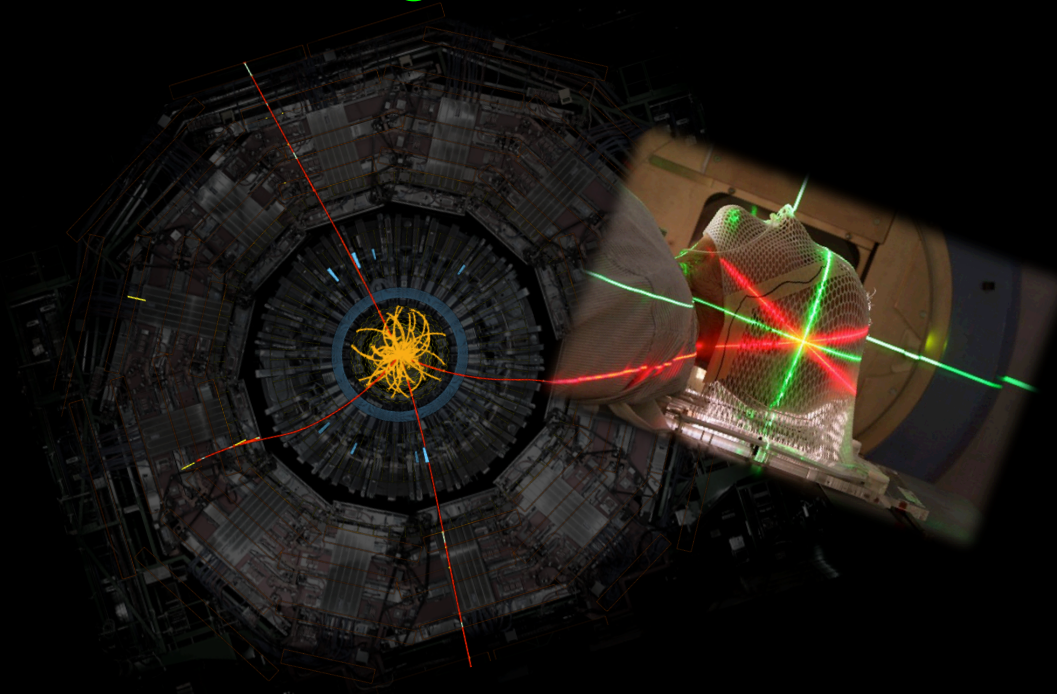


# Acceleratori e rivelatori di particelle

Sfide tecnologiche nella ricerca dell'infinitamente piccolo



MasterClasses 2019

Pisa, 3 Aprile 2019

**Lorenzo Bianchini**  
**INFN Sezione di Pisa**



Slides: courtesy of M.A. Ciocci

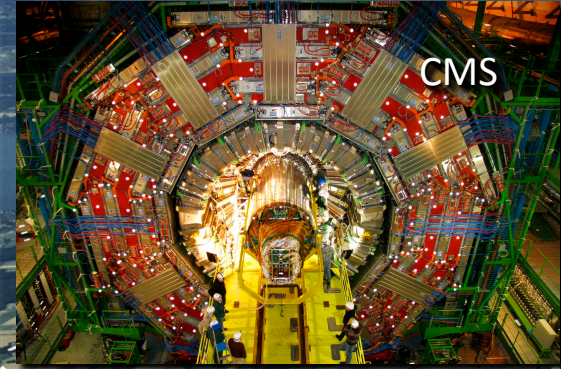
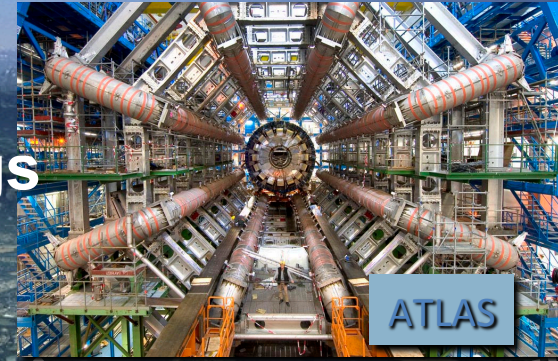
# CERN – European Centre for Nuclear Research

**In uno dei più grandi laboratori al mondo...**



Dove dal 2010 è iniziata una nuova era della ricerca fondamentale

Ricerca diretta dell'Higgs

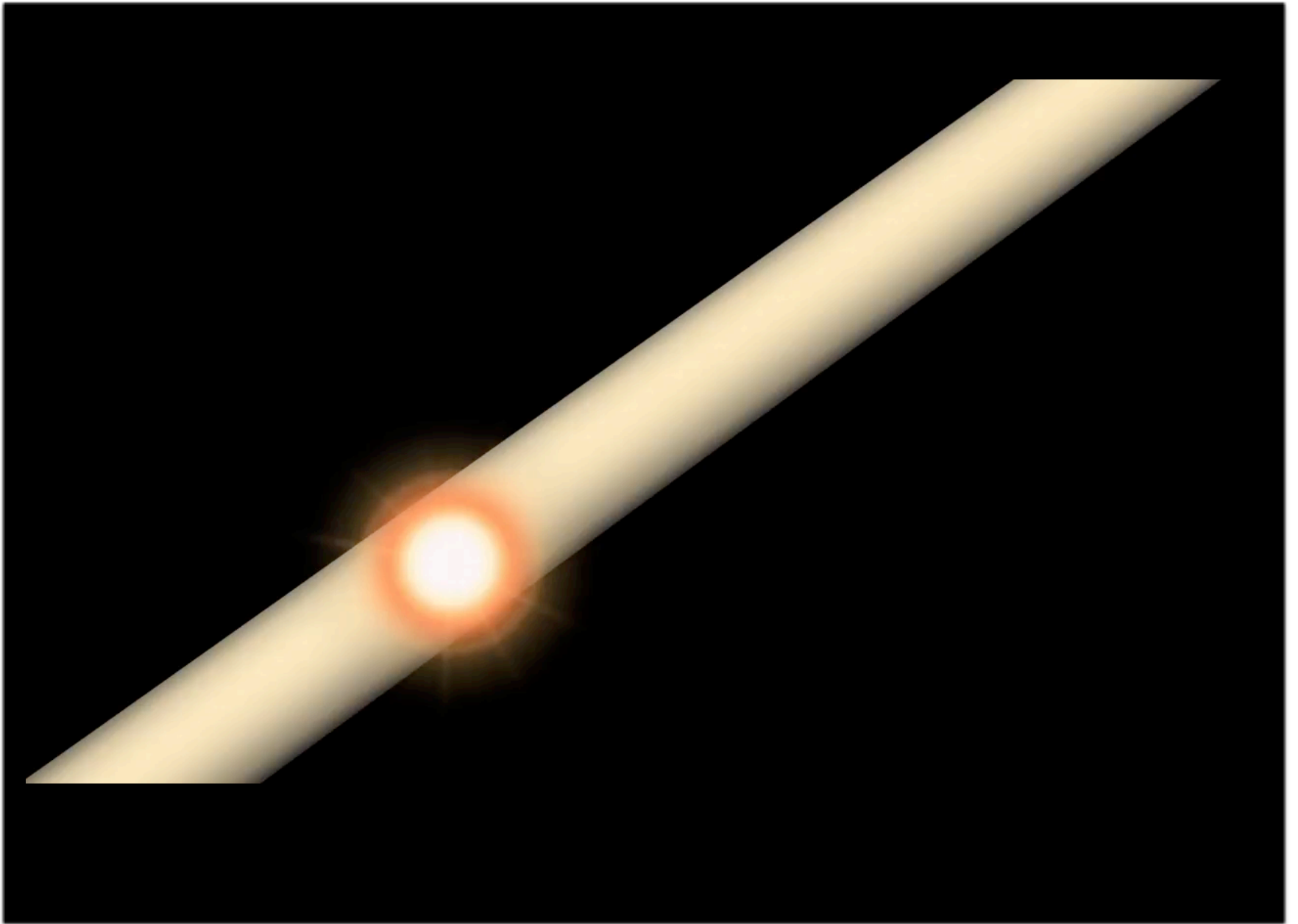


Exploration of a new energy frontier in p-p collisions

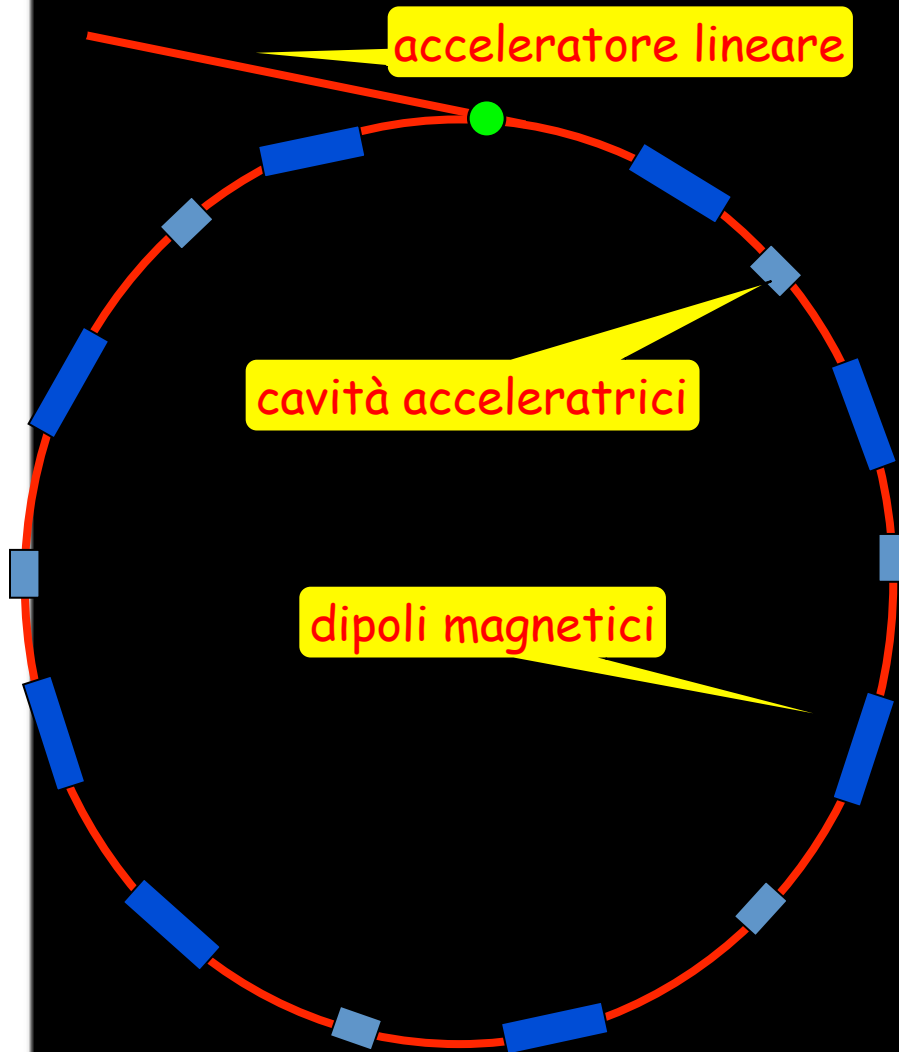


LHC ring:  
27 km circumference





# Acceleratori circolari

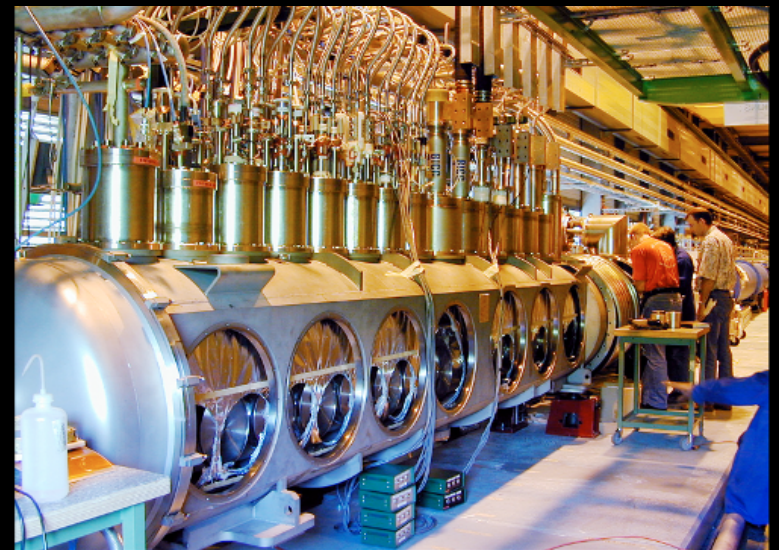
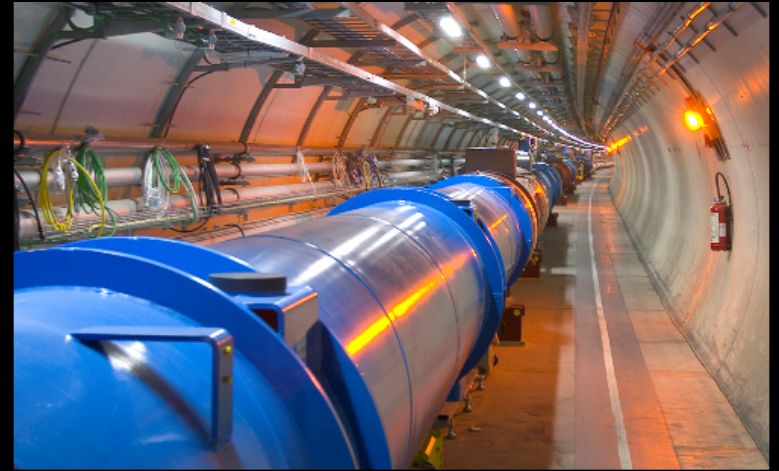


- Si confinano le particelle in una orbita circolare con un campo magnetico perpendicolare al disegno (uscente dal disegno)
- ad ogni passaggio, acquistano energia dentro una cavità risonante

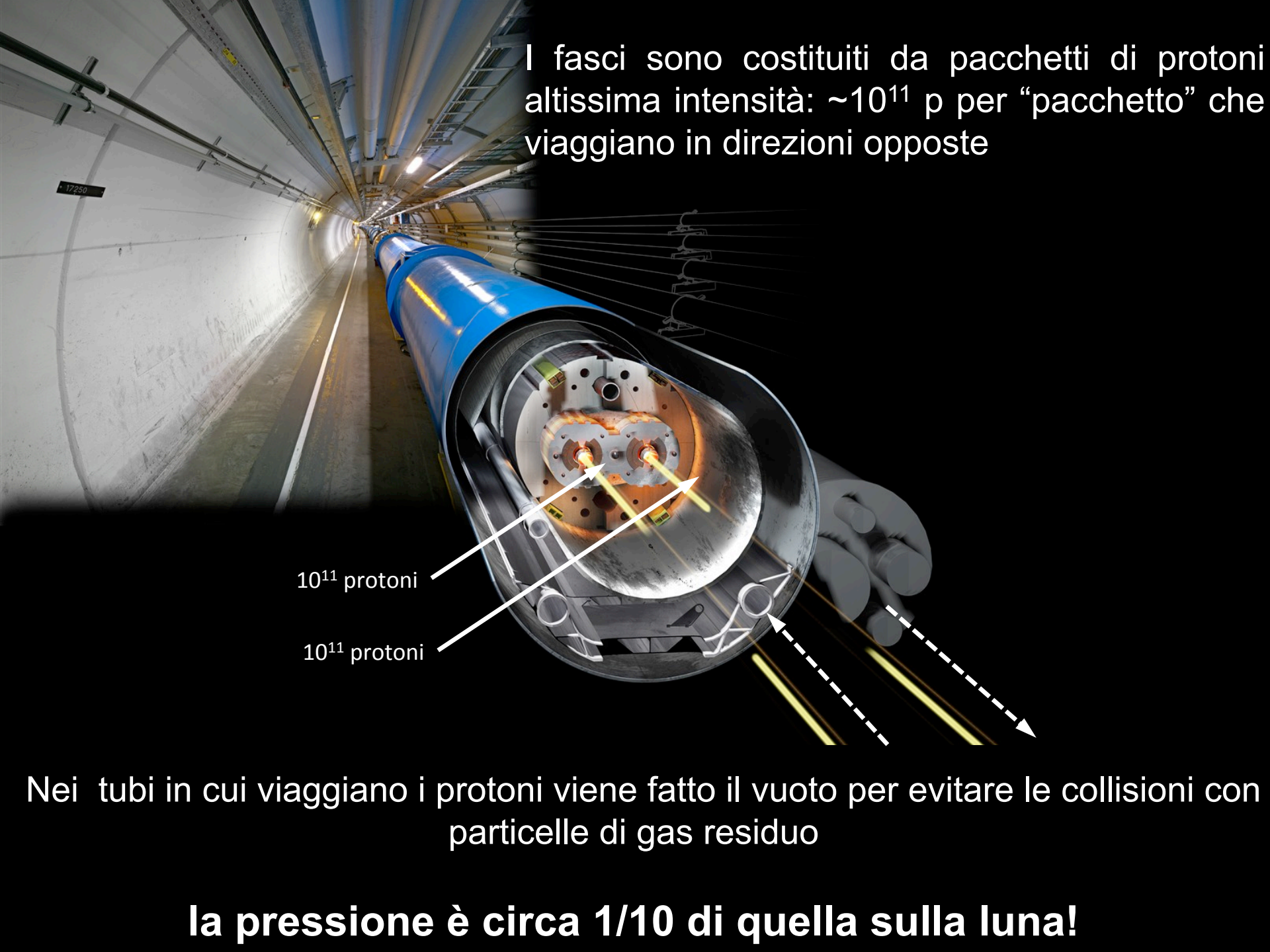


# I magneti superconduttori

- Per far restare protoni da 7 TeV nell'orbita circolare di LHC sono necessari campi magnetici da circa 8 Tesla ( $\sim 80000$  volte il campo magnetico terrestre)
- Magnet speciali ("quadrupoli") strizzano i fasci nei punti di collisione per aumentare il numero di collisioni
- 1600 magneti superconduttori sono raffreddati con He liquido superfluido ad  $1.9^\circ\text{K}$  ( $-271.25^\circ\text{C}$ )
- $\sim 7000$  km di cavo superconduttore: l'intera produzione mondiale di due anni! È il sistema criogenico più grande al mondo



I fasci sono costituiti da pacchetti di protoni altissima intensità:  $\sim 10^{11}$  p per “pacchetto” che viaggiano in direzioni opposte



$10^{11}$  protoni

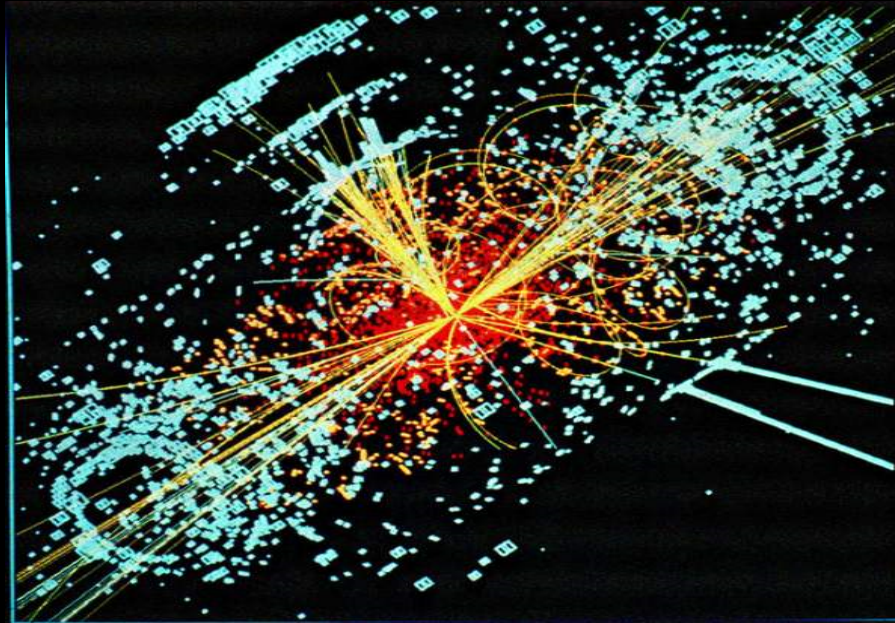
$10^{11}$  protoni

Nei tubi in cui viaggiano i protoni viene fatto il vuoto per evitare le collisioni con particelle di gas residuo

**la pressione è circa 1/10 di quella sulla luna!**

**Al centro dei rivelatori CMS e ATLAS i fasci di protoni si scontrano e...**

Avvengono reazioni paragonabili a quelle tra le  
più calde della nostra galassia



Le collisioni tra protoni corrispondono a temperature superiori un  
miliardo di volte a quelle del sole.

**all'incirca  $160 \times 10^{15} \text{ } ^\circ\text{C}$  ( $kT_{\text{term}} = 0.025 \text{ eV}$ )**

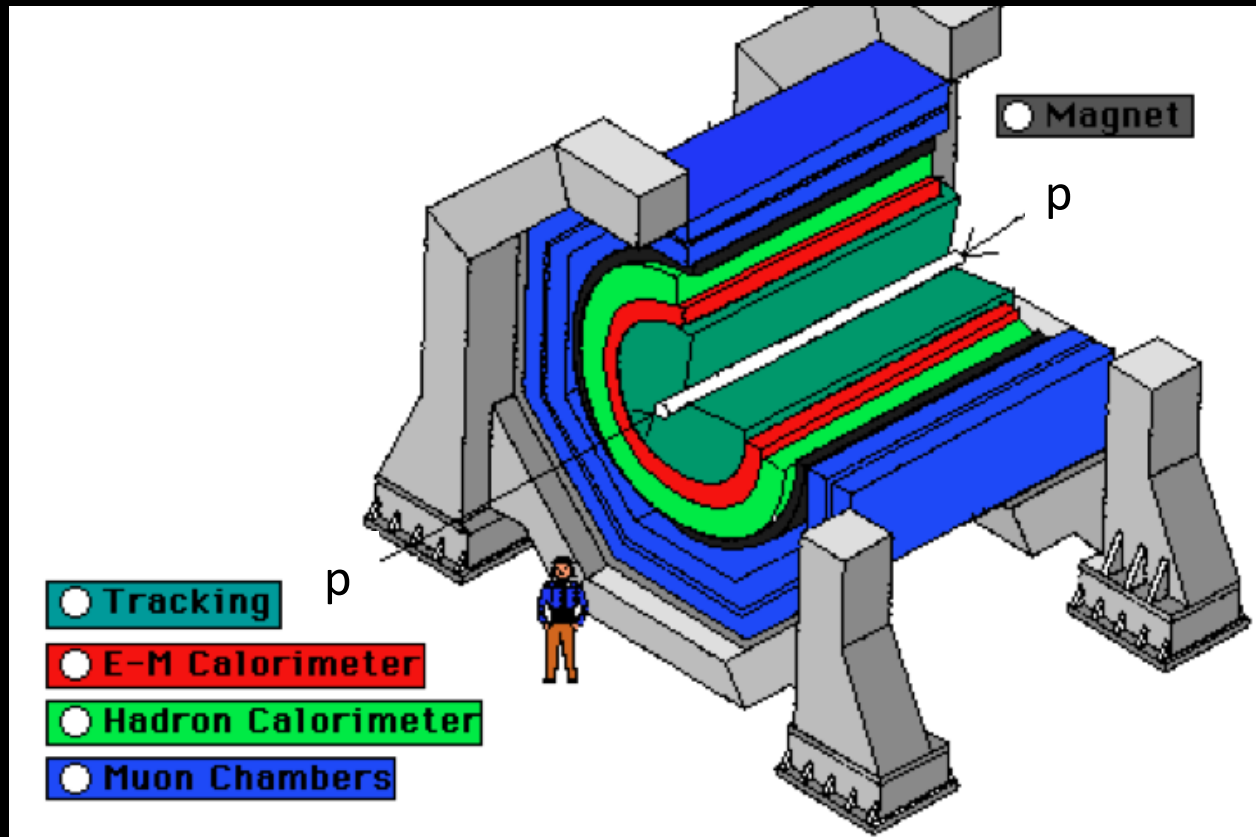




**Che vengono viste da alcuni tra i più complessi strumenti che abbiamo mai costruito,**

**I rivelatori insieme registrano i dati di 140 milioni di canali, 40 milioni di volte al secondo. 14,000 Ton, 21.6 metri di lunghezza per 14.6 metri di diametro**

# Come vediamo le particelle?



La maggior parte dei rivelatori con particelle che si scontrano frontalmente sono simili....

# Guardiamo la sezione trasversale del rivelatore

In una interazione vengono prodotte:

- particelle cariche
  - adroni (ad es protone)
  - leptoni ( $e$ ,  $\mu$ )
- particelle neutre
  - fotoni
  - adroni neutri (ad es neutroni)
  - neutrini (invisibili)

Funzioni del rivelatore

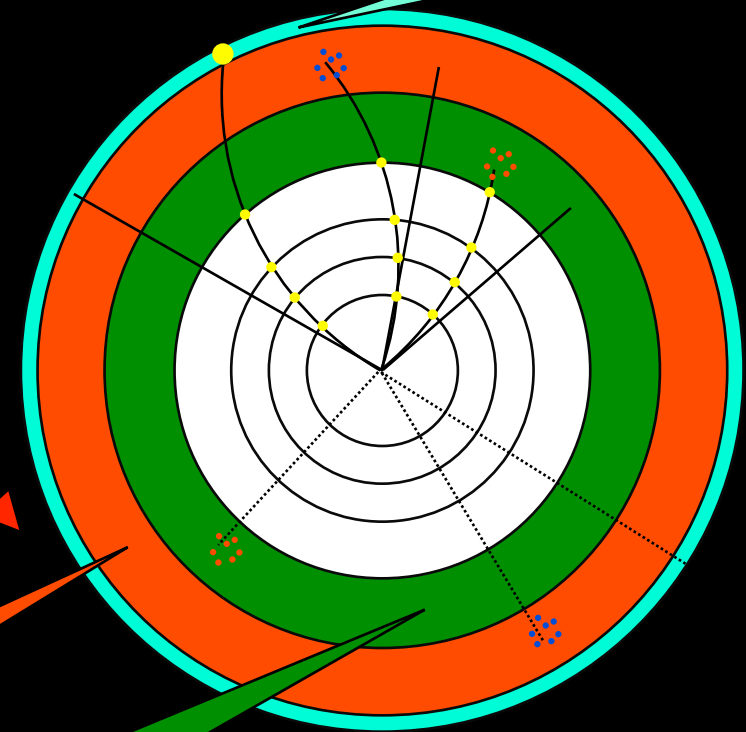
- 1) misura della quantità di moto delle particelle cariche
- 2) misura dell'energia delle particelle neutre
- 3) identificazione

rivelatore adroni

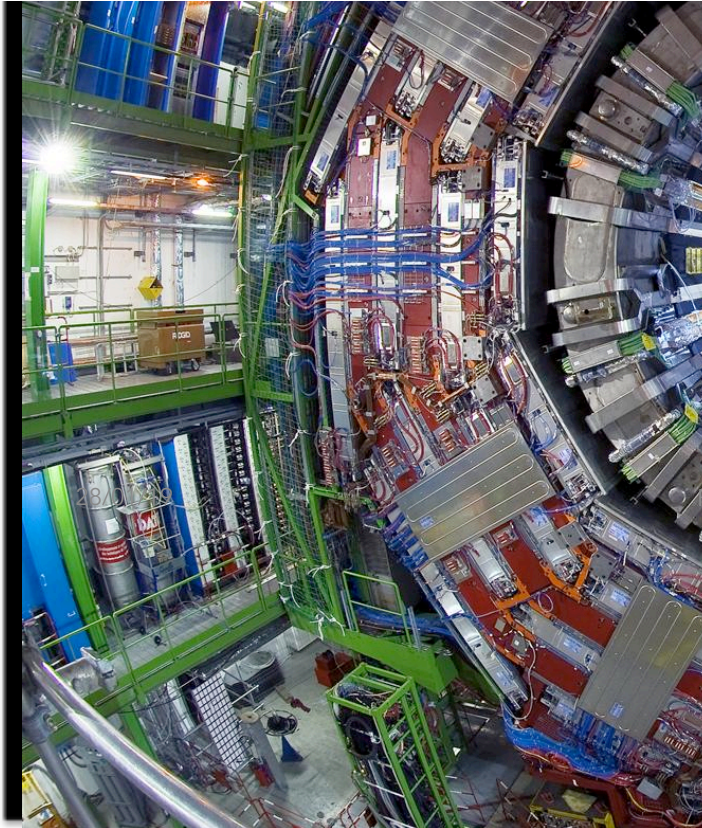
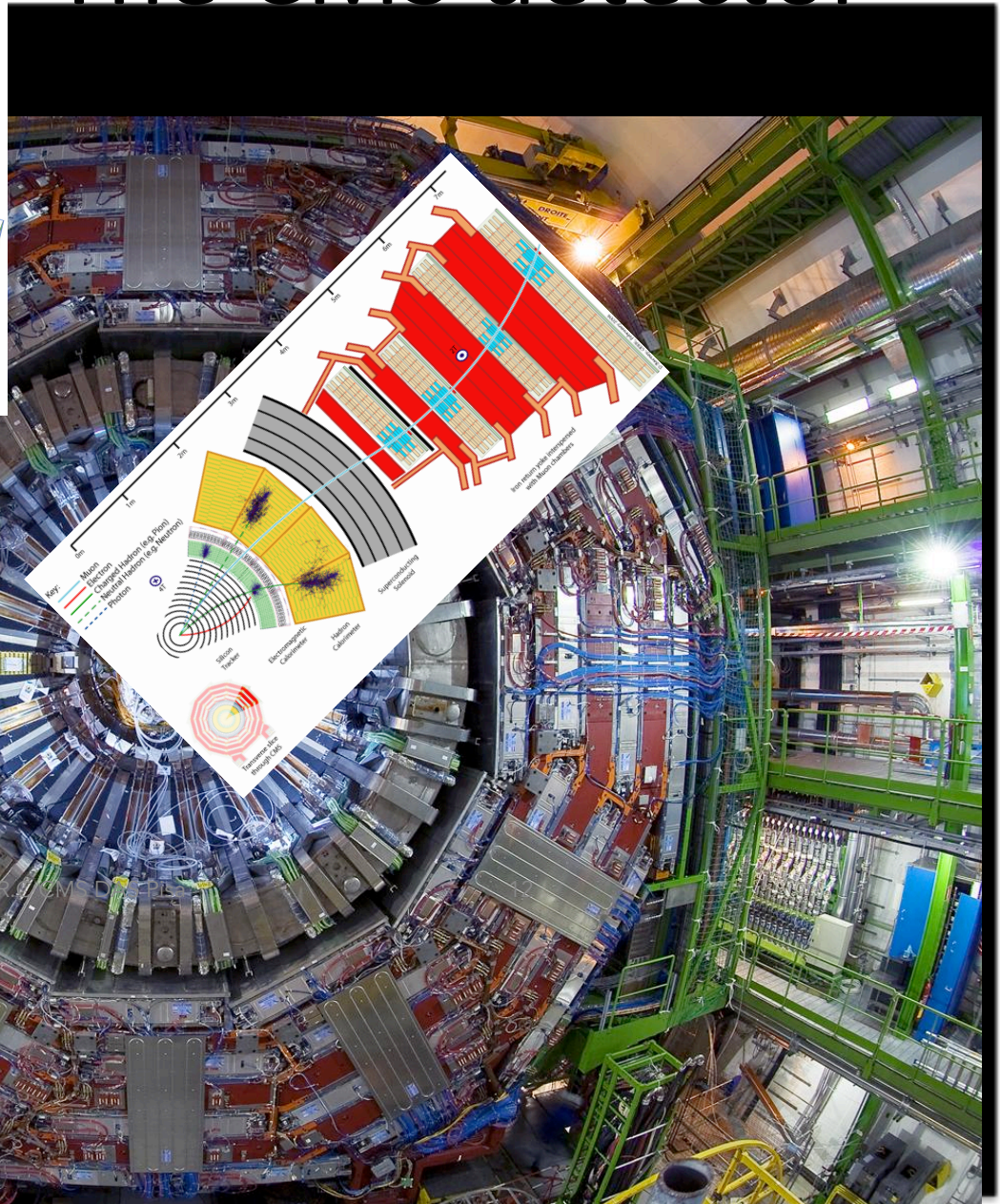
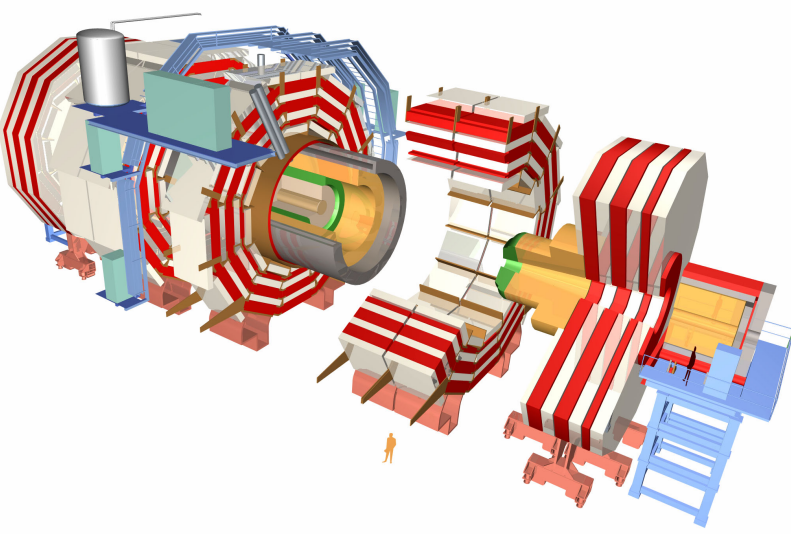
rivelatore elettroni/fotoni

rivelatore muoni

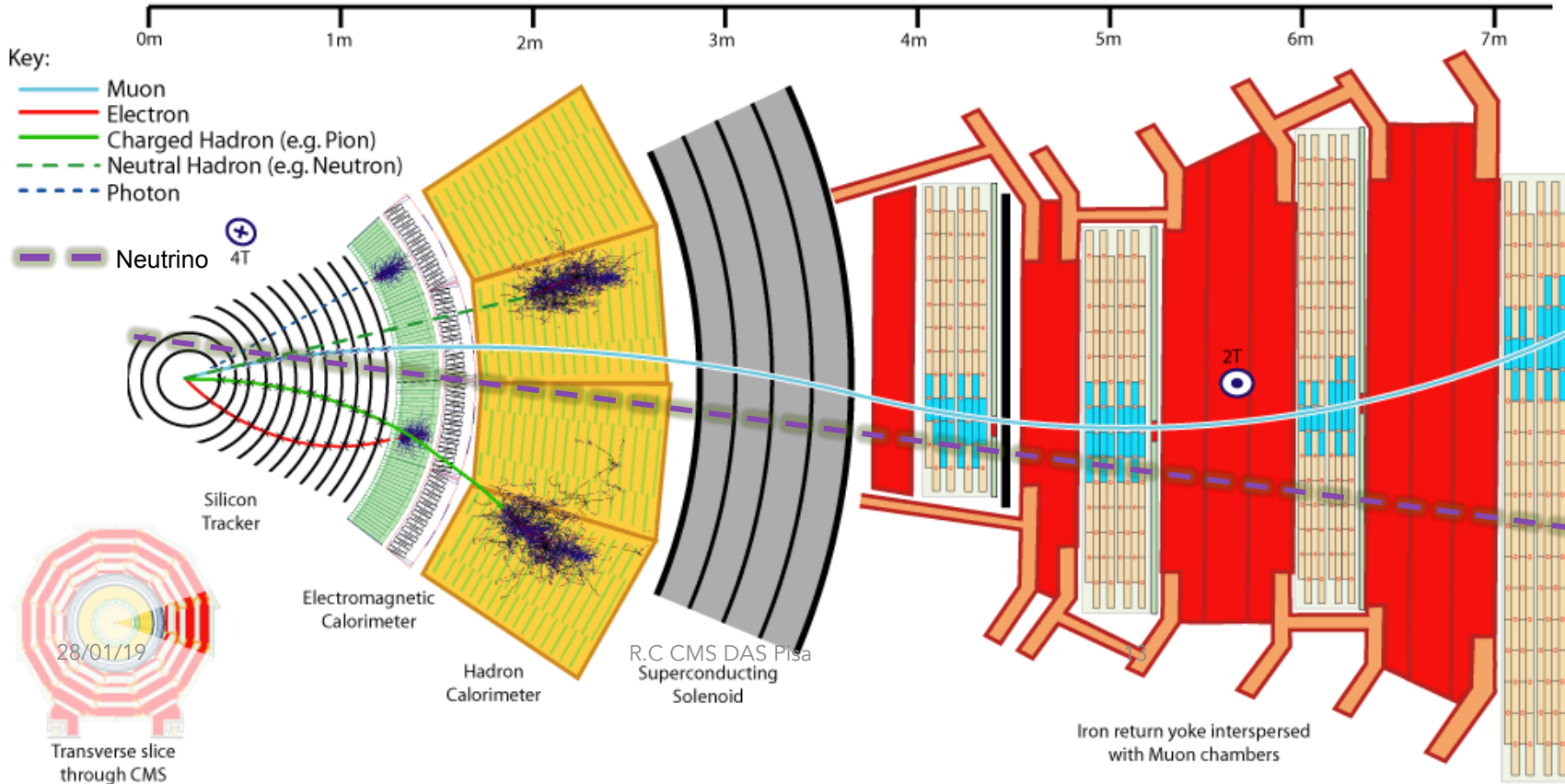
B



# The CMS detector



← 7 meters →

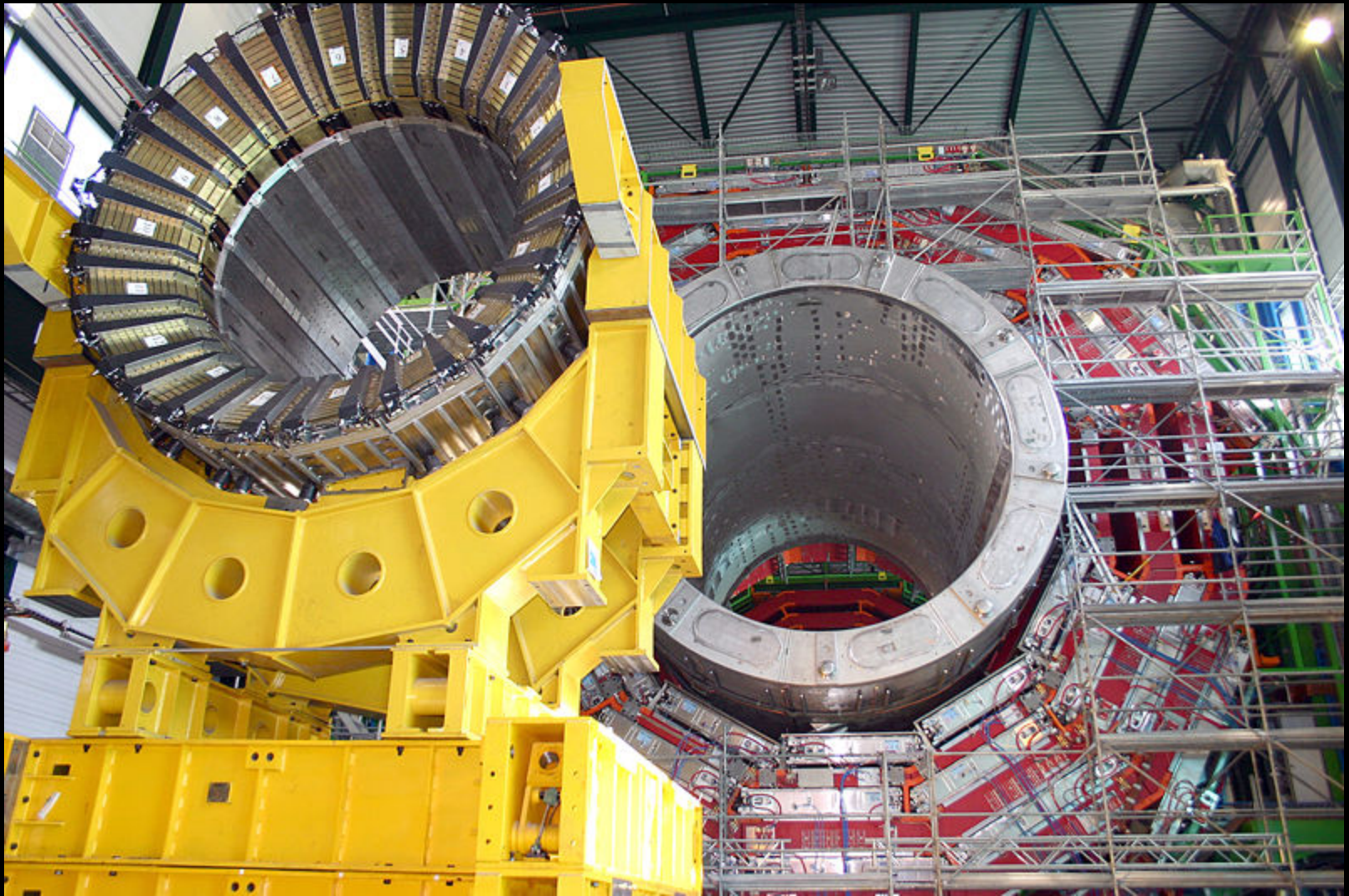


# CMS – Muon Chambers



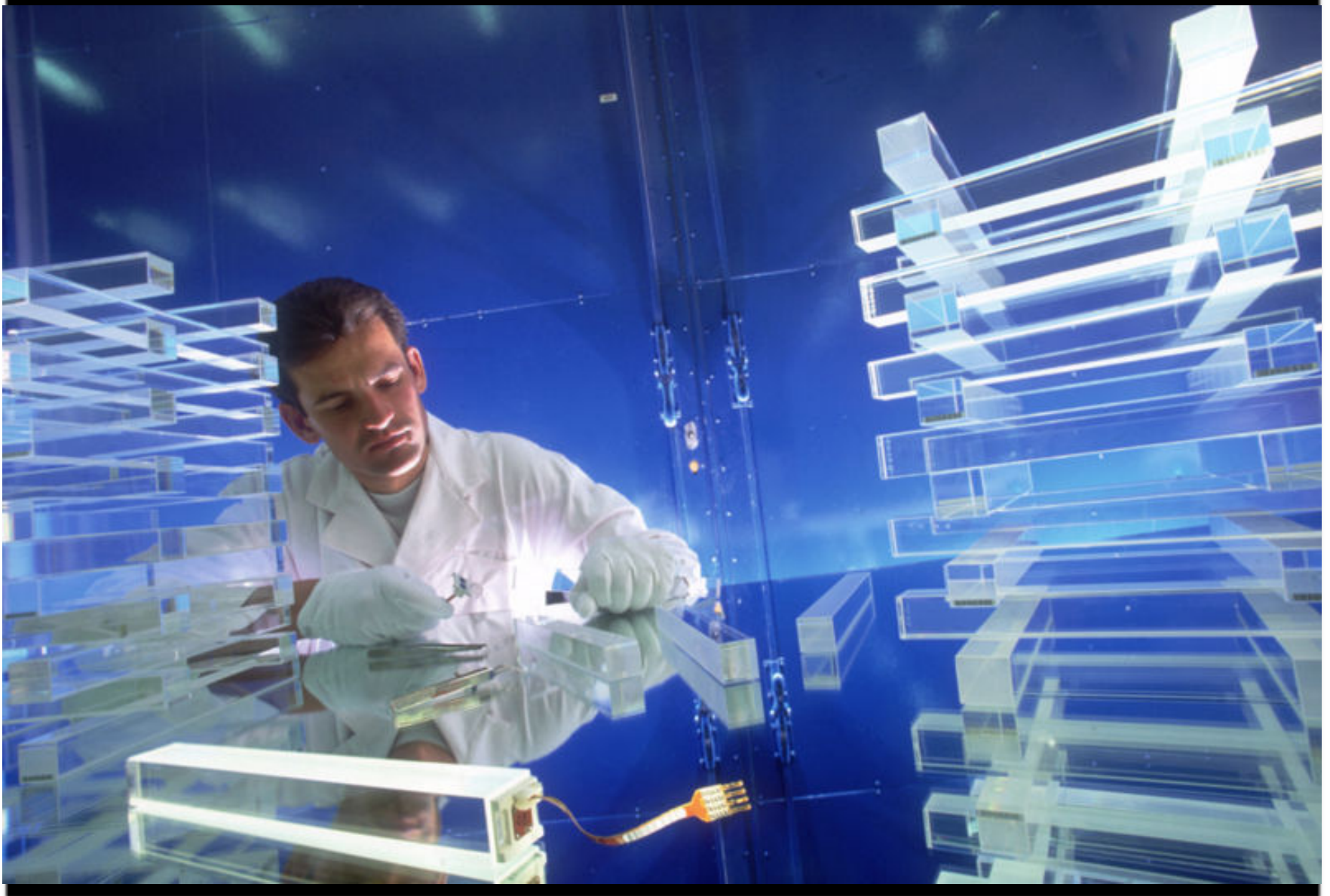
Camere per rivelare i  $\mu$

# CMS – Hadronic Calorimeter



CMS: calorimetro adronico pronto a essere inserito nel solenoide

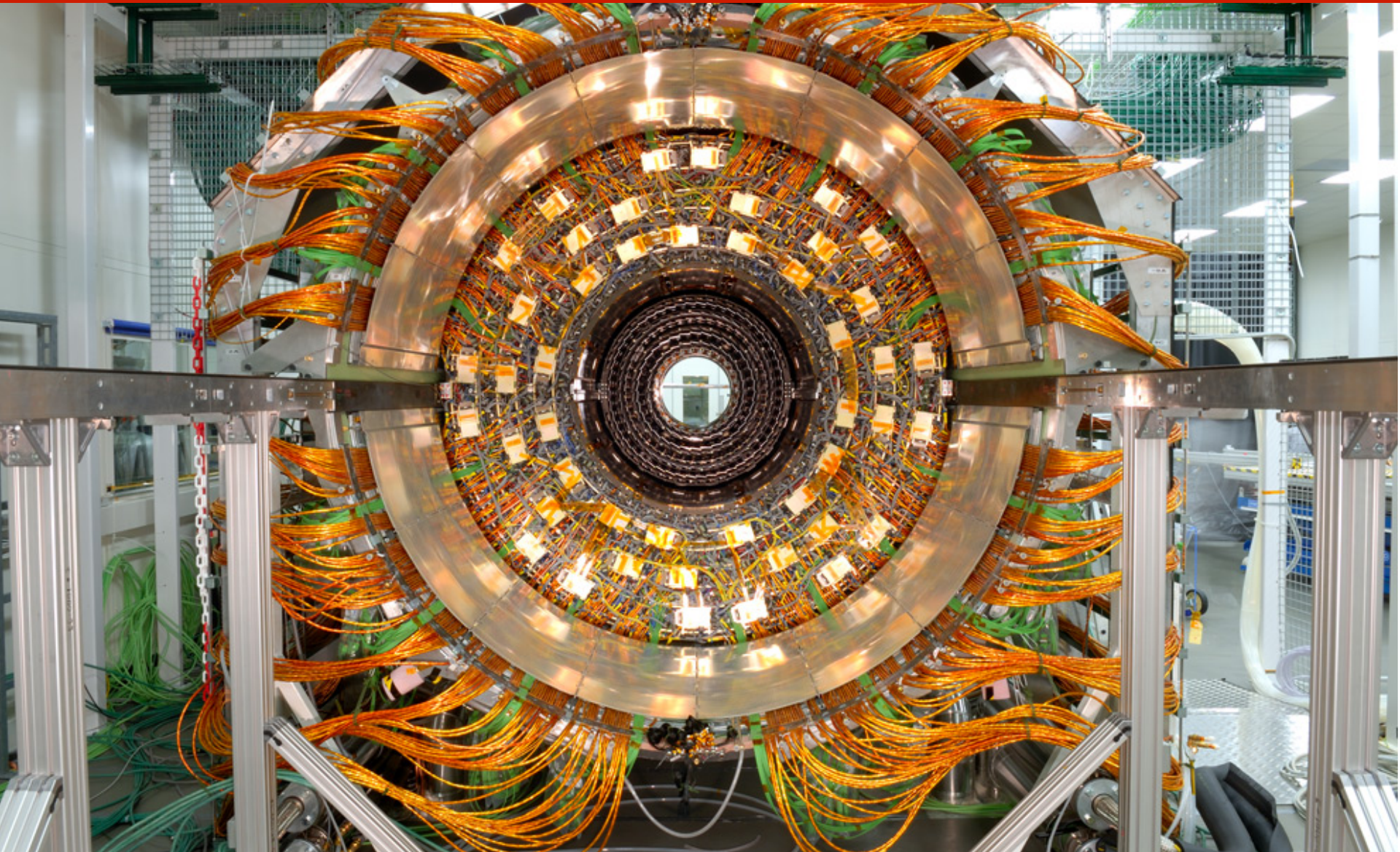
# CMS – Electromagnetic Calorimeter



Test di qualità dei cristalli del Calorimetro Elettromagnetico

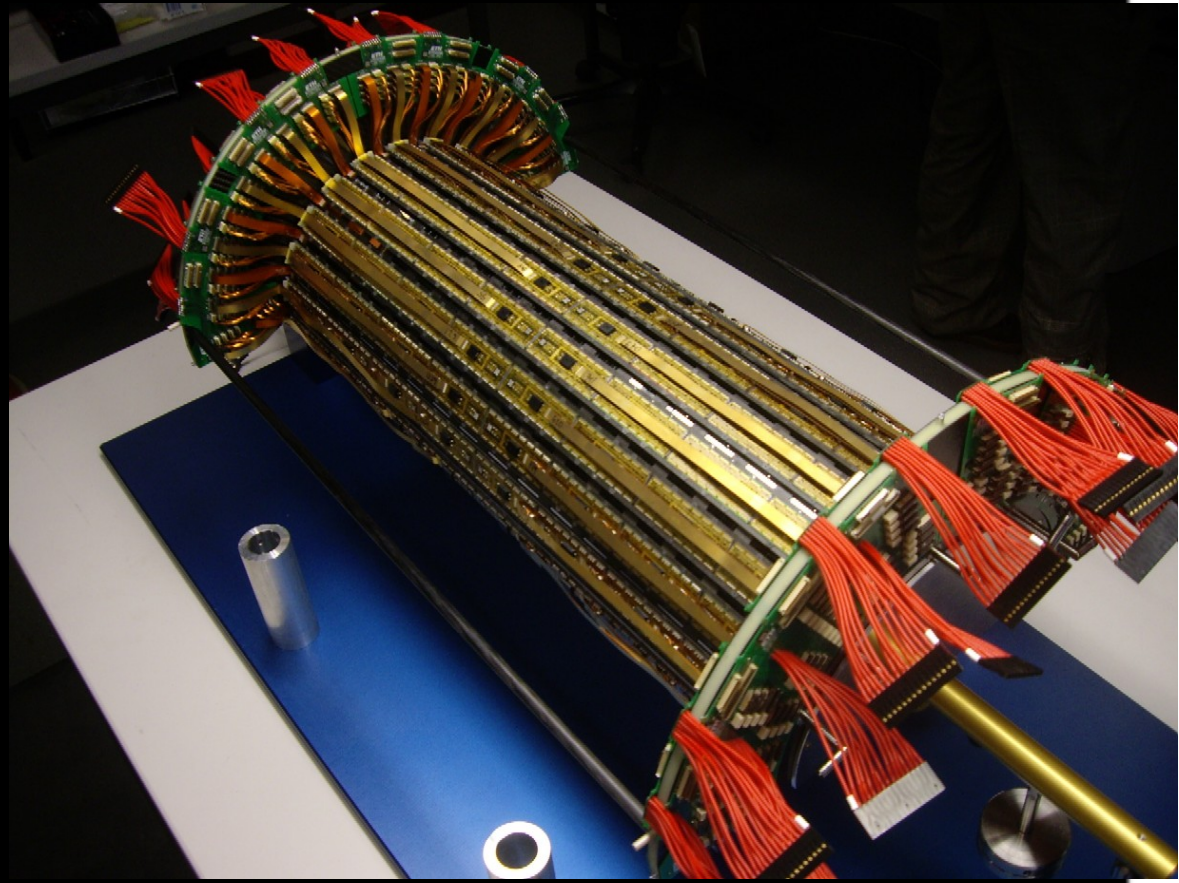
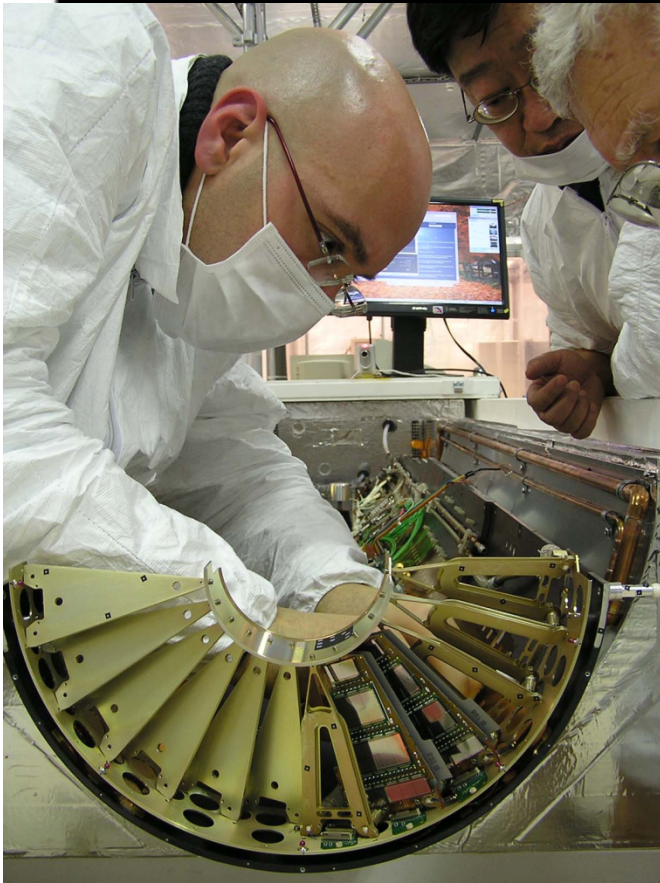


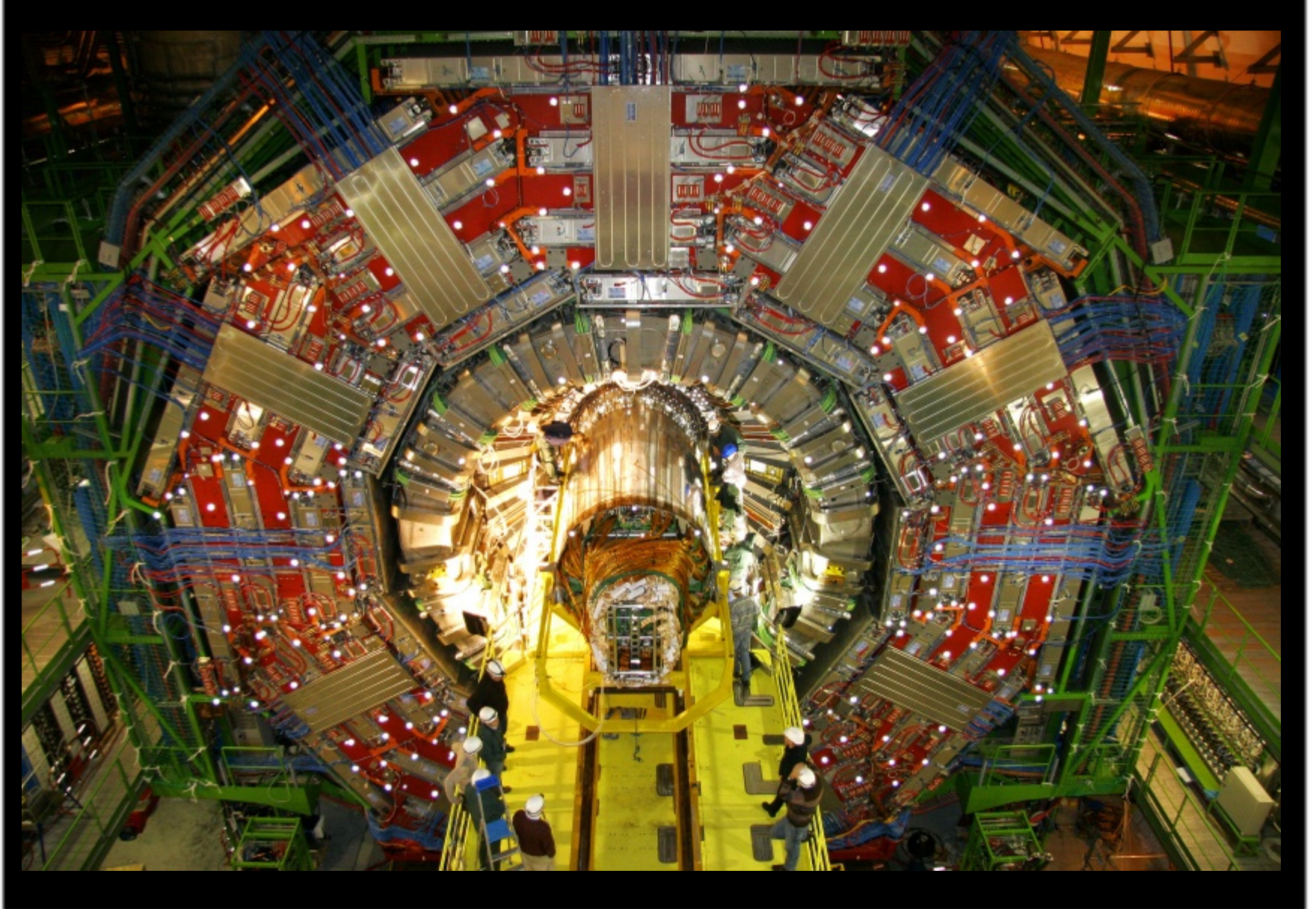
# CMS – Tracker



Cablato e pronto a funzionare!

# CMS – Pixels

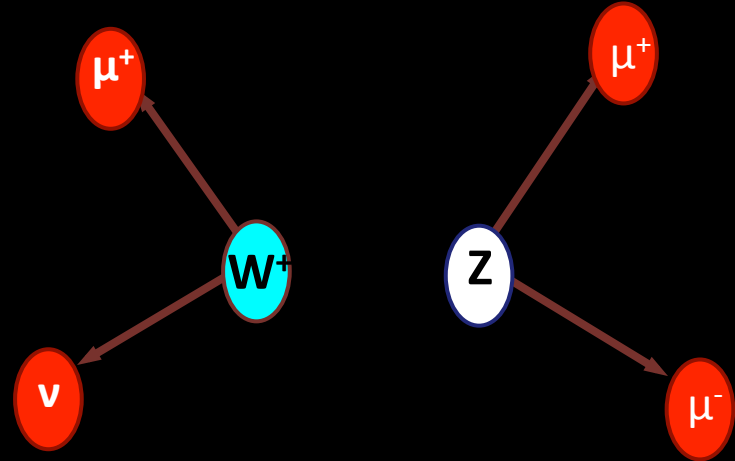




Inserimento del tracker nel rivelatore CMS

# Particelle pesanti: bosoni W e Z

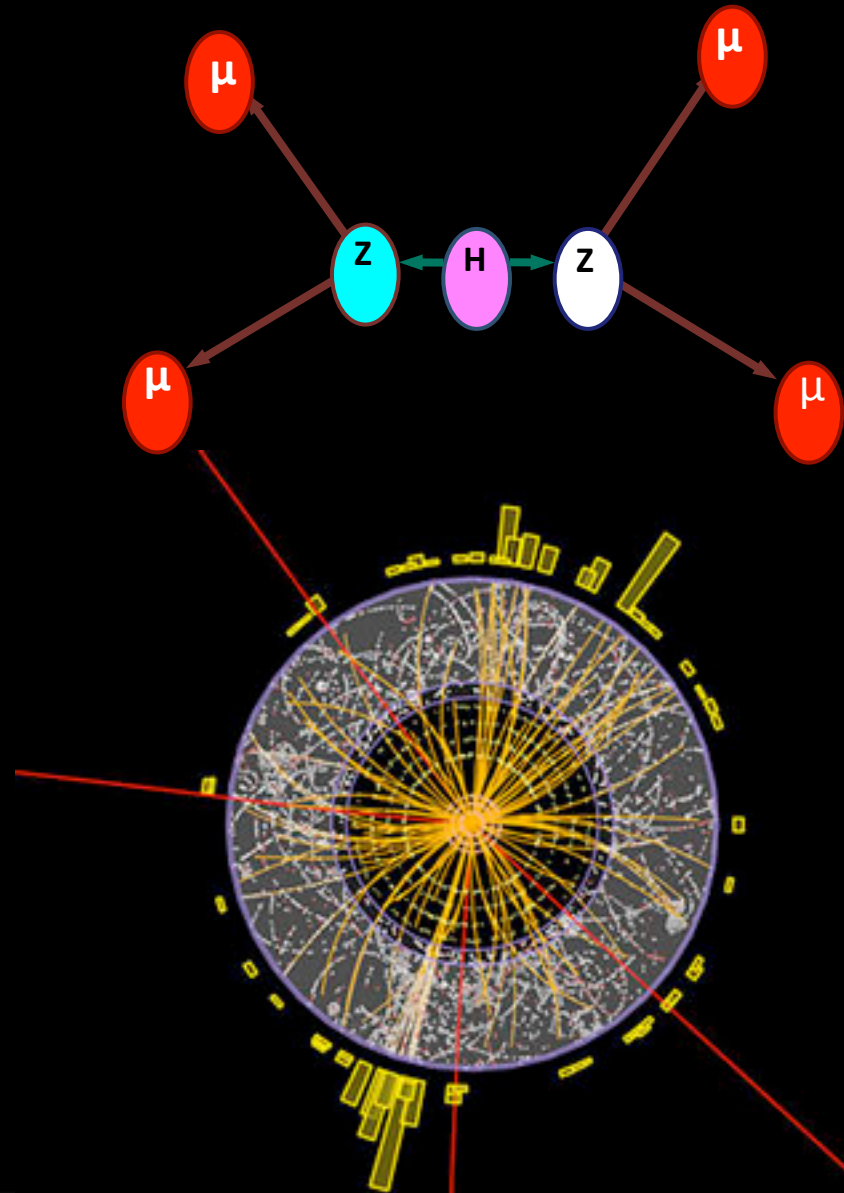
- Particelle pesanti decadono subito dopo essere prodotte
  - Vite medie  $\sim 10^{-24}$  sec
- Possiamo “vedere” solo le particelle prodotte dalla disintegrazione



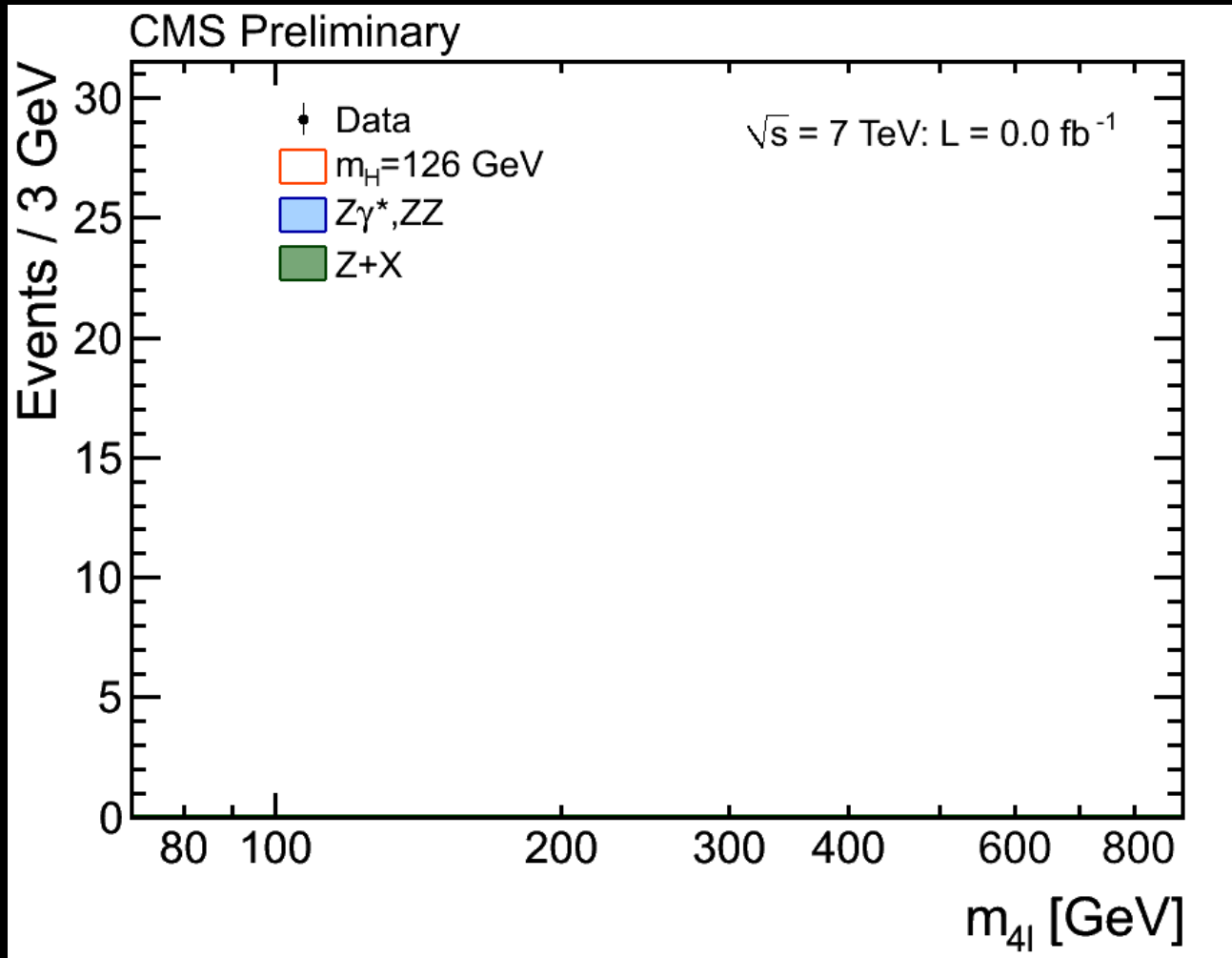
- I prodotti di decadimento trasportano la massa delle particelle madri sotto forma di energia.
- Il loro essere energetici li rende distinguibili, consentendo di identificare eventi di decadimenti con alta purezza (= rapporto segnale-rumore  $\gg 1$ )

# Ricostruire il bosone di Higgs

- Il bosone di Higgs una volta creato si disintegra subito e produce altre particelle. Tra i decadimenti principali ci sono
  - Due fotoni
  - Quattro **elettroni** o **muoni**.
- Ci sono tante altre collisioni dove possono essere creati **due fotoni** o quattro **elettroni** (o **muoni**) che vengono registrati dal rivelatore: è il “**rumore**” di **fondo**

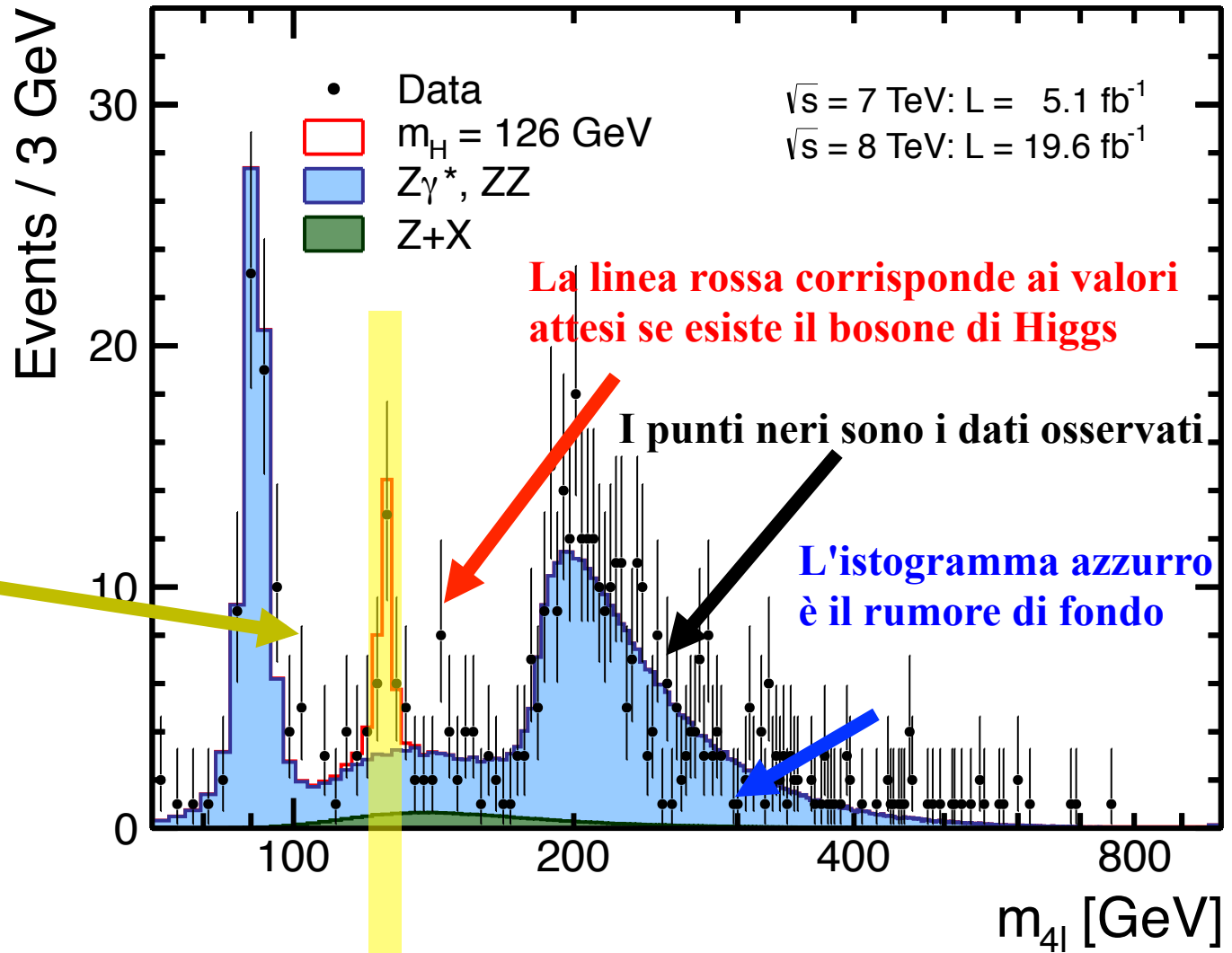


# $H \rightarrow 4l$



# H → 4l

CMS preliminary



Qui c'è un eccesso di dati rispetto al previsto!

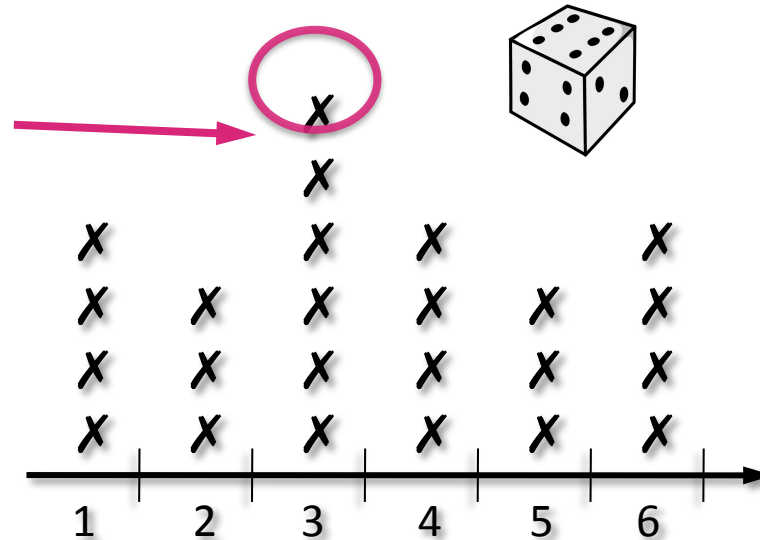
I dati sono compatibili con la presenza del bosone di Higgs di massa 125 GeV

# Abbiamo scoperto una nuova particella?

- Le collisioni di particelle sono processi intrinsecamente **casuali**
- Le previsioni teoriche si possono fare sul **risultato medio** atteso ma non sulla singola collisione (meccanica quantistica!)
- Come stabilire se l'eccesso è dovuto a segnale o ad una fluttuazione statistica del fondo?

Possiamo dire che un dado è "truccato" se un numero è estratto più frequentemente di altri

Può succedere anche per un dado normale, con una probabilità però bassa



- I fisici dichiarano una "scoperta" se la probabilità che il fondo fluttui in modo da dare un segnale simile a quello osservato sia meno di **uno su 3.5 milioni** (" $5\sigma$ ")



# ... e adesso?

- LHC è stato spento dal 2013 per 2 anni, per poter apportare migliorie (upgrade) tali da fornire collisioni più frequenti e ad energie più elevate (13 TeV).



- LHC è rientrato in funzione nel 2015 e gli esperimenti sono ripartiti migliorando la conoscenza dell'Higgs e alla caccia di nuove scoperte tra cui risolvere misteri quali quello della materia oscura.
- LHC è ora spento per ulteriori upgrade all'acceleratore ed ai rivelatori, verrà riaccessso nel **2021**
  - Tra 3-4 anni, potreste trovarvi a fare un tesi di master su dati mai analizzati prima
  - Il dipartimento di Fisica di Pisa, come altre grandi Università italiane, vi offre questa opportunità grazie all'INFN



**INFN**

a cura dell'Ufficio Comunicazione INFN, video editing Francesca Cuicchio

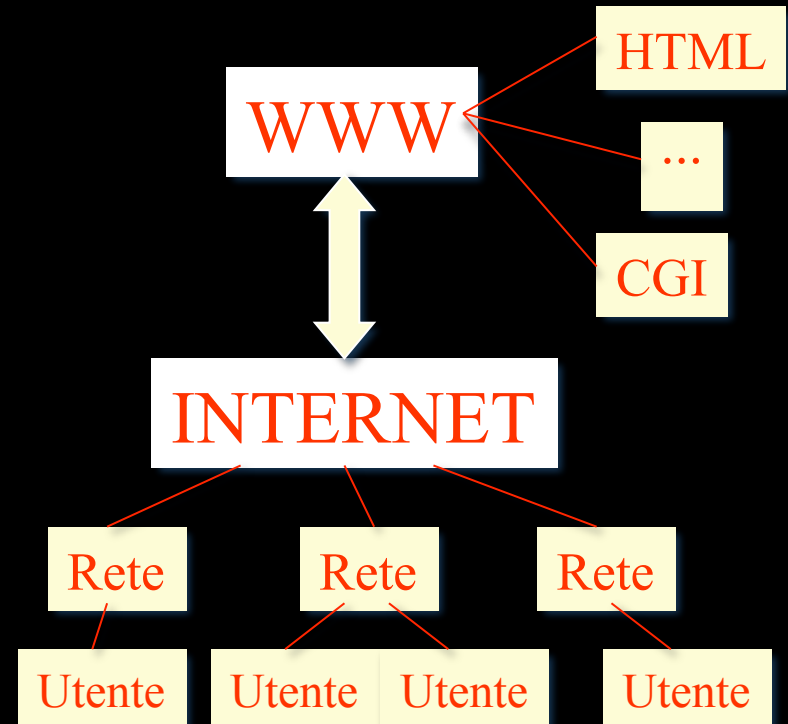
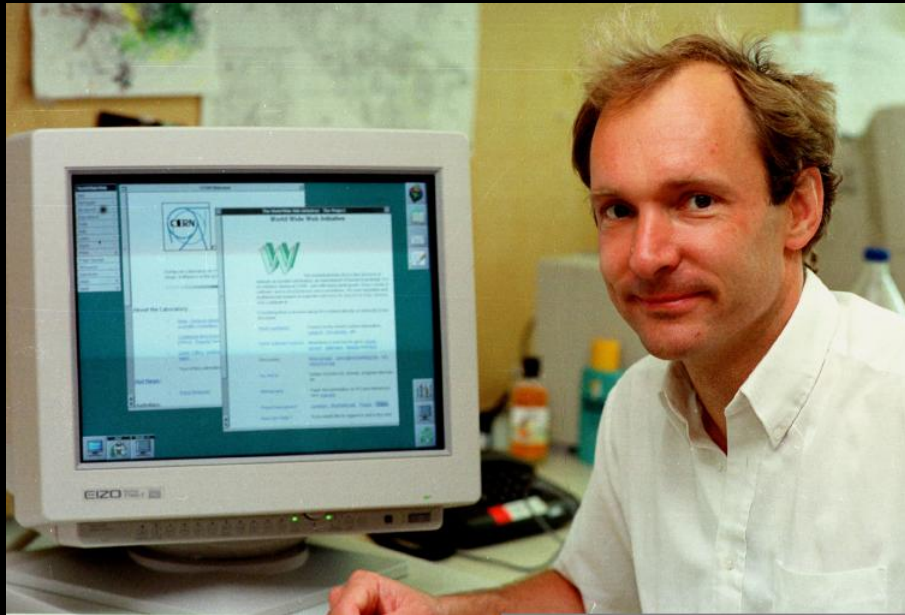
# “Verso un nuovo mondo”

- Abbiamo costruito apparati sofisticati ed enormi per cercare una particella puntiforme che spiega il perchè le particelle elementari hanno massa.
  - La scoperta del bosone di Higgs è una scoperta di enorme importanza, forse addirittura più sconvolgente della scoperta dell'elettrone.
- È un grande successo di una comunità non solo di migliaia di fisici, ma anche di ingegneri, informatici ecc con competenze di eccellenza in moltissimi settori strategici: microelettronica, telecomunicazioni, trattamento e analisi dati,...
- La scoperta scientifica è il seme del progresso tecnologico
- È un processo complesso ma con ricadute economiche e sociali enormi, che riguarda tutti:
  - Avviene su una scala di tempi imprevedibile ossia molto lunga
  - Gli scopritori non diventano ricchi, ma tutti ad un certo punto diventiamo più ricchi

# Quello che non sapevamo nel 1989...WEB

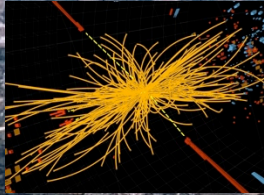
- Non tutti sanno che il WWW è stato inventato al CERN da Tim Berners-Lee
- Lo scopo era la gestione delle informazioni all'interno delle grandi collaborazioni che lavoravano agli esperimenti di fisica delle particelle

<http://home.web.cern.ch/topics/birth-web>



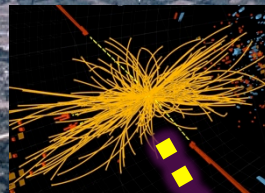
# Sfide Sperimentali

CMS



# Sfide Sperimentali

CMS



Collision event data

- $\sim 1 \text{ MB/evento} \times 40 \text{ MHz}$  insostenibile per la farm ricostruzione che per salvataggio su disco
- $\Rightarrow$  Riduzione event rate tramite algoritmi online (trigger) a  $\sim 1 \text{ kHz}$





**Che vengono trasmessi e analizzati su una rete di computers in tutto il mondo : la GRID che connette 1 milione di cores in 200 siti di 35 paesi diversi. Traffico dati generato (40 Gb/s) paragonabile al traffico istantaneo di telefonia mondiale. Storage ~ 1000 PB.**

# La Grid OGGI

Le Grid sono oggi utilizzate dagli scienziati per affrontare problemi cruciali ed estremamente complessi come studiare l'origine e l'evoluzione dell'Universo, costruire molecole in grado di debellare la malaria o combattere il cancro, prevedere l'effetto sulle nostre vite del riscaldamento globale, gestire situazioni di crisi ambientali o sanitarie ecc.

**Pensate alle possibili applicazioni ed evoluzioni delle GRID!**

Per maggiori informazioni:

<http://www.asimmetrie.it/index.php/molte-reti-per-una-grid>

Video sulla GRID europea

<https://www.youtube.com/watch?v=5XO2CCnHlZU>



# Lo sapete che...

Moltissime sono le applicazioni nella vita di tutti i giorni che utilizzano particelle, rivelatori e tecnologie sviluppati per la fisica delle alte energie ?

Solo qualche esempio di quelle di cui sicuramente avete sentito almeno il nome:

Radiografia

TAC

PET

Scintigrafia ossea

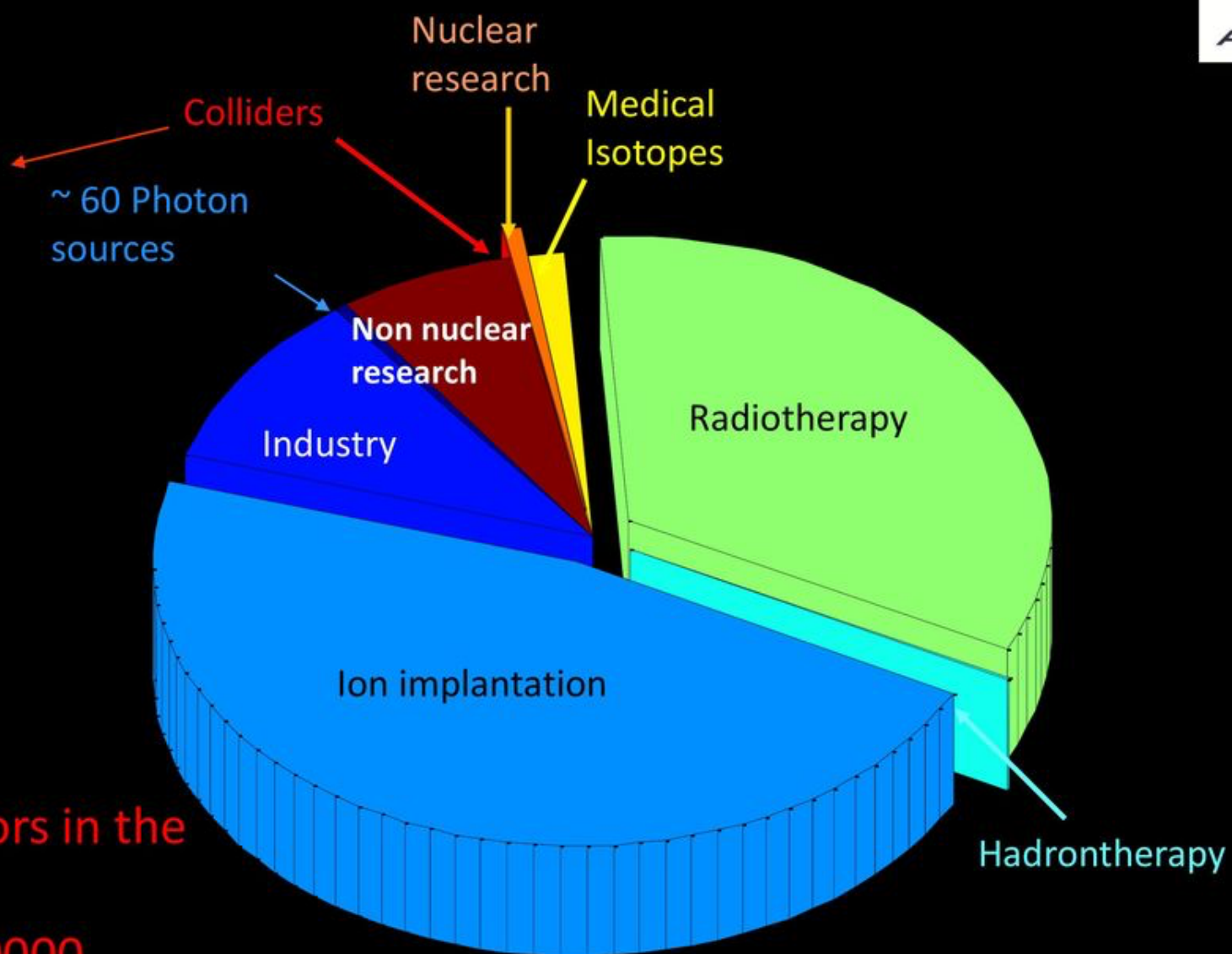
Acceleratori per la cura dei tumori

Acceleratori per la produzione di isotopi per imaging medicale

Acceleratori per studi di biologia strutturale (DNA batteri e altro)



- 1 CERN
- 1 Italy
- 2 Russia
- 1 China
- 1 USA
- 1 Japan

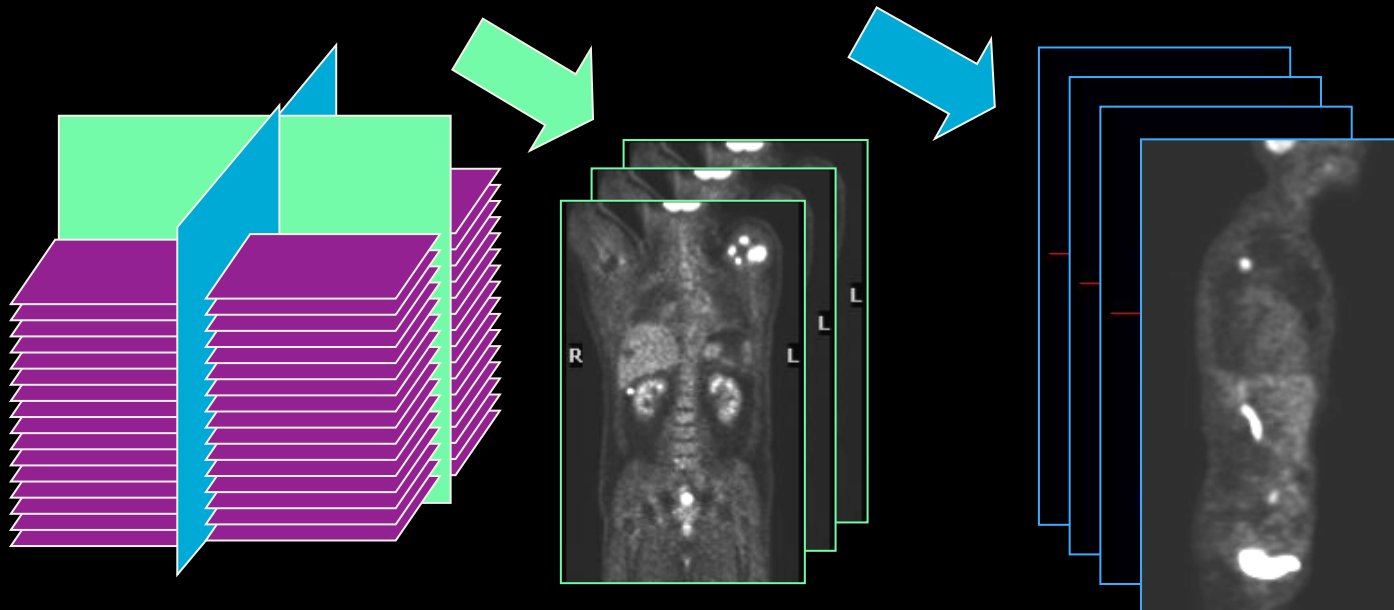
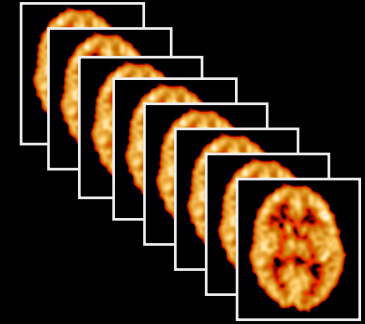
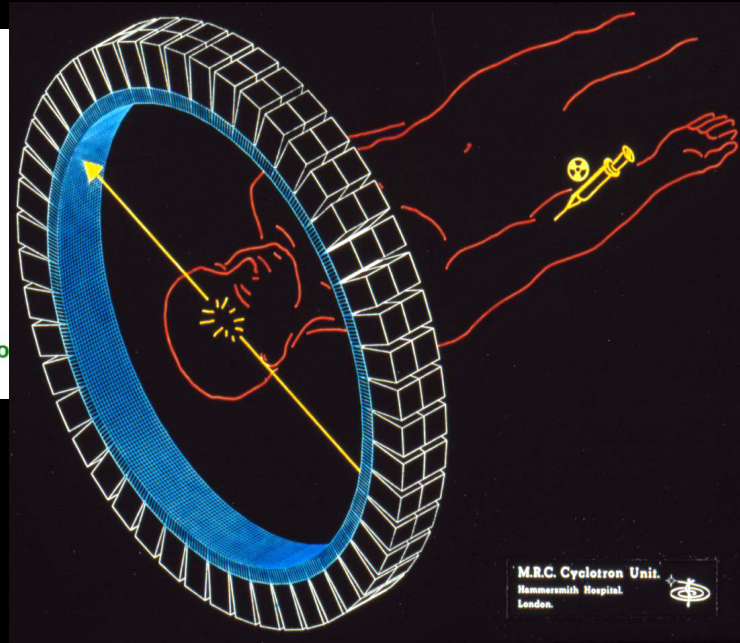
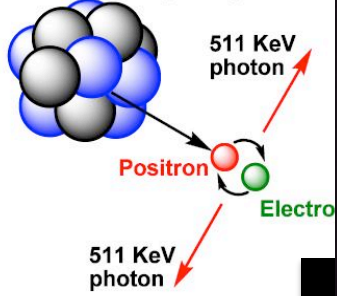


Accelerators in the world:  
around 30000  
(15000 in 2000)

# PET

A

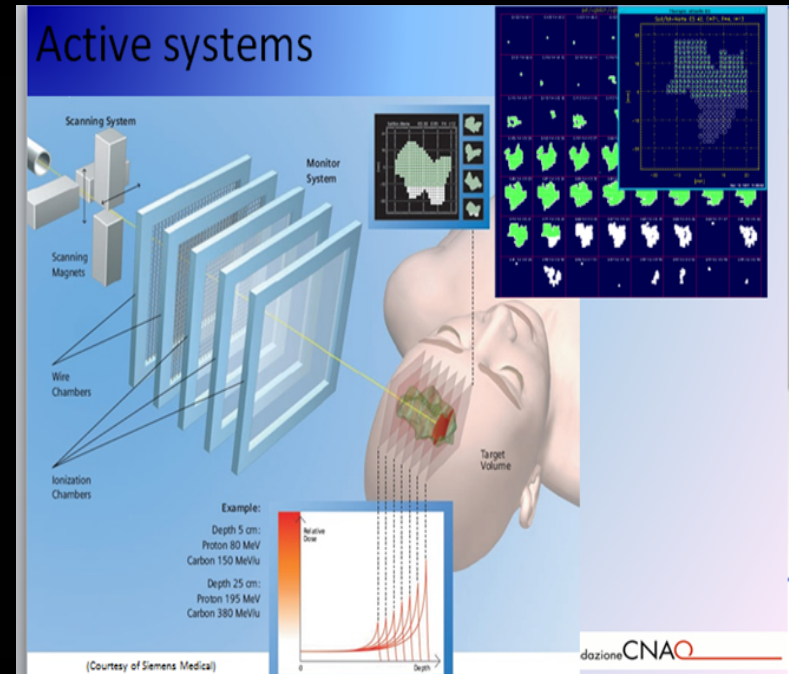
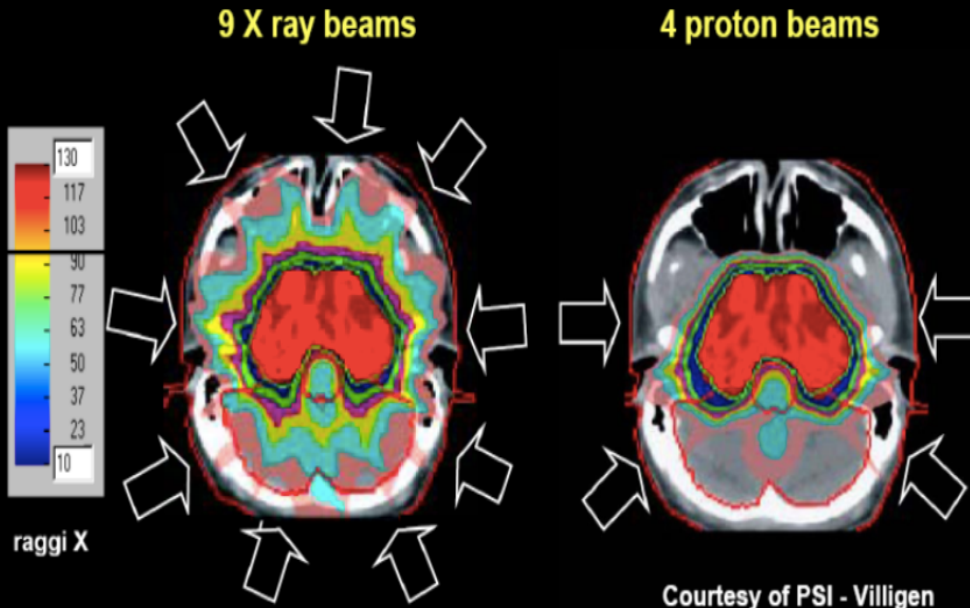
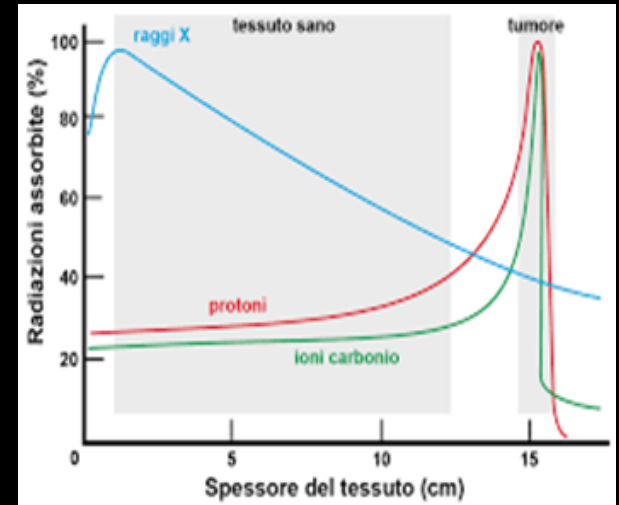
Positron emitting isotope



# Gli acceleratori per la cura dei tumori: ADROTERAPIA

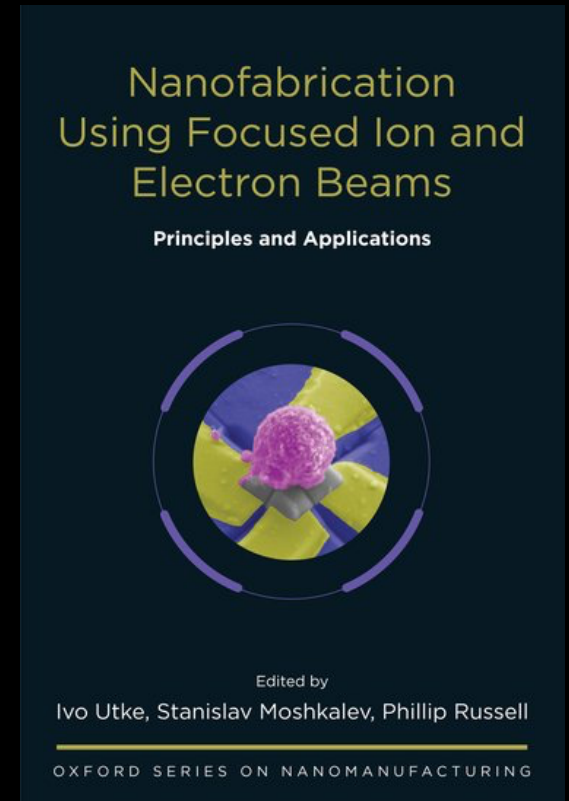
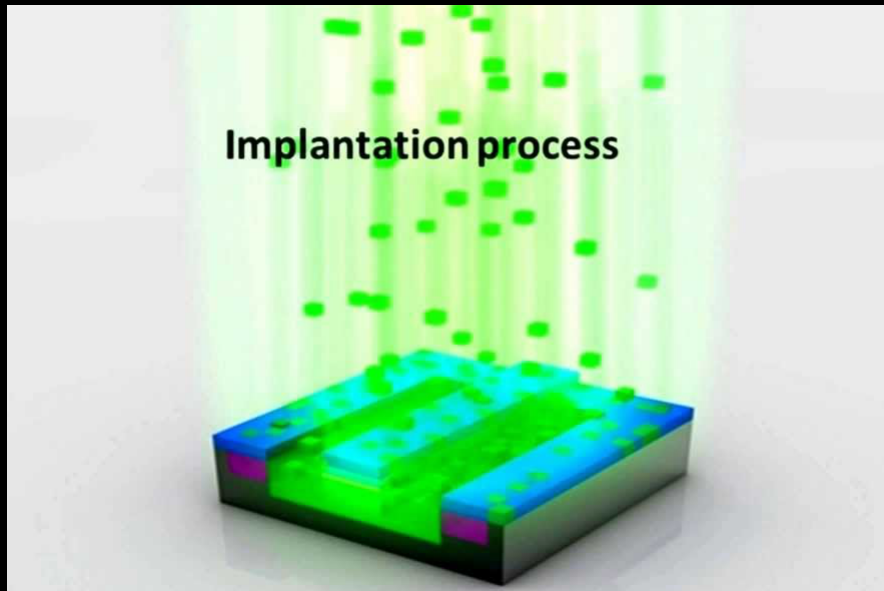
- Usa protoni o ioni per depositare energia prevalentemente nel tratto finale della traiettoria,

È un bisturi per tumori, permette di risparmiare maggiormente i tessuti sani



# Acceleratori e Tecnologia: Impiantazione ionica

Sviluppo di materiali poco costosi, leggeri ed efficaci per applicazioni elettroniche

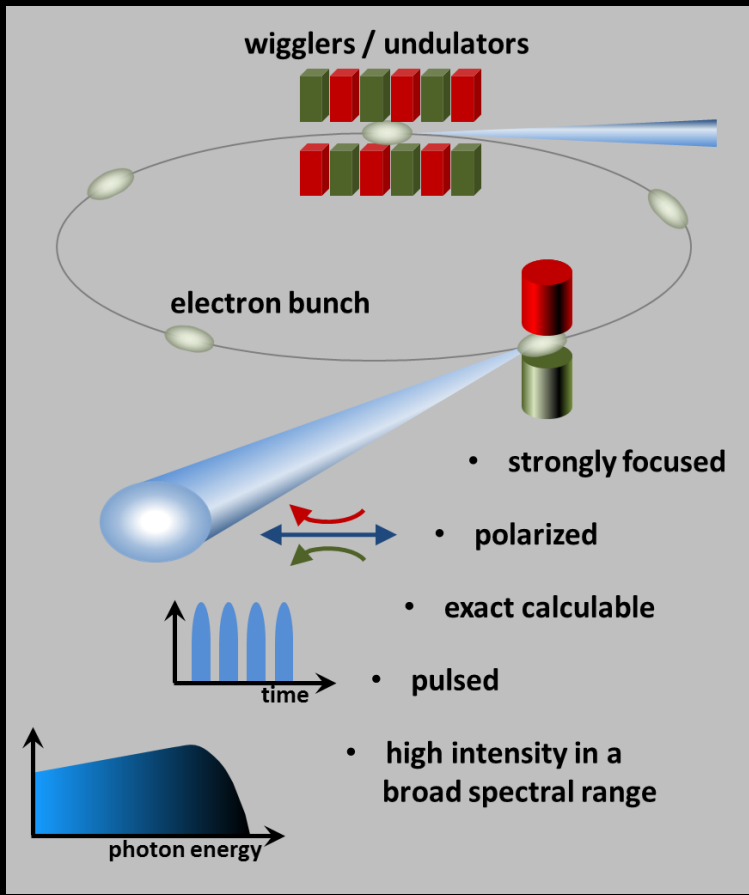
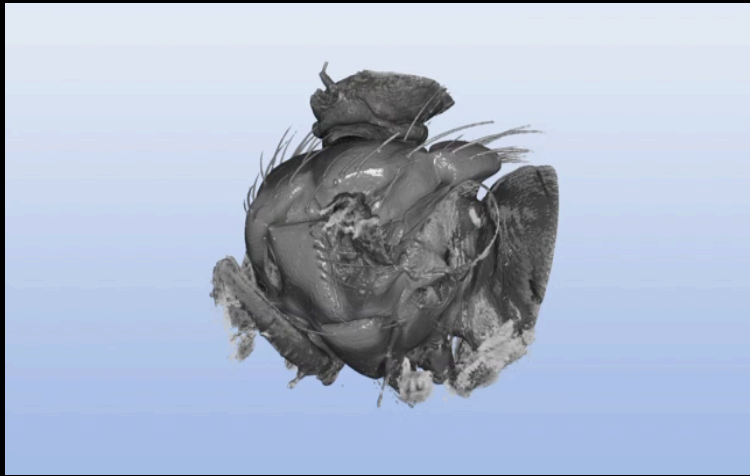


Silicio o Germanio bombardato con ioni che penetrando nel reticolo cristallino modificano le caratteristiche elettriche del materiale — transistor/diodi

# Acceleratori: Luce di sincrotrone

fotoni emessi da elettroni accelerati e deflessi da campi magnetici

mosca *in vivo*



Fluorescenza a raggi X  
autoritratto di Van Gogh  
nascosto sotto uno strato  
di erba



# Volete saperne di più di quello che vi ho raccontato?

- Rivista on-line dell'INFN sulle frontiere della Scienza e le sue applicazioni  
<http://www.asimmetrie.it/>  
In particolare  
<http://www.asimmetrie.it/images/stories/archivio-numeri-passati-pdf/asimmetrie-6-HR.pdf>
- Scienza per tutti  
Un sito dell'infn dedicato al pubblico ai docenti e agli studenti  
<http://scienzapertutti.Inf.infn.it/>
- I segreti di LHC e i suoi esperimenti  
<http://lhcitalia.infn.it/>
- Film di Scienza  
<https://www.youtube.com/user/comunicazioneINFN?feature=mhee>
- Ufficio Comunicazione INFN  
...e tantissimo altro  
<http://home.infn.it/it/comunicazione>

# Volete saperne di più di quello che vi ho raccontato?

- CMS film su VLC

- Installazione di CMS

<https://www.youtube.com/playlist?list=PL68DA09E89731866C>

- Le attività dell'INFN

<https://www.youtube.com/watch?v=xLOZH4mSiho>

I giganti della Fisica

<https://www.youtube.com/watch?v=a3NPnG6Xgm8>

Guido Tonelli (Università di Pisa) qualche anno fa CMS

<https://www.youtube.com/watch?v=KFtSjybIAQ0>

Sergio Bertolucci (Laureato a Pisa!)

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

La Grid

<https://www.youtube.com/watch?v=rCOpEbzLMM0>

- Universo Bambino

<https://www.youtube.com/watch?v=62MsjMqG7Q8>

- Onde Gravitazionali

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

<https://www.youtube.com/watch?v=XCkiJyf8q-E>

- Ricerca e società

<https://www.youtube.com/watch?v=i6Tlx86Tkoo>

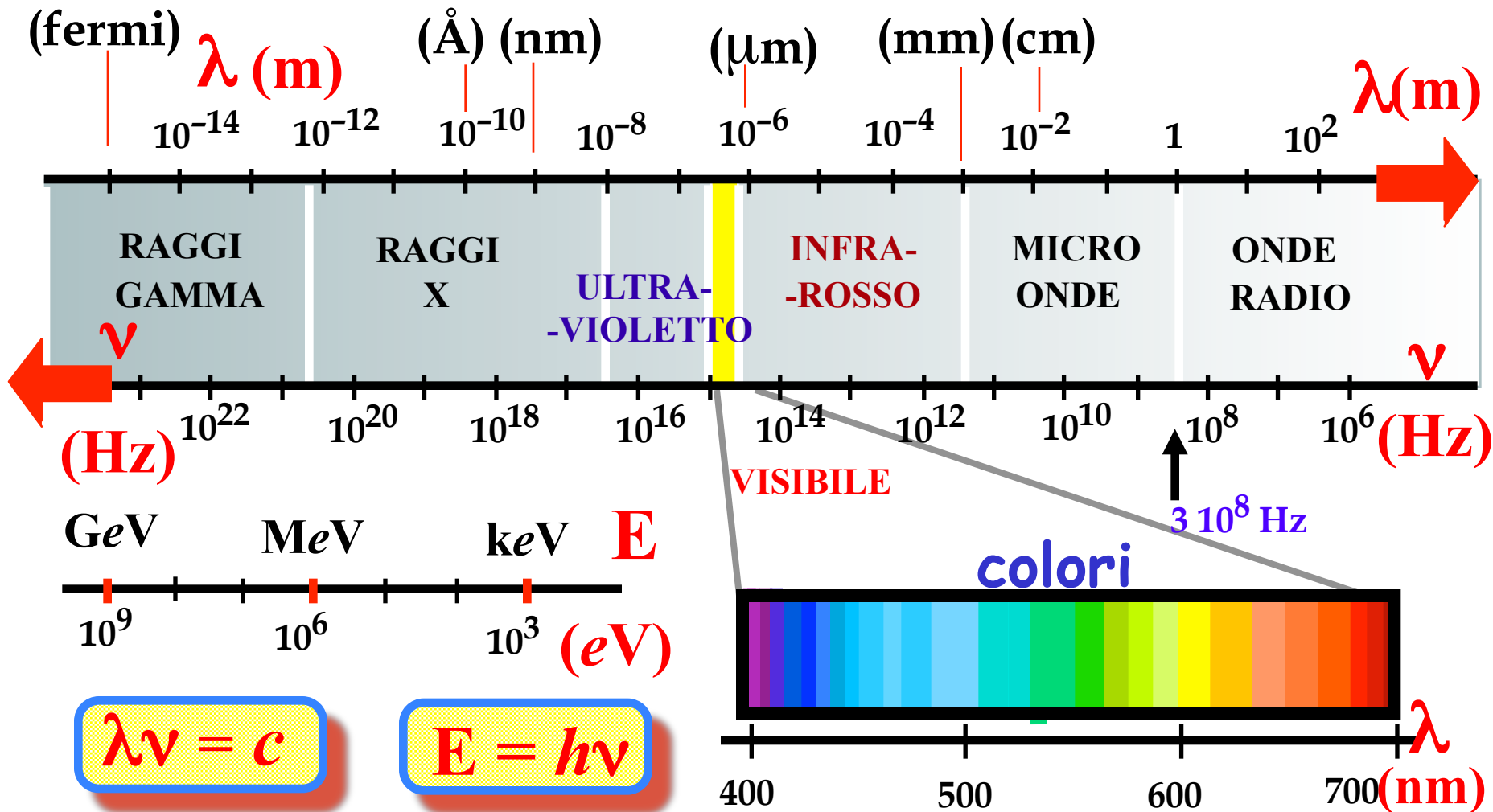


Grazie e buon divertimento!

# Esercizio MasterClass

- Dividiamoci in 20 gruppi da 2 e sceglietevi un numero progressivo XX tra 41 e 60.
  - Aprite la vostra tabella su <https://www.i2u2.org/elab/cms/cima/index.php> scegliendo CERN-03Apr2019 -> Pisa2019 -> XX
- Andate su <https://www.i2u2.org/elab/cms/ispy-webgl/> -> Open File -> Open file from Web, e caricate il file dati masterclass\_XX.ig
- Svolgimento esercizio a coppie - Discussione
- Documentazione:
  - <https://quarknet.i2u2.org/page/cms-masterclass-2017-documentation>
  - <https://cms.physicsmasterclasses.org/pages/cmswzit.html> pag. 42

# Spettro elettromagnetico



# CMS: una piccola parte della collaborazione (1/5)

