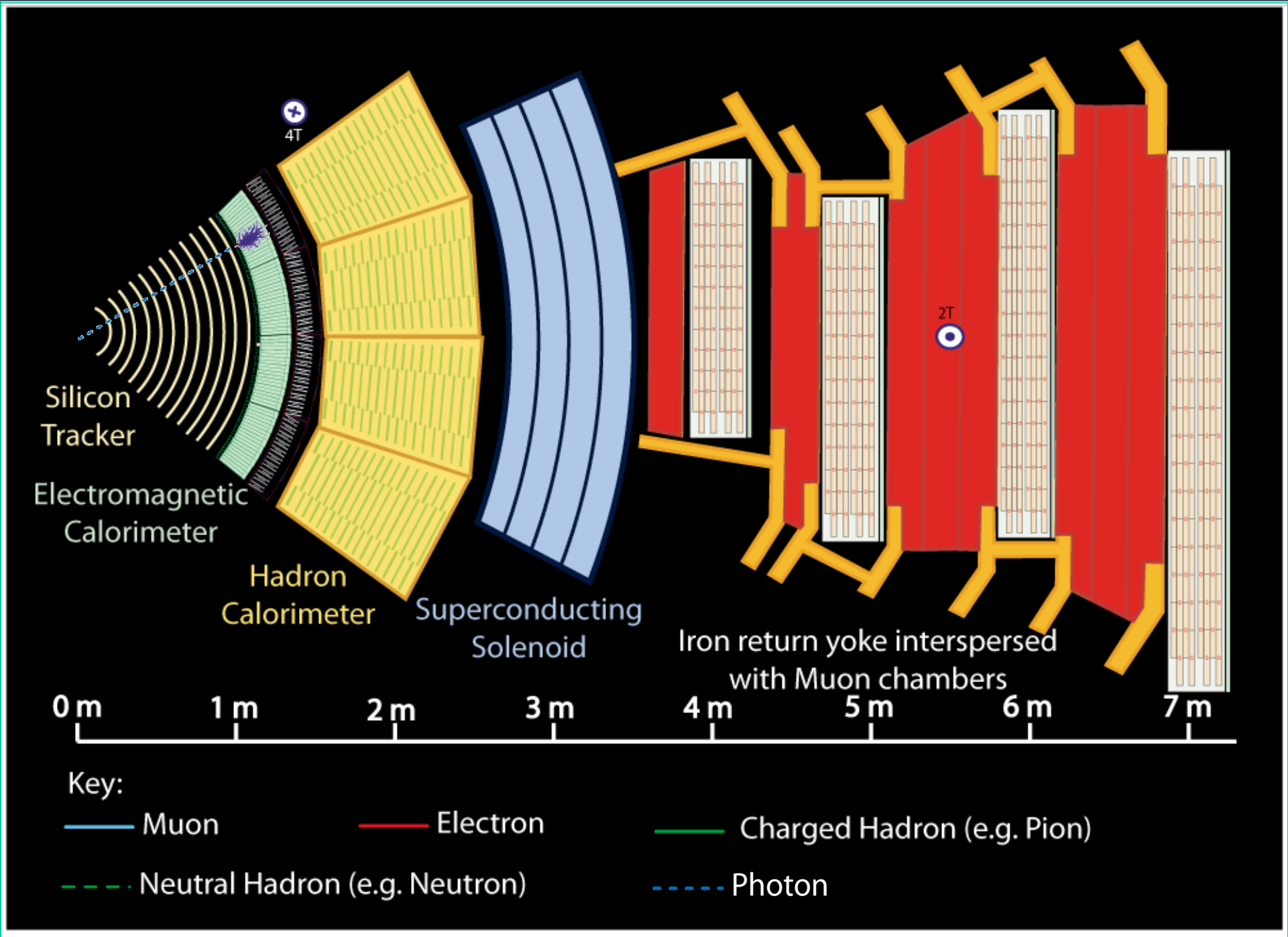
<http://cms.web.cern.ch/news/tracker-detector>

Il tracker ricostruisce la traiettoria di muoni, elettroni e hadroni ad alta energia, così come le tracce che vengono dal decadimento di particelle a breve vita.

I rivelatori scelti hanno una risoluzione dell'ordine di 10 micron e sono...







Il calorimetro elettromagnetico - ECAL

<http://cms.web.cern.ch/news/electromagnetic-calorimeter>

Il calorimetro elettromagnetico è utilizzato per misurare l'energia delle particelle prodotte nelle interazioni, in particolare elettroni e fotoni.

Il rivelatore è composto da cristalli di tungstato di piombo...

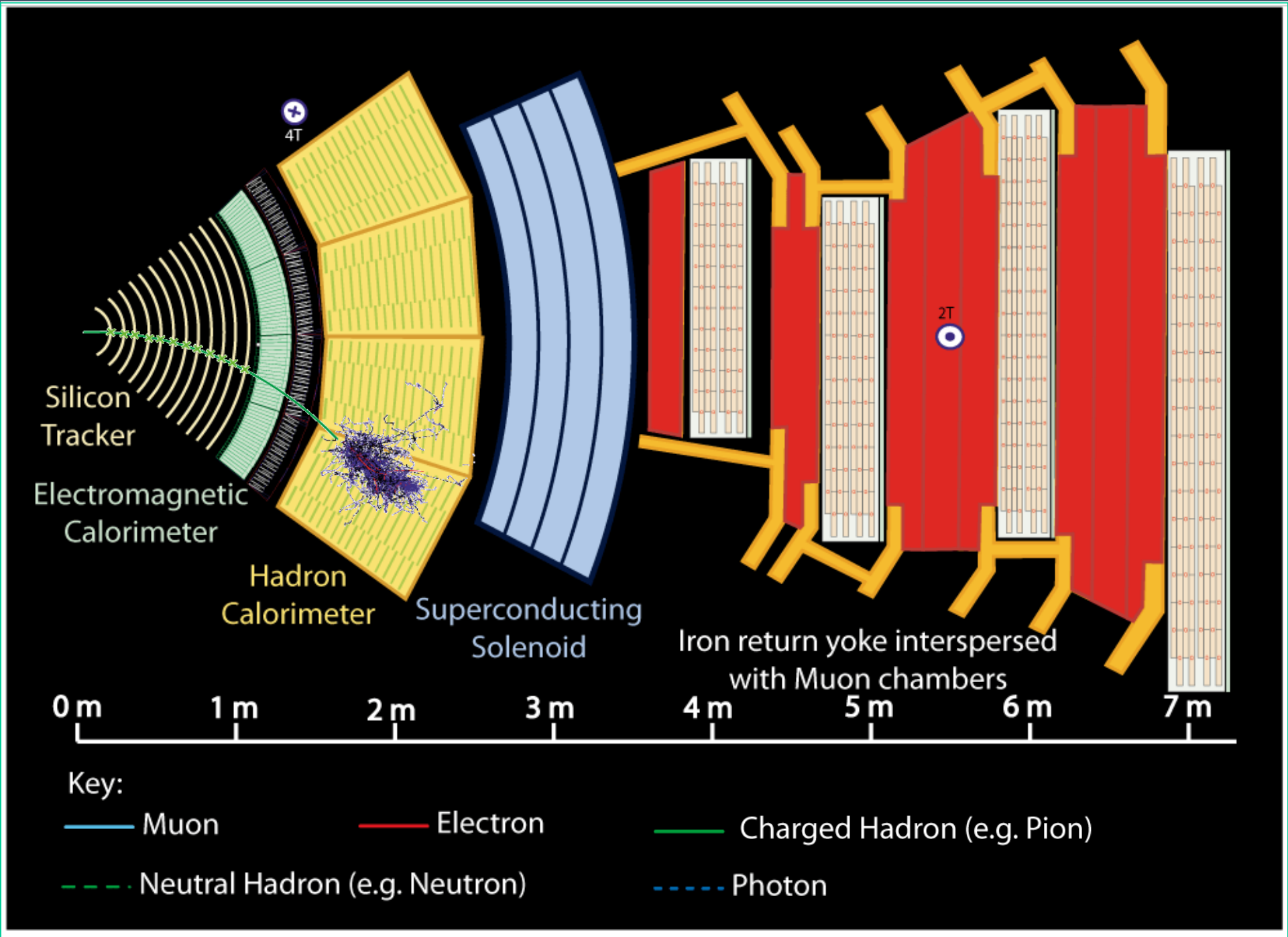


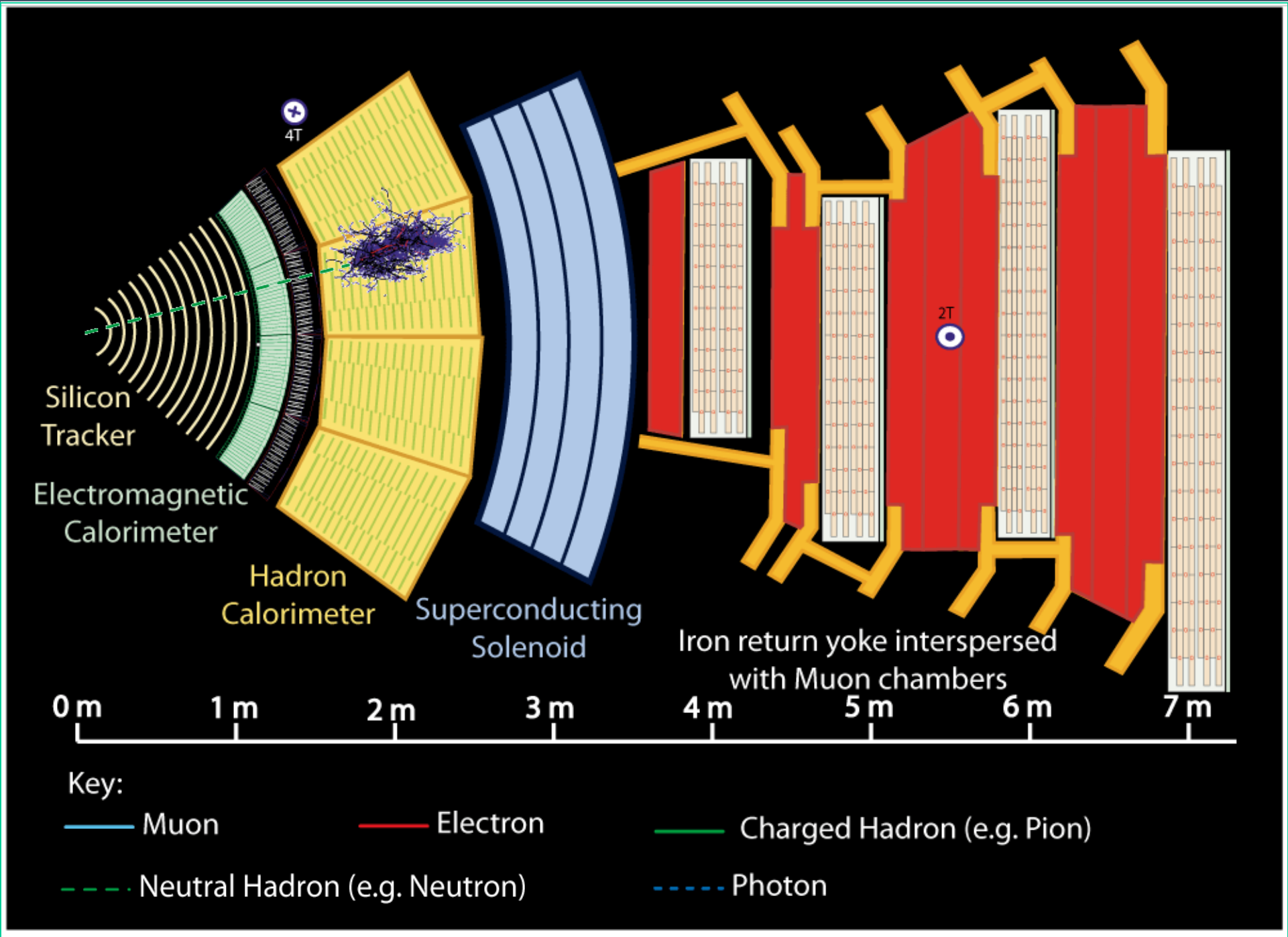
...un materiale prevalentemente metallico, più pesante dell'acciaio, ma che contiene ossigeno in forma cristallina, che lo rende trasparente ed emette luce di scintillazione quando elettroni e fotoni lo attraversano.

Questi cristalli producono un segnale veloce e ben definito, che permette di ottenere un rivelatore preciso, veloce e abbastanza compatto.

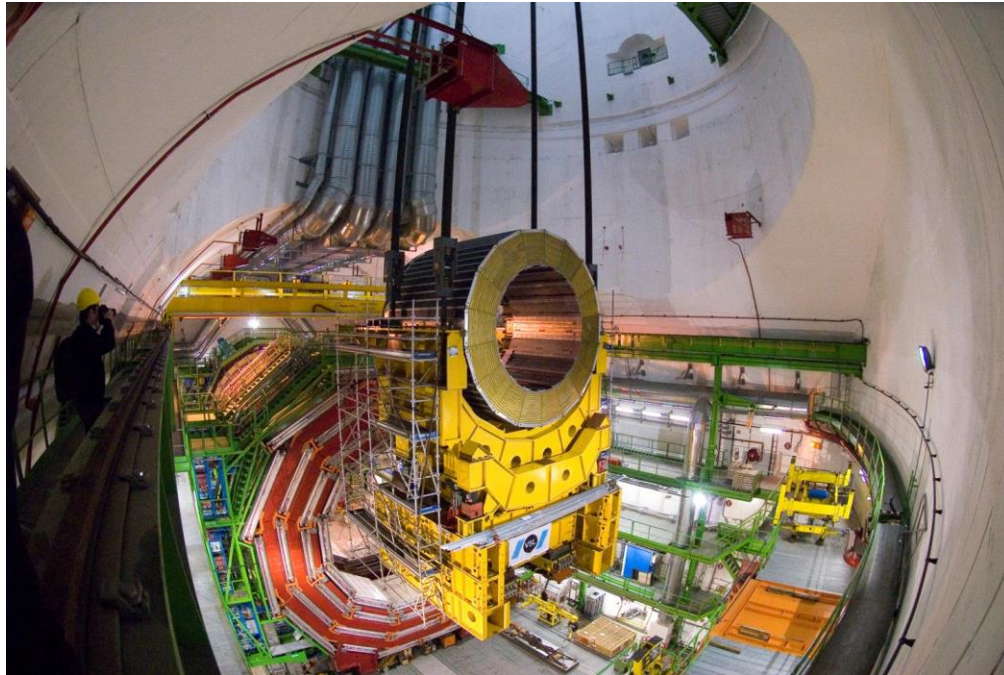
I seminari del





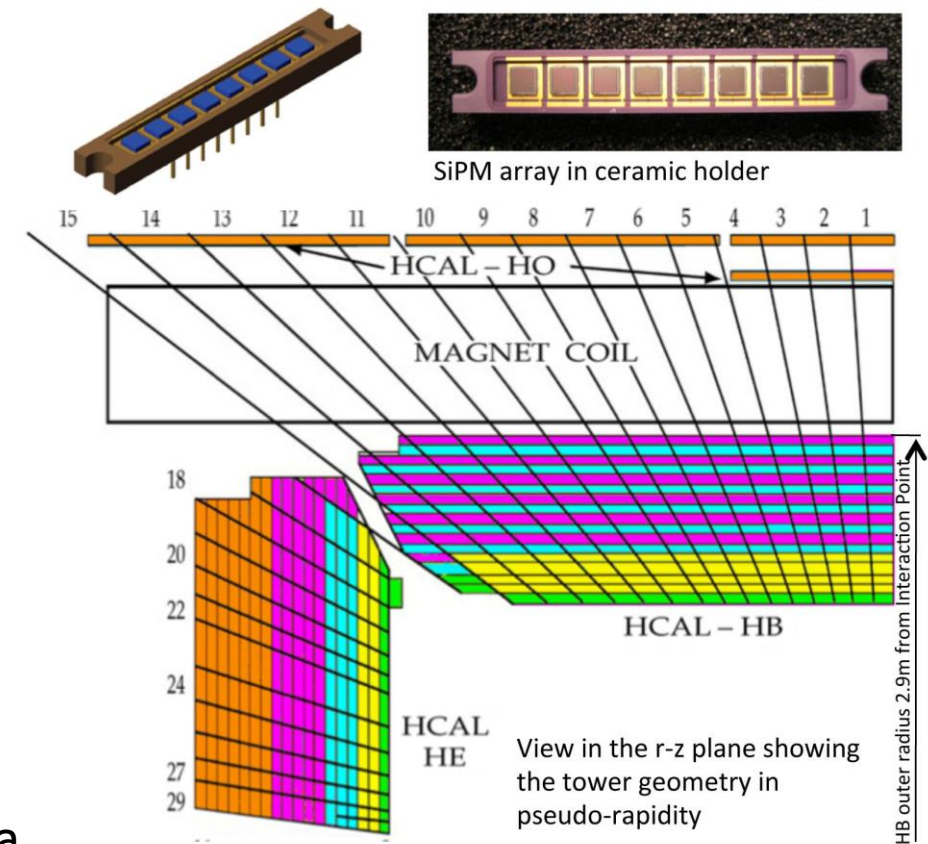


Il calorimetro adronico - HCAL



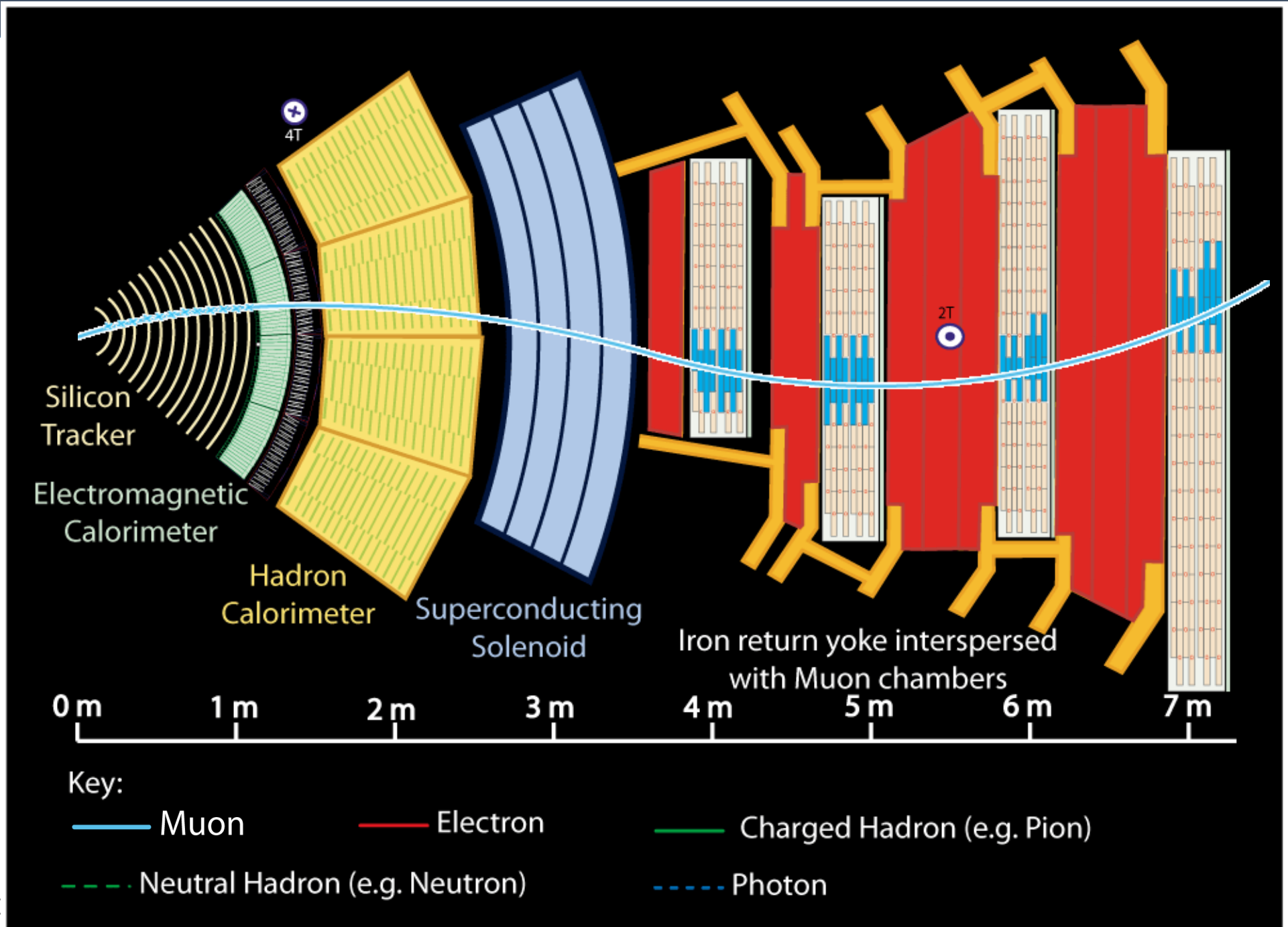
Il calorimetro adronico misura l'energia degli adroni, particelle composte da quarks e gluoni (per esempio protoni, neutroni, pioni...).

<http://cms.web.cern.ch/news/hadron-calorimeter>



HCAL è un calorimetro a campionamento, cioè ricostruisce la posizione delle particelle e la loro energia attraverso strati alternati di un materiale assorbitore e di un materiale scintillatore, che produce un segnale di luce molto veloce quando passa una particella.

La luce viene raccolta da fibre ottiche e amplificata. Sommando tutta la luce prodotta in una determinata regione si costruisce una “torre”, che ci dà la misura dell'energia della particella.

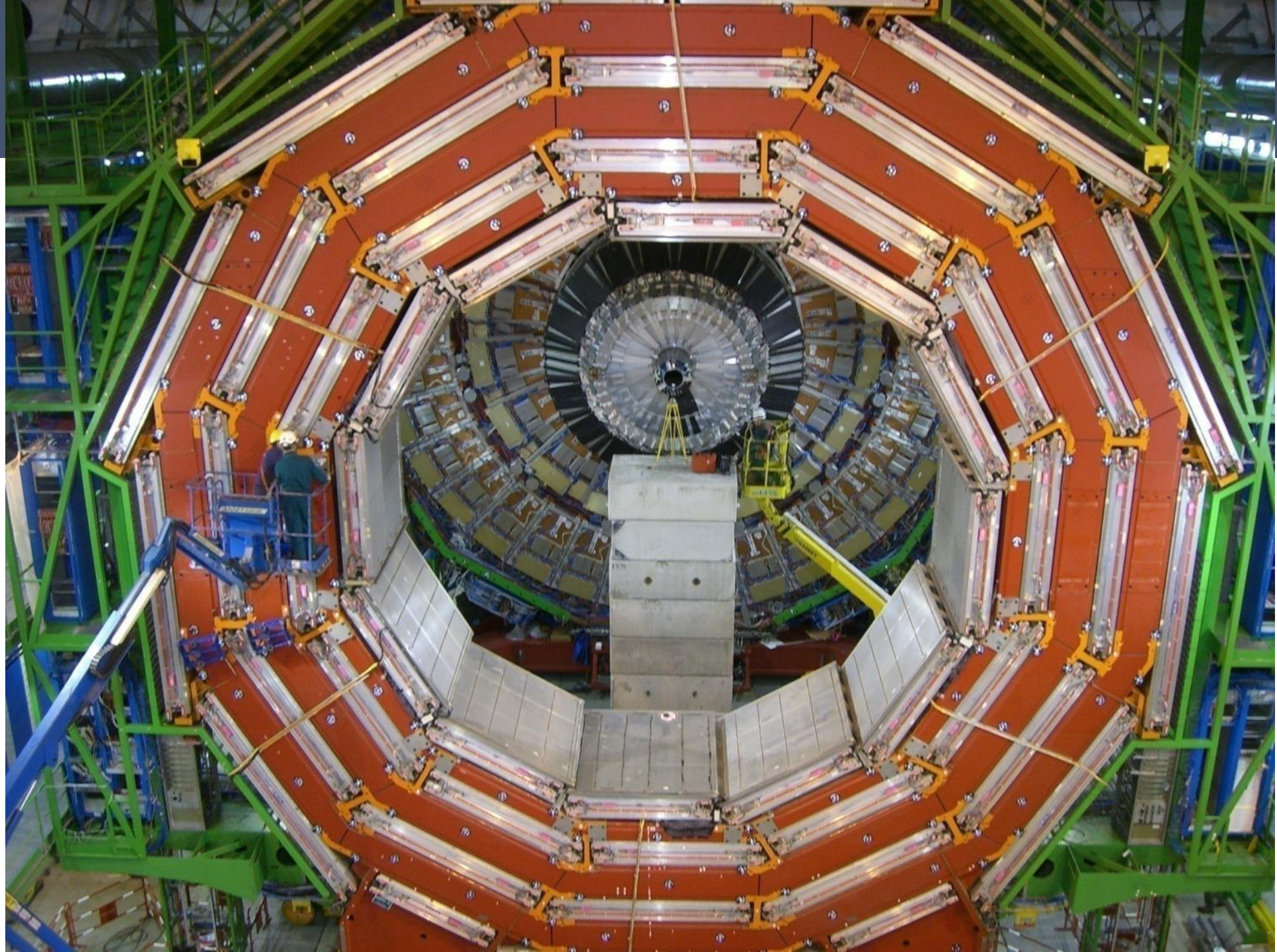


Il sistema a muoni

I muoni possono attraversare diversi metri di ferro poichè interagiscono poco con il materiale attraversato. Quindi le camere per rivelare i muoni sono lo strato più esterno dell'esperimento.

I rivelatori di muoni sono rivelatori a gas: in totale ci sono 1400 camere, di tre tipi diversi, che hanno lo scopo di ricostruire le tracce dei muoni e fornire un sistema di *trigger*.

<http://cms.web.cern.ch/news/muon-detectors>



CMS si chiude per la prima volta



24/05/2016

40

La caverna prima...

2003



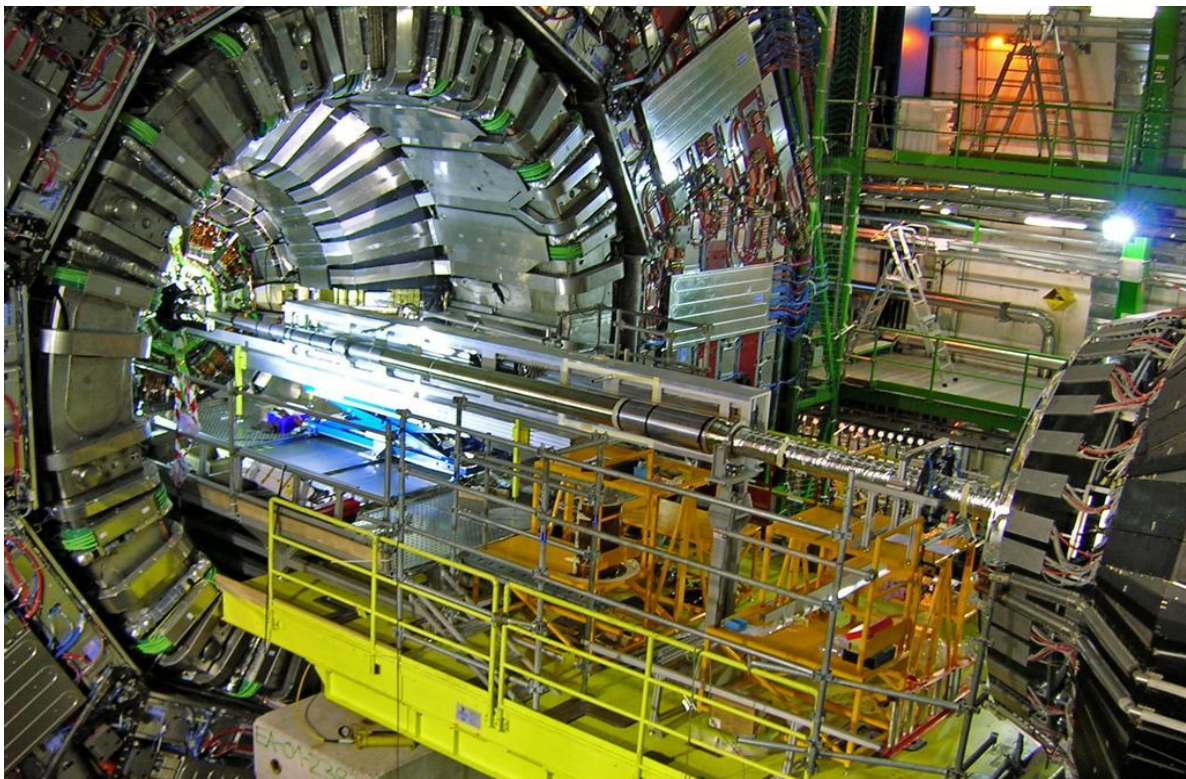
LHC Point 5 - UXC 55 Cavern - Point 4 Headwall - 17-03-2003 - CERN ST-CE

24/05/2016

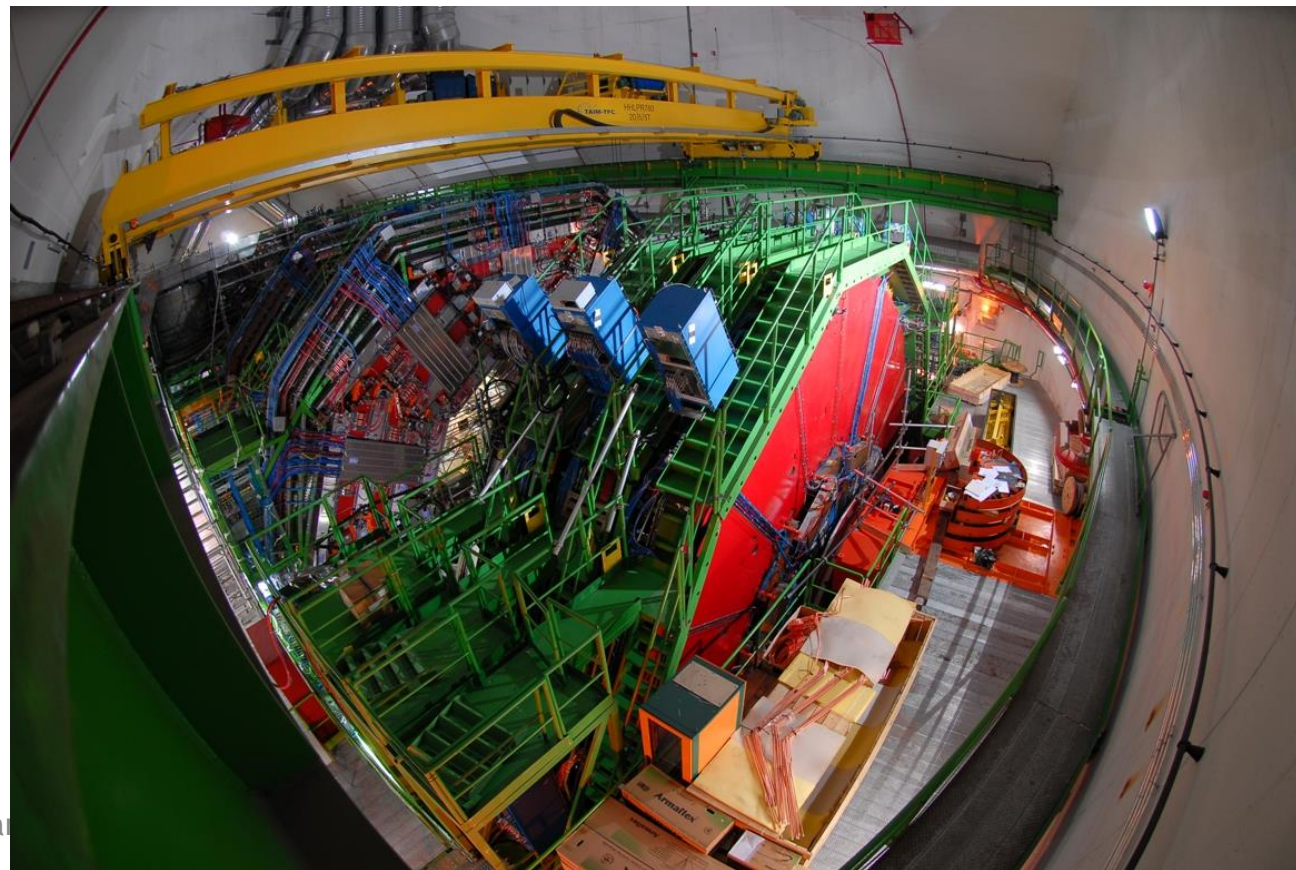
...l'inserimento delle varie parti di rivelatore...

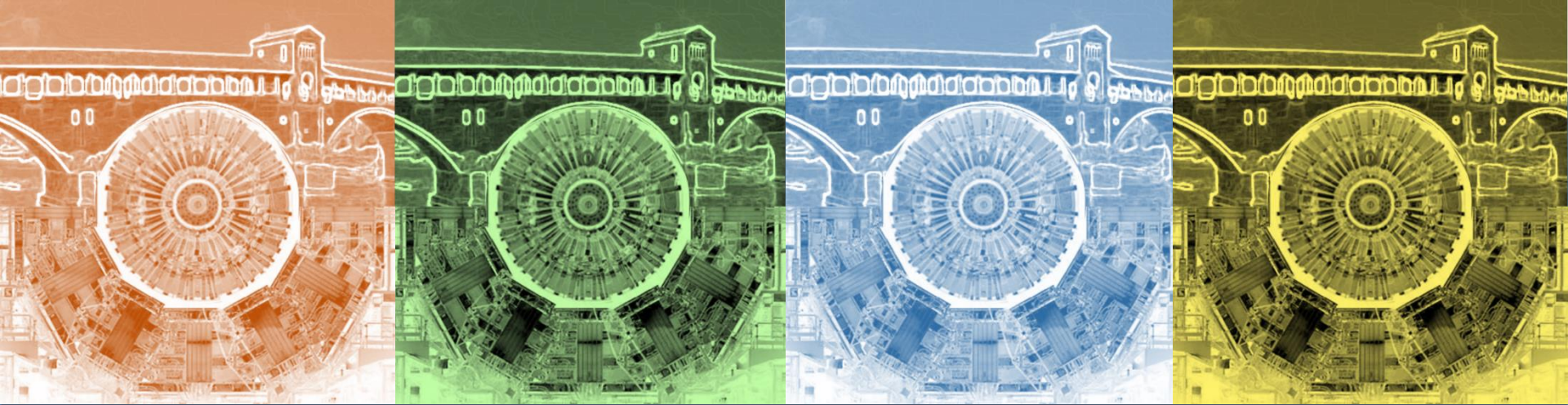


...la beampipe...



...vista dall'alto





back to surface

Security

- Access to caverns
- Fire, leakages
- Detectors operations
- HV, cooling
- Out of order lifts

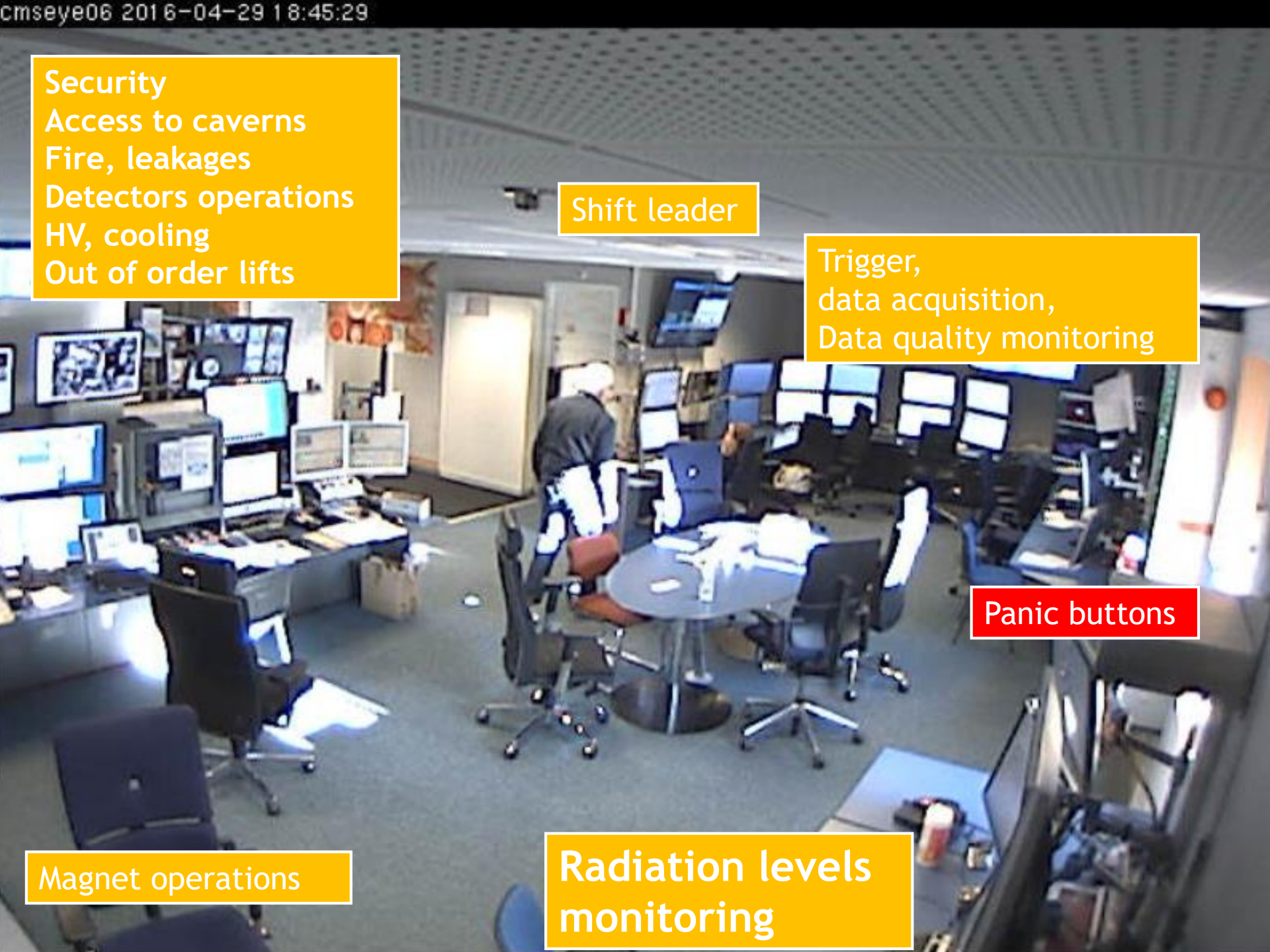
Shift leader

Trigger,
data acquisition,
Data quality monitoring

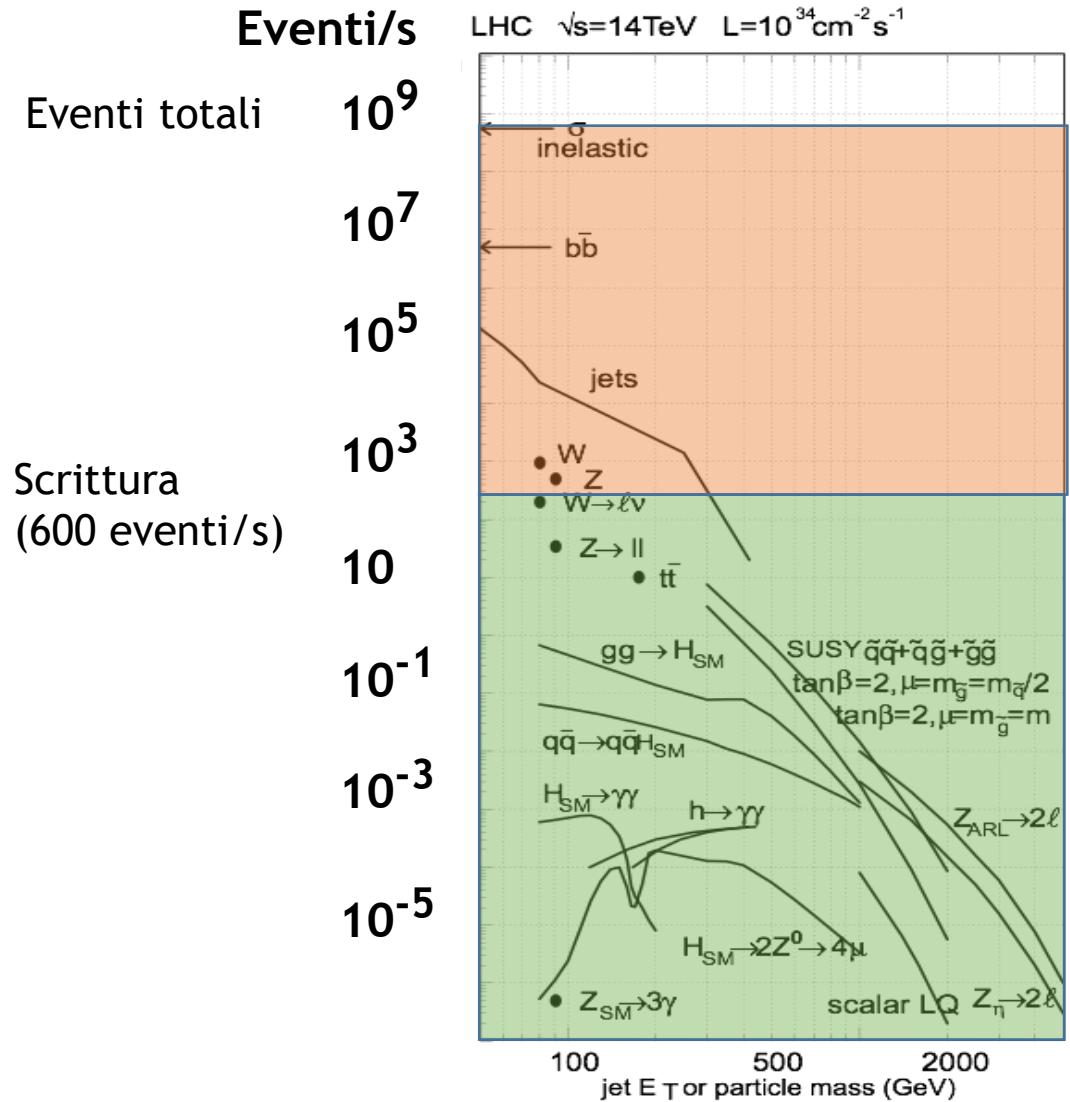
Panic buttons

Magnet operations

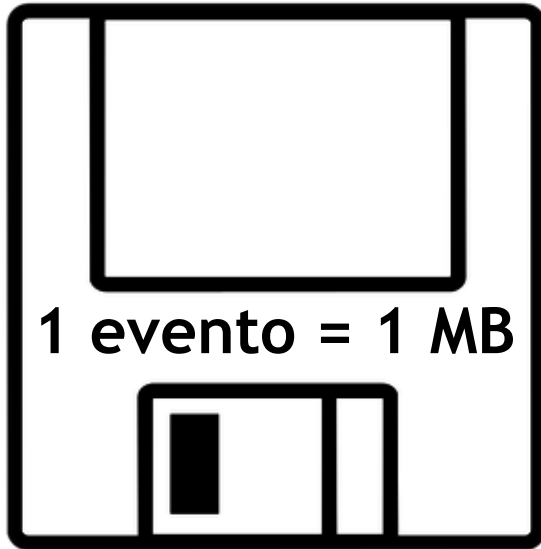
Radiation levels
monitoring



Trigger



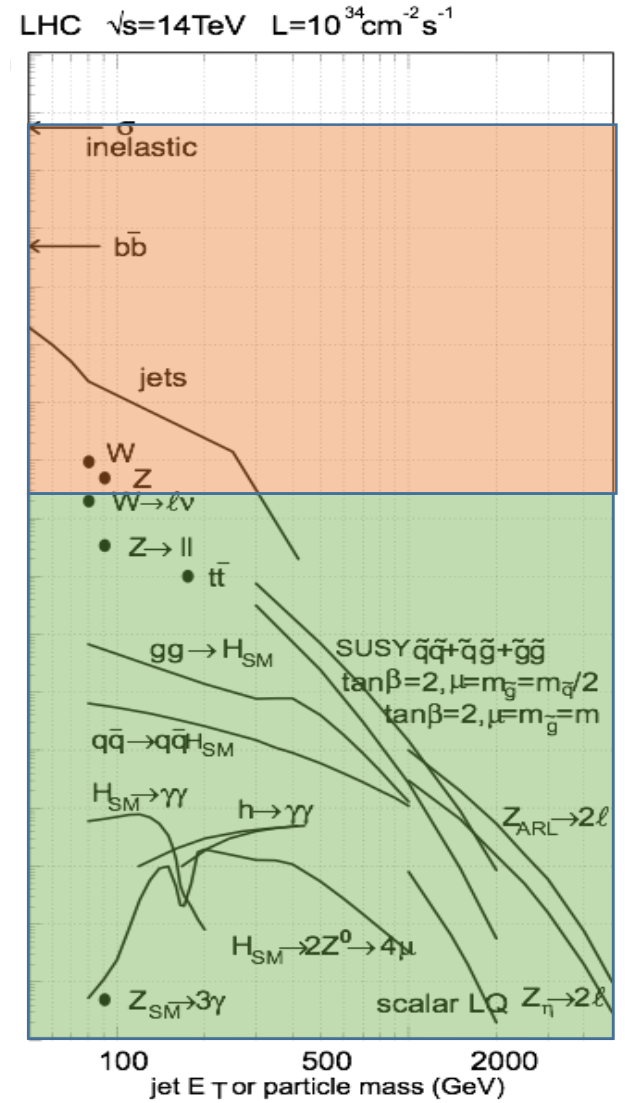
Trigger



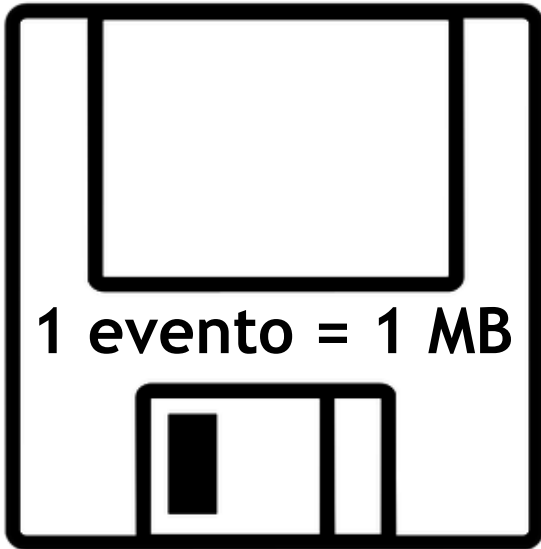
Eventi/s

Eventi totali 10^9

Scrittura (600 eventi/s)



Trigger



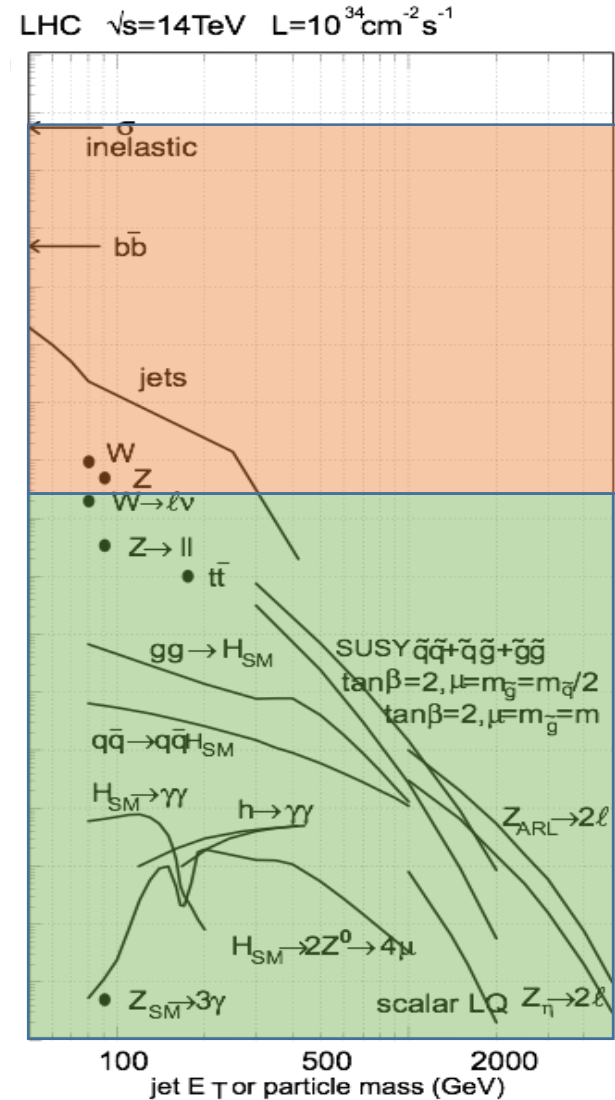
Eventi/s

Eventi totali 10^9

Scrittura
(600 eventi/s)

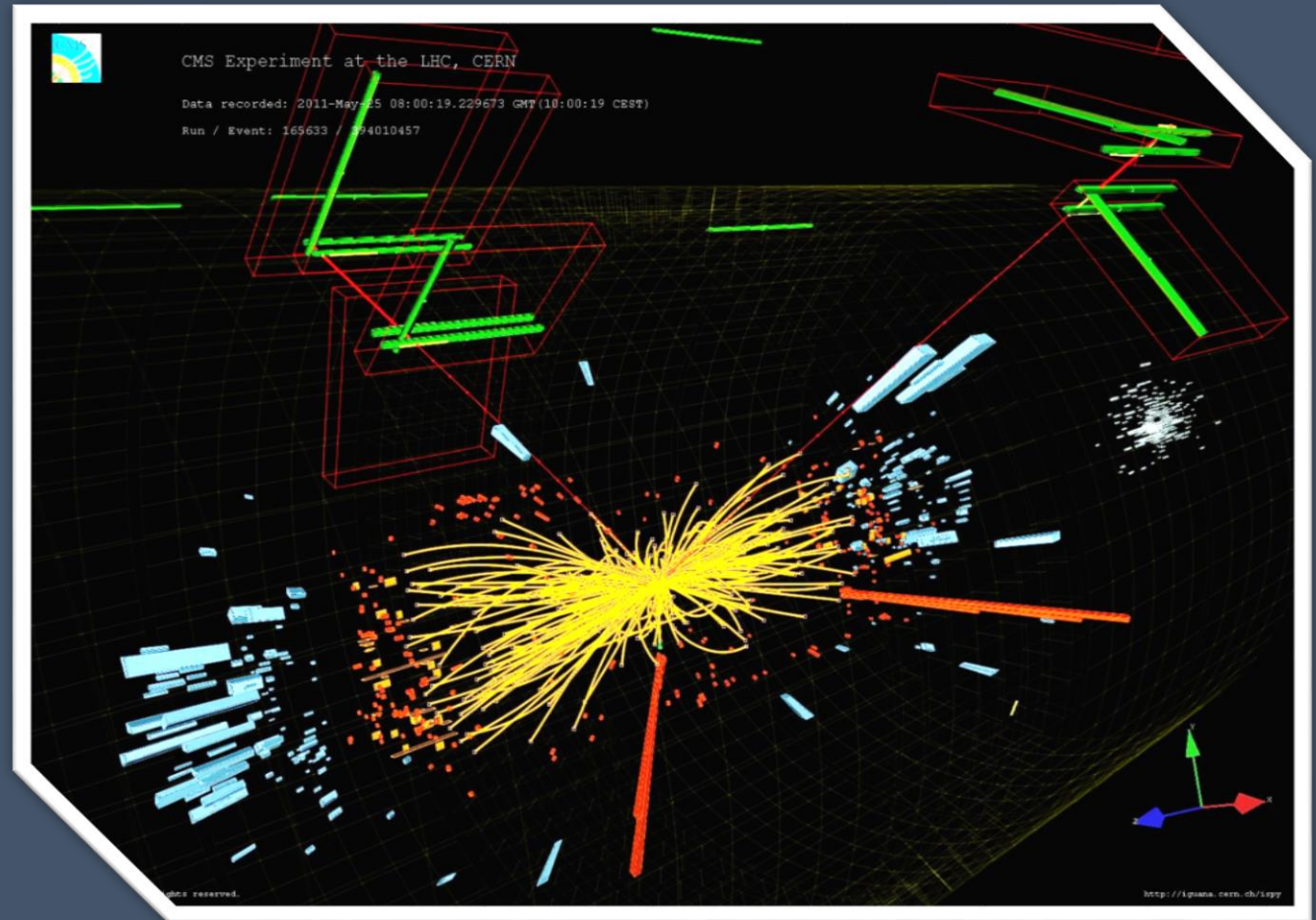
Dobbiamo scegliere

..in fretta - prima scrematura in $4 \mu\text{s}$



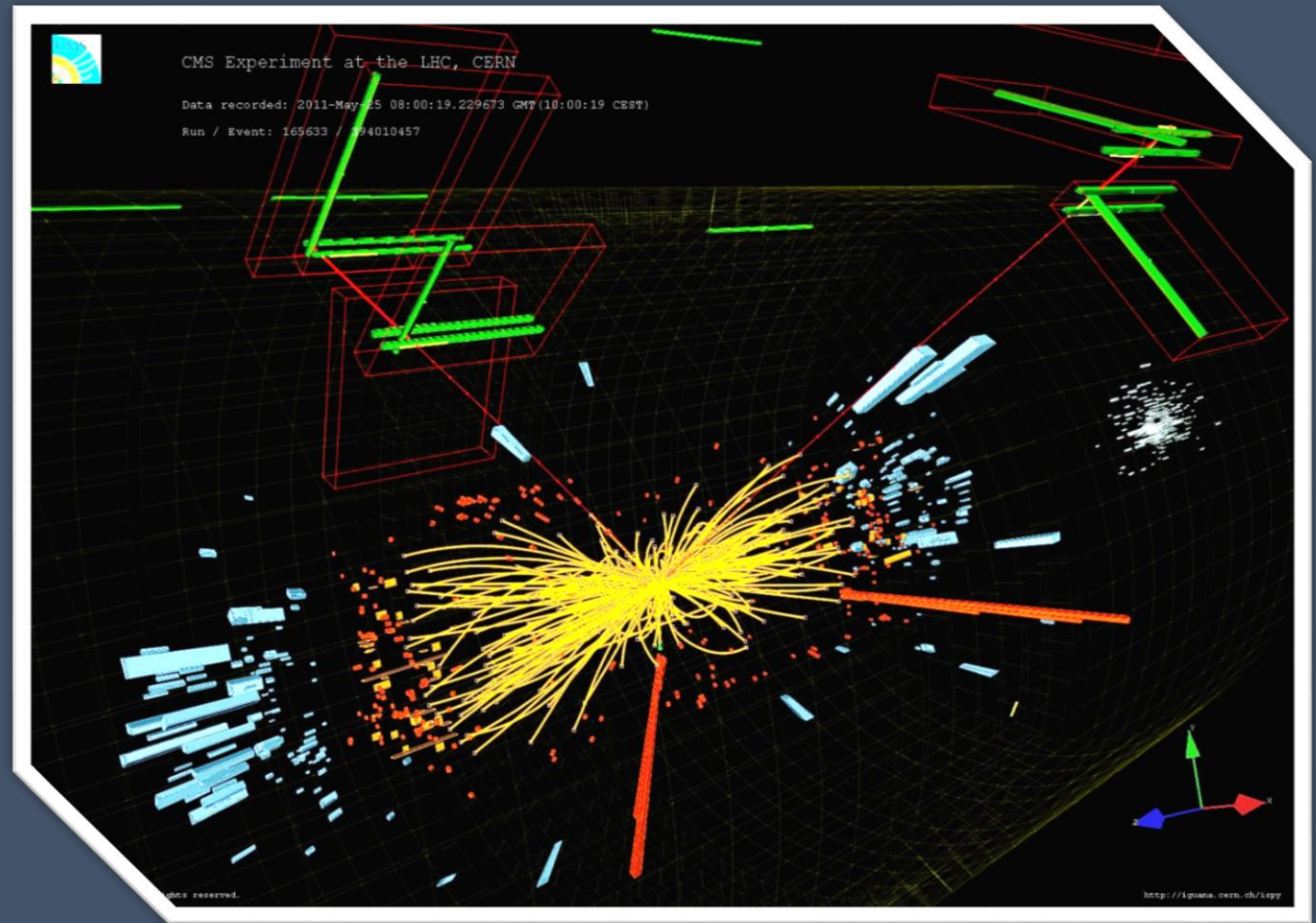
Quali sono i rivelatori più veloci?

Tracciatore
Calorimetri
Muoni



Quali sono i rivelatori più veloci?

Tracciatore
Calorimetri
Muoni

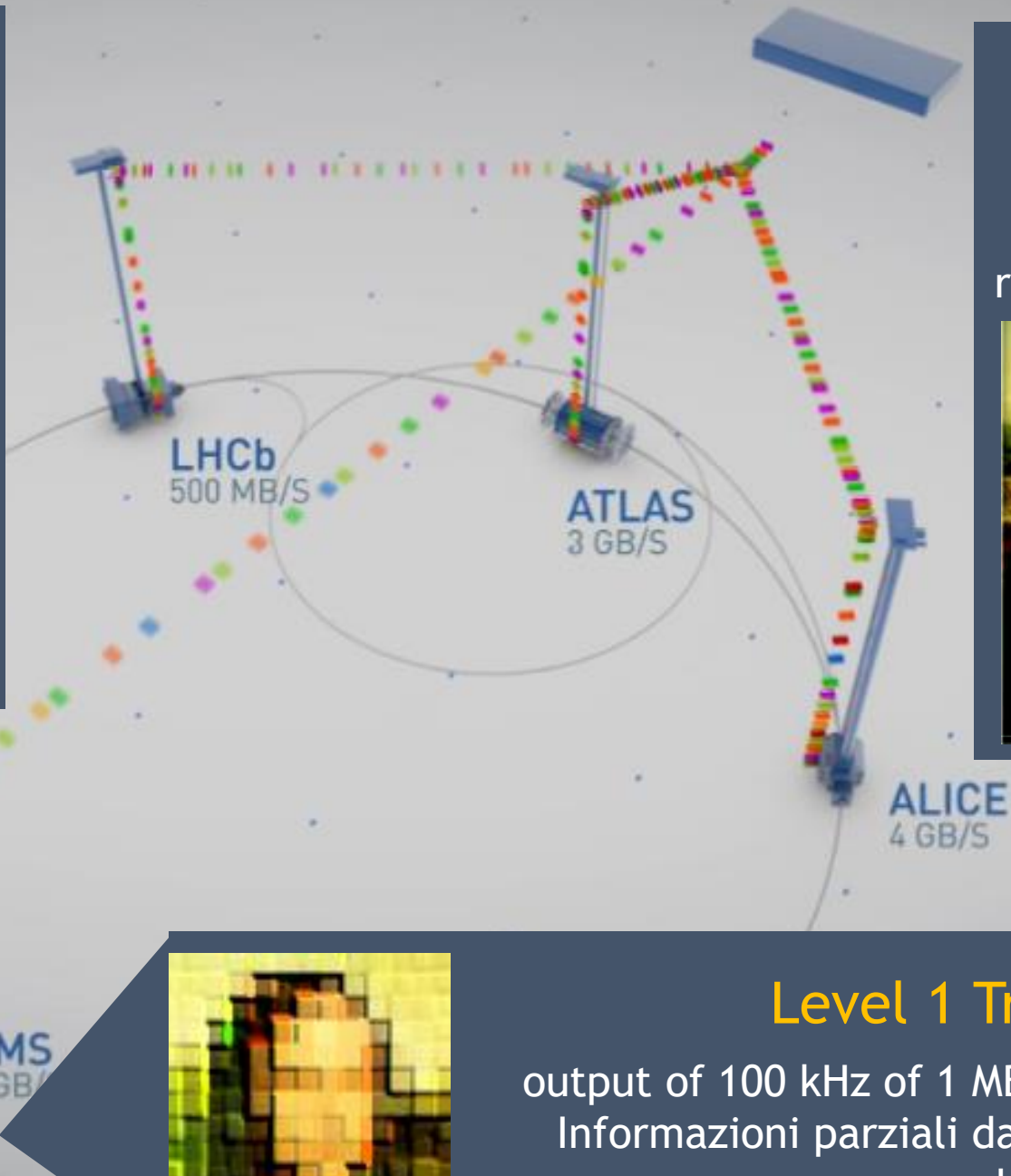


La ricostruzione di un intero evento nel tracciatore impiega **5** secondi



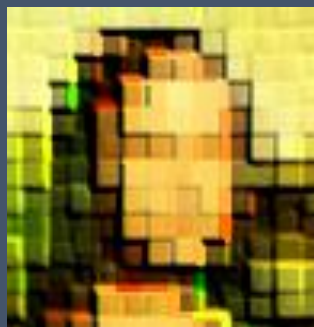
High level trigger farm

600 Hz of 1 MB events



CERN
data center

Full event
reconstruction



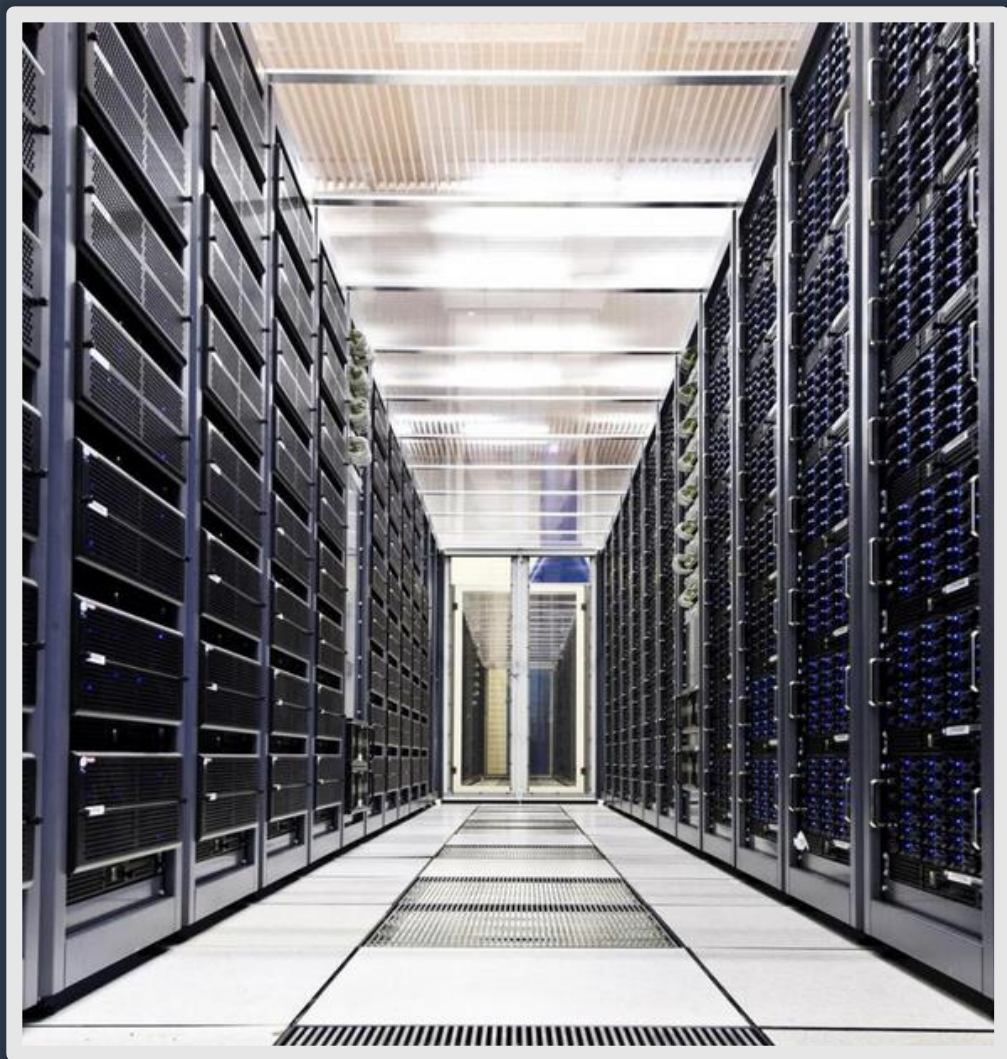
Level 1 Trigger

output of 100 kHz of 1 MB events
Informazioni parziali da muoni,
calorimetri

CMS data center

Circa 2 PB di dati all'anno

73 000 processori



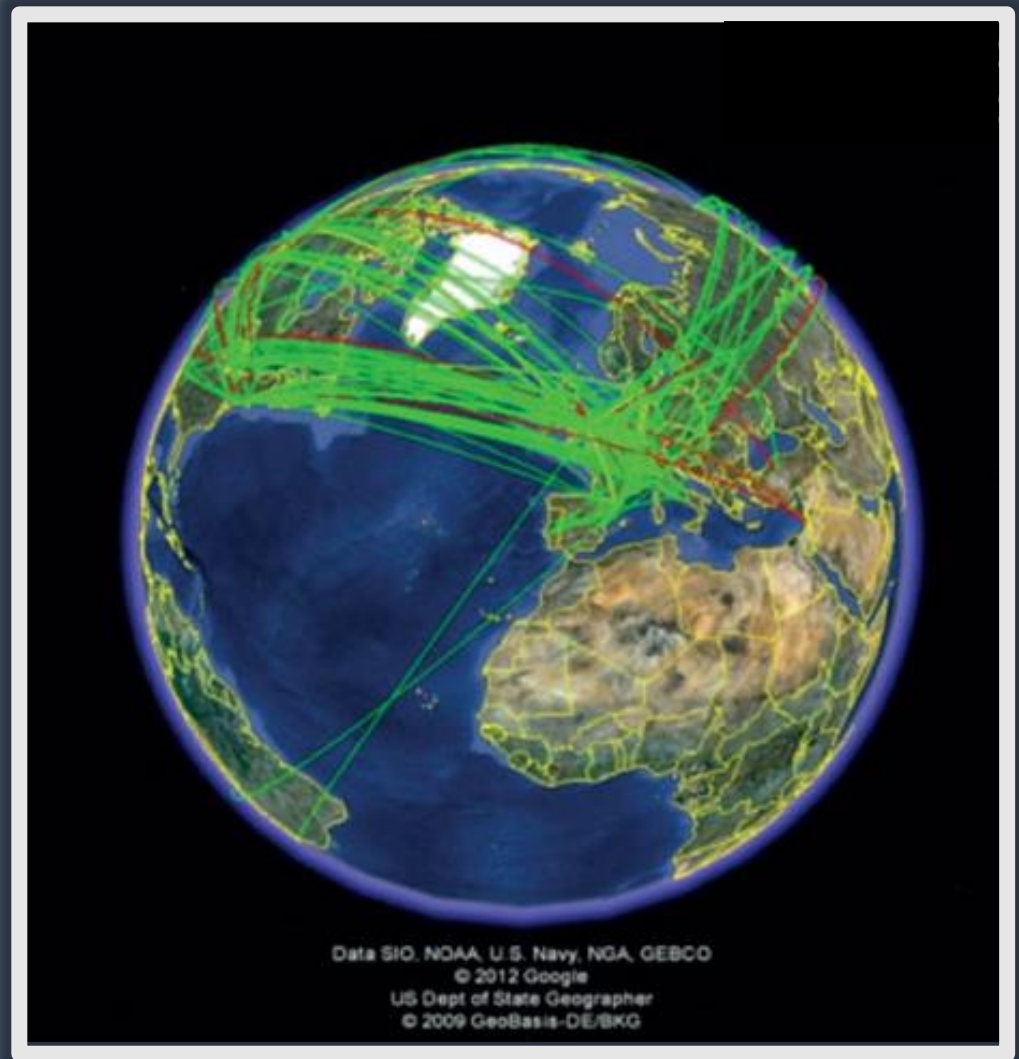
Grid

CMS gathers 4000 people from
40 Countries

1,5 millions jobs run every
day 2013

180 PB disk storage available
worldwide (2013)

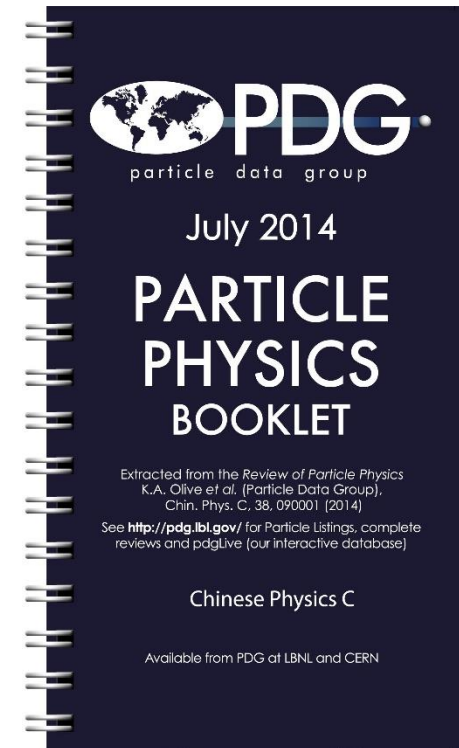
It paved the way to a wider
use of grid computing in
science (climatology, biology)



What are we looking for?

Most of these particles are unstable. Many decay channels are possible

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H Higgs boson
QUARKS	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
LEPTONS	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	$< 15.6 \text{ MeV}/c^2$	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	
	0	0	0	+1	
	1/2	1/2	1/2	1	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	
				GAUGE BOSONS	



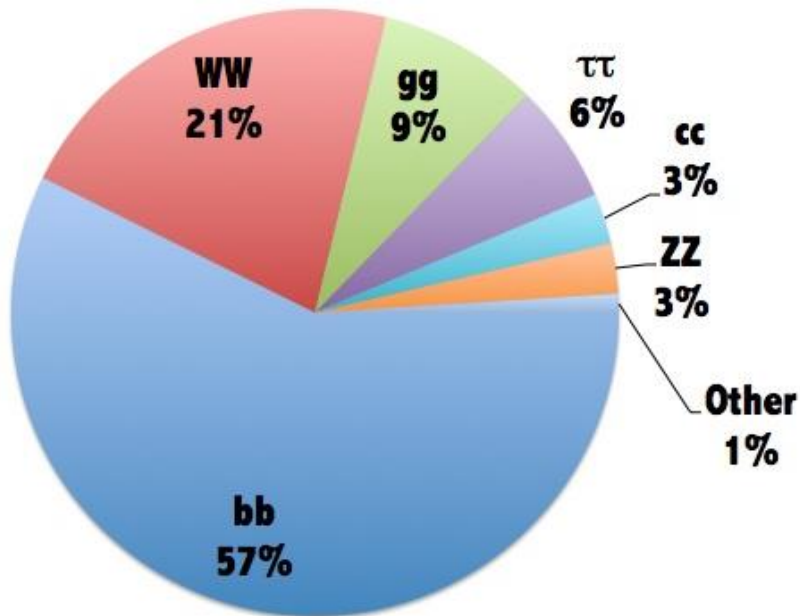
<http://pdg.lbl.gov/>

What are we looking for?

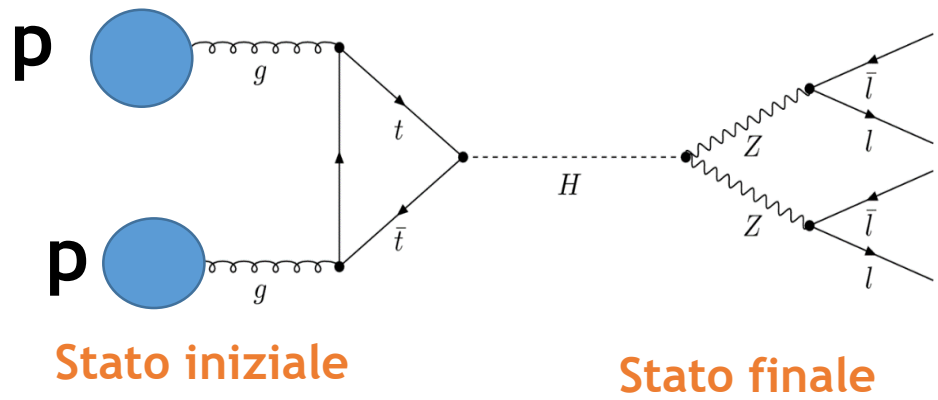


Raro ed instabile.

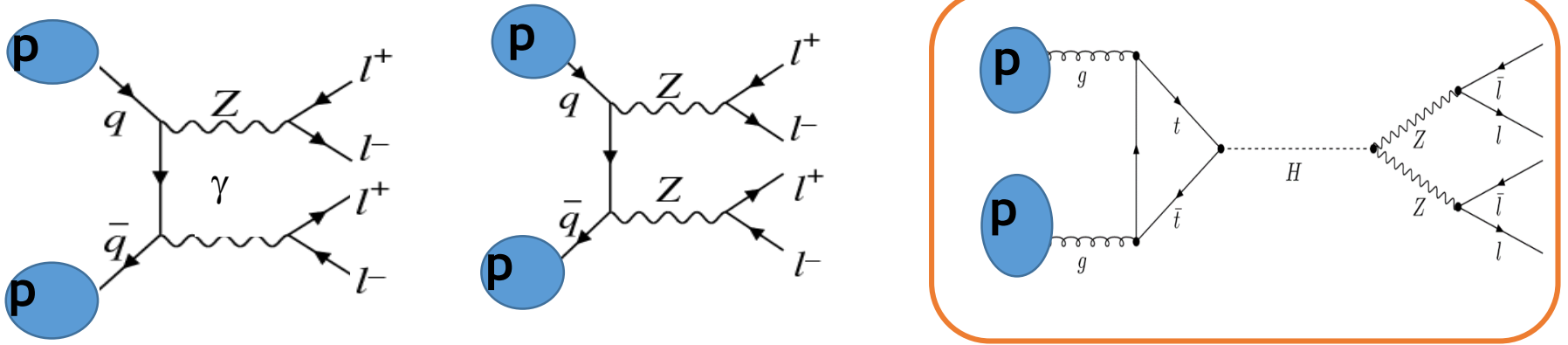
- Viene prodotto in **una** collisione su **10 miliardi**
- Decade in **10⁻²² secondi**
- Possiamo osservare soltanto le particelle figlie



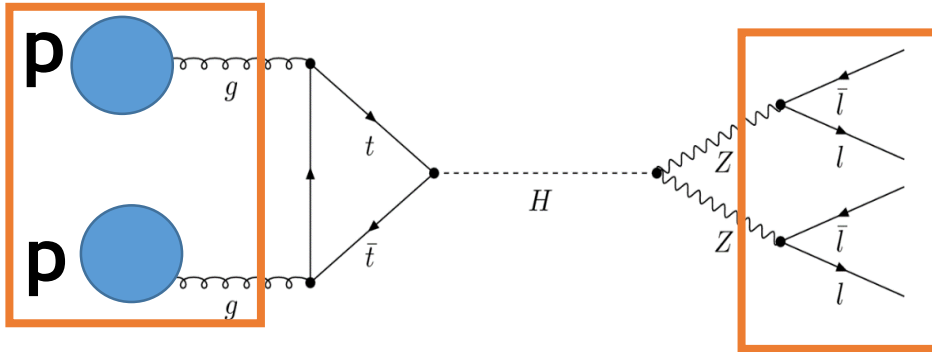
Altri processi possono mimare gli stessi stati finali



Il problema del fondo

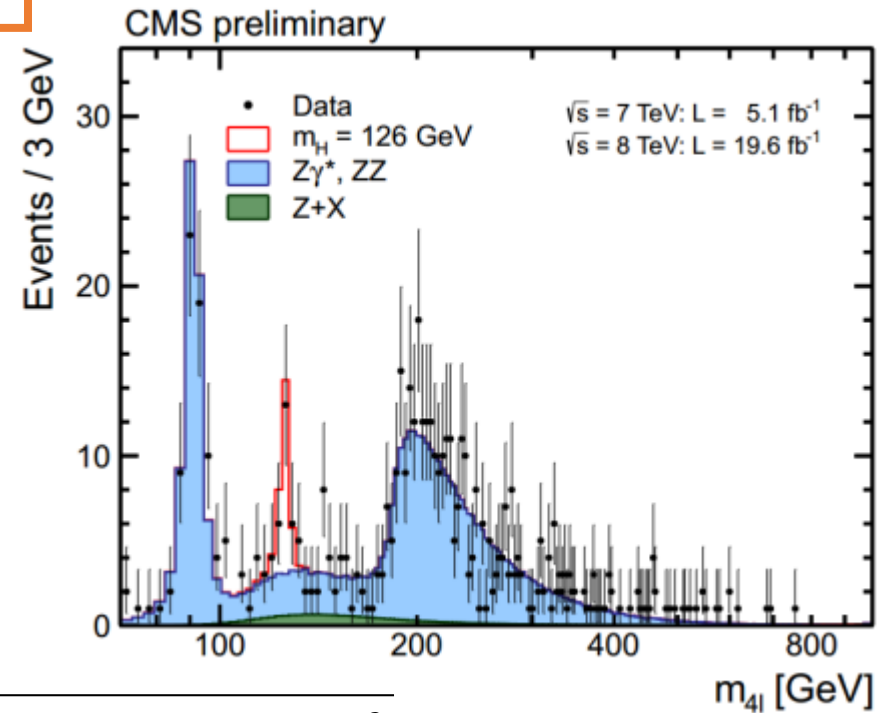
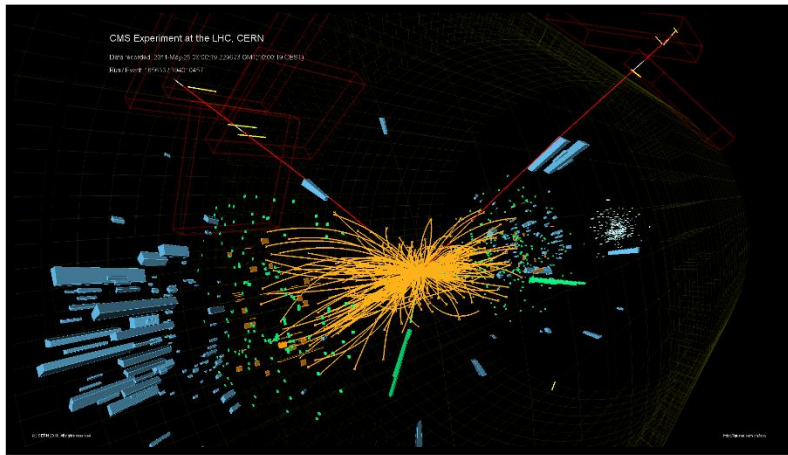


Looking for peaks



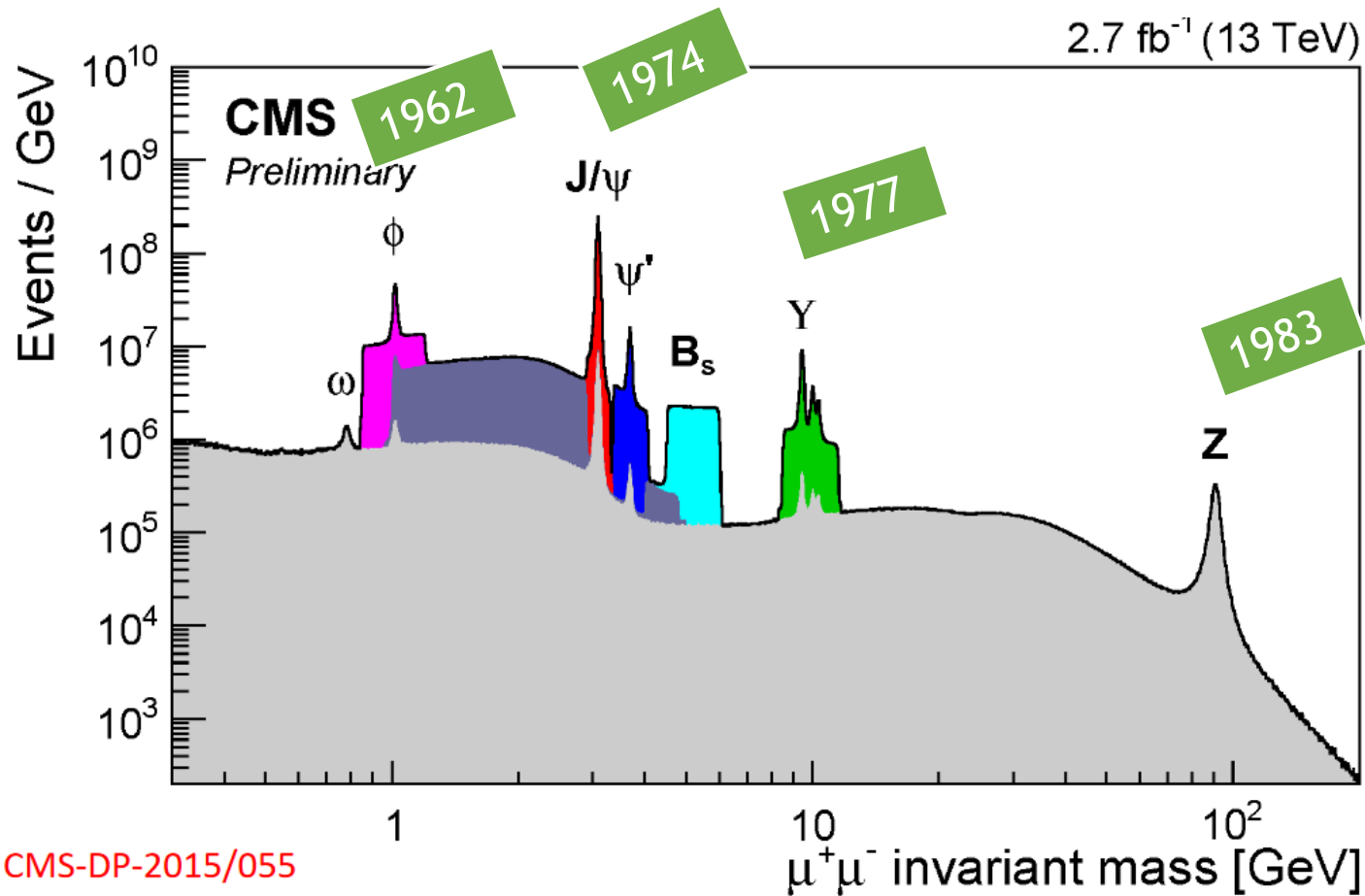
Stato iniziale

Stato finale

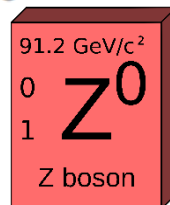
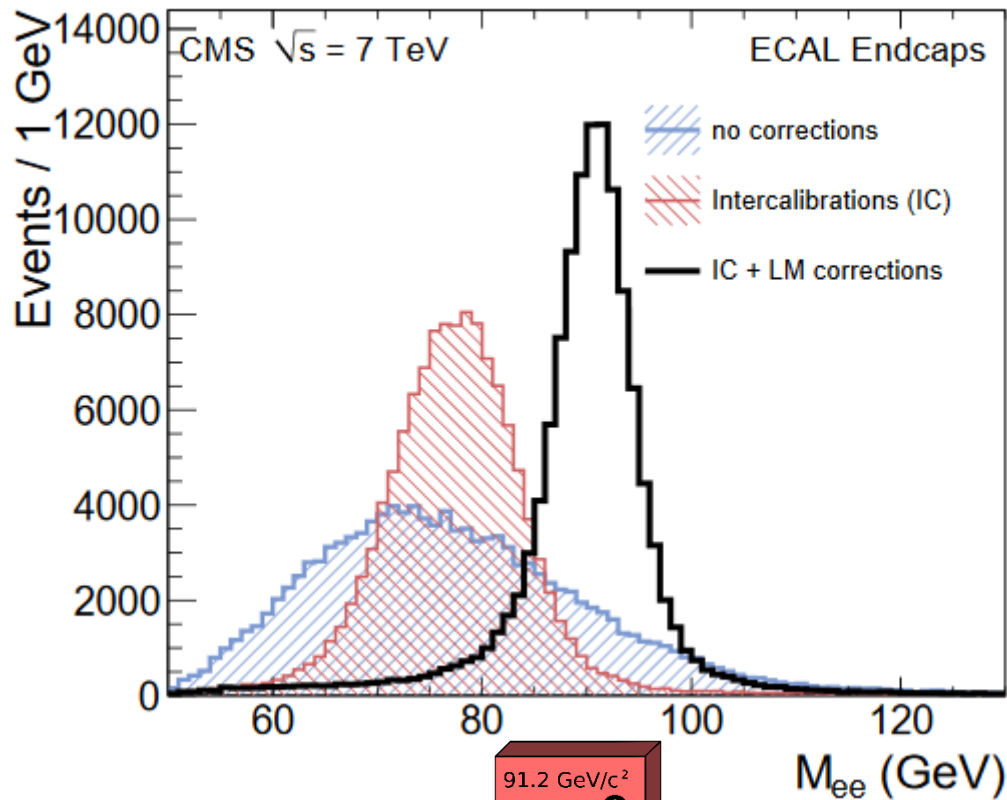
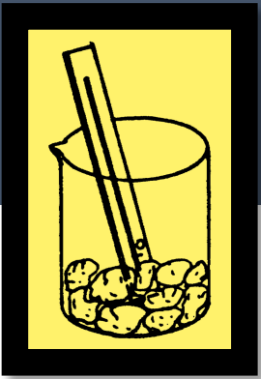


$$M = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + E_4)^2 - (\vec{p}_1 + \vec{p}_2 + \vec{p}_3 + \vec{p}_4)^2}$$

Looking for peaks

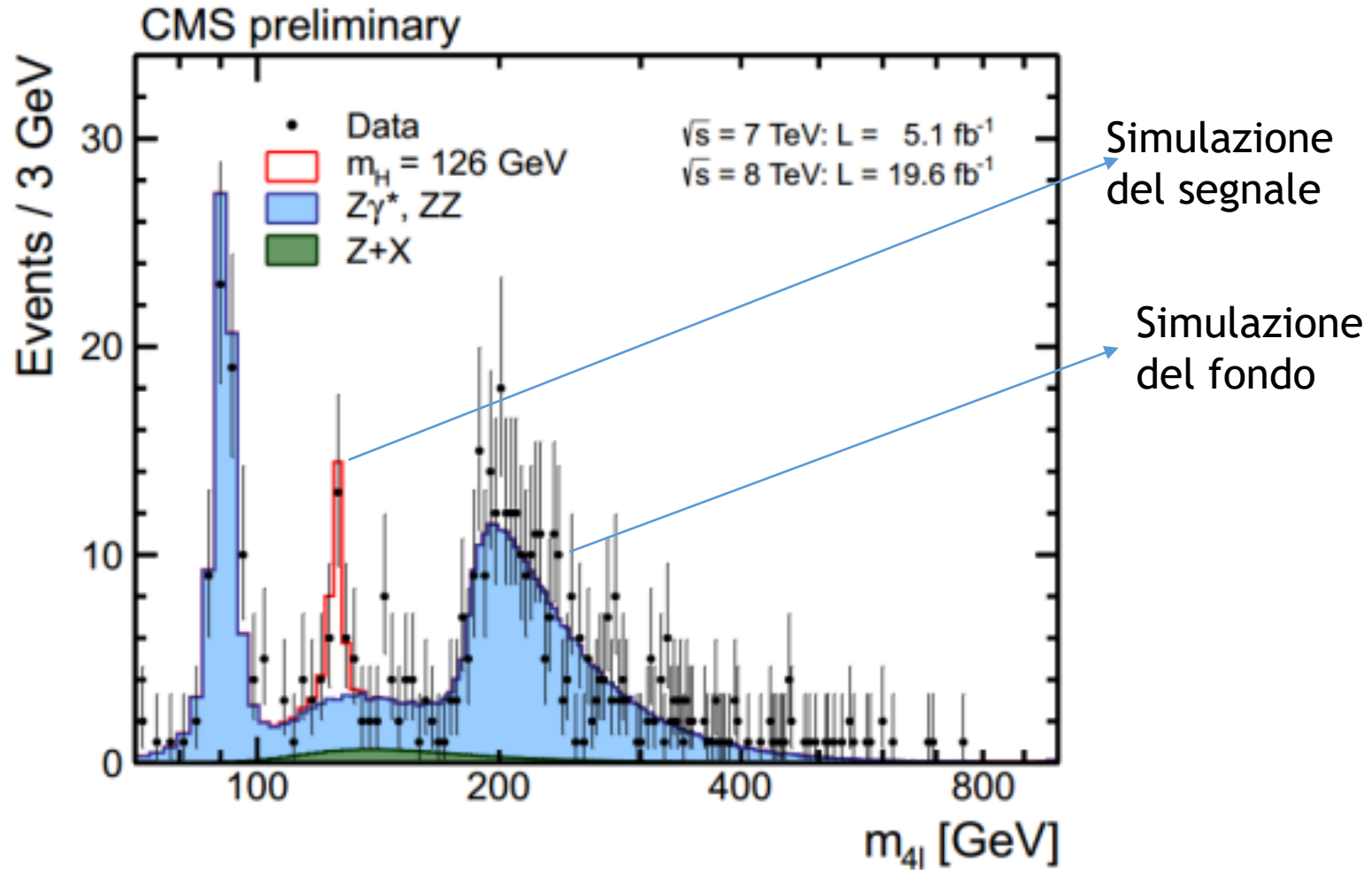


Calibrazione in energia

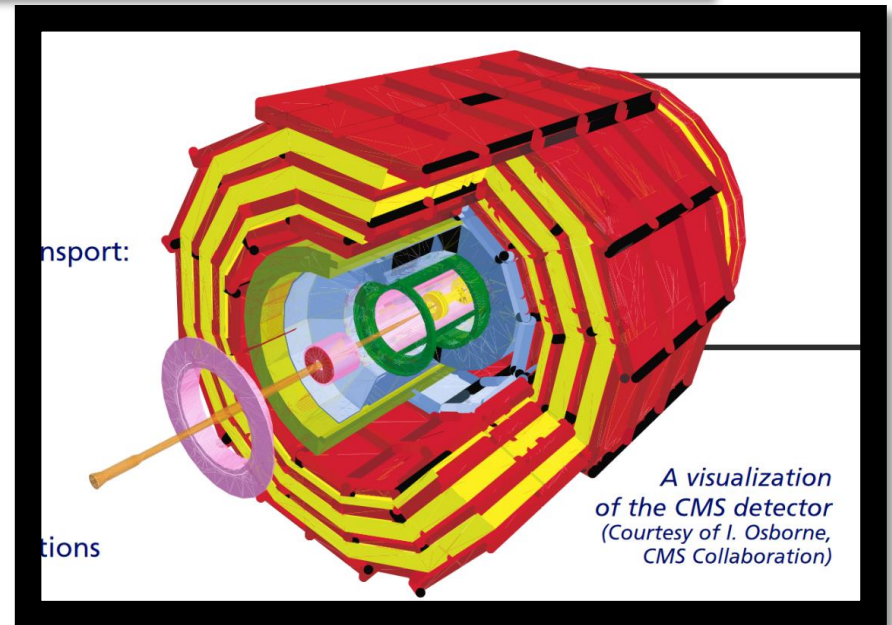
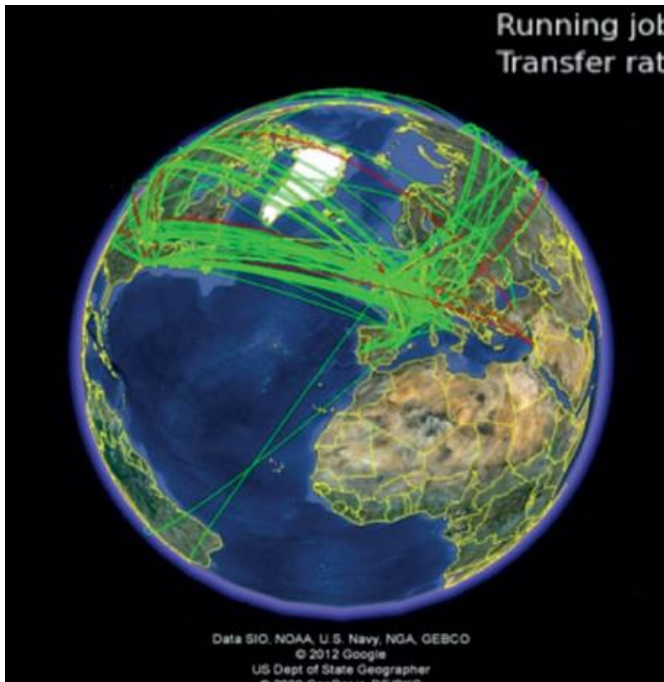
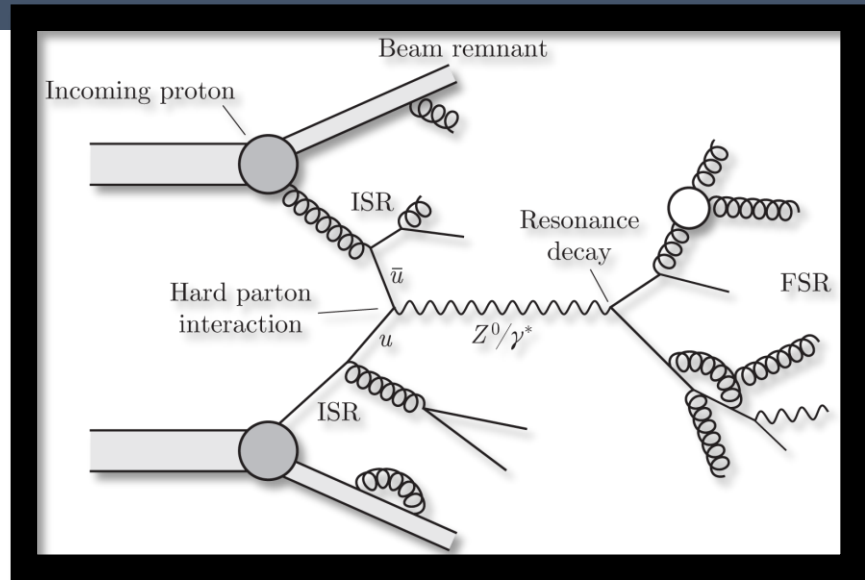
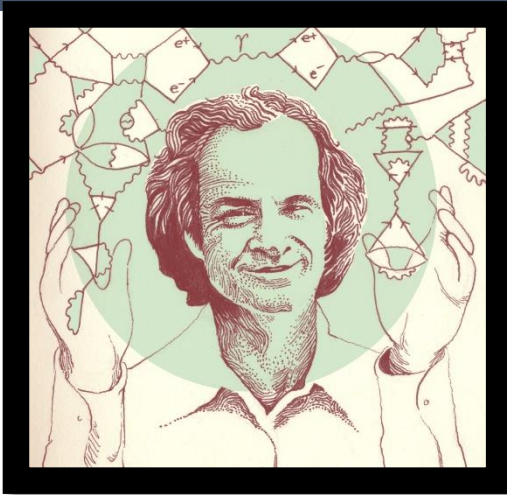


Il decadimento del bosone Z in una coppia di elettroni viene utilizzato per la calibrazione in energia del calorimetro elettromagnetico

Simulazione del background

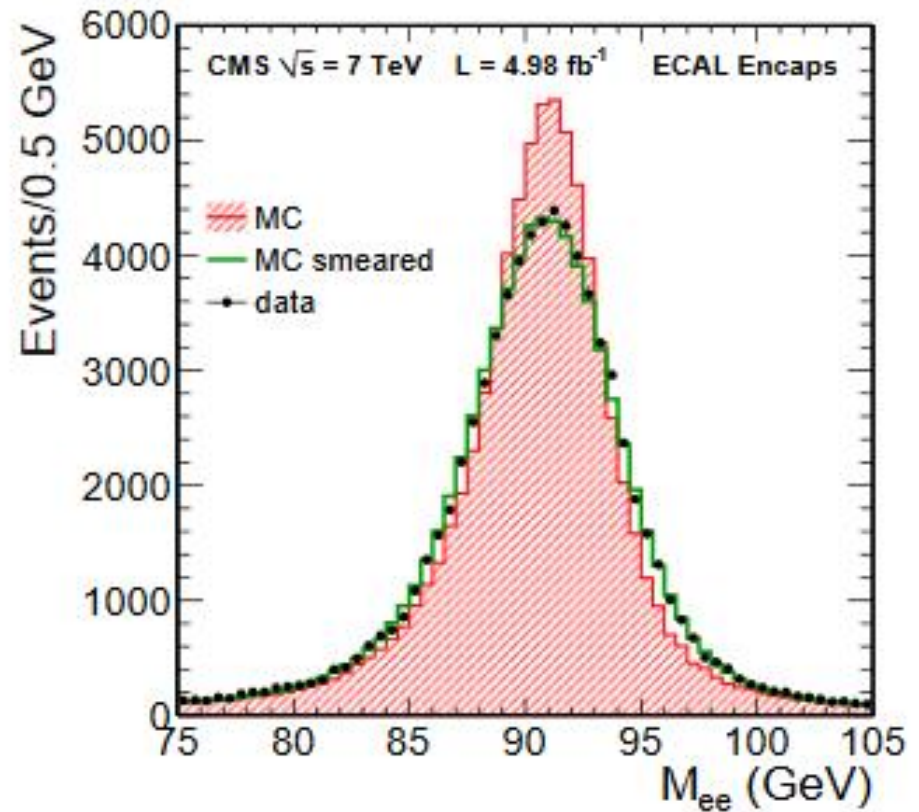


Simulazione Monte Carlo



Correcting for very tiny effects

Nella simulazione la risoluzione in energia dei calorimetri non è riprodotta fedelmente



CMS was built to

Find the
Higgs
boson

Test the
Standard
Model

Probe new
Physics models
(supersymmetry)

Find
something
unexpected

LHC



LHC

2011 2012 2013 2014 2015 2016 2017 2018 2019 2020 2021 2022 2023 2024 2025 20262037

Run 1
7-8 TeV

Long Shutdown 1

Run 2
13-14 TeV

Long Shutdown 2

Run 3
14 TeV

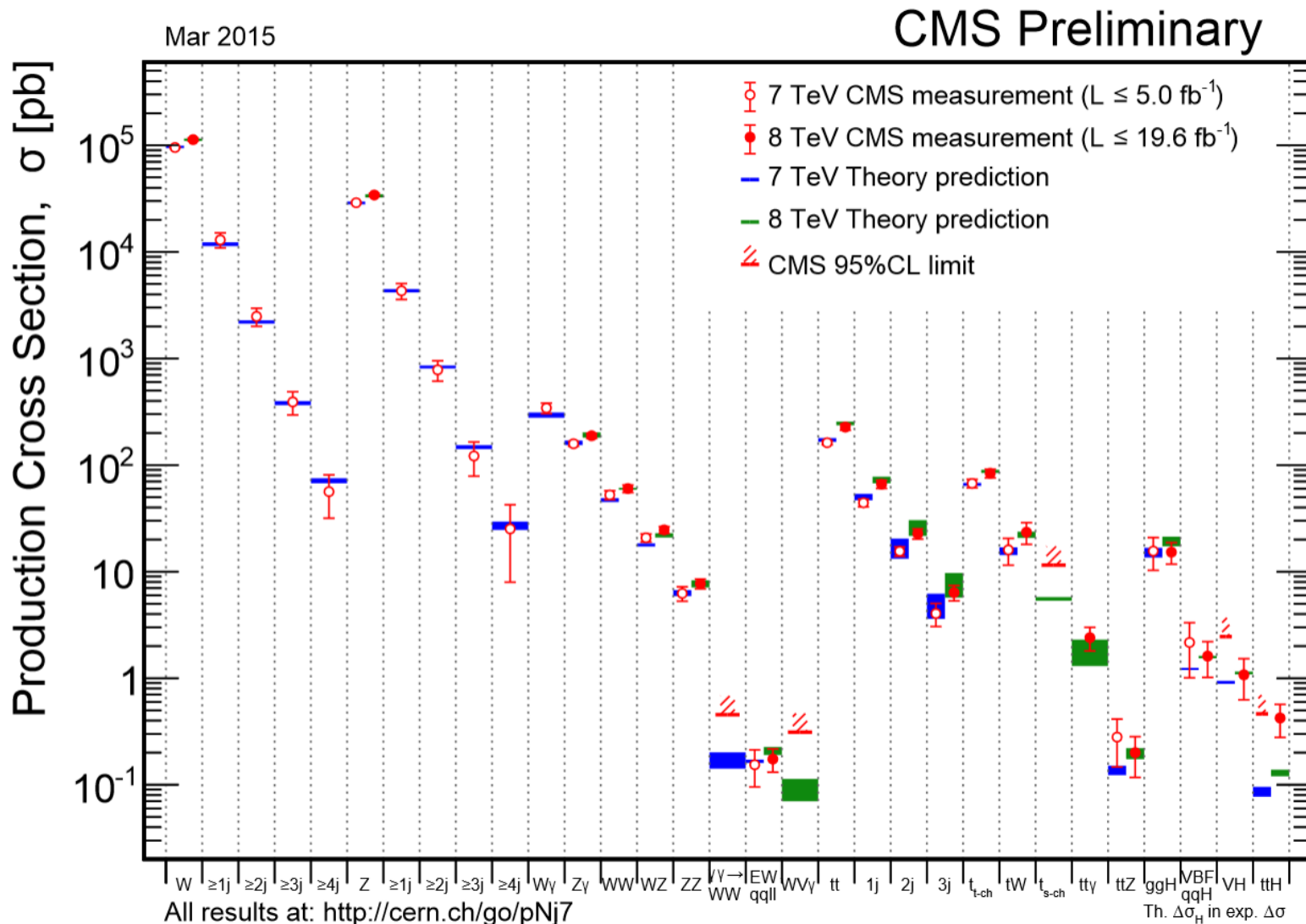
Long Shutdown 3
High Luminosity LHC

Run 4
14 TeV

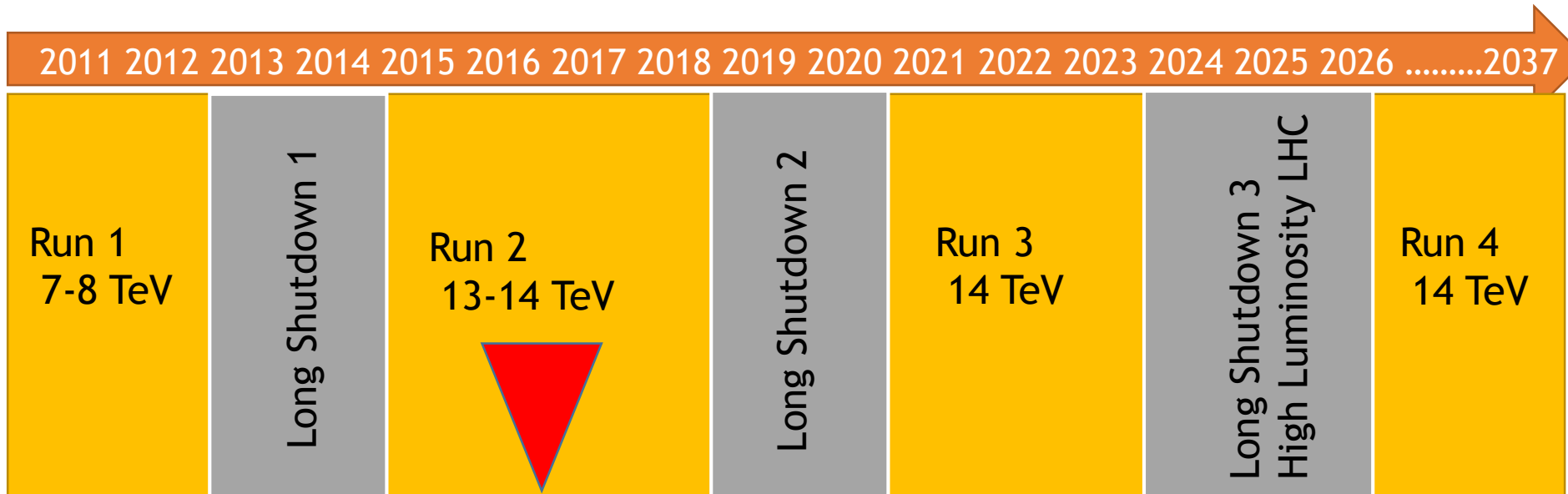


Run 1 Results - Standard Model

Probabilità



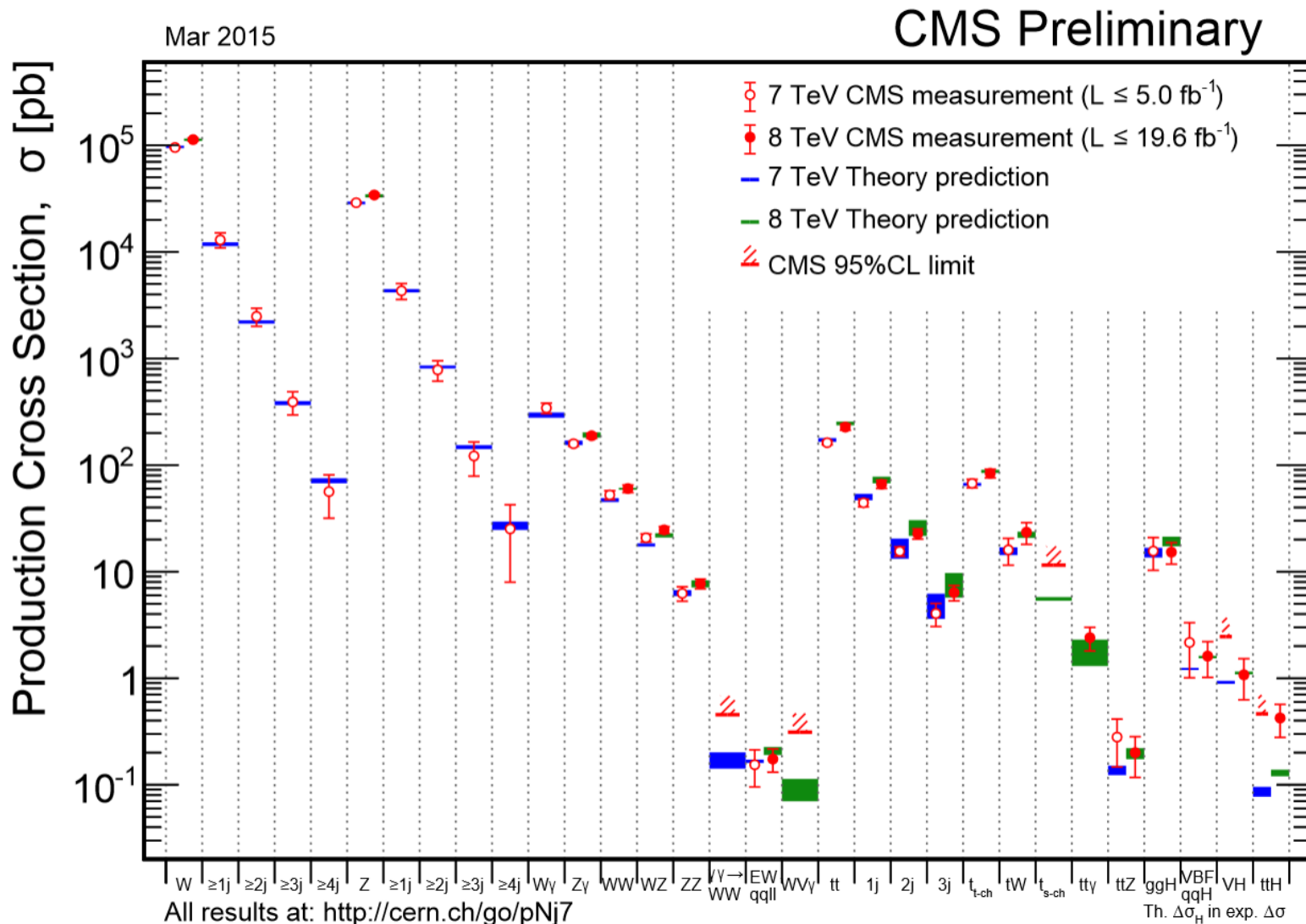
LHC -schedula



*Run2 - Energia 13 -14 TeV,
Statistica 5 volte superiore
rispetto a quella del Run1*

Run 1 Results - Standard Model

Probabilità



Processo

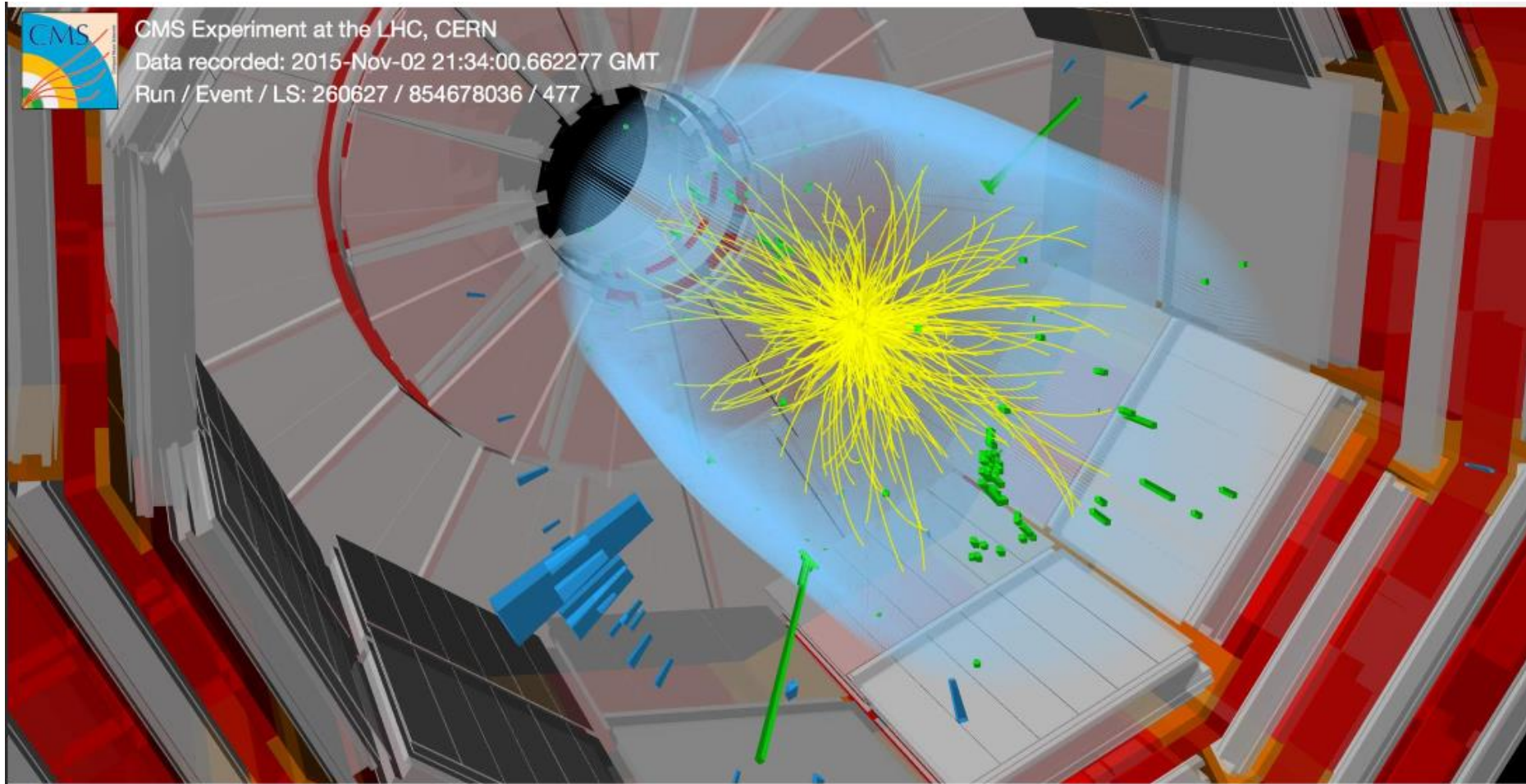
Interesting enough...



CMS Experiment at the LHC, CERN

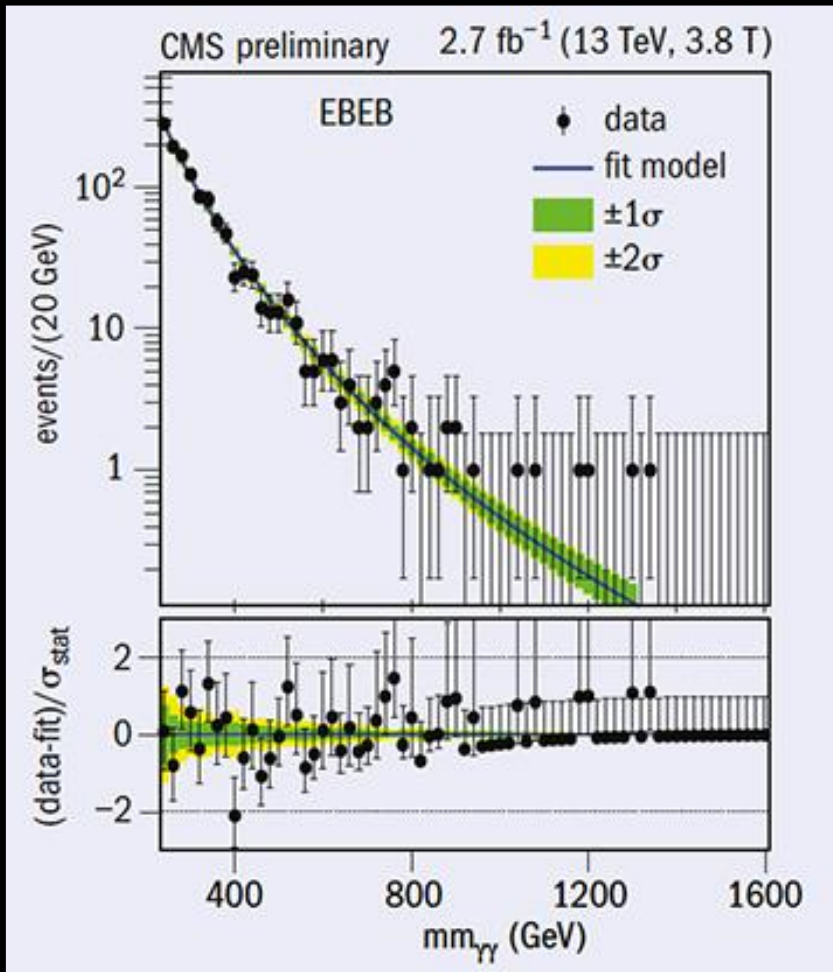
Data recorded: 2015-Nov-02 21:34:00.662277 GMT

Run / Event / LS: 260627 / 854678036 / 477

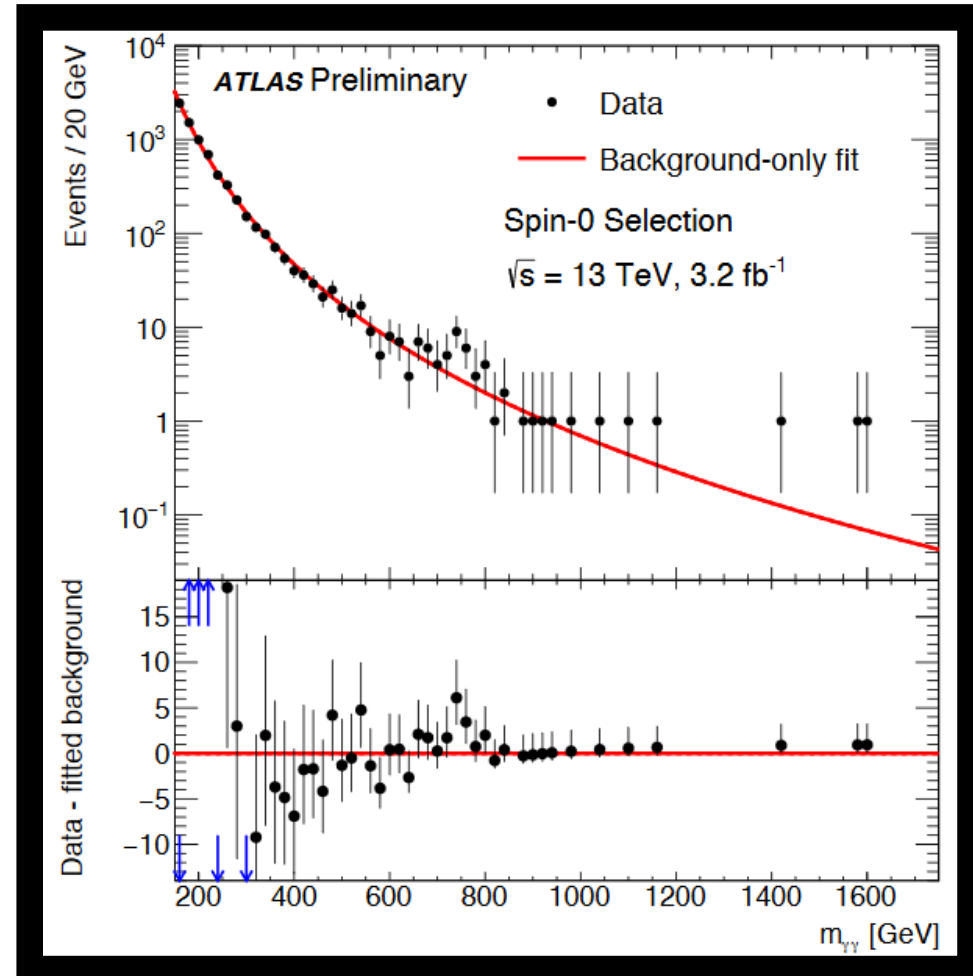


Diphoton event with $m(\gamma\gamma) = 745$ GeV

Interesting enough...

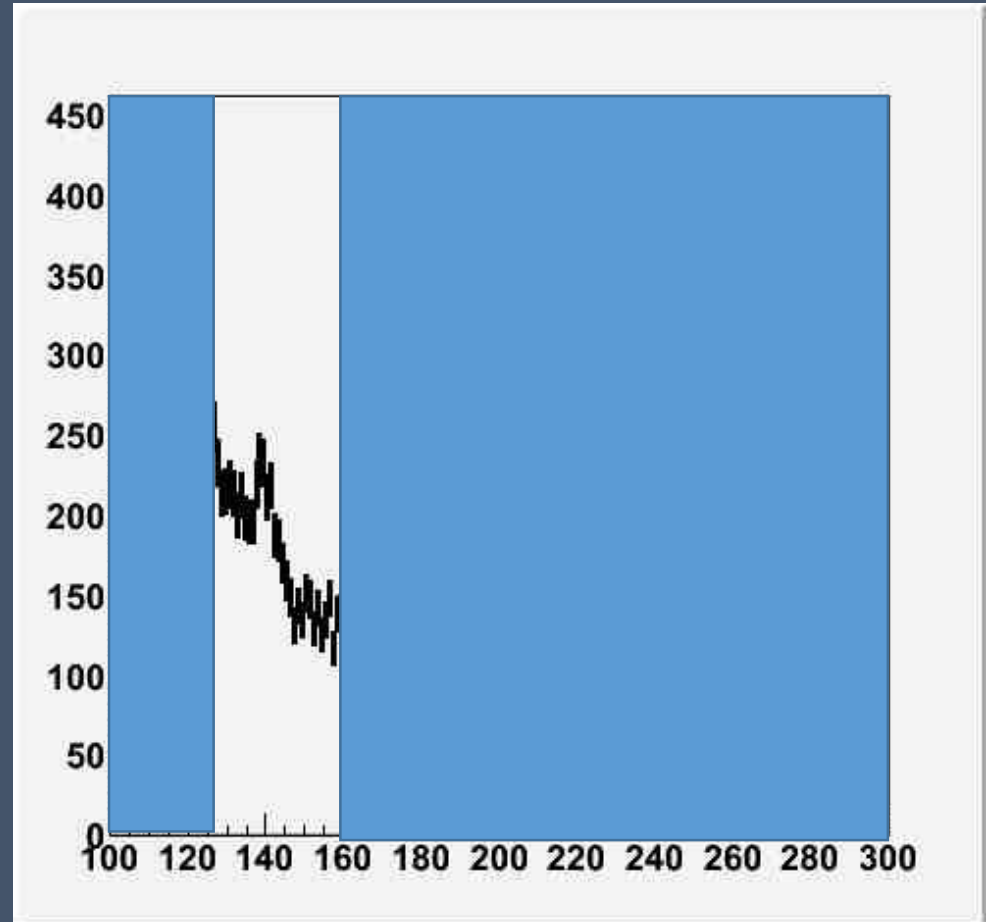


2.9 - 3.4 sigma



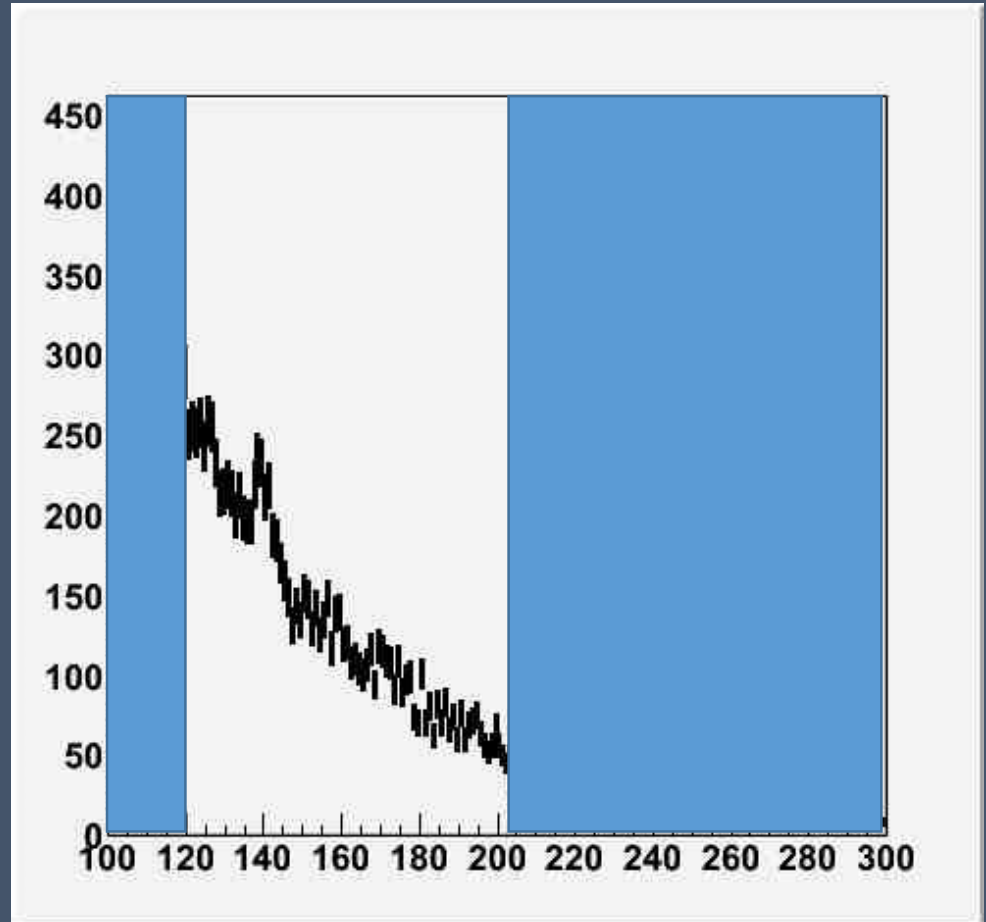
3.6 - 3.9 sigma

Look Elsewhere effect



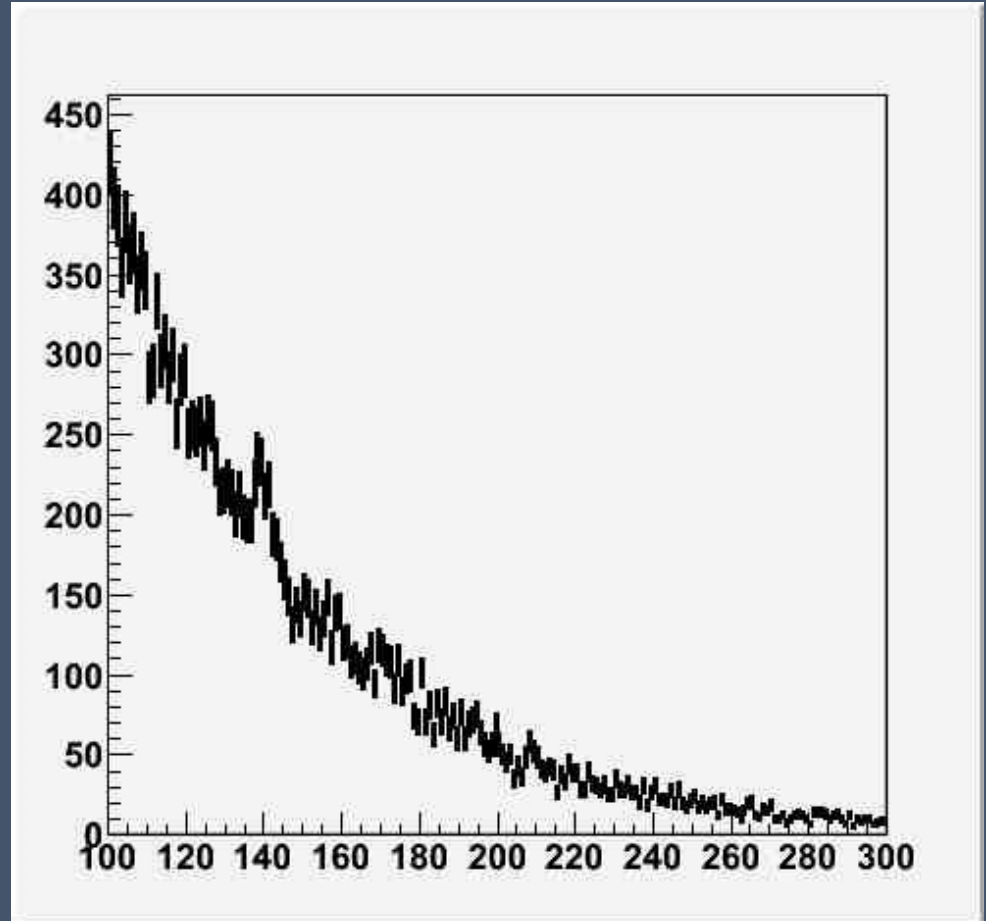
Is there a significant bump in this mass spectrum?

Look Elsewhere effect



Is there a significant bump in this mass spectrum?

Look Elsewhere effect



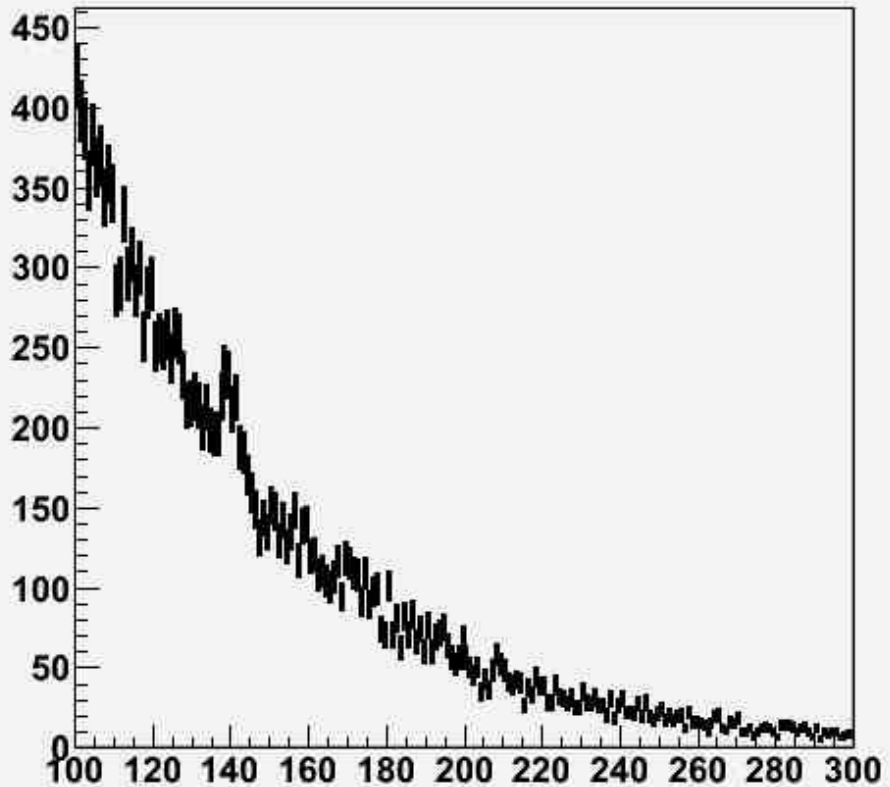
Is there a significant bump in this mass spectrum?

Look Elsewhere effect

Più ampio è il range di massa in cui cerco, più aumenta la probabilità di avere un picco dovuto a fluttuazioni statistiche

Atlas 1.8 - 2 sigma

CMS 1 - 1.6 sigma



Unexpected (?) Physics



$$M(H^{\circ}) = \pi \left(\frac{1}{137}\right)^8 \sqrt{\frac{hc}{G}}$$
$$3987^{12} + 4365^{12} = 4472^{12}$$

$$\Omega(t_0) > 1$$



