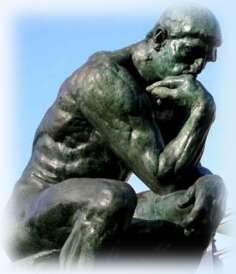
Particelle elementari e fisica delle alte energie

Fabrizio Ferro
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

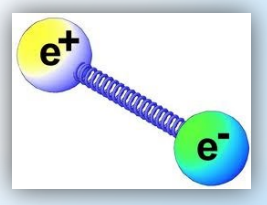
Domande fondamentali

Fin dall'antichità l'uomo si è posto alcune domande fondamentali:



- Quali sono i costituenti fondamentali della materia distribuita nell'universo?

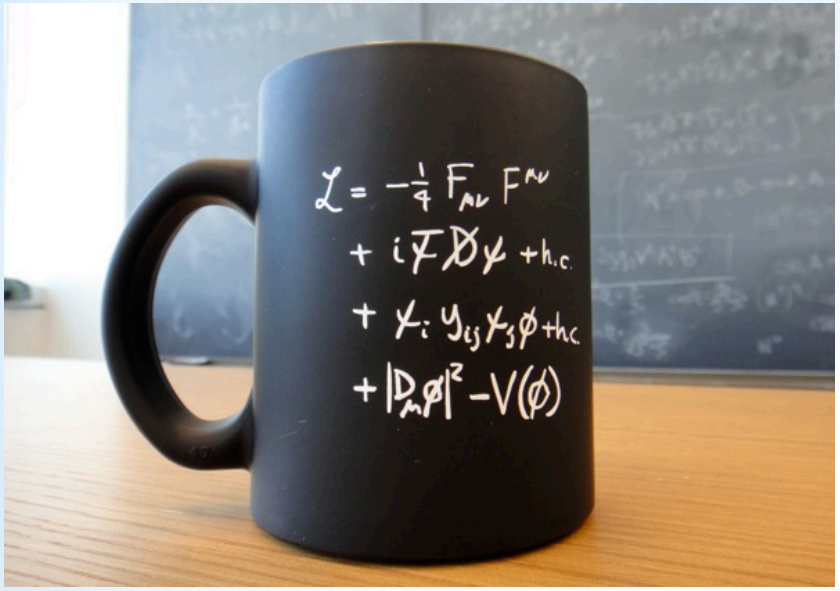
- Quali sono le forze fondamentali che agiscono tra i costituenti elementari, li legano insieme a vari livelli fino a costruire la materia così come ci appare?

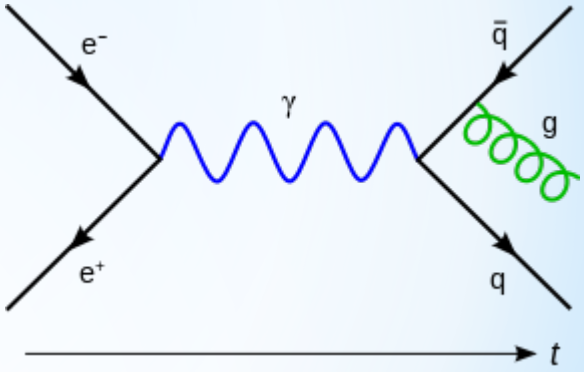


- Come ha avuto origine l'universo e come si è evoluto fino allo stato attuale?

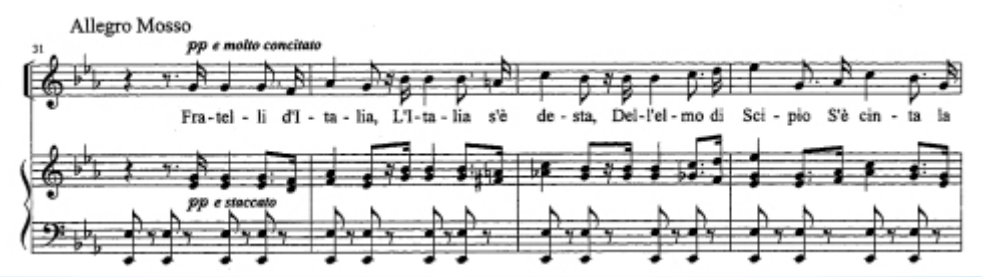
La matematica

La matematica è il linguaggio con cui rappresentiamo la natura





Un po' come uno spartito rappresenta la musica

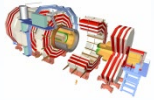


Fisica delle particelle

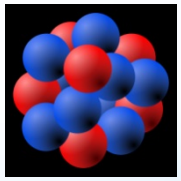
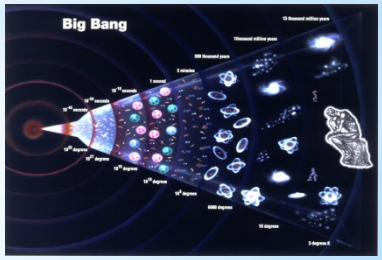
- Cos'è?
  - è la scienza che ambisce a descrivere e spiegare gli elementi costitutivi della materia e le loro interazioni
- Perché?
  - usando un approccio *riduzionista*, conoscendo le singole parti si può spiegare il funzionamento di un sistema complesso

- Ok... ma... PERCHÉ?
  - per capire **di cosa siamo fatti** noi e tutto ciò che ci circonda
  - per risalire indietro nel tempo (quasi) sino all'istante in cui tutto ha avuto inizio
  - per porre le basi dello sviluppo tecnologico
- Come?
  - con un virtuoso gioco di scambio tra

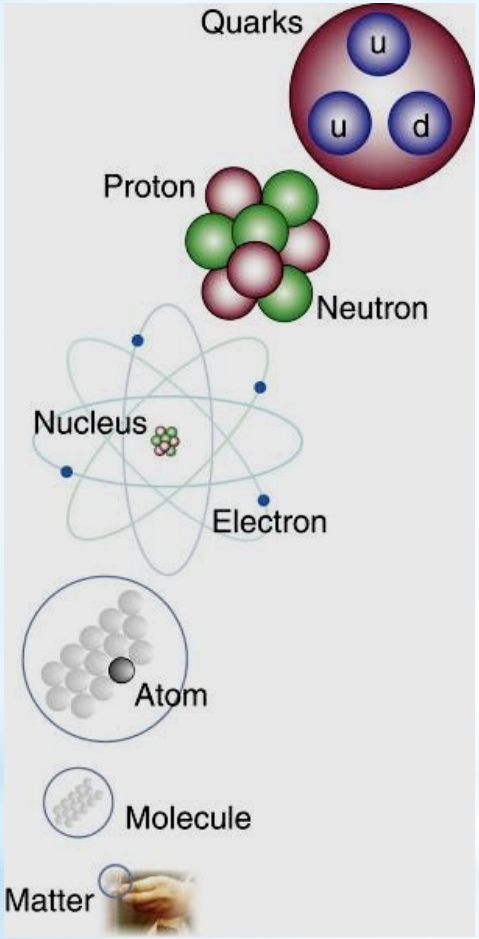
TEORIA – ESPERIMENTI - TECNOLOGIA

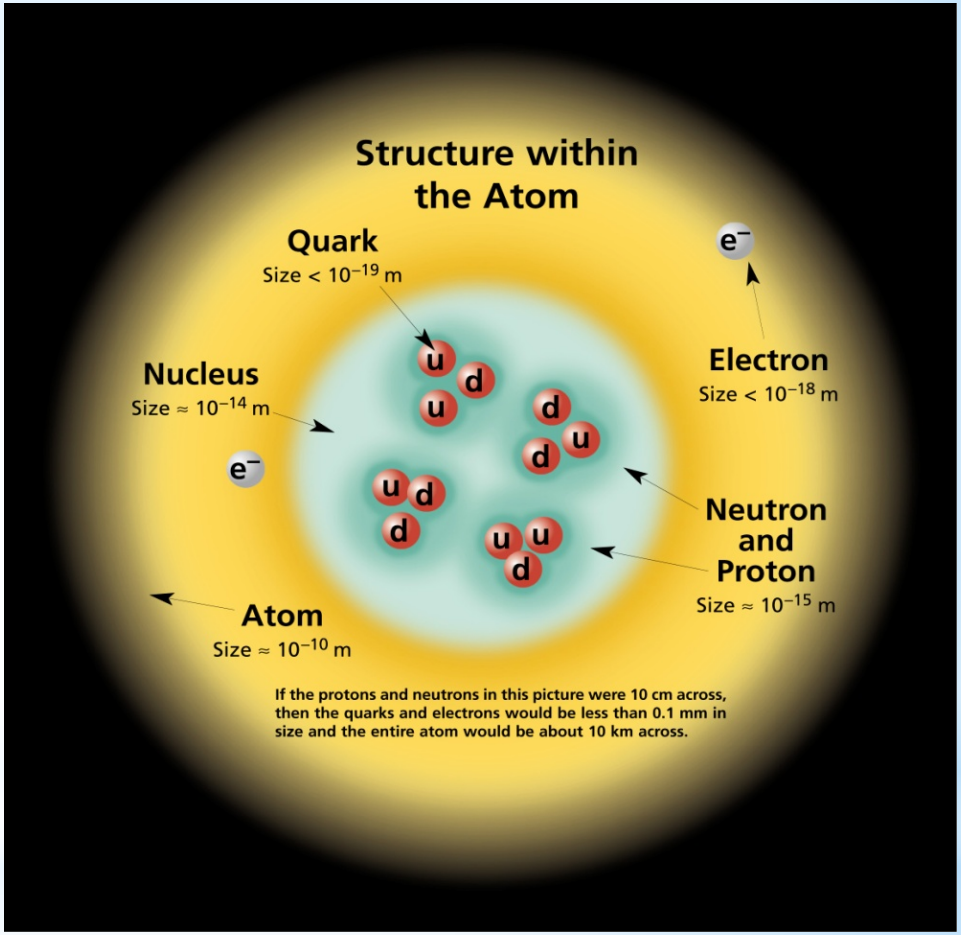


La teoria oggi

- Modello Standard delle particelle elementari
  - Elettromagnetismo
  - Forza nucleare debole
  - Forza nucleare forte 
- Modello cosmologico del Big Bang 

Di cos'è fatta la materia?





Noi siamo fatti di elettroni, quark up e quark down (contenuti in protoni e neutroni)

Particelle stabili e instabili

- Le sole particelle stabili (note) sono:
  - Elettroni
  - Protoni
  - Neutroni (nel nucleo)
  - Neutrini
- Esistono molte particelle instabili che decadono spontaneamente, si trasformano cioè in tempi più o meno brevi in particelle stabili
- Le particelle instabili vengono prodotte negli urti tra particelle

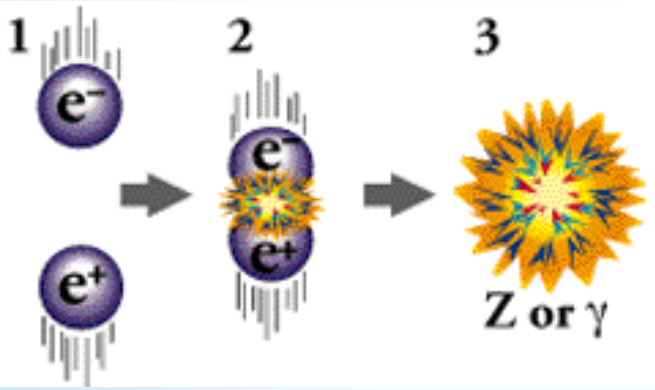
L'anti-materia

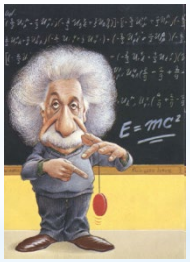
In esperimenti di laboratorio si è scoperto che esistono anche le particelle elementari dell'antimateria:

antiquark e antileptoni

Antiquark e antileptoni hanno la stessa massa dei corrispondenti quark e leptoni ma hanno carica elettrica di segno opposto.

Quando particella e antiparticella interagiscono si annichilano: le loro masse scompaiono e vengono trasformate in radiazione





$E = mc^2$

Ma allora … … …

Il Big Bang

Durante il big bang, cioè il momento iniziale del nostro universo, si è creata tanta materia quanta anti-materia, quindi abbiamo un ovvio problema:

Dove è finita l'anti-materia?

NON LO SAPPIAMO!

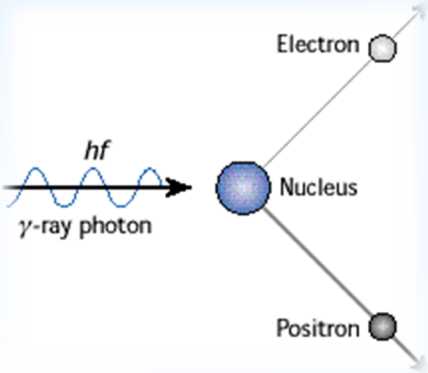
Pero' sappiamo che:
materia ed anti-materia non sono esattamente uguali: se lo fossero sarebbero scomparse entrambe nello stesso modo ed adesso ci sarebbe solo energia (questo effetto si chiama "CP violation", è una violazione di simmetria)

Siamo qui grazie ad una "imperfezione" della Natura

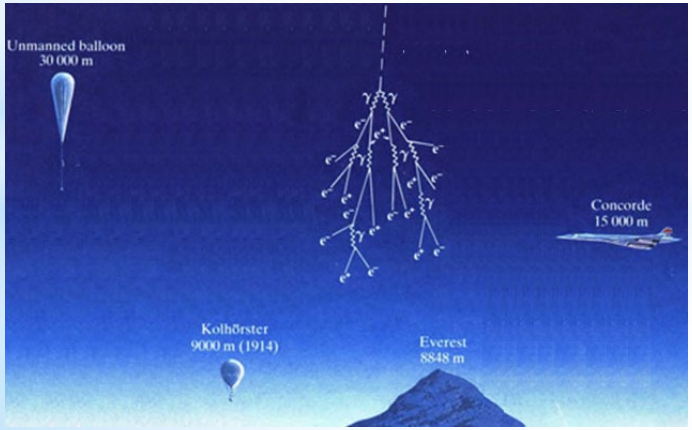
Creazione di materia

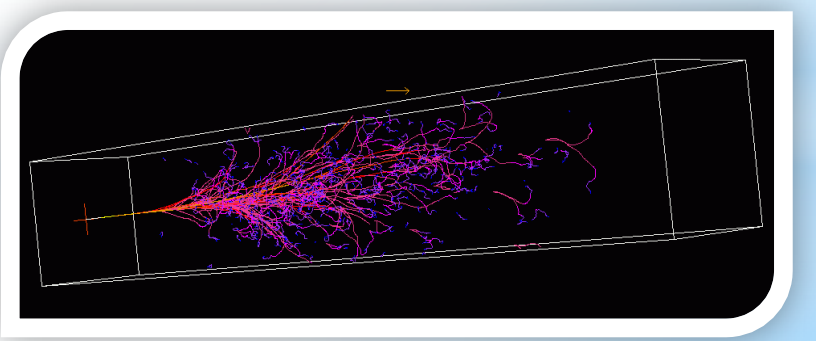
Produzione di coppie particella – anti-particella

$$\gamma \rightarrow e^{+} + e^{-}$$



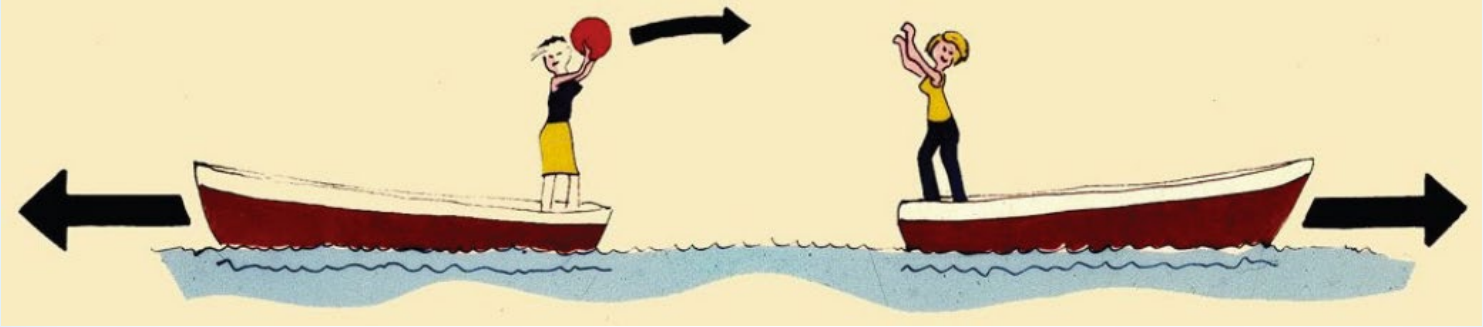
Succede in continuazione sopra le nostre teste
I raggi cosmici producono nell'atmosfera sciami elettromagnetici



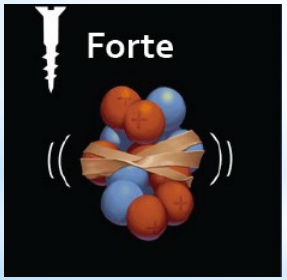


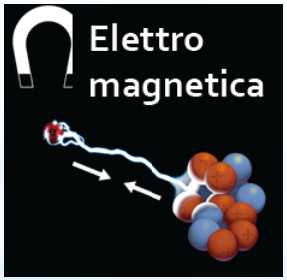
Le interazioni

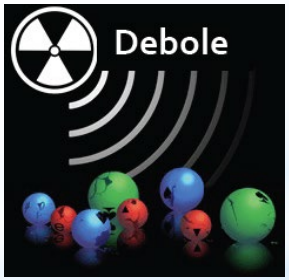
Le interazioni tra particelle sono mediate da altre particelle



Le 4 forze fondamentali







Mediatore

gluone

fotone

W e Z

gravitone (?)

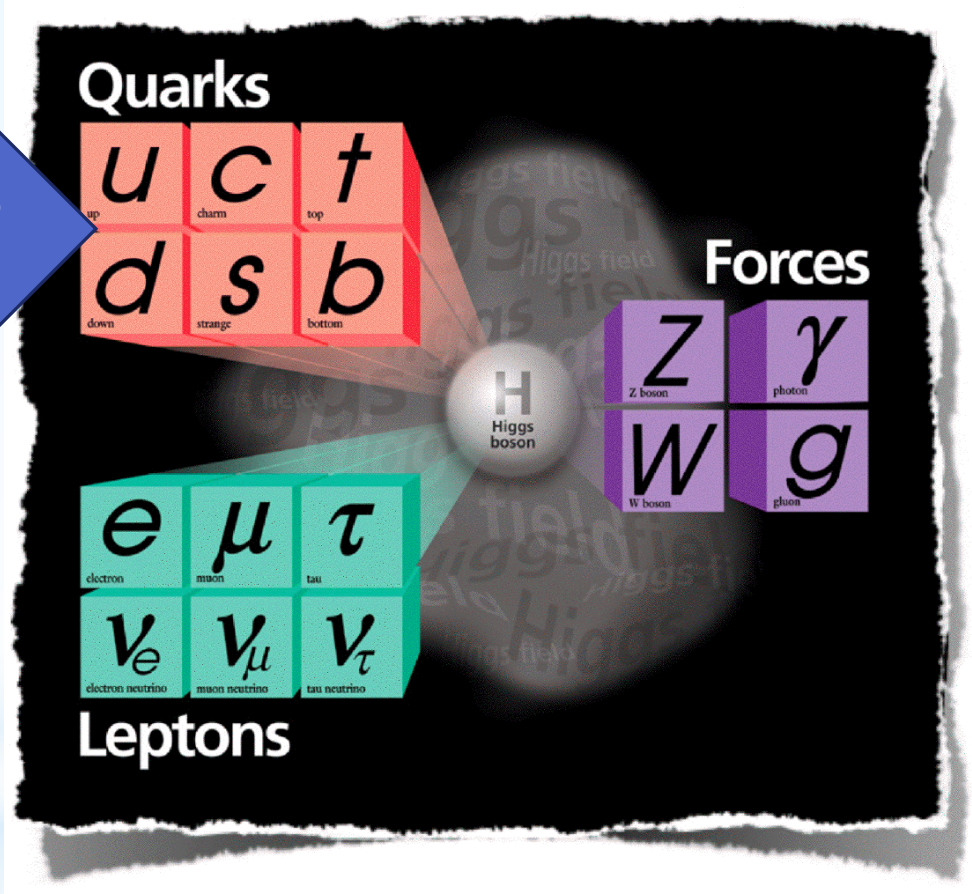
Le particelle del Modello Standard

La bellezza delle simmetrie

3 famiglie di quarks e 3 famiglie di leptoni

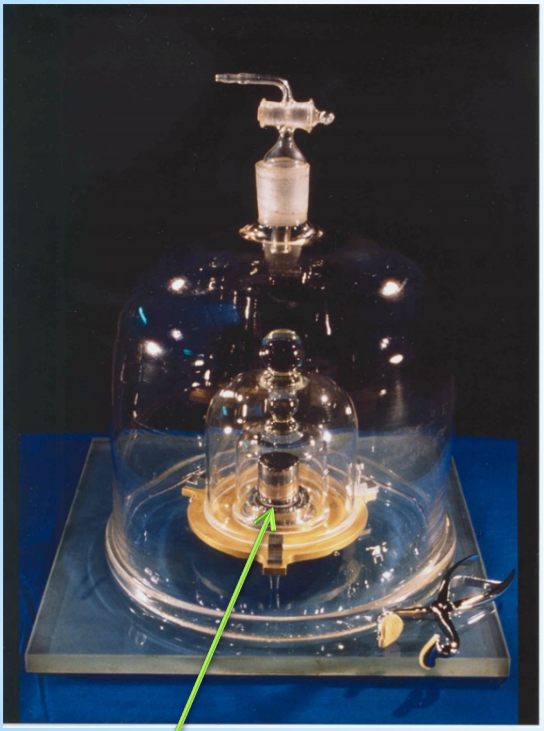
Con solo 2 famiglie non ci sarebbe violazione di CP: non saremmo qui.

C'e' una quarta famiglia?



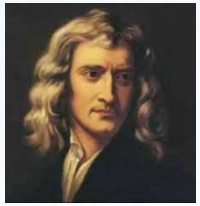
I quark e i leptoni sono le particelle elementari della materia che è distribuita nell'Universo

La massa: cos'è?



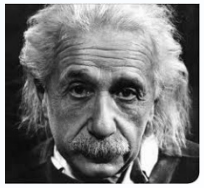
kg campione di Sèvres

La massa è prima di tutto un concetto e in quanto tale si è evoluto nella Storia



Quantità di materia **$F = ma$**

∨

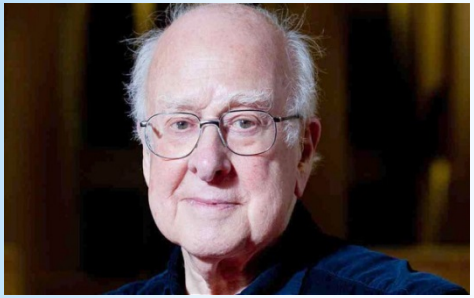


Massa = Energia **$E = mc^2$**

∨

Massa = Energia di una particella a riposo (ferma)

Il bosone di Higgs



Peter Higgs ed altri nel 1964 applicarono al Modello Standard un meccanismo noto come rottura spontanea della simmetria che permettesse di spiegare la massa delle particelle senza *rovinare* le simmetrie presenti nella teoria

Immaginate di trovarvi persi nel deserto. Intorno a voi è tutto identico, tutto perfettamente simmetrico.
Vi sedete ad aspettare l'inevitabile?
No, cominciate a camminare in una direzione!
Il deserto è sempre lo stesso, ma voi avete rotto la simmetria scegliendo vostra sponte una direzione!

Il bosone di Higgs

Il vuoto è permeato da un campo, detto campo di Higgs con cui le particelle massive interagiscono. Le particelle che interagiscono poco saranno leggere, quelle che interagiscono molto saranno pesanti.

Immaginiamo che il mare sia il campo di Higgs: un aliscafo si muove leggero perché interagisce poco con l'acqua, mentre una chiatta si muove pesantemente perché interagisce molto.

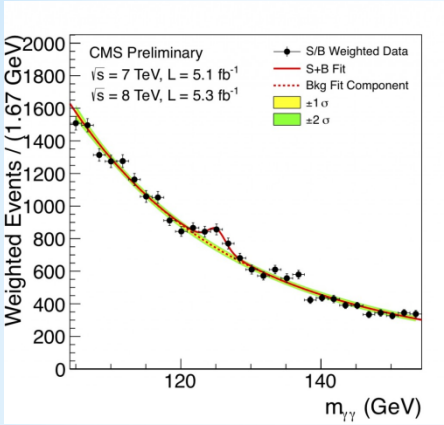
Il bosone di Higgs

Il bosone di Higgs è un'eccitazione del campo di Higgs ed esso stesso interagisce col campo, quindi acquisisce massa!

Il ben più familiare fotone è anche lui un bosone ed è un'eccitazione del campo elettromagnetico (luce, radio, telefonini...)

Se il mare è il campo, l'onda è un po' come se fosse "il bosone del mare".

Il bosone di Higgs



La scoperta:

il 4 luglio 2012 gli esperimenti ATLAS e CMS annunciano al CERN la scoperta di una particella compatibile con il bosone di Higgs

Il nobel:

l'8 ottobre 2013 Higgs ed Englert vengono insigniti del premio Nobel per la Fisica

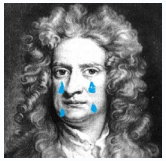
Quindi, il Modello Standard...

Una teoria eccellente che, ad oggi, descrive e prevede in modo eccezionalmente preciso i processi fondamentali della natura.

Ha alcuni aspetti insoddisfacenti:

Alcune difficoltà interne (fine-tuning, grande gerarchia delle masse).

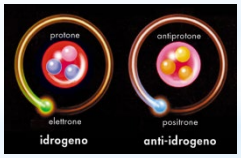
Non descrive la forza di gravità.



Non risponde alla domanda: cos'è la materia oscura dell'Universo?
Non risponde alla domanda: cos'è l'energia oscura dell'Universo?

95%

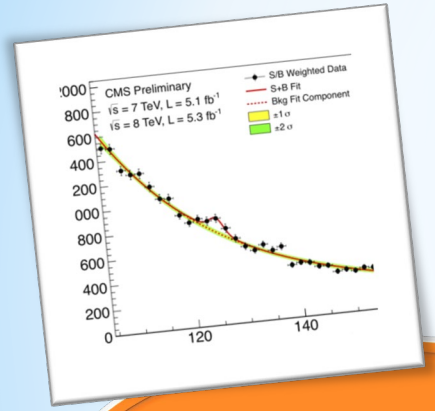
Dove e' finita tutta l'anti-materia ?



Estensioni?

Super-simmetria, nuove dimensioni, altro?!

Scienza e tecnologia



NUOVA TECNOLOGIA

NUOVE SCOPERTE

NUOVI STRUMENTI PER TUTTI

NUOVI STRUMENTI PER LA RICERCA

Chi fa ricerca?

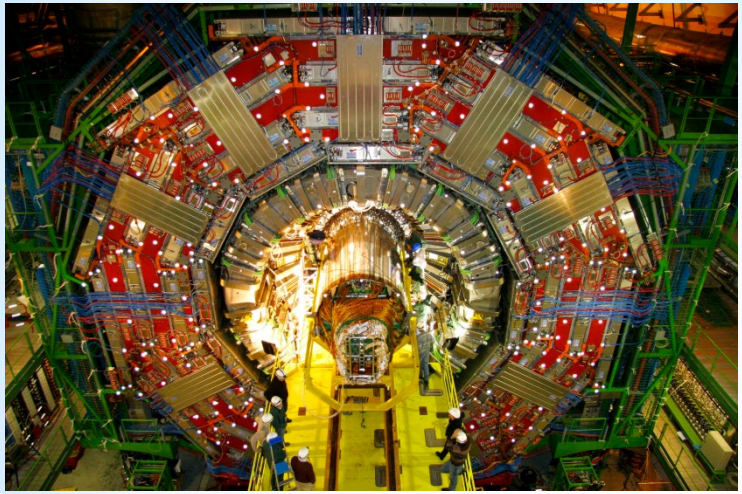
- Le Universita'
- Gli Enti di Ricerca nazionali (INFN, CNR, INAF, ENEA, etc.) organizzati in
  - Sezioni (Genova, Torino, Milano, Roma, etc.)
  - Laboratori Nazionali (Gran Sasso, Legnaro, Frascati, etc.)
- Gli istituti di ricerca stranieri
- I centri di ricerca internazionali (CERN)

- Le aziende e i centri di ricerca privati

Per fare ricerca il primo passo e' fare la tesi di laurea con un gruppo che fa il tipo di ricerca a cui siete interessati

N.B.: una ricerca valida puo' essere fatta solo se si hanno SOLIDE BASI
Quello che studiate oggi vi servira' domani

Strumenti per particelle



Rivelatori

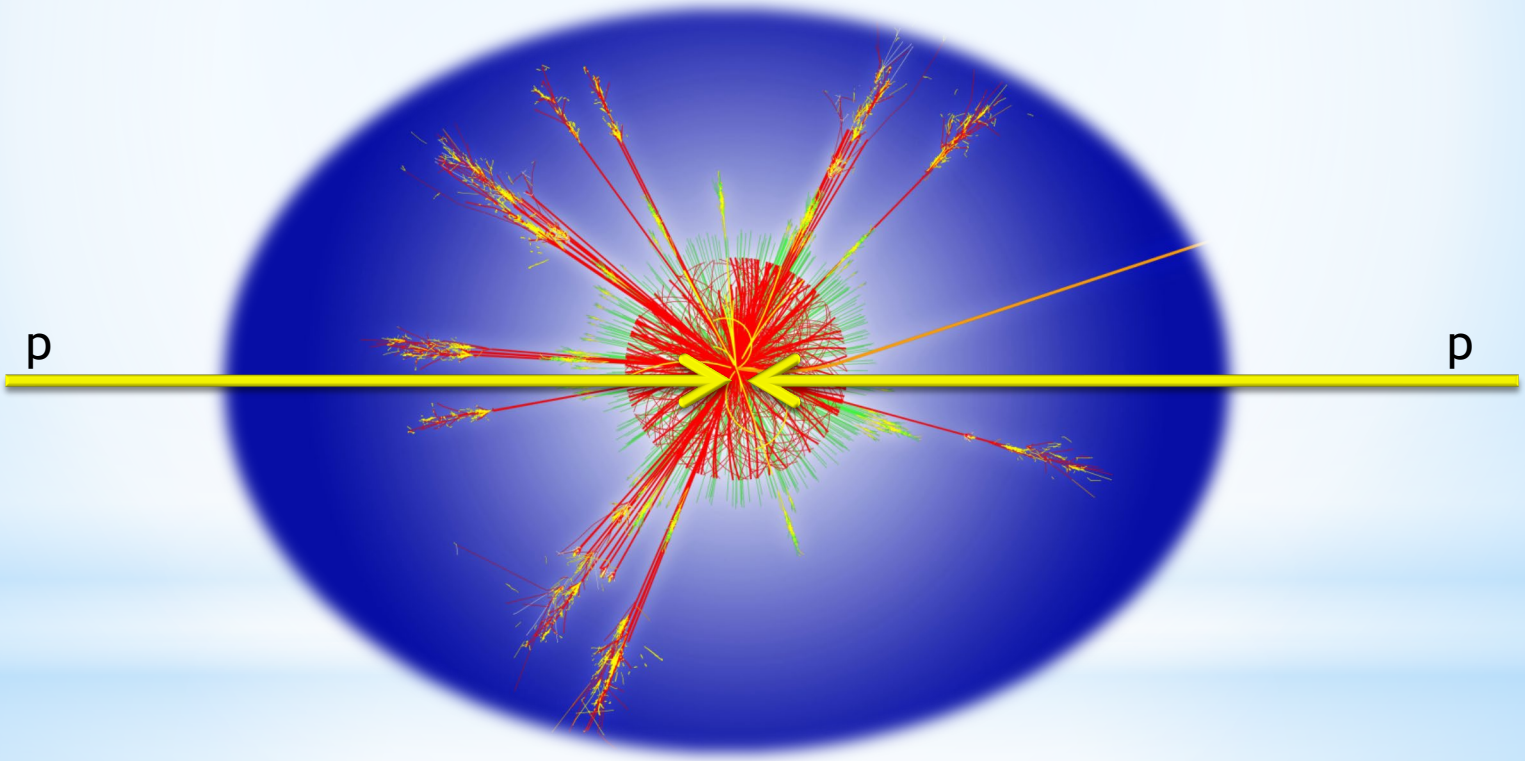
Acceleratori

L'occhio vede luce e colori: cioè è un rivelatore di fotoni

Le vecchie TV erano acceleratori di elettroni

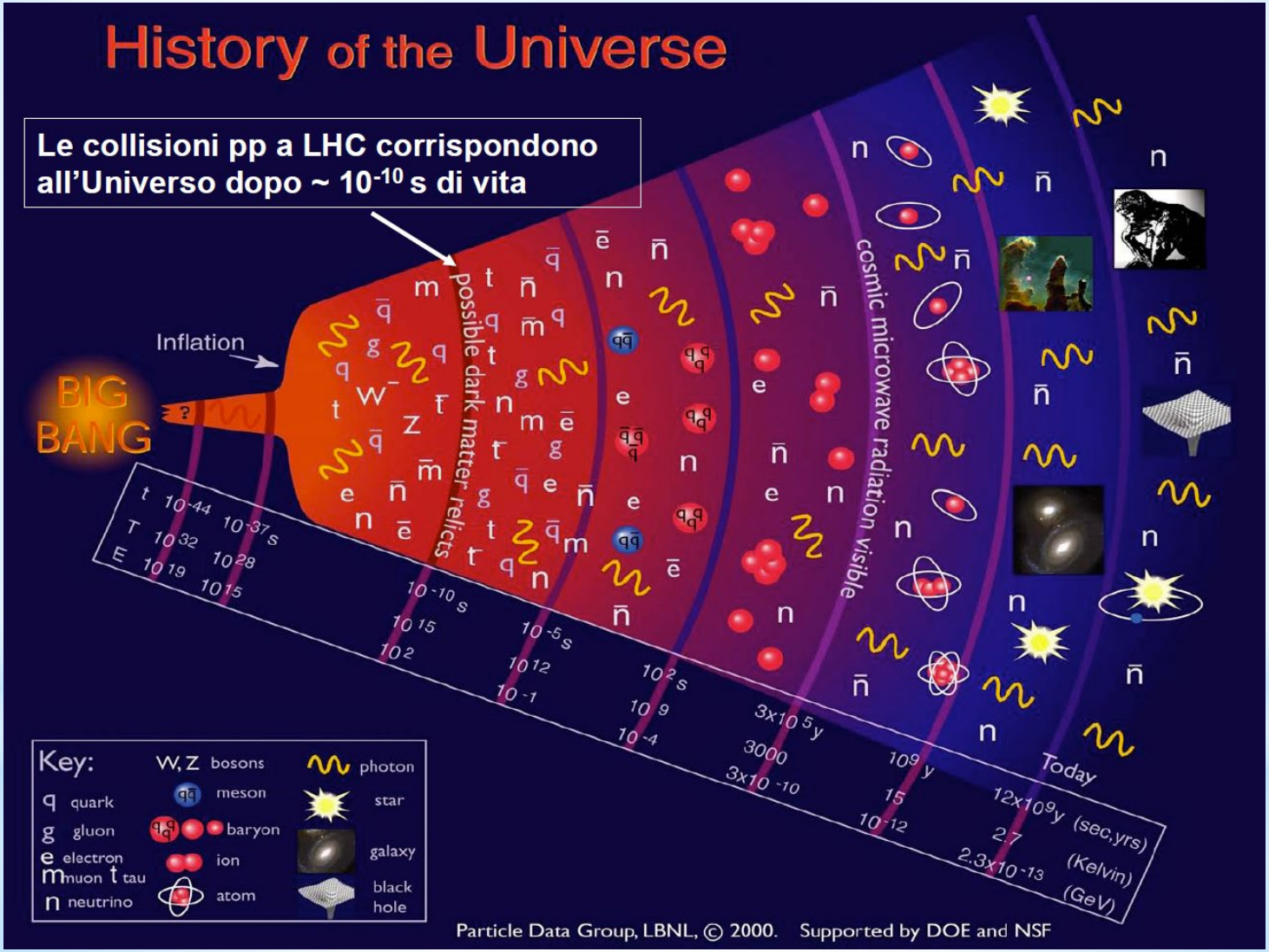
Urti per generare particelle

Facendo urtare frontalmente due particelle ad altissima energia (velocità) si producono nuove particelle che vengono *fotografate* dai rivelatori

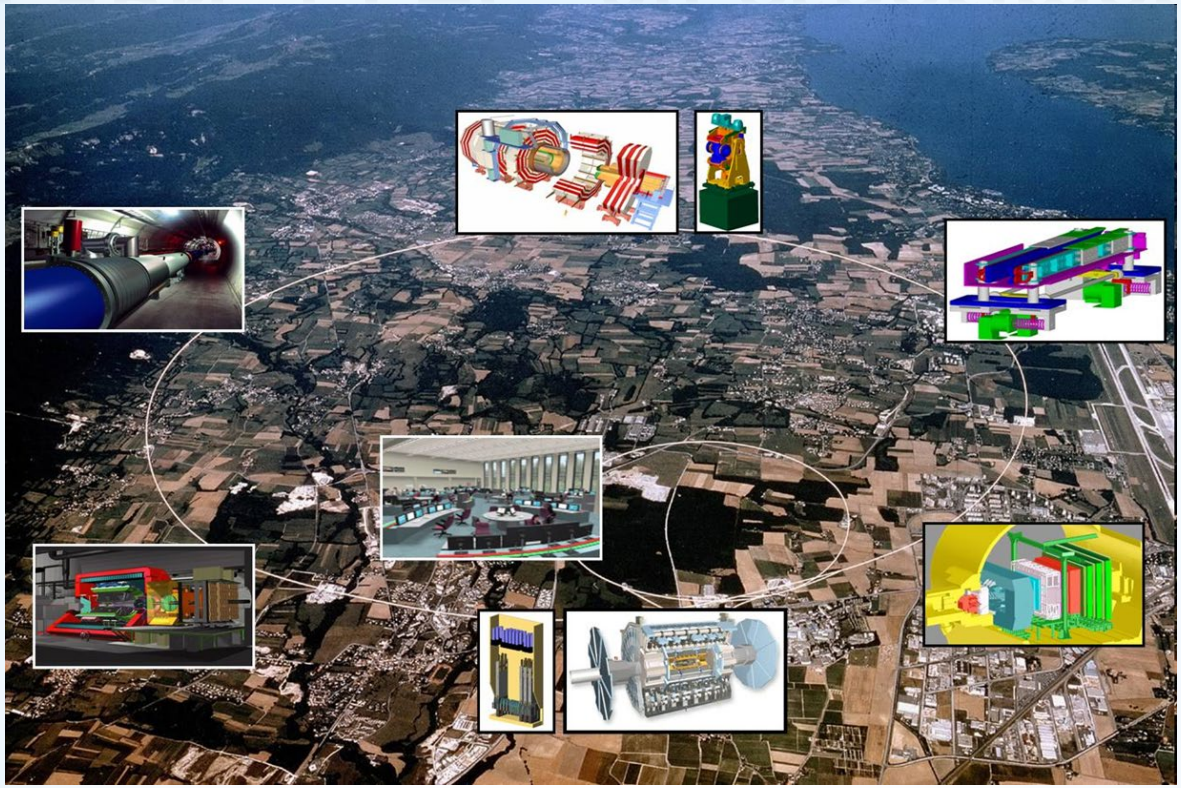


Lo studio delle particelle prodotte ci consente di capire cosa sia successo durante l'urto

Alte energie: indietro nel tempo

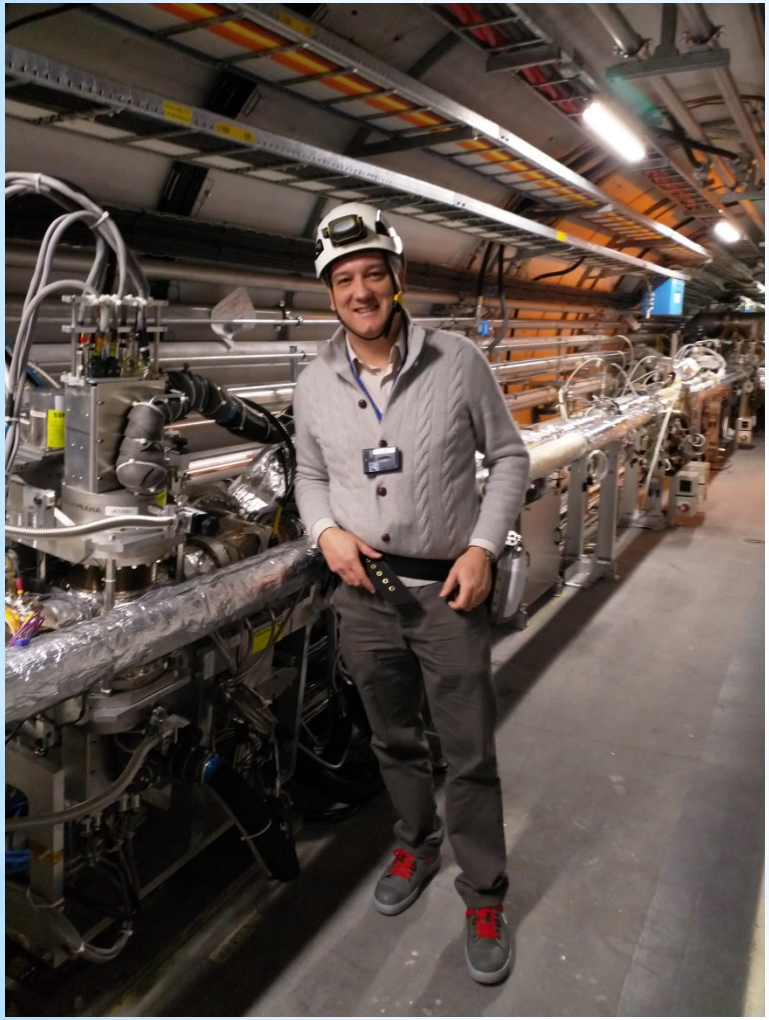


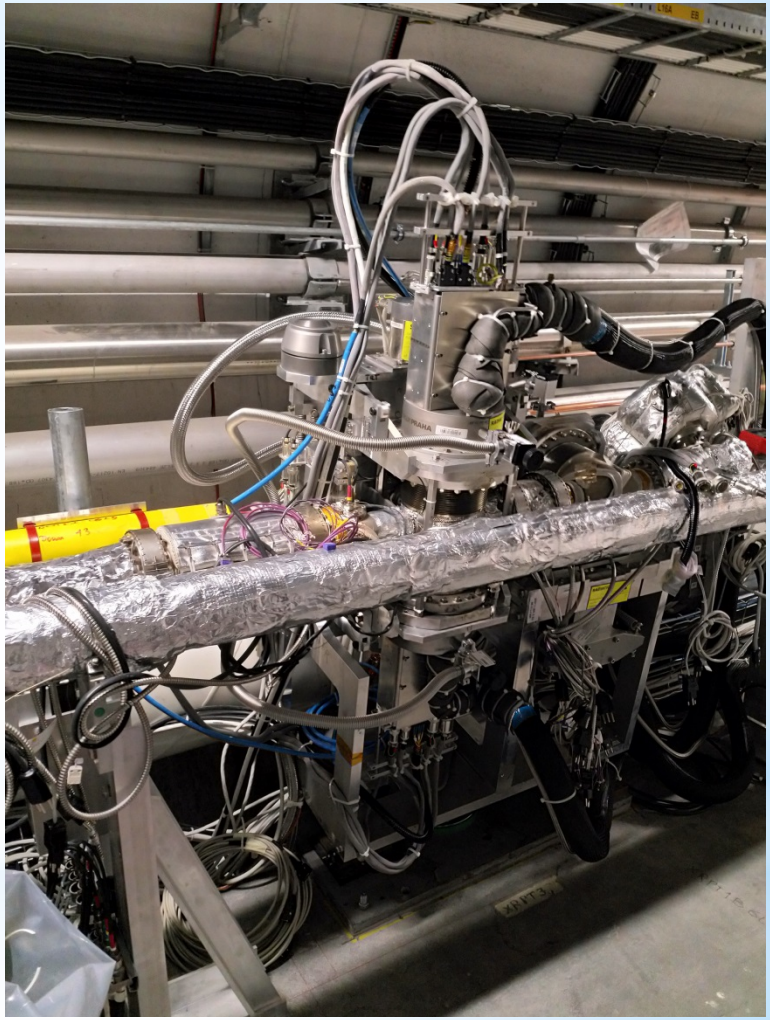
Il CERN, l'LHC, gli esperimenti



CERN: Consiglio Europeo per la Ricerca Nucleare: uno dei piu' grandi laboratori di fisica al mondo. Si trova vicino a Ginevra.
LHC: Large Hadron Collider: il piu' grande **collisionatore di protoni** al mondo. Lungo ~27km, in un tunnel a ~100m di profondita'.
Esperimenti: in 4 grandi caverne si trovano i maggiori esperimenti di LHC: CMS, ATLAS, LHCb, ALICE.

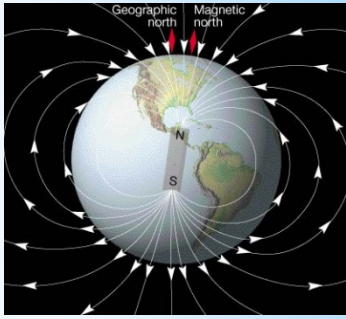
Il tunnel di LHC





I magneti di LHC

= 100000



- Per far ruotare protoni che si muovono quasi alla velocità della luce sono necessari campi magnetici molto intensi: quasi 100000 volte il campo magnetico terrestre!
- 1600 magneti superconduttori a -271.25°C (He liquido, 1.9 Kelvin)

Fili Nb-Ti

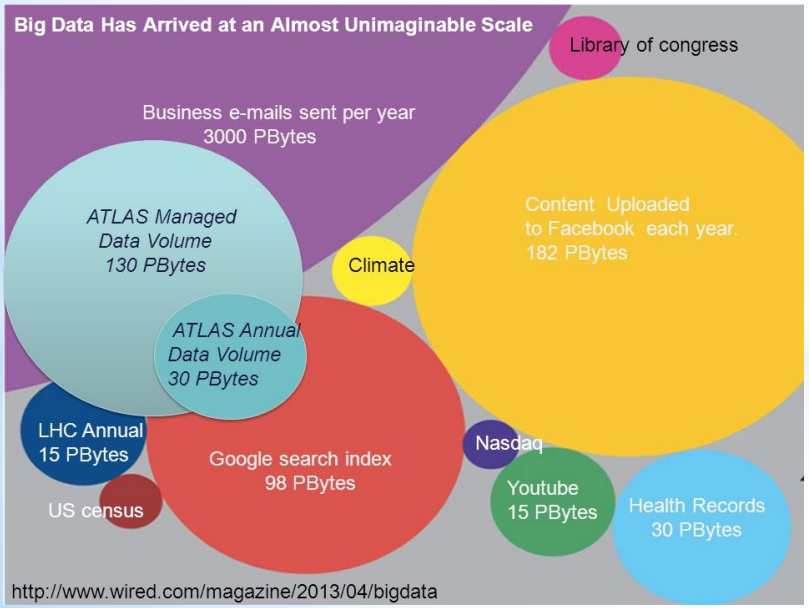
Il luogo più freddo dell'Universo

La sala di controllo di LHC

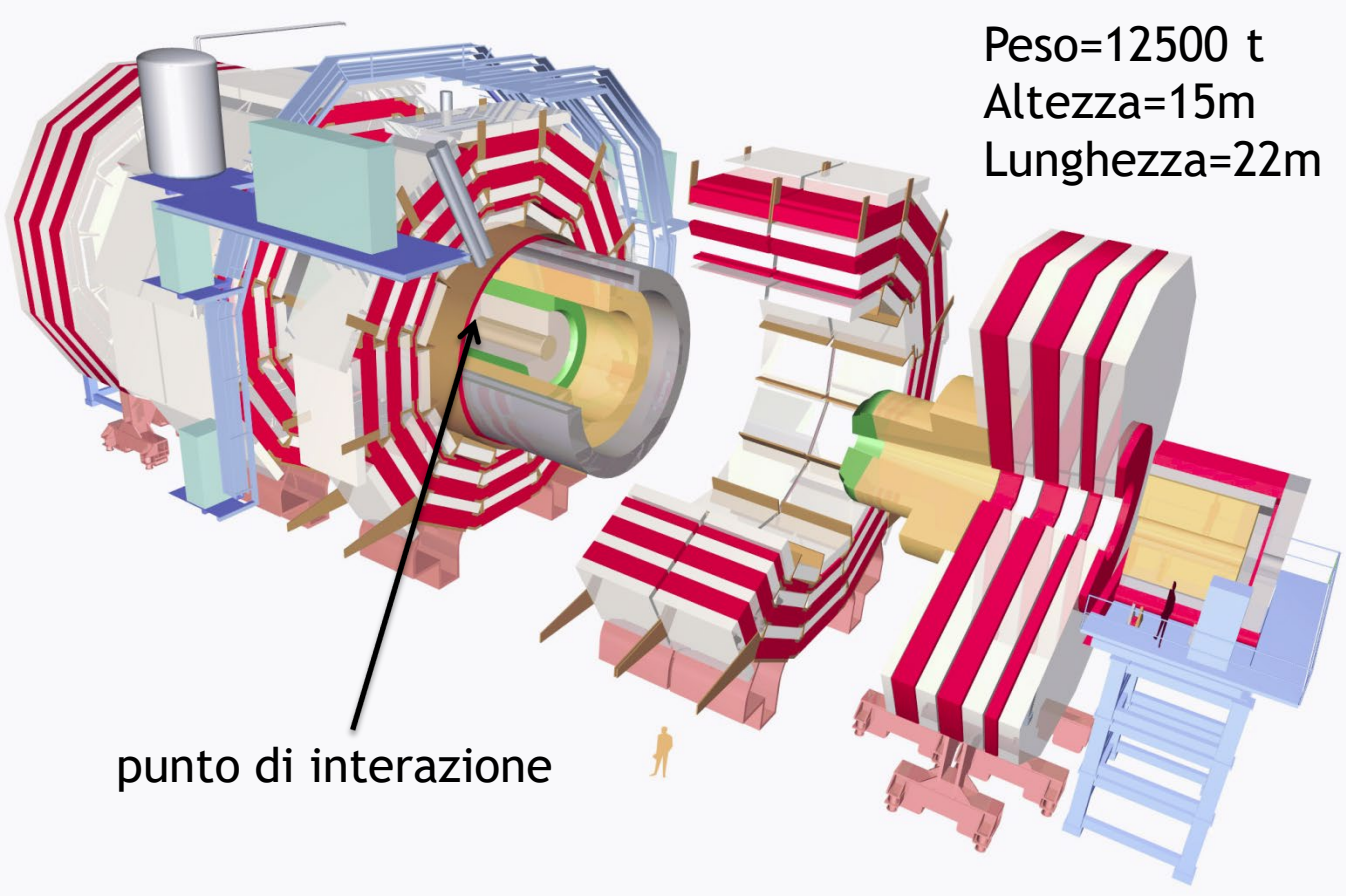
La sala di controllo di un esperimento

Una marea di dati da analizzare

- LHC ha prodotto finora più di 330000 Tbytes (330 Pbytes) di dati, circa l'equivalente di 2000 anni di video in HD (cfr. il disco fisso di un PC casalingo contiene circa 1 Tbyte)
- I centri di calcolo sono distribuiti sull'intero pianeta (GRID)

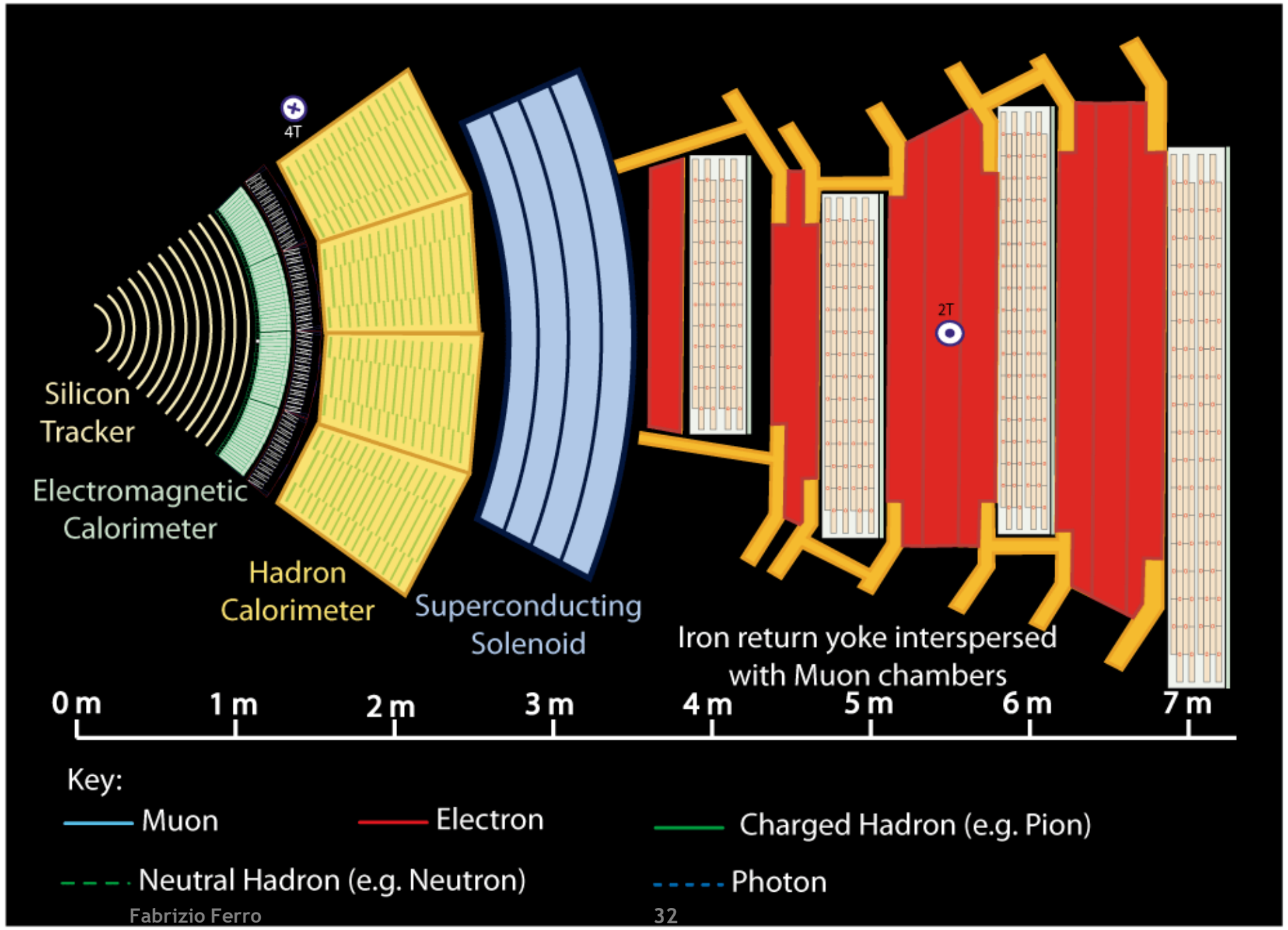


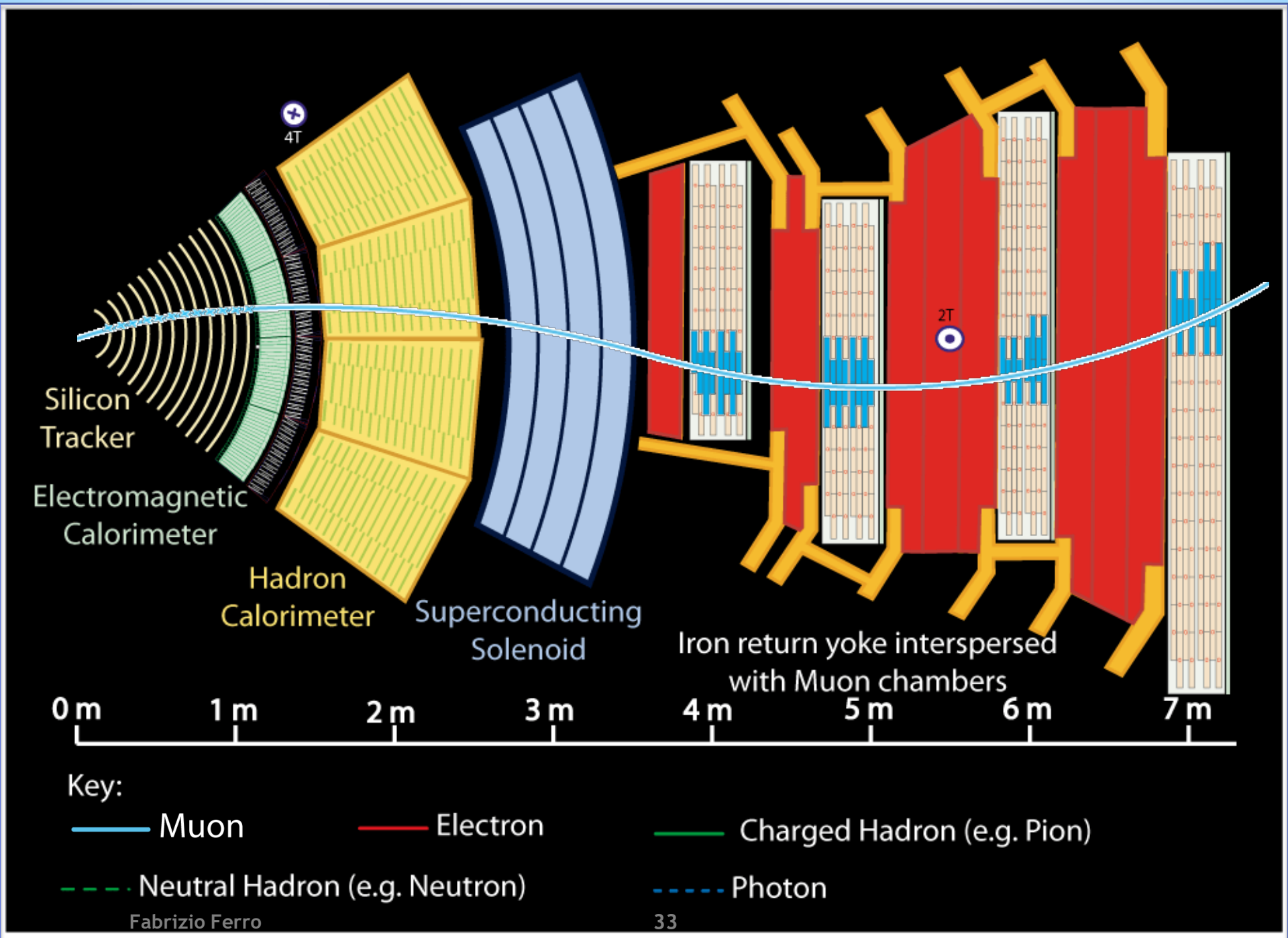
CMS: uno degli esperimenti

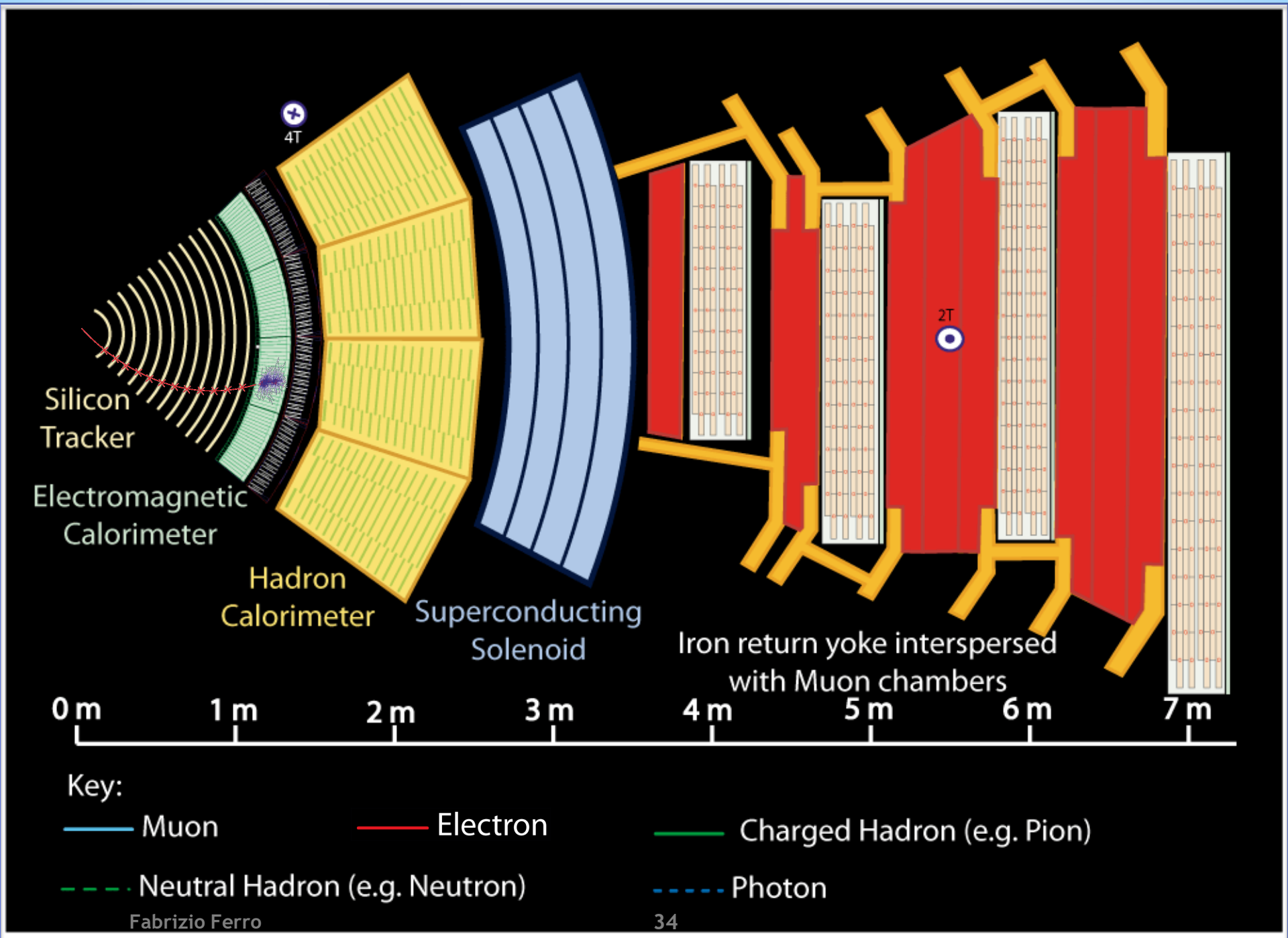


I rivelatori circondano la zona dell'urto e fotografano le particelle prodotte per capire cosa è avvenuto durante l'urto.

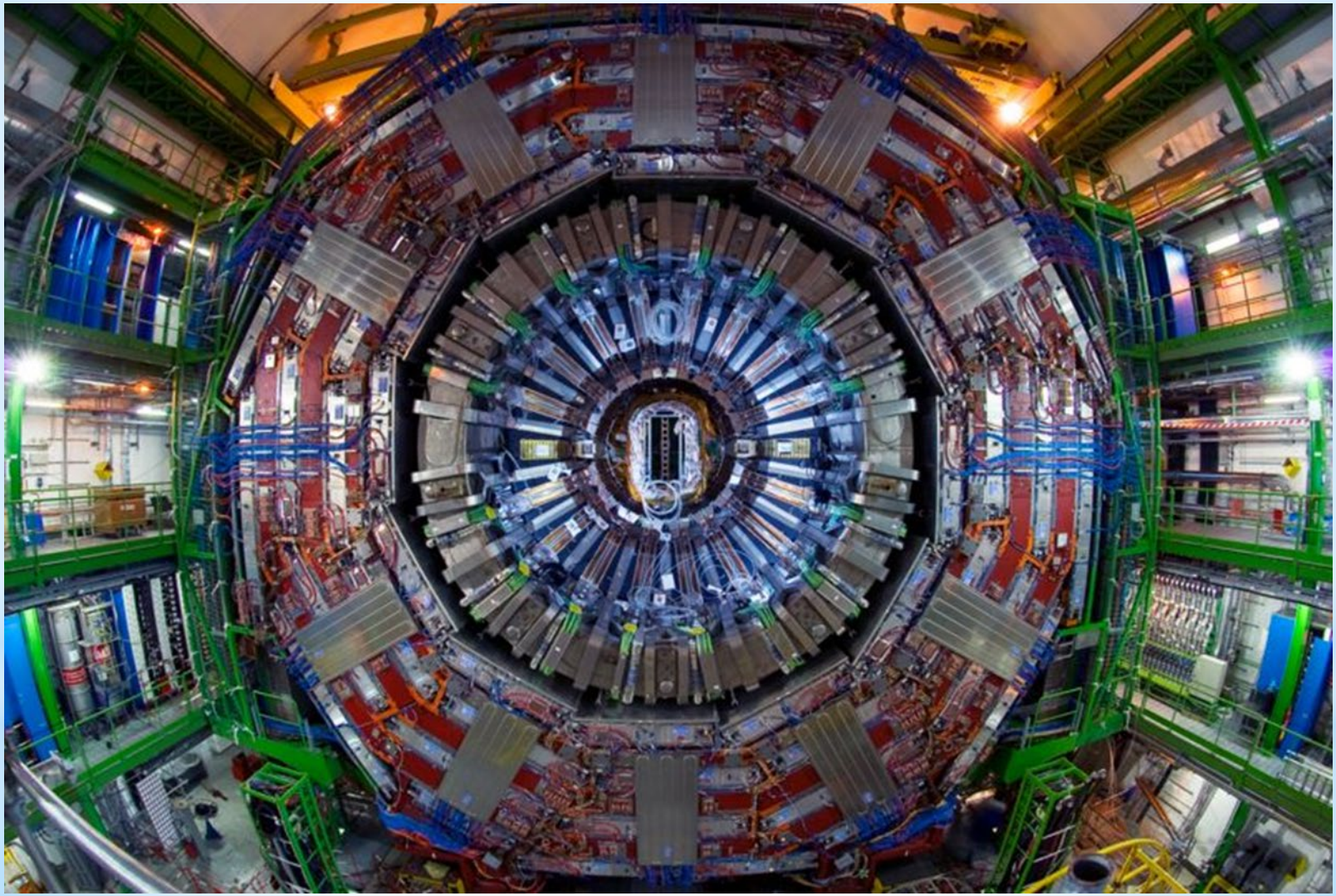
20-40 milioni di urti al secondo!!!


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

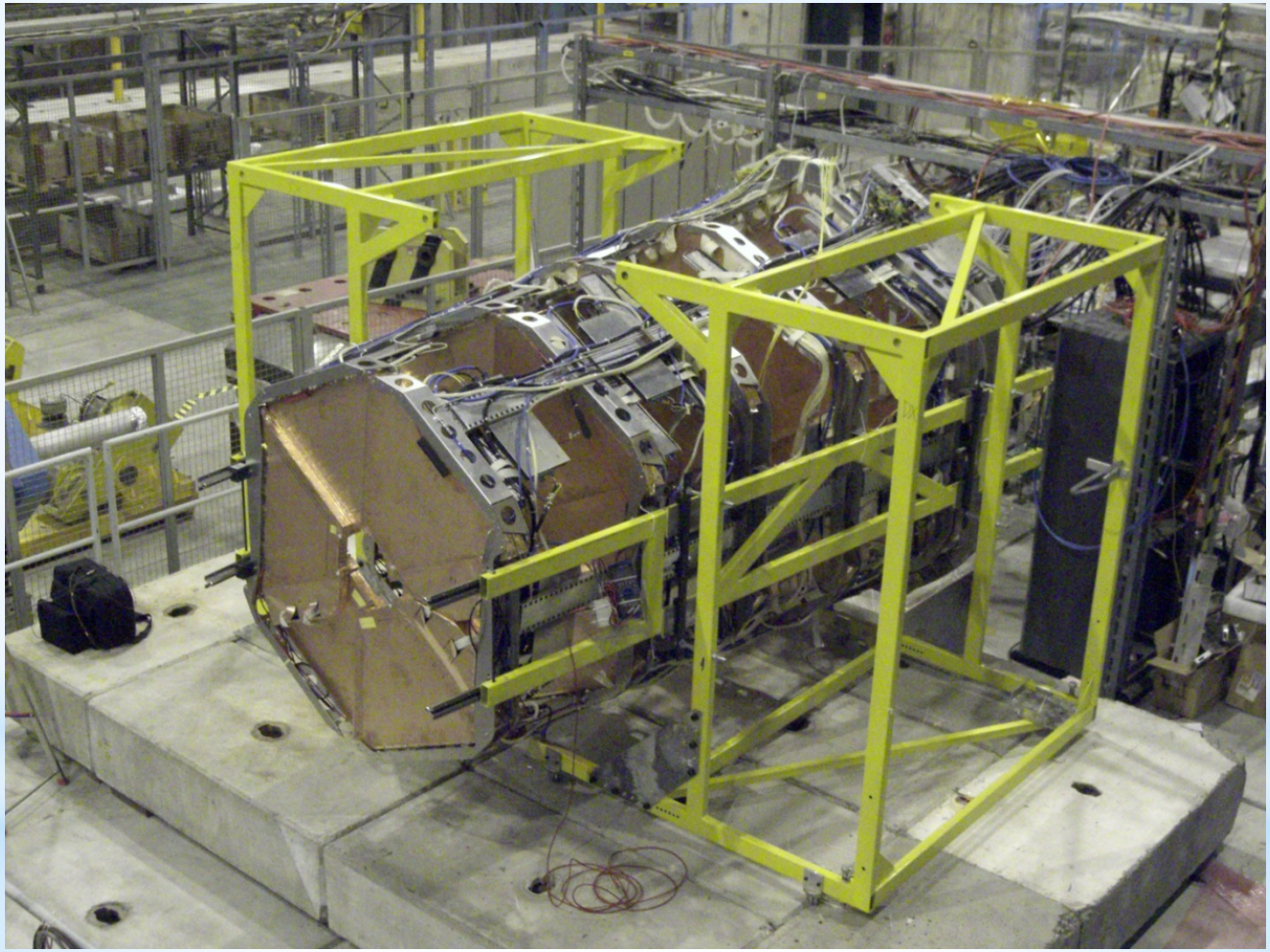

4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon


4T
2T
Silicon Tracker
Electromagnetic Calorimeter
Hadron Calorimeter
Superconducting Solenoid
Iron return yoke interspersed with Muon chambers
0 m
1 m
2 m
3 m
4 m
5 m
6 m
7 m
Key:
Muon
Electron
Charged Hadron (e.g. Pion)
Neutral Hadron (e.g. Neutron)
Photon

CMS: dal vivo

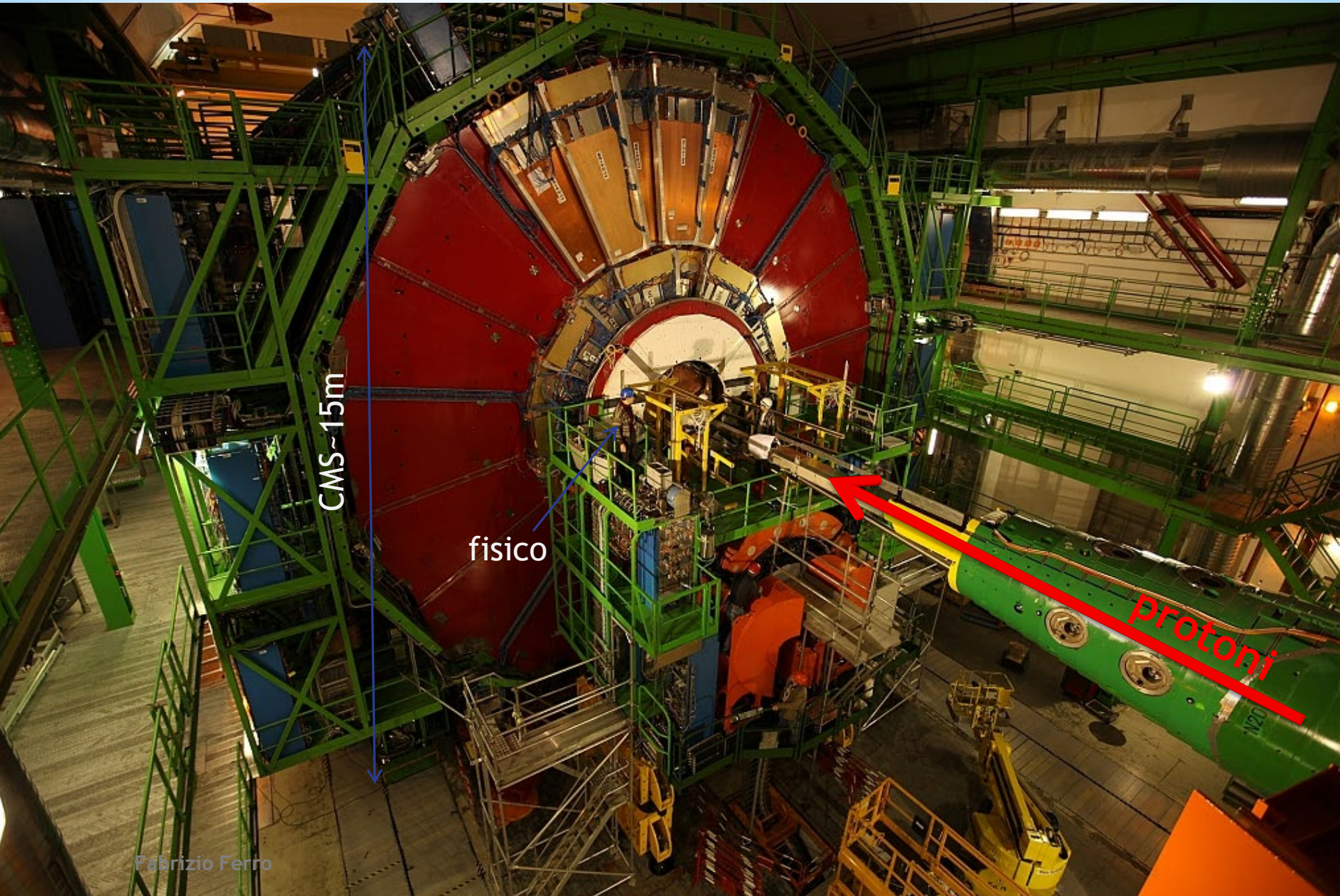


Un rivelatore "genovese"

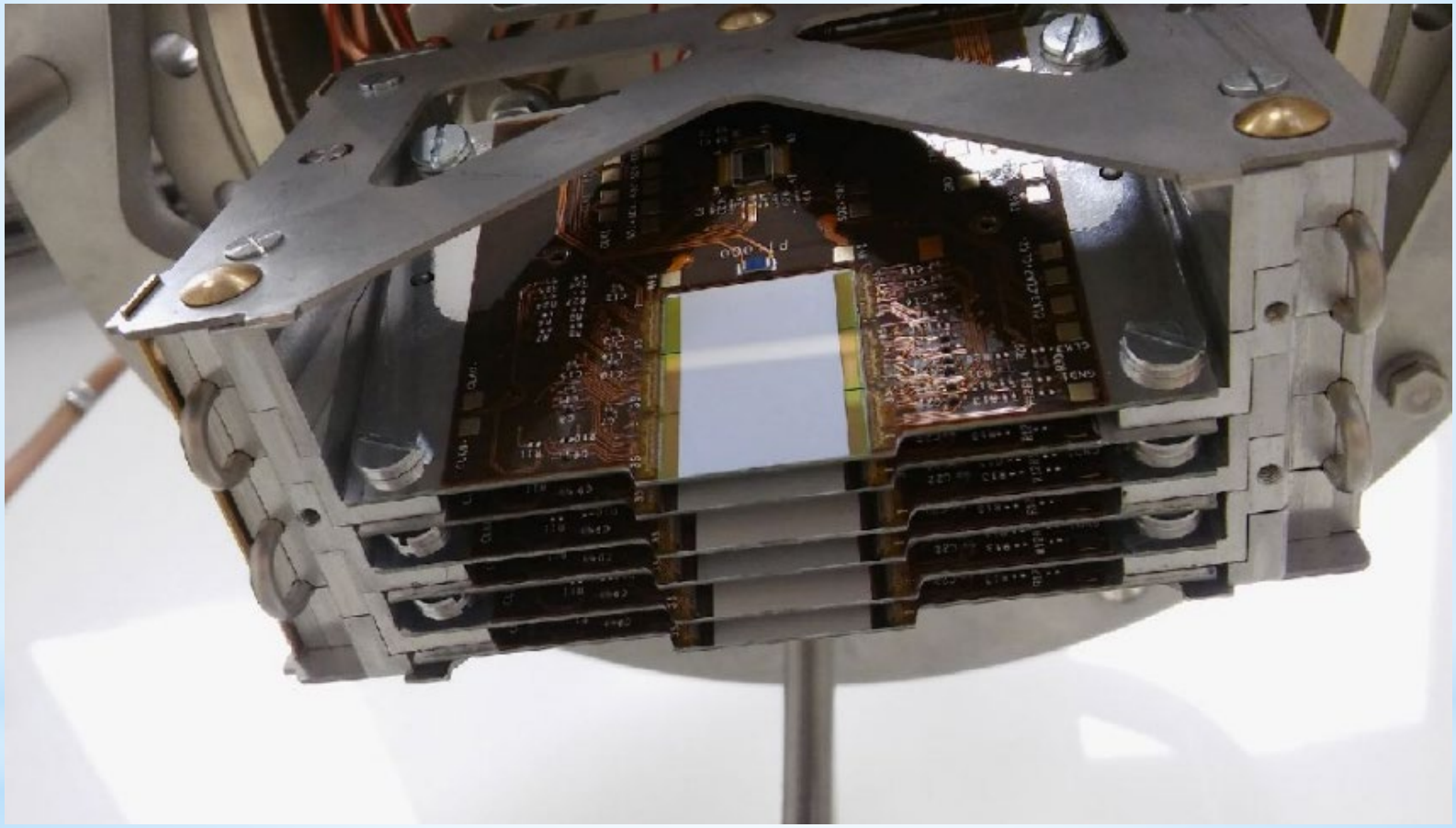


T1 in fase di test

Durante l'installazione

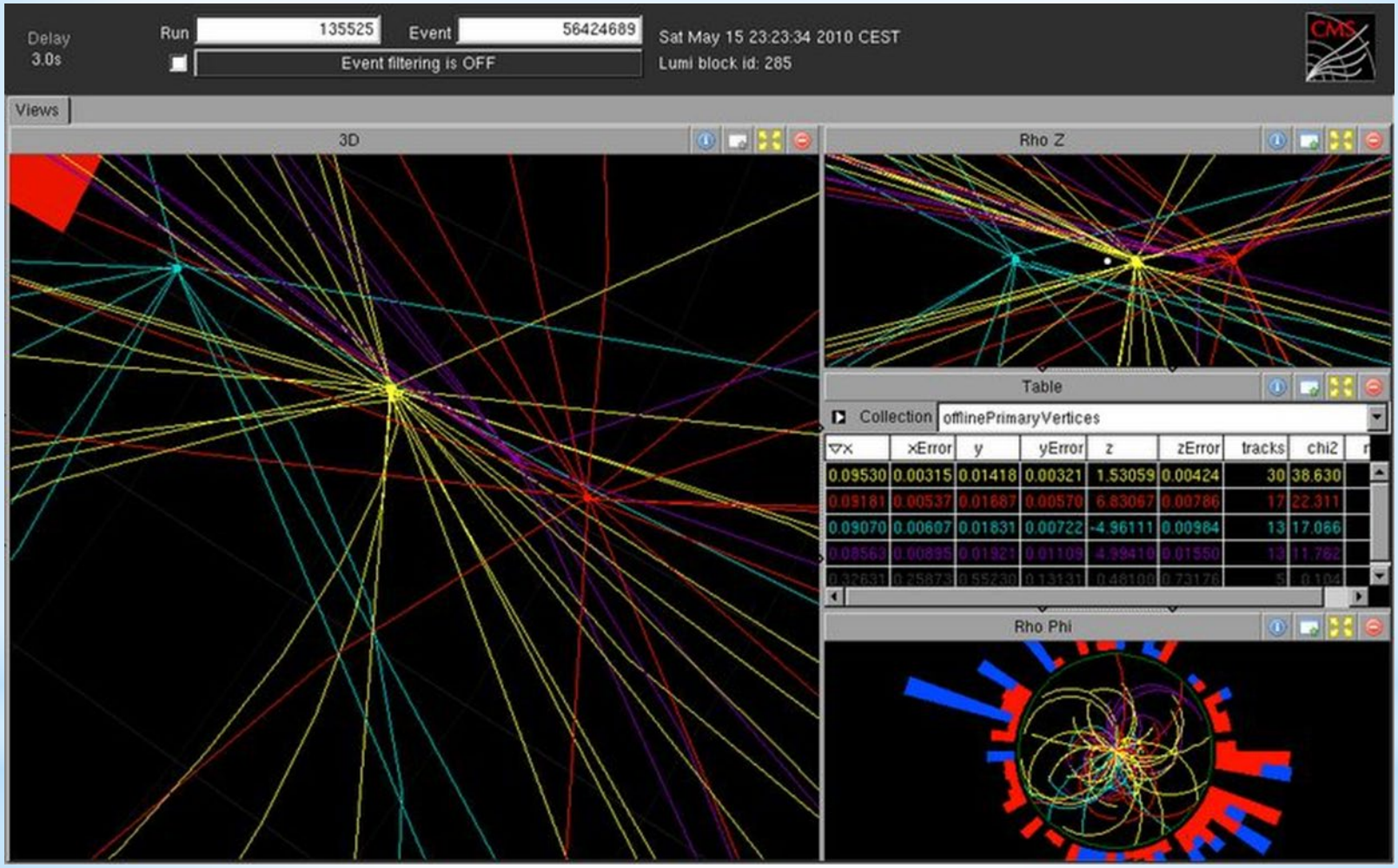


Un altro rivelatore "genovese"

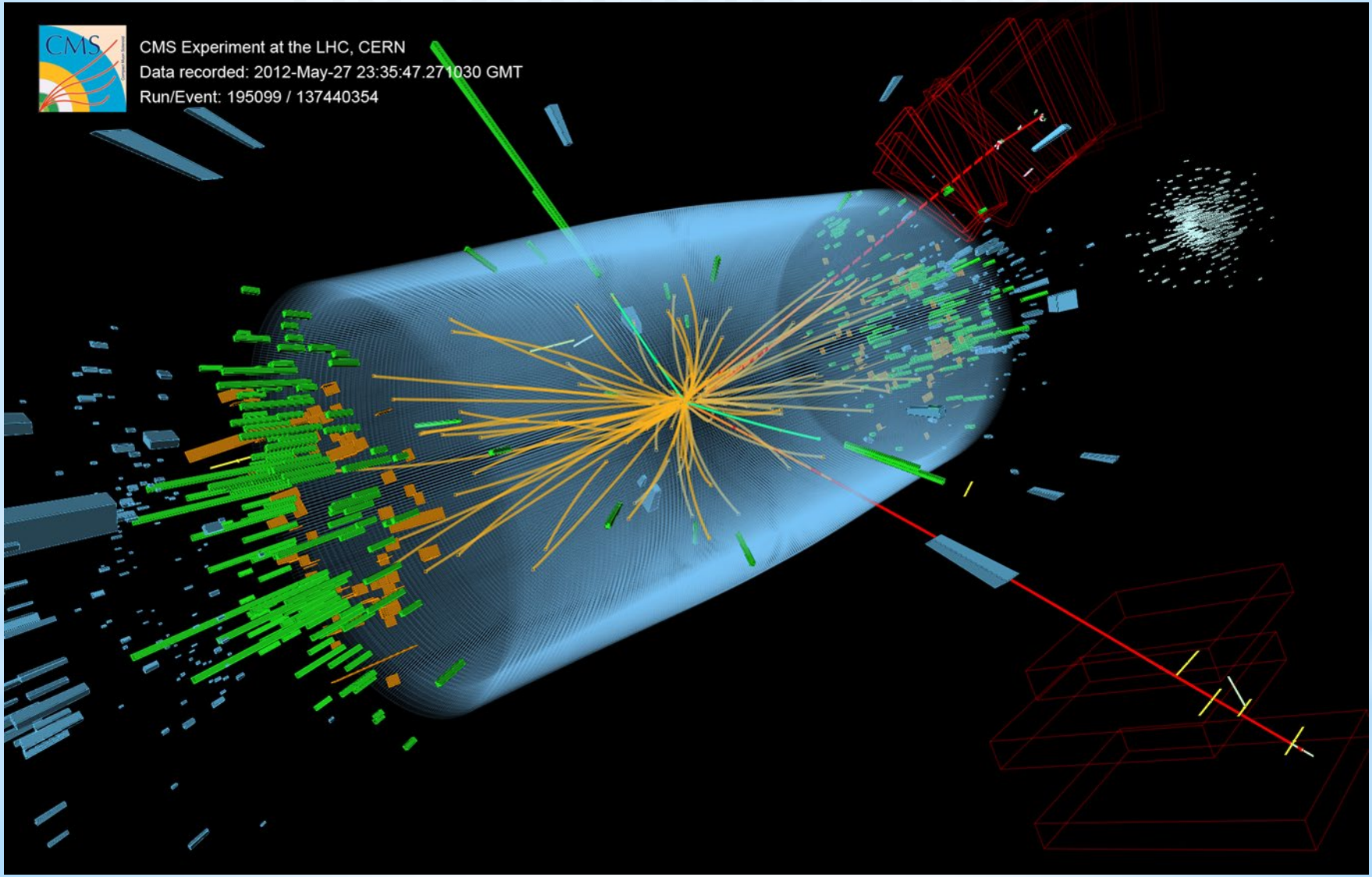


Rivelatore a pixel 3D da 150x100 um

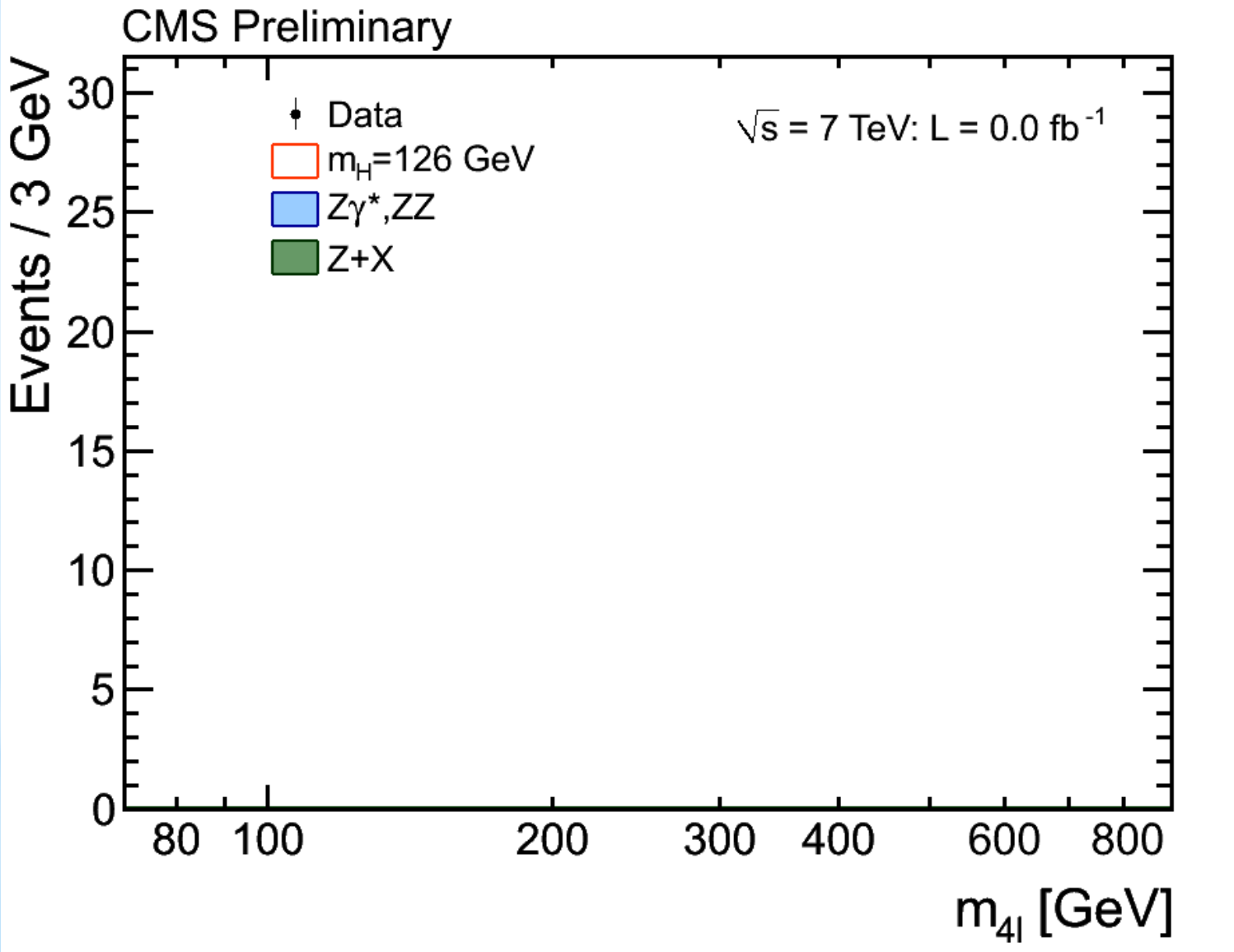
Cosa si vede


Delay
3.0s
Run
135525
Event
56424689
Event filtering is OFF
Sat May 15 23:23:34 2010 CEST
Lumi block id: 285
CMS
Views
3D
Rho Z
Table
Collection
offlinePrimaryVertices
xError
y
yError
z
zError
tracks
chi2
0.09530 0.00315 0.01418 0.00321 1.53059 0.00424 30 38.630
0.09181 0.00537 0.01687 0.00570 6.83067 0.00786 17 22.311
0.09070 0.00607 0.01831 0.00722 -4.36111 0.00984 13 17.066
Rho Phi

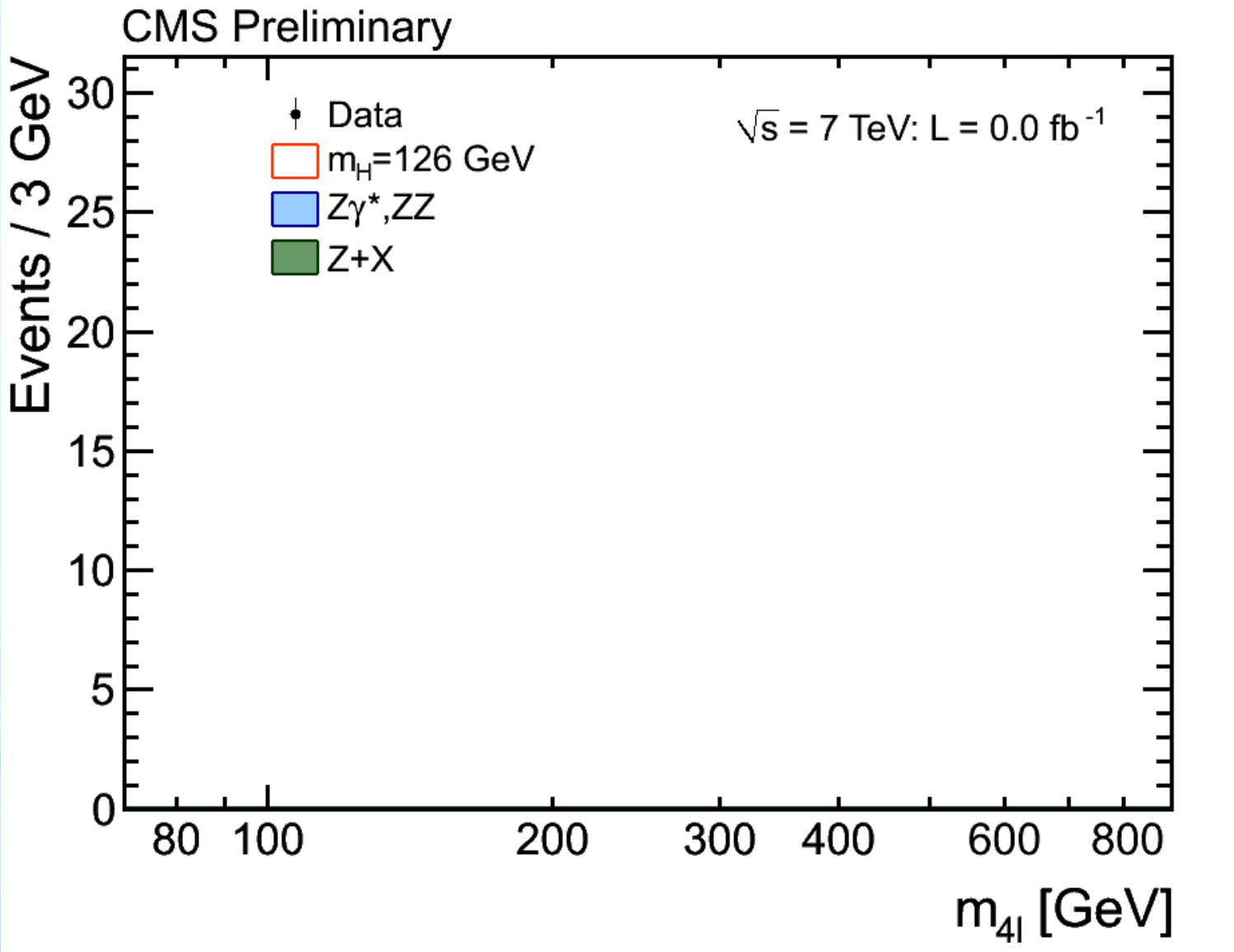
Un possibile Higgs



Come *appare* l'Higgs



Come *appare* l'Higgs



Tornando alla fisica

- Il Modello Standard resiste. Nessun segnale evidente di nuova fisica.
- Osservato il bosone di Higgs con massa pari a 125.5 GeV.
- La ricerca si sta concentrando sullo studio delle proprietà del bosone di Higgs da poco scoperto e alla ricerca di tracce dirette e indirette di nuova fisica.

CERN: non solo ricerca pura

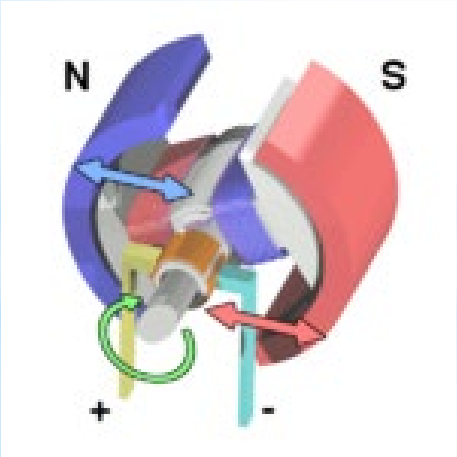
Applicazioni non facili da prevedere a priori!

- **Applicazioni pratiche dei rivelatori di particelle**:
  - **Diagnostica (per immagini, PET)**
  - **Terapia medica (adroterapia)**
- **Tecnologie**
  - **Materiali**
  - **Superconduttività**
  - **Magneti**
  - **Criogenia**
  - **Elettronica**
- **Computing**
  - **WWW**
  - **GRID**

- **Ritorno degli investimenti in commesse industriali di alta tecnologia**
  - **per es. 1/3 dei magneti sono stati costruiti dall'Ansaldo**

Memento

La ricerca non è mai fine a se stessa

Se Faraday, Roentgen e Hertz
si fossero concentrati solo sui *problemi contingenti* dei loro tempi,
non avremmo mai sviluppato i motori elettrici, i raggi X, la radio (etc…).

Ma questa è un'altra storia…