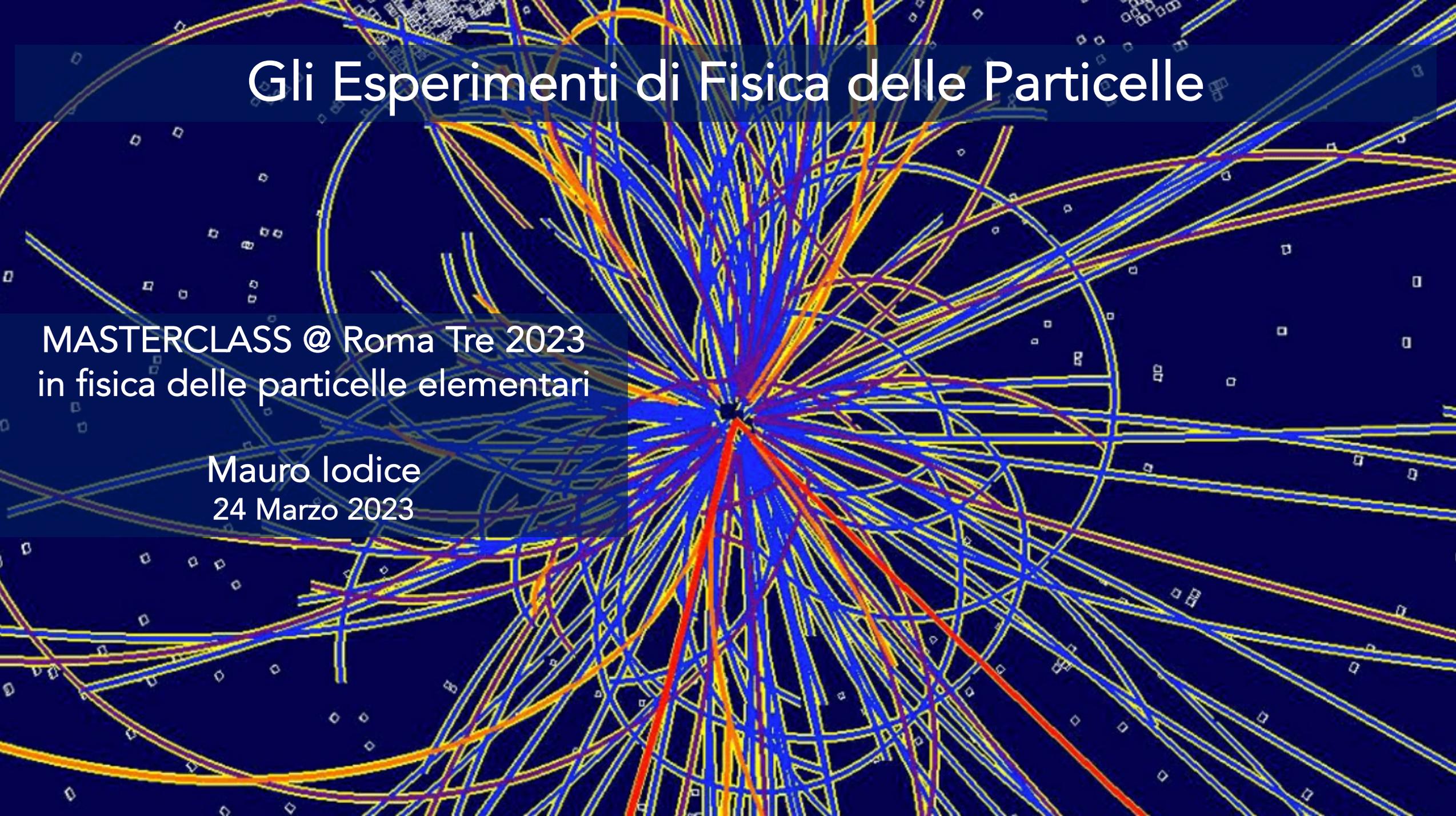


# Gli Esperimenti di Fisica delle Particelle

A complex visualization of particle tracks from a detector, likely a bubble chamber or cloud chamber. The tracks are represented by numerous thin, overlapping lines in various colors (blue, yellow, orange, red) that radiate from a central point, creating a starburst or 'jet' pattern. The background is dark blue with scattered small white squares, possibly representing other particles or detector elements.

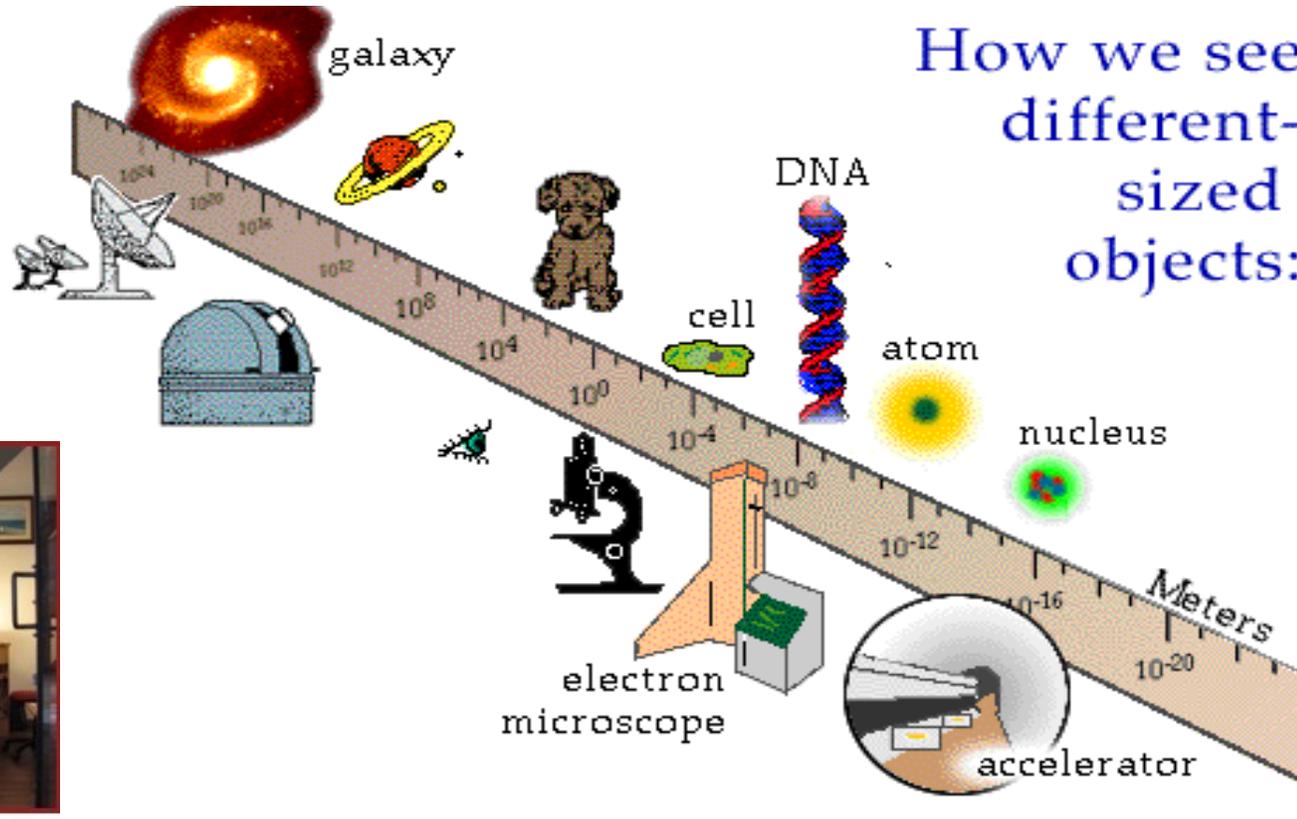
MASTERCLASS @ Roma Tre 2023  
in fisica delle particelle elementari

Mauro Iodice  
24 Marzo 2023

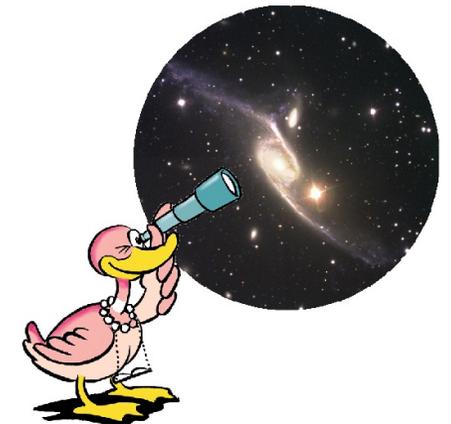
# Come osserviamo gli oggetti ?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare

How we see different-sized objects:



La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra  $0.4\text{--}0.8\ \mu\text{m}$  quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al  $\mu\text{m}$

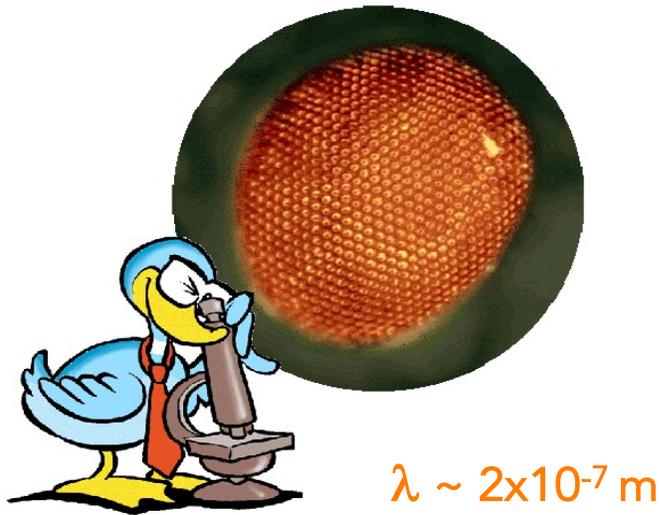


Per osservare oggetti grandi lontani, gli astronomi usano i telescopi.

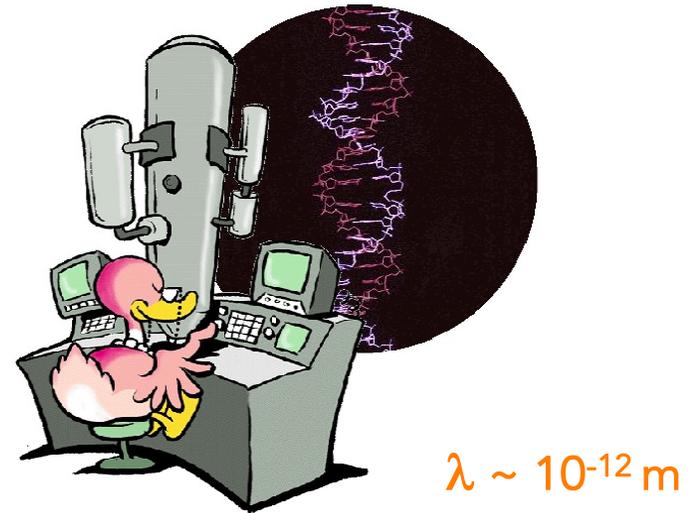
**Ma come guardiamo gli oggetti microscopici ?**

# Osservazione degli oggetti microscopici

I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



I **microscopi ad elettroni** ci consentono di osservare oggetti ancora più piccoli, fino al livello della struttura atomica. Usano piccoli fasci di elettroni come sonda



Per le leggi della meccanica quantistica, ogni particella può essere vista come un'onda con lunghezza d'onda  $\lambda$  inversamente proporzionale alla sua quantità di moto

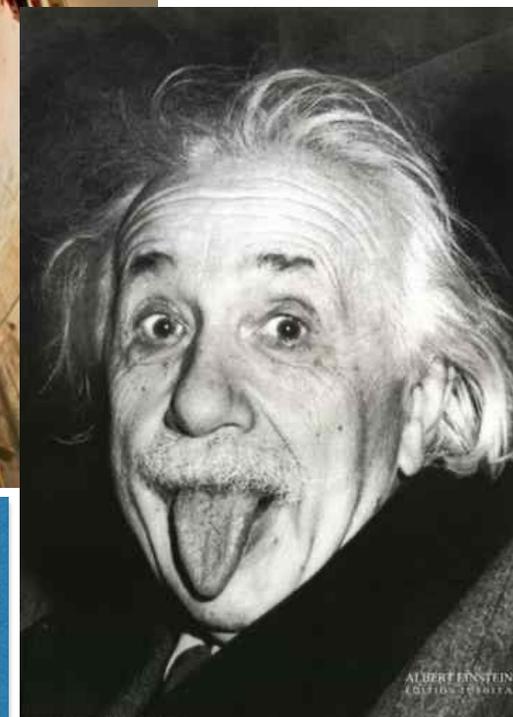
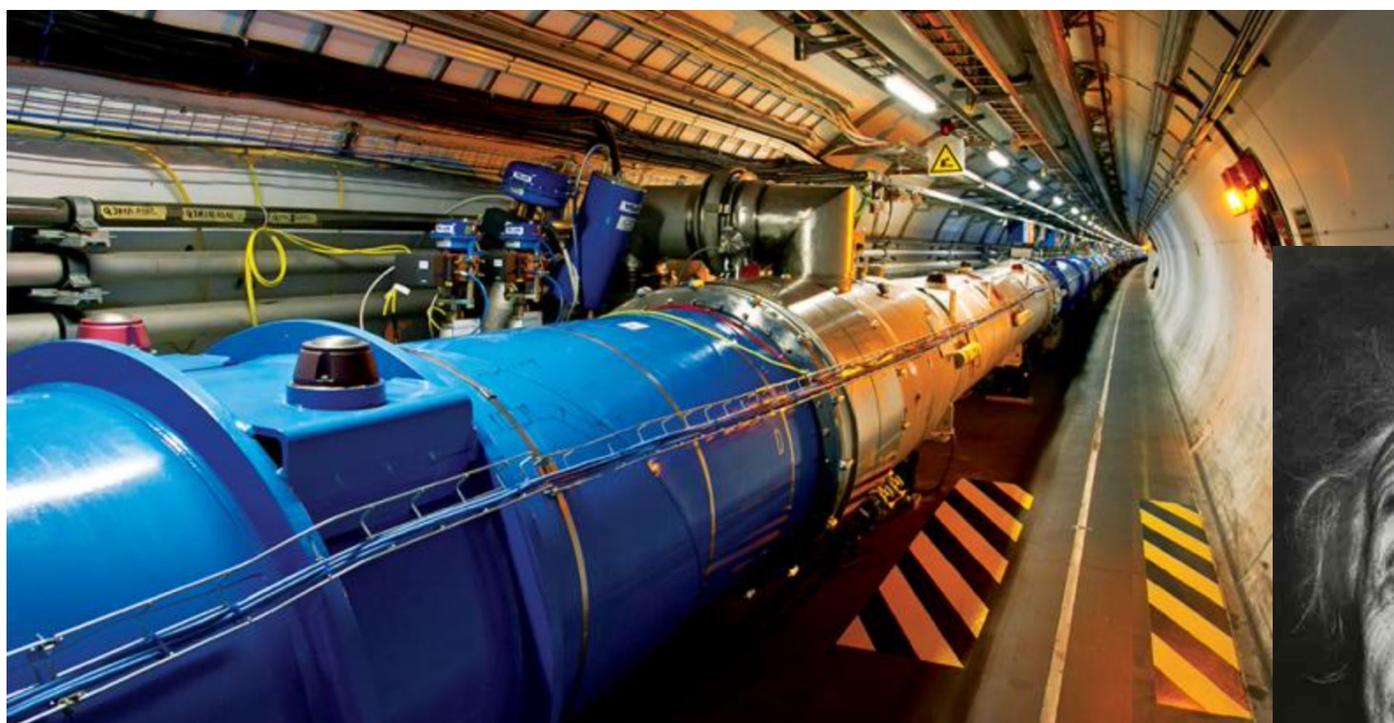
●  
elettrone



~~~~~  
 $\lambda \sim h/p$

PICCOLE DIMENSIONI  $\longleftrightarrow$  GRANDI ENERGIE

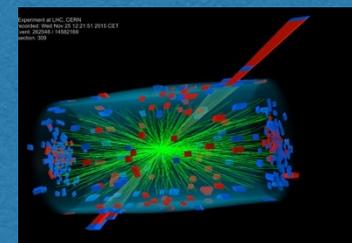
# Perché gli acceleratori di particelle ?



1. Per disporre di una radiazione di lunghezza d'onda sufficiente all'esplorazione della materia su distanze sempre minori:  $\lambda = hc/E$ .  
Con  $E \sim 10 \text{ TeV}$ ,  $\lambda \sim 10^{-19} \text{ m}$  (10'000 inferiore al raggio del protone)

2. Per disporre dell'energia necessaria a produrre nuove particelle non presenti nella materia ordinaria.  
Equivalenza fra massa e energia

$$E=mc^2$$



3. Per fare un viaggio indietro nel tempo...

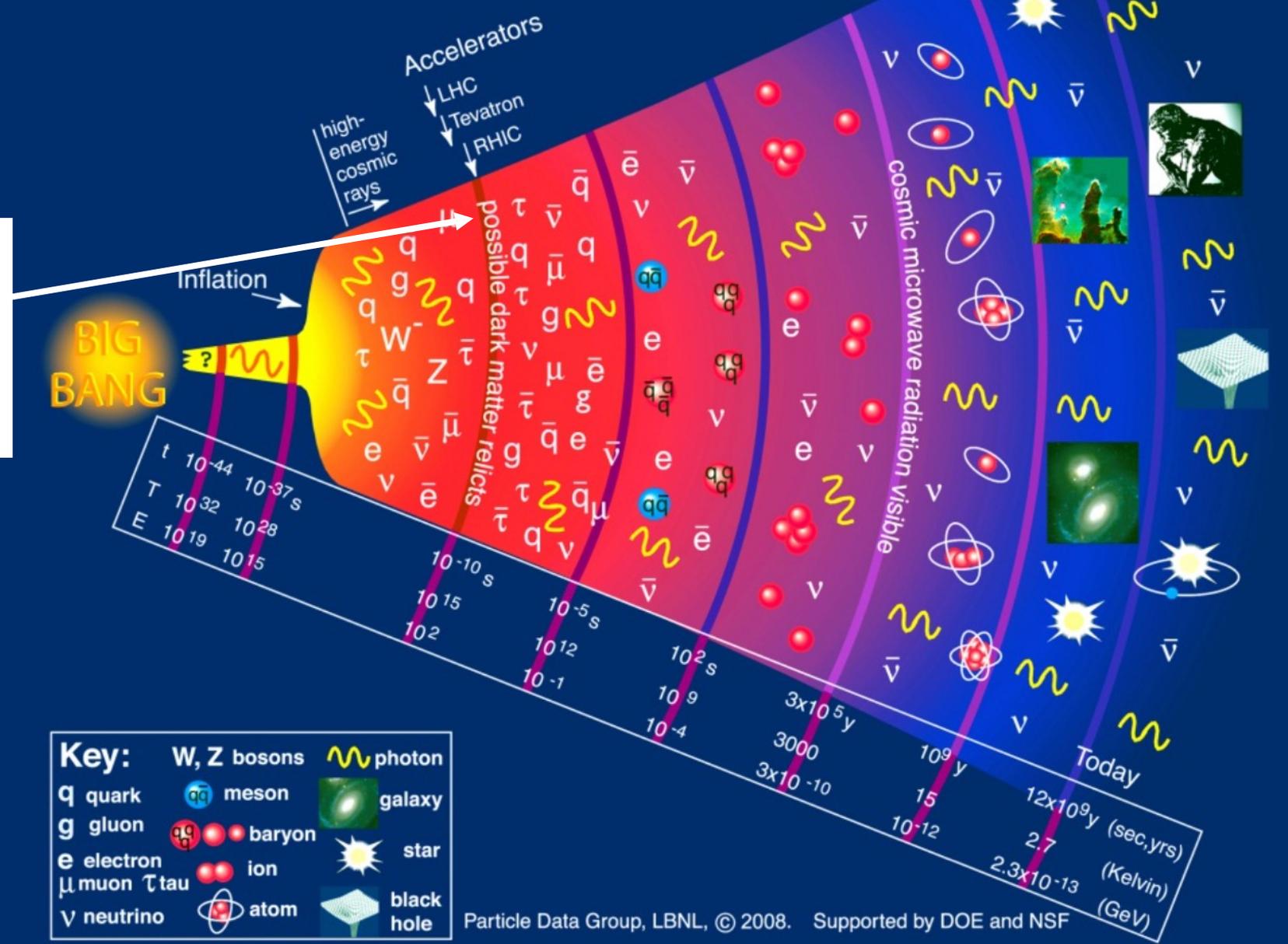


# Un viaggio alle origini dell'Universo

Le collisioni p-p a LHC ci riportano indietro fino a qui:

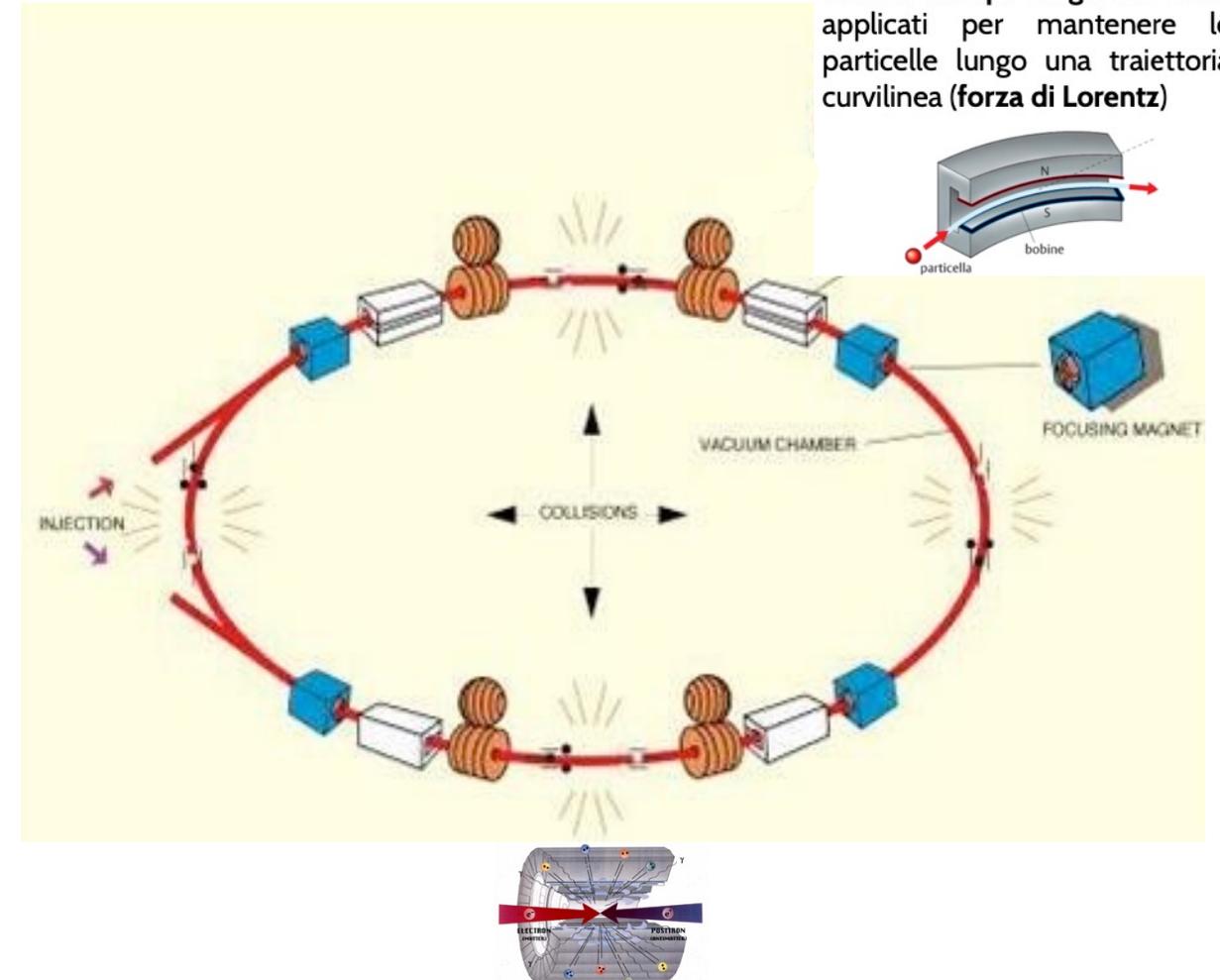
- $10^{-10}$  s dopo il Big Bang
- $10^{15}$  gradi K

## History of the Universe



# I Collider

- Due fasci di particelle viaggiano in direzioni opposte (in tubi a vuoto)
- Le particelle viaggiano raggruppate in pacchetti (bunch) ciascuno composto da circa  $10^{11}$  particelle
- Accelerazione, curvatura e foccheggiamento sono effettuati per mezzo di elementi magnetici diversi lungo l'anello
- i pacchetti vengono fatti incrociare tra di loro in uno a più punti dove le particelle collidono e vengono **RIVELATI** i prodotti delle collisioni



# I Collider

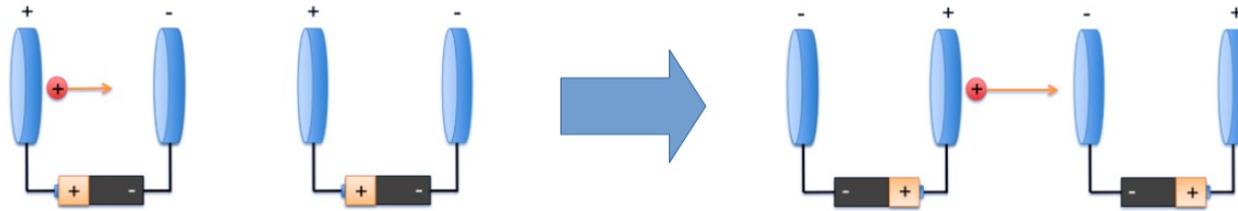
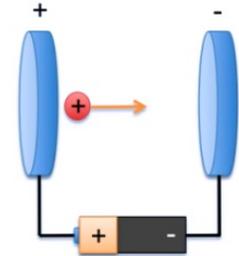
---

A Frascati è stato progettato e costruito il primo collisore (elettrone – positrone) della storia, grazie a Bruno Touschek negli anni 60



# Come vengono accelerate le particelle?

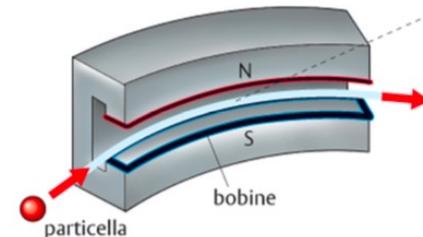
- Le particelle cariche vengono accelerate da un **campo elettrico**
  - un solo elettrodo necessiterebbe di una **differenza di potenziale** elevatissima
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione del campo elettrico



- Nella realtà, l'inversione della polarità del campo elettrico viene svolta da un **generatore di radiofrequenza** e la successione di elettrodi è rimpiazzata da **cavità risonanti**



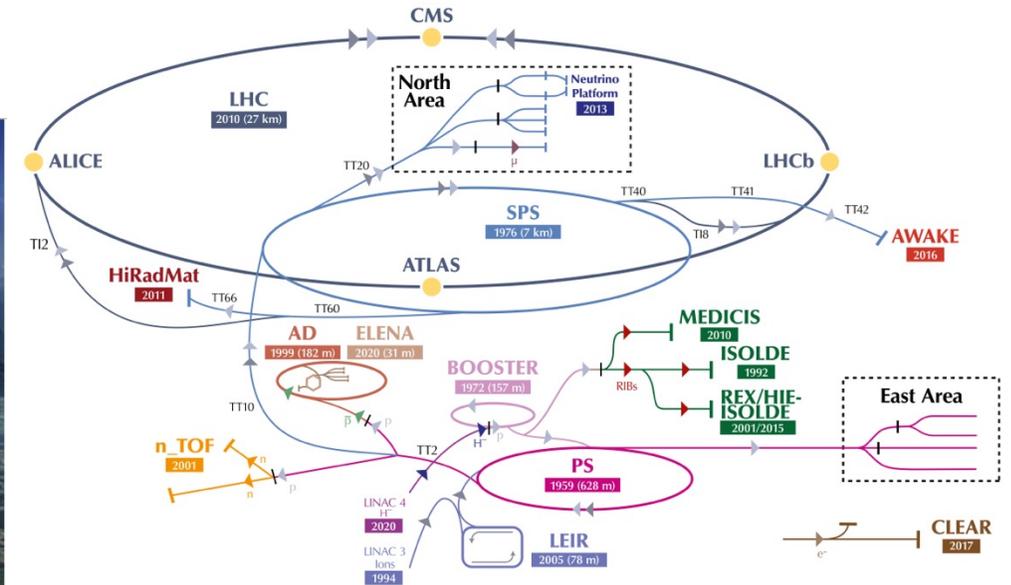
- Potenti **campi magnetici** sono applicati per mantenere le particelle lungo una traiettoria curvilinea (**forza di Lorentz**)



# Gli acceleratori del CERN



The CERN accelerator complex  
Complexe des accélérateurs du CERN



Il CERN dispone di un eccezionale complesso di acceleratori. Ha il suo culmine nel **Large Hadron Collider (LHC)** Un anello di 27 km di circonferenza

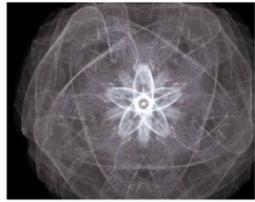
Numerosi esperimenti sono disposti in diversi punti del sistema di acceleratori.

# Che cos'è il CERN ?

**CERN significa: Consiglio Europeo per la ricerca nucleare**

**E' un grandissimo laboratorio di Fisica**

|          |               |                         |
|----------|---------------|-------------------------|
| <b>C</b> | Conseil       | European                |
| <b>E</b> | Européen pour | <b>Organization</b> for |
| <b>R</b> | la            | Nuclear                 |
| <b>N</b> | Recherche     | Research                |
|          | Nucléaire     |                         |



Pierre Auger, **Edoardo Amaldi** e Lew Kowalski sono fra i fisici che hanno più contribuito

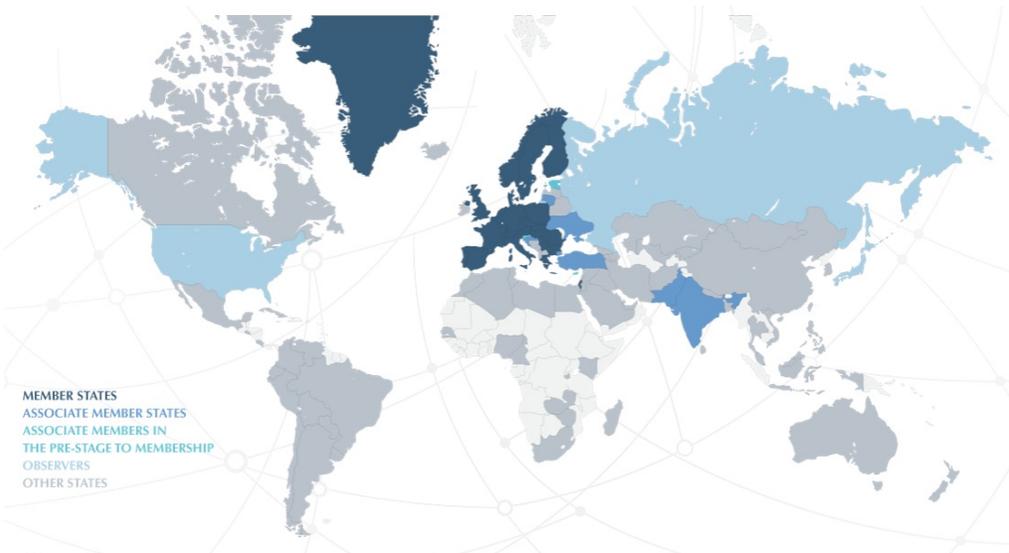


Nasce alla fine della seconda guerra mondiale dall'intuizione visionaria di scienziati europei:

- Un laboratorio per unire gli scienziati europei
- Per condividere i costi crescenti degli impianti per lo studio della fisica nucleare

# Il CERN di oggi

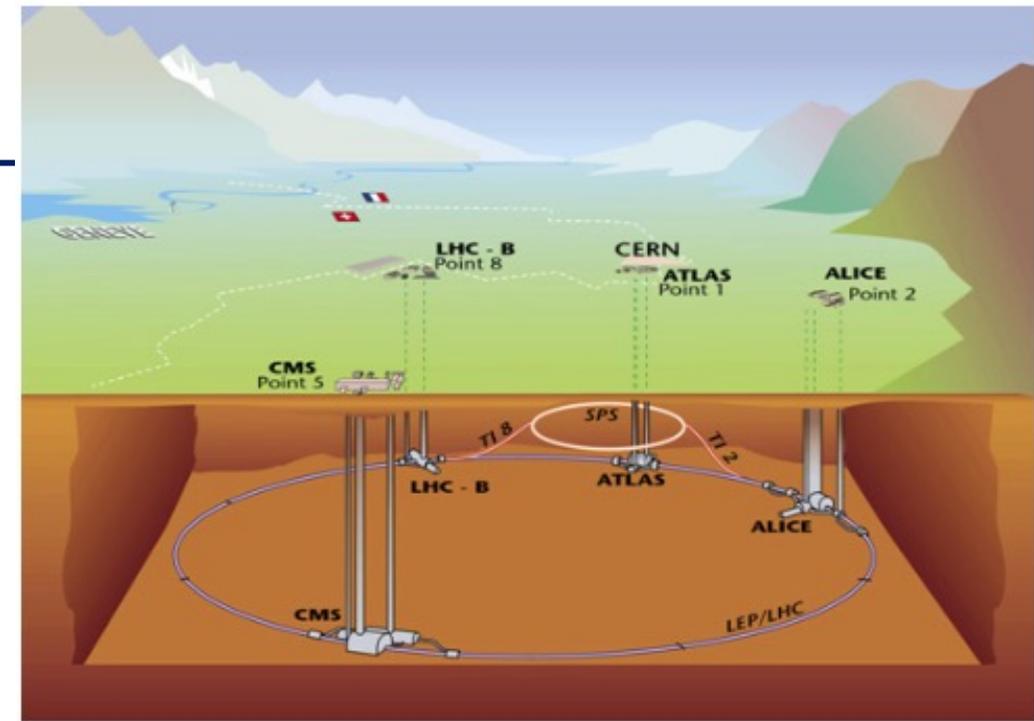
- Il CERN è il più grande laboratorio al mondo per la fisica delle particelle
- Fondato nel 1954, si trova nei pressi di Ginevra, al confine franco-svizzero
- Ha 23 stati membri → l'Italia è fra i paesi fondatori
- L'italiana, Fabiola Gianotti, è direttrice del CERN da 2016



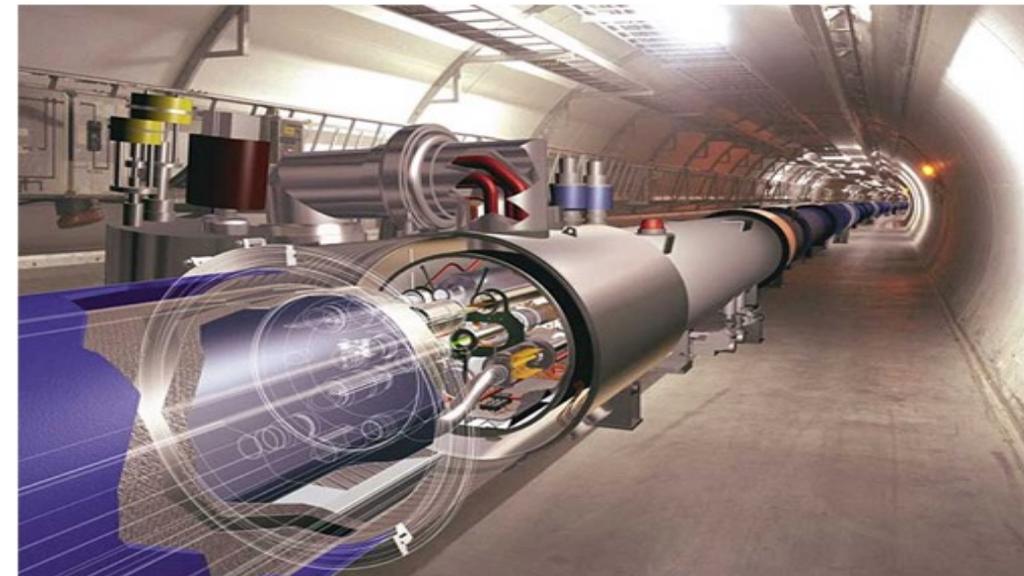
# Il Large Hadron Collider - LHC

E' lo strumento scientifico più grande del mondo!

- 27 km di circonferenza
- Energia di collisione dei fasci di protoni 13 TeV
- "pacchetti" di protoni con 100 miliardi di protoni
- I protoni viaggiano quasi alla velocità della luce ( $v=0.999999991c$ ) → fanno 10000 giri al secondo!
- In 10 ore percorrono 10 miliardi di Km (Terra-Nettuno-Terra)
- Dimensioni trasverse dei fasci:  $2.5 \mu\text{m}$
- e collidono ogni 25 ns



Il Large Hadron Collider è costruito a 100 metri di profondità



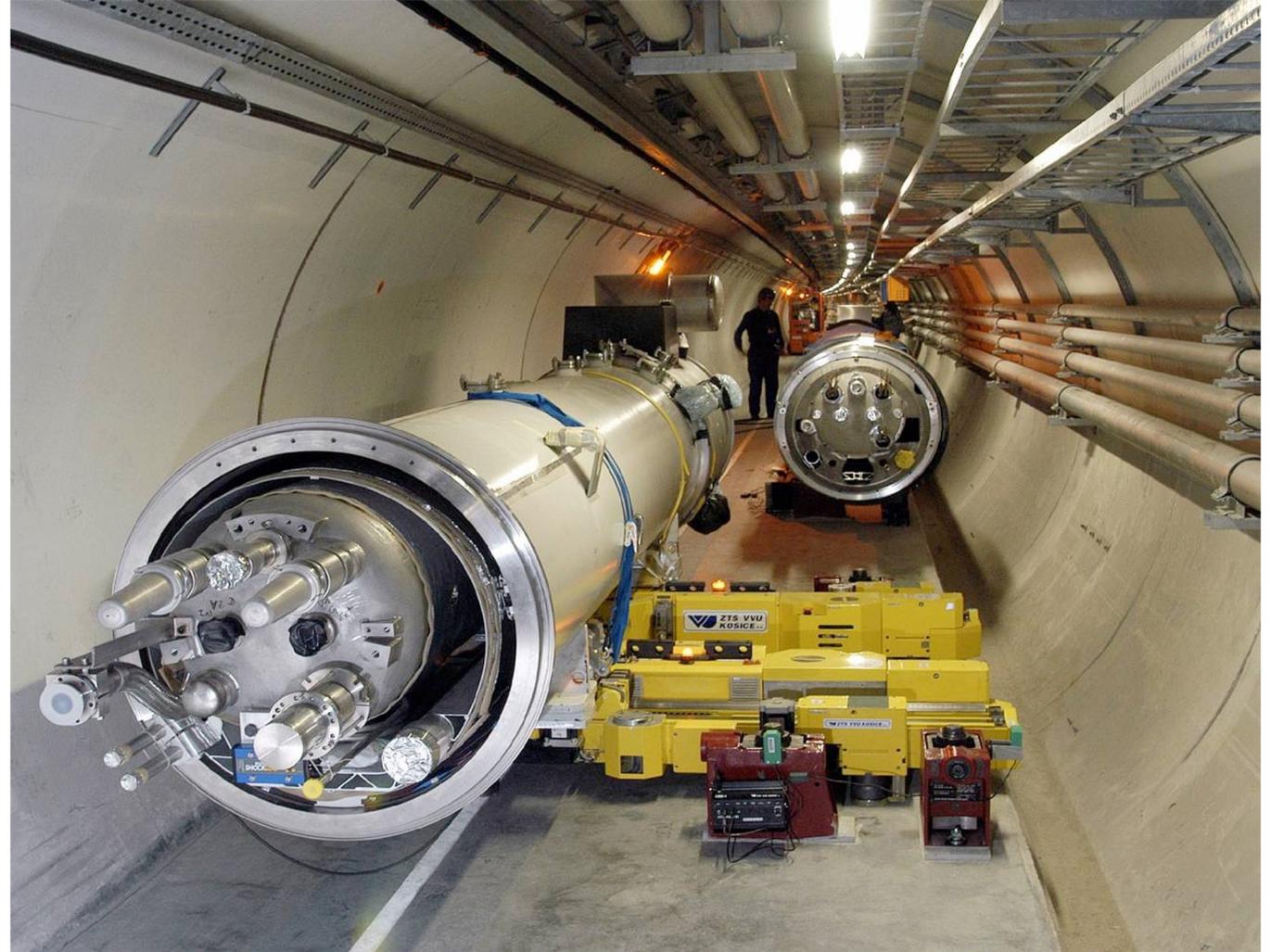
...talmente grande che ci si sposta in treno o in moto!

---

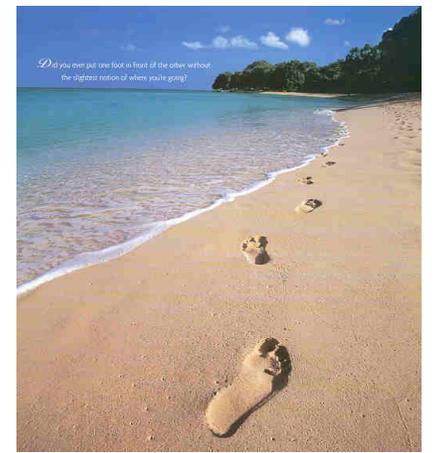
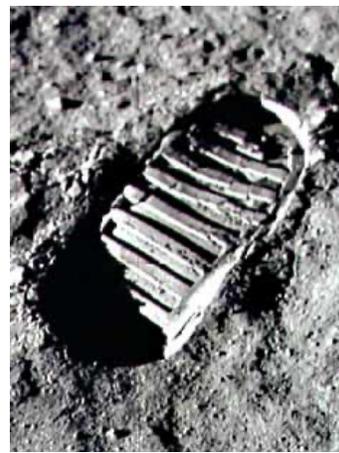


# LHC è una macchina da record

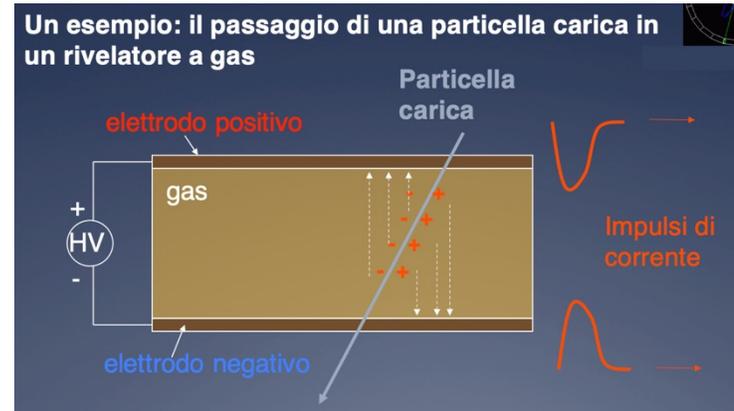
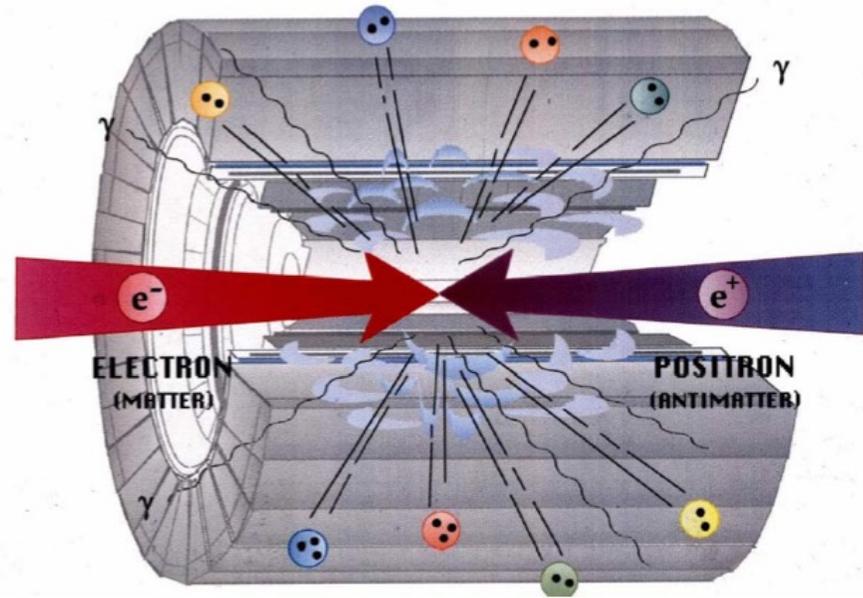
- 1232 dipoli magnetici superconduttori che producono un campo da 8.36 Tesla (campo magnetico terrestre ~ 0.00000040 Tesla)
- 700.000 litri di Elio liquido alla temperatura di 1.9K (-271°C)
- 30.000 tonnellate di materiale a 1.9K ...è più freddo dello spazio profondo !
- 27 km di vuoto spinto ( $10^{-10}$  torr, confrontabile con il vuoto cosmico)
- E' necessaria una potenza di 120 MWatt per il funzionamento di LHC ...circa il consumo di energia di tutto il Cantone di Ginevra !



# I rivelatori di particelle



La rivelazione delle particelle si basa sugli effetti prodotti dal loro passaggio nella materia.



Una macchina fotografica

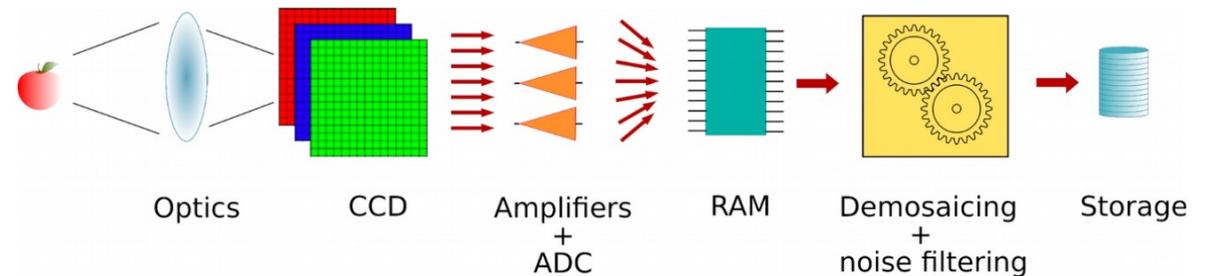


## Scopi

- Identificare le particelle
- misurarne le caratteristiche (energia, carica..)

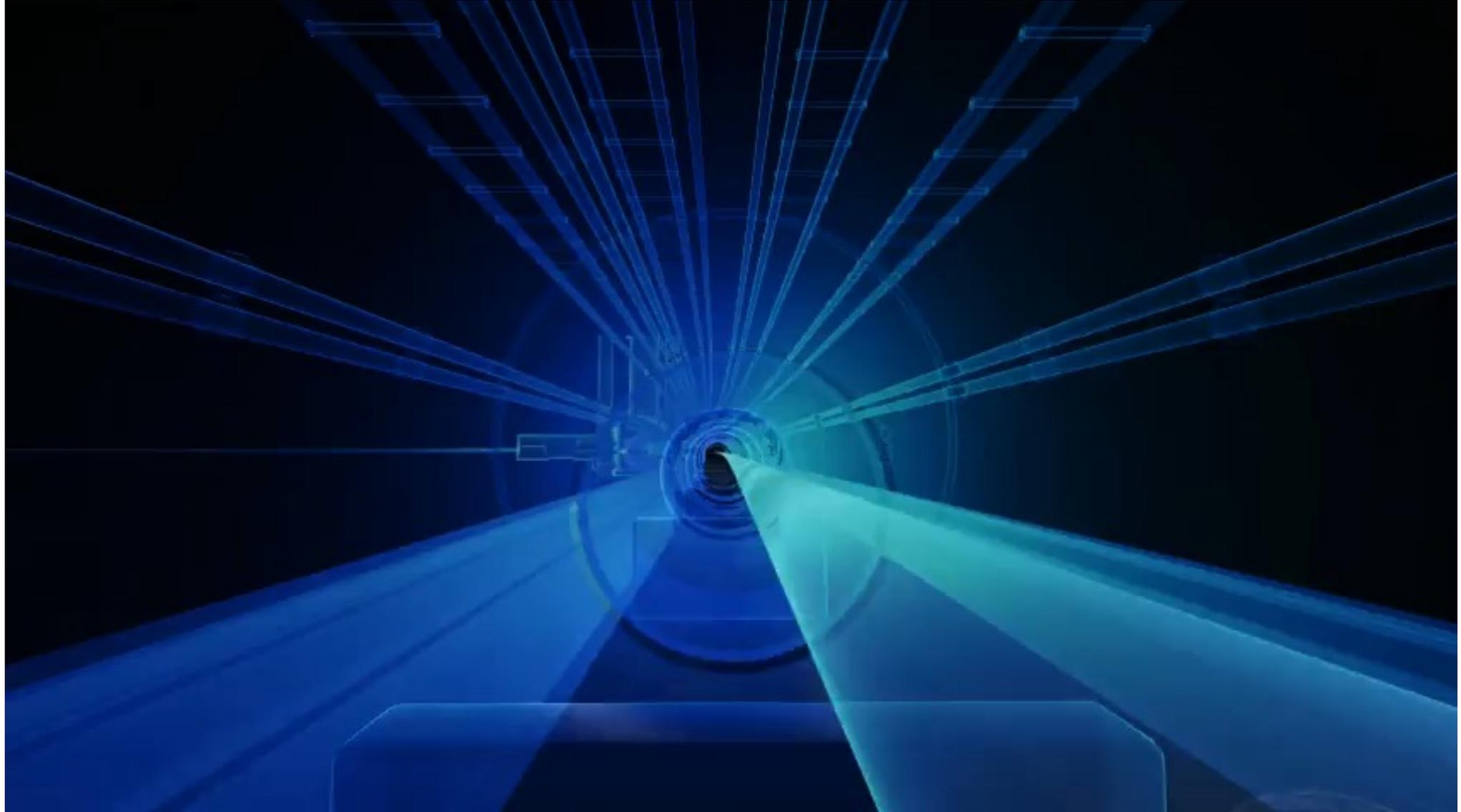
## Come?

... lavoro da detective ... seguire gli indizi per ricostruire quello che è successo



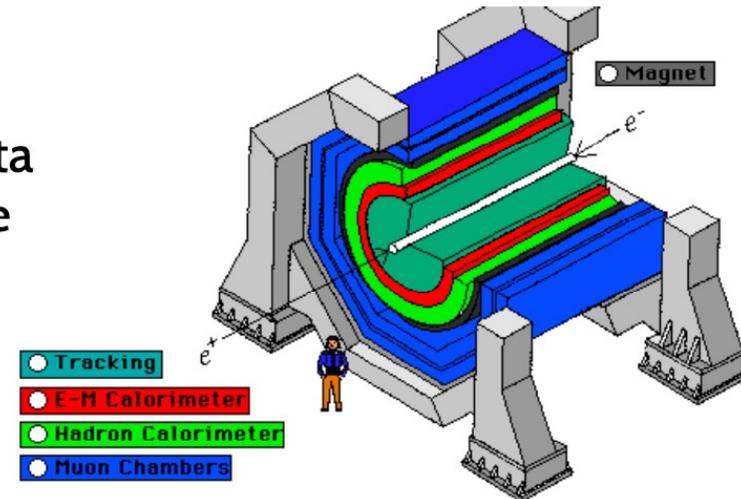
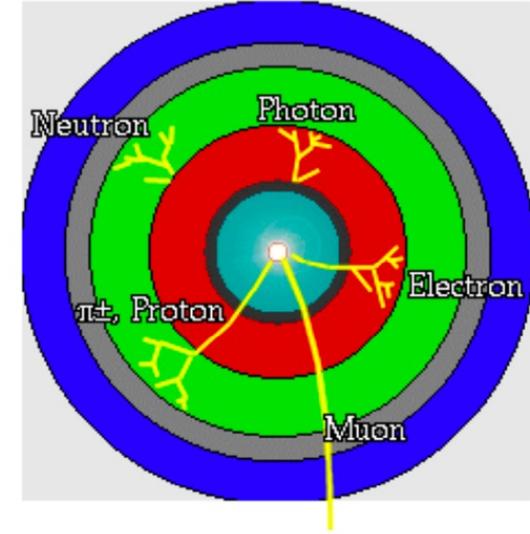
# Cosa osserviamo da una collisione fra particelle

---

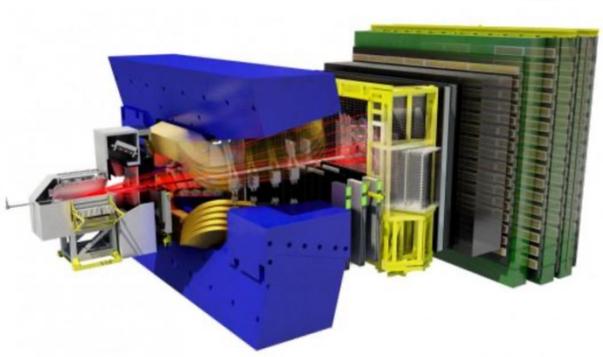


# Apparati di Rivelatori

- Gli apparati degli esperimenti al CERN sono costituiti da più rivelatori sensibili a diverse particelle
- La maggior parte hanno una simmetria cilindrica rispetto ai tubi dell'acceleratore/fascio → struttura a “cipolla”
- Questi rivelatori producono o segnali ottici od elettrici quando le particelle interagiscono con i mezzi attivi
- Combinando i vari segnali e le informazioni sull'energia ceduta e curvatura della traiettoria, si possono identificare le particelle

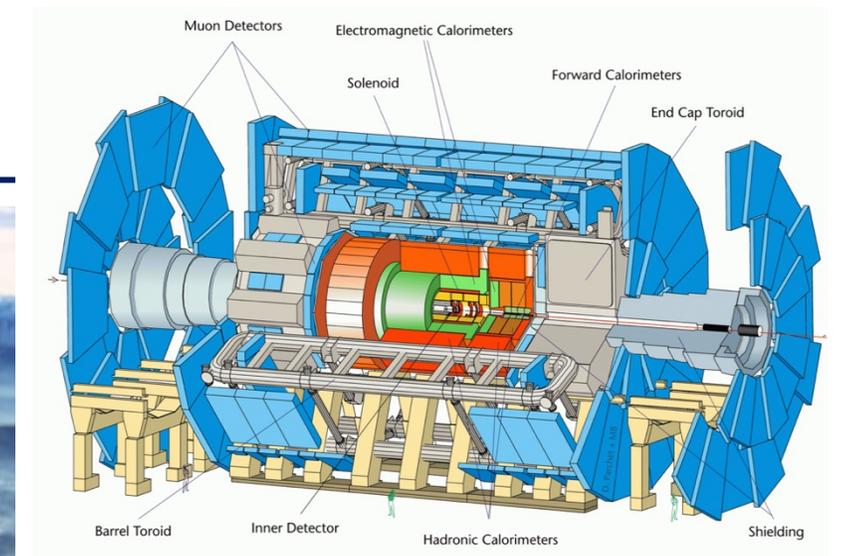
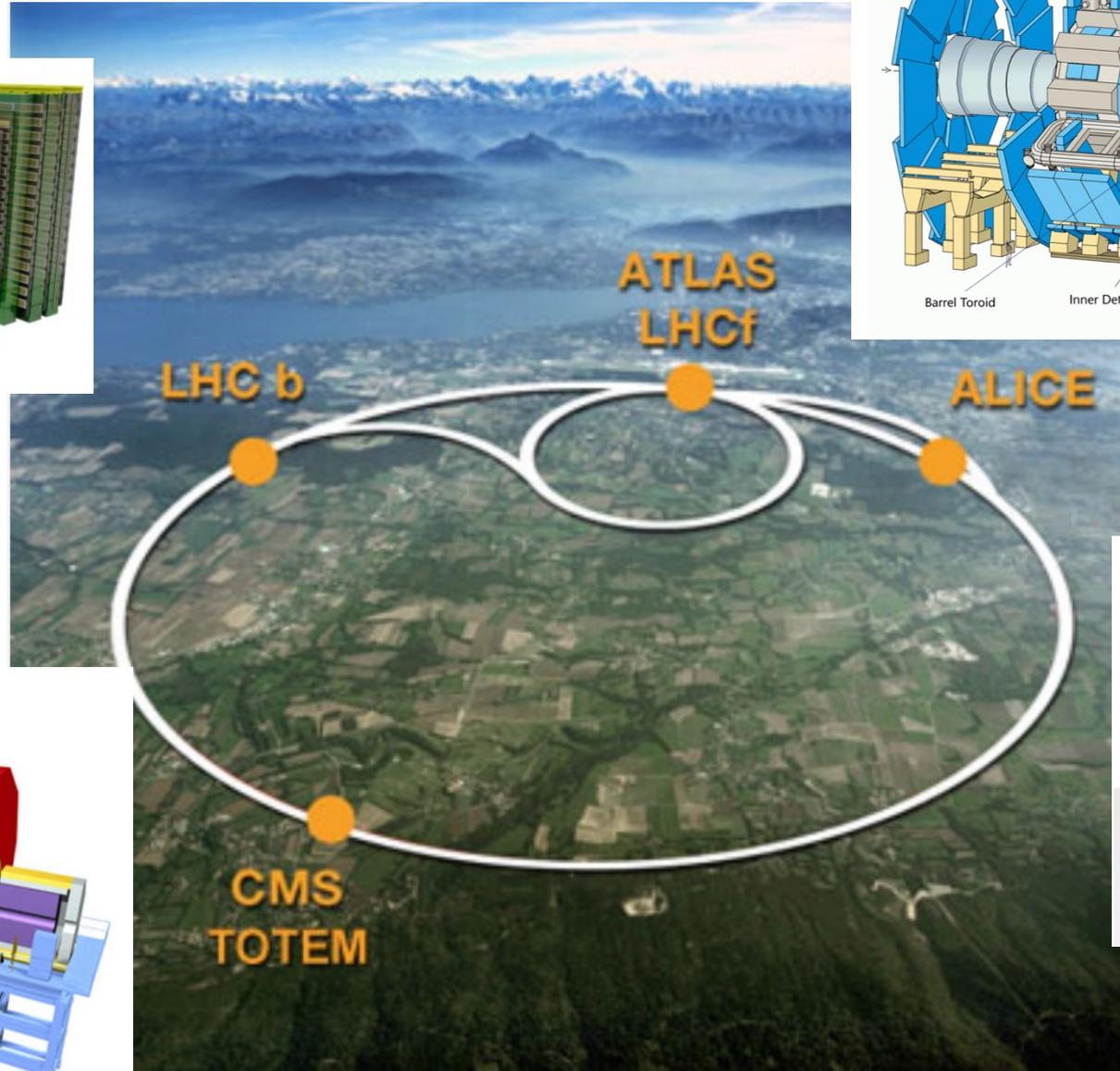
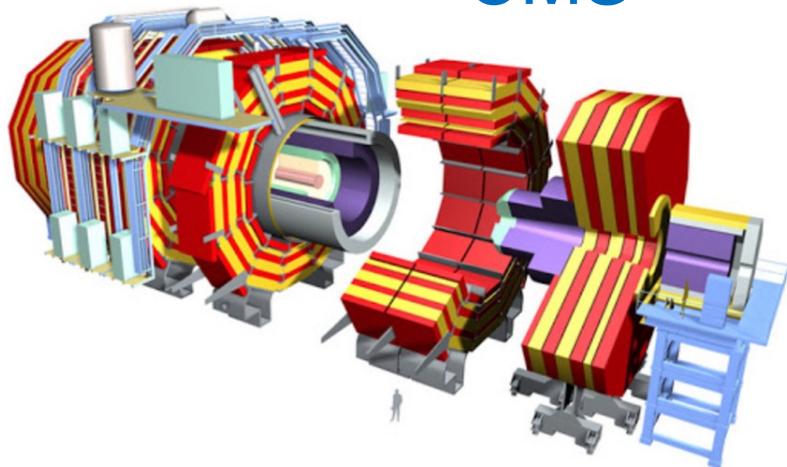


# Gli esperimenti dell' LHC

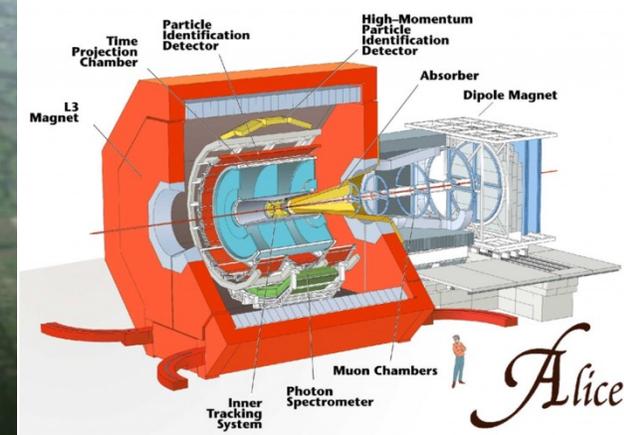


LHCb

CMS

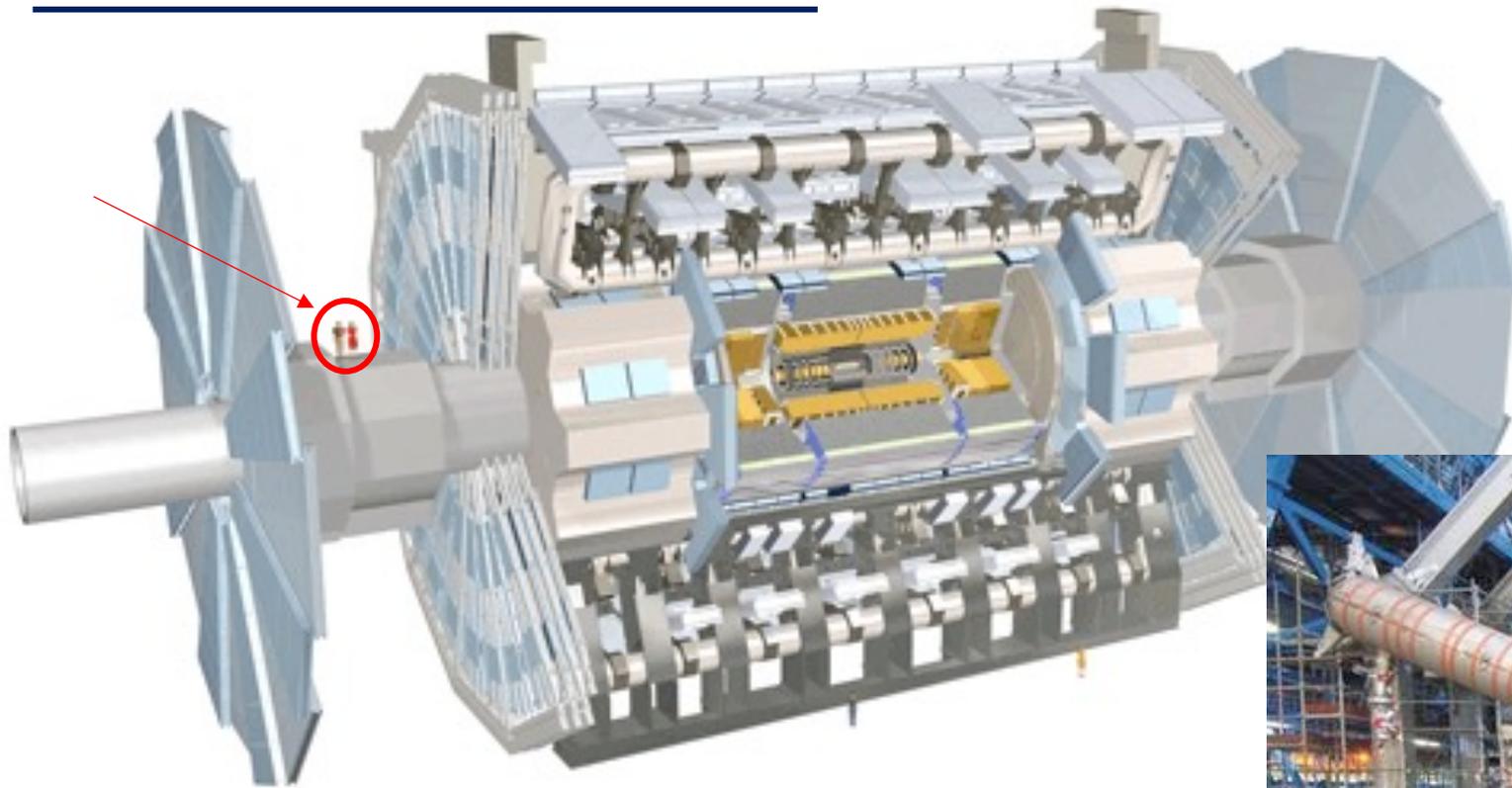


ATLAS



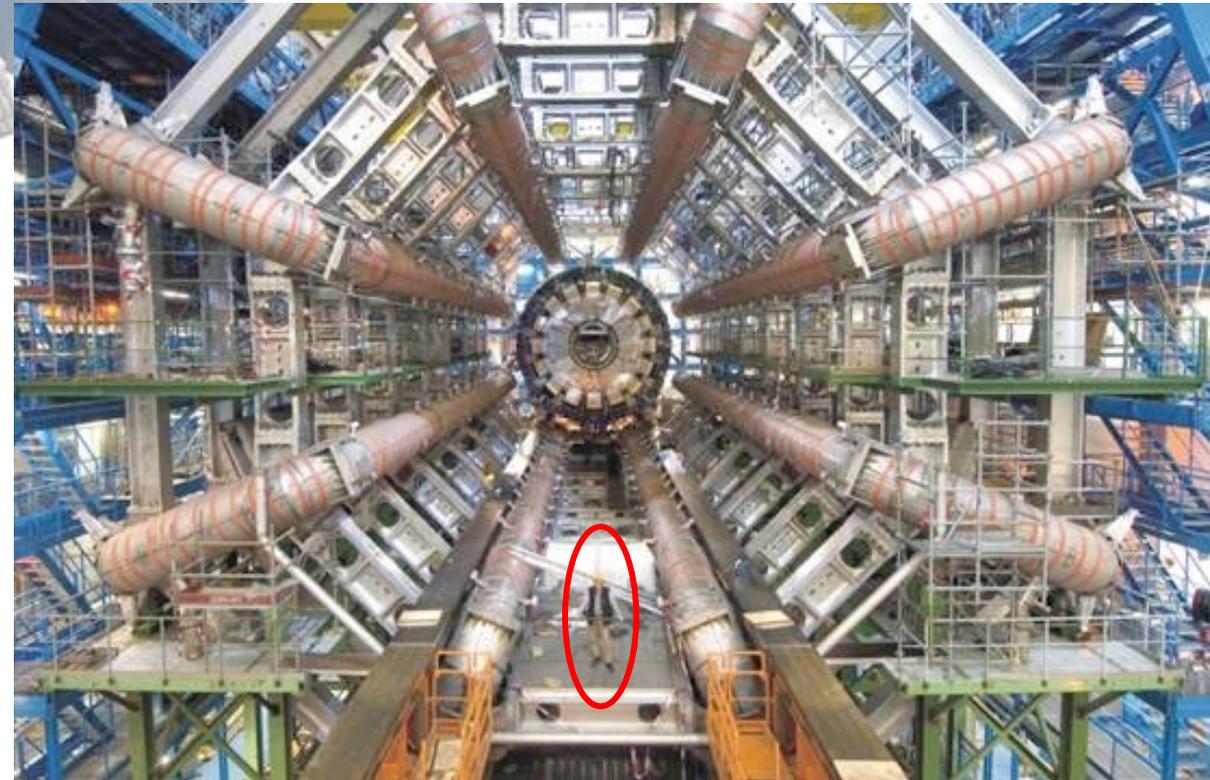
*ALICE*

# Il rivelatore ATLAS



Il più grande rivelatore  
mai costruito

lunghezza  $\approx 40$  m  
Altezza  $> 20$  m  
peso  $\approx 7000$  tons  
canali di elettronica  $\approx 10^8$   
.... e  $\approx 3000$  km di cavi



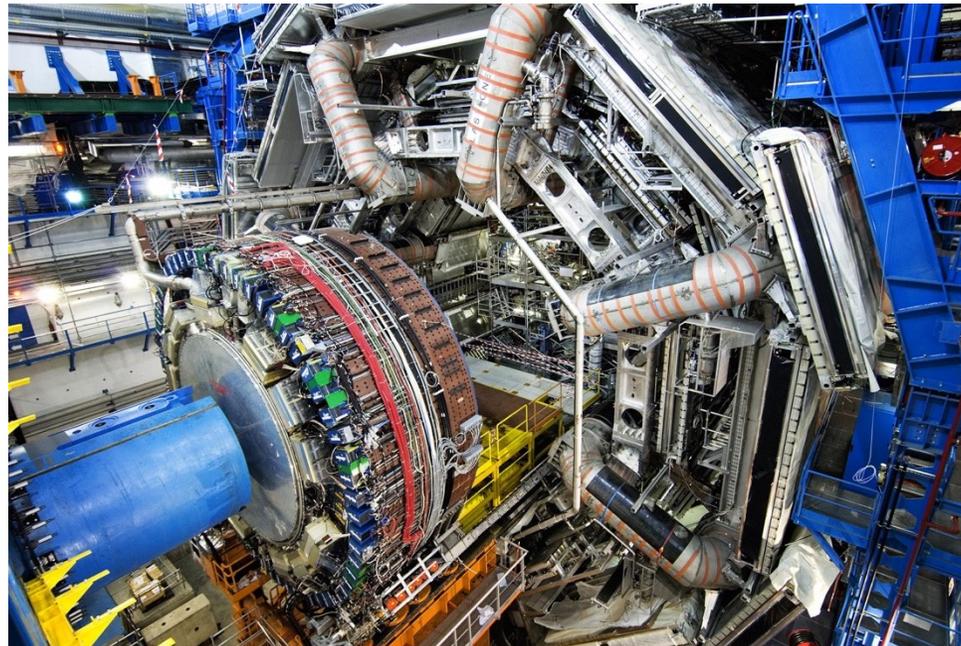
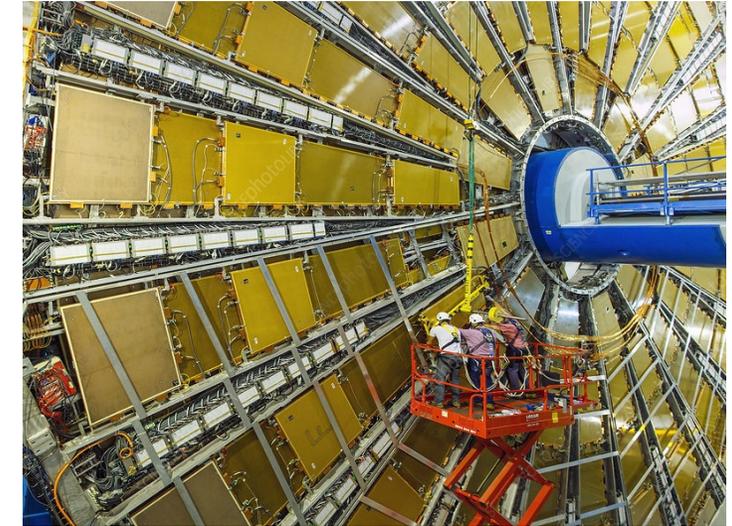
# Costruiamo i nostri strumenti – acquisiamo e analizziamo i dati

Il lavoro del fisico sperimentale è anche quello di costruire gli strumenti di misura

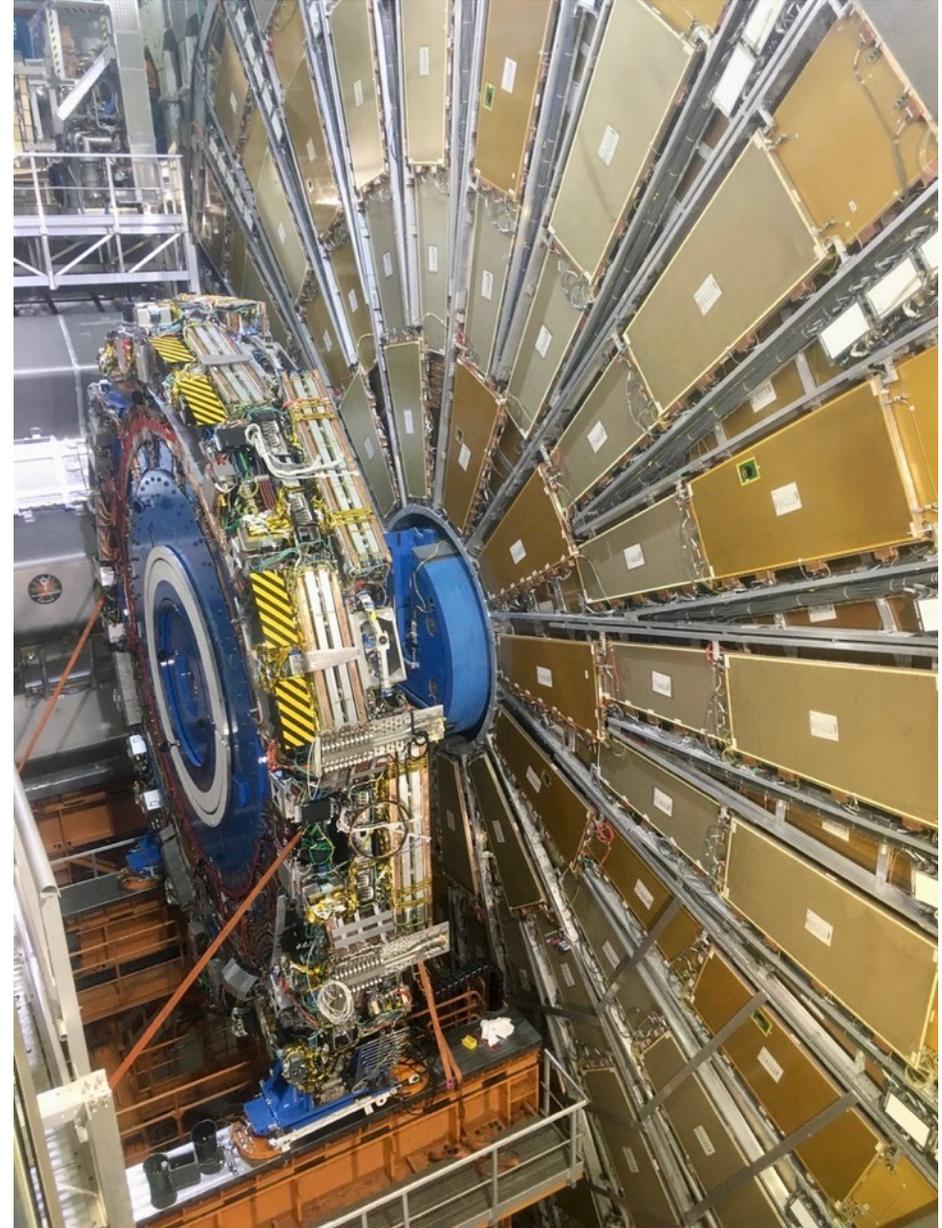
- Costruire i rivelatori di particelle
- Monitorare le performance dei rivelatori
- Analizzare i dati

La sezione INFN di Roma Tre collabora all'esperimento ATLAS fin dalla sua progettazione

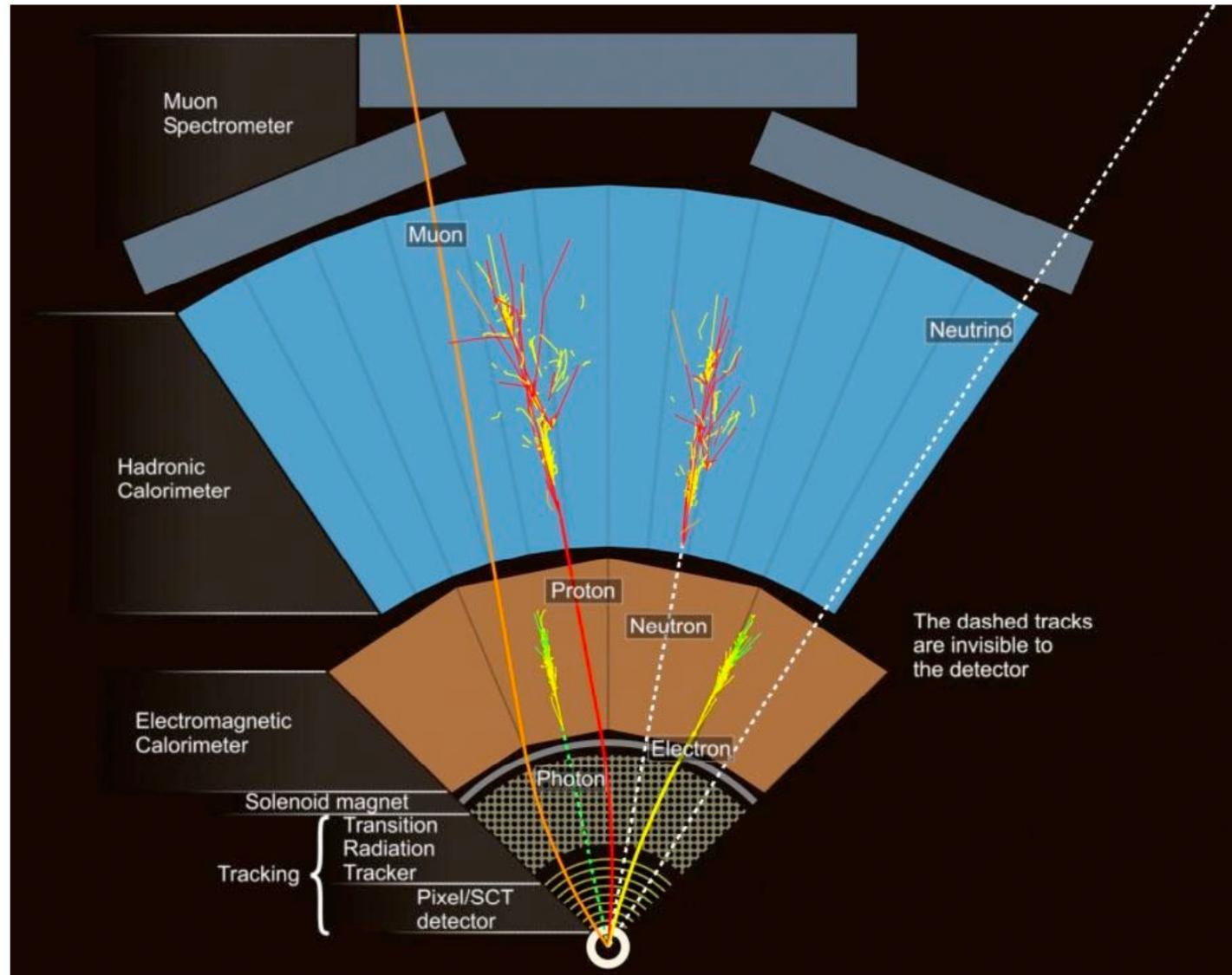
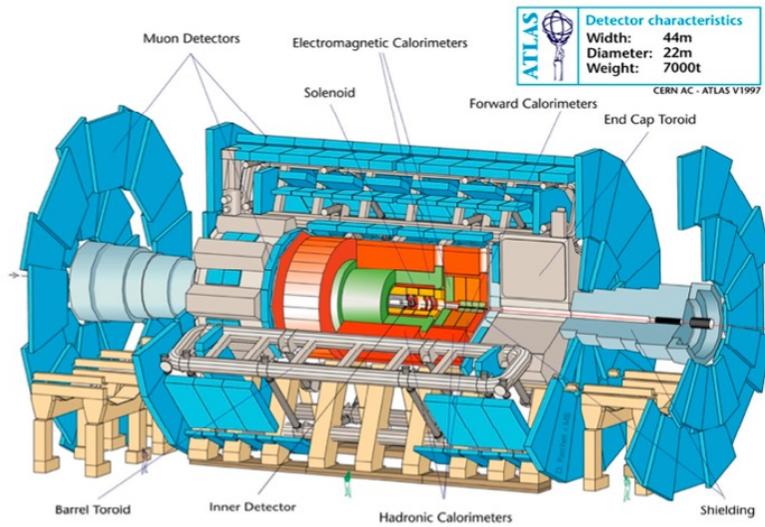
Alcuni dei rivelatori per muoni sono stati progettati e costruiti nei nostri laboratori



# Costruiamo i nostri strumenti ...VERY EXCITING !!!



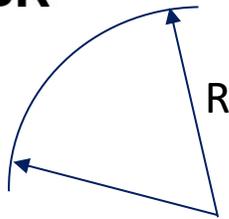
# Uno «Spicchio» di ATLAS



# Misura della carica e della quantità di moto

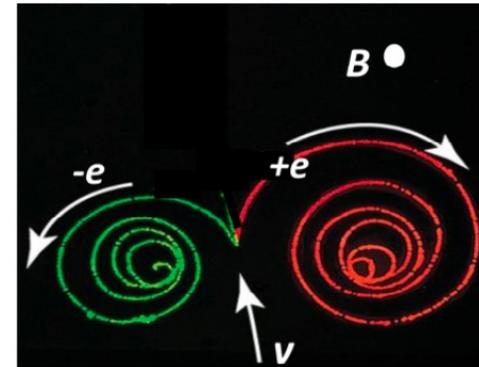
- Una particella carica in moto in un campo magnetico segue una traiettoria curvilinea a causa della forza di Lorentz
- la traiettoria segue un arco di circonferenza dal raggio di curvatura posso ricavare:

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} = q\mathbf{B}R$$



- dal tipo di curvatura è anche possibile capire la carica

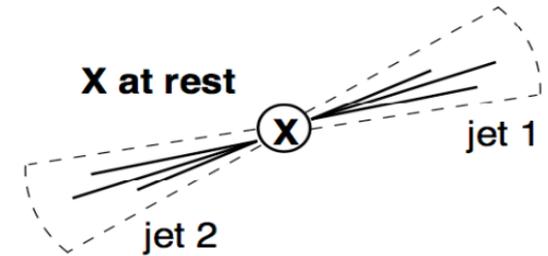
## Evento in una camera a bolle



le tracce di un elettrone ( $e^-$ ) ed un positrone ( $e^+$ ) generate dalla collisione di un fotone con gli atomi di idrogeno

# Come appaiono i quark?

- I quark non esistono allo stato libero, a causa dell'interazione forte (**confinamento adronico**)
- Convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti jet



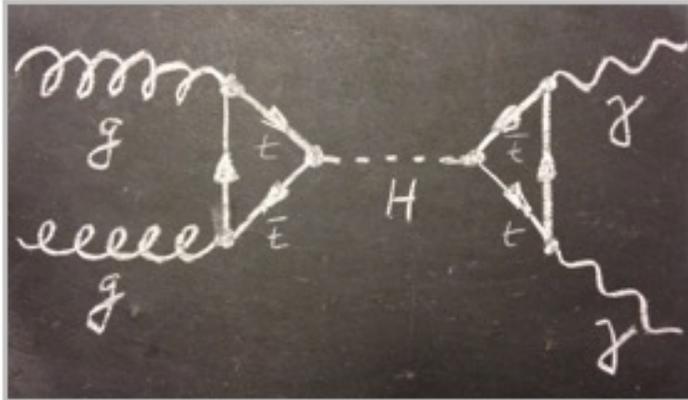
# E i neutrini?

- I neutrini, così come i muoni, sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori. Al contrario dei muoni, i neutrini non interagiscono per niente con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili
- Il principio di conservazione dell'energia ci viene in aiuto. Se nello stato finale osserviamo uno “sbilanciamento” di energia rispetto allo stato iniziale, allora questa differenza di energia è attribuibile ai neutrini



# Rivelazione di eventi rari - A caccia del bosone di Higgs

Higgs  $\rightarrow$  fotone-fotone



Un bosone di Higgs può decadere in due fotoni (evento predetto dal modello standard – ma la massa NON è predetta)

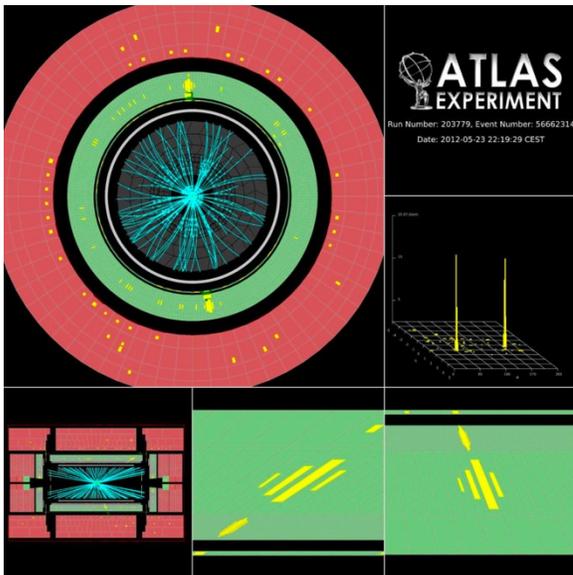
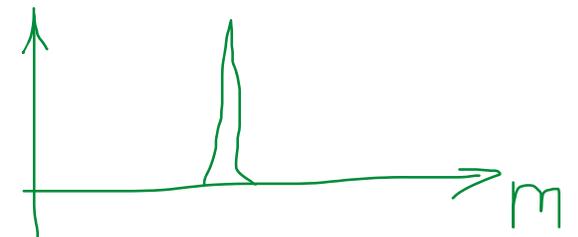
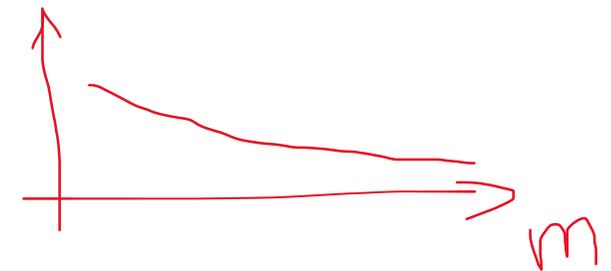
Seleziono tutti gli eventi dove osservo e misuro le proprietà dei due fotoni. Da queste posso ricavare la MASSA di un eventuale «genitore» ...*se esiste davvero!*

Per ogni evento riporto su un grafico la massa ricostruita

Ci sono due possibilità:

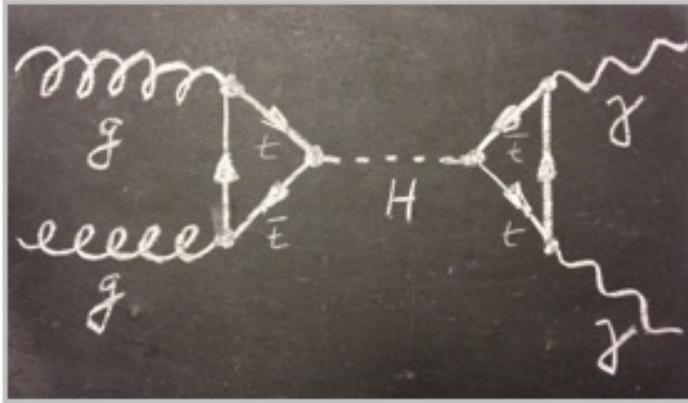
1. I due fotoni sono prodotti in modo scorrelato (NON dallo stesso genitore)  $\rightarrow$  La massa ricostruita avrà un valore casuale (*background*)
2. I due fotoni SONO prodotti entrambi da una particella: la massa ricostruita sarà esattamente la massa della particella genitore.

Frequenza di conteggio

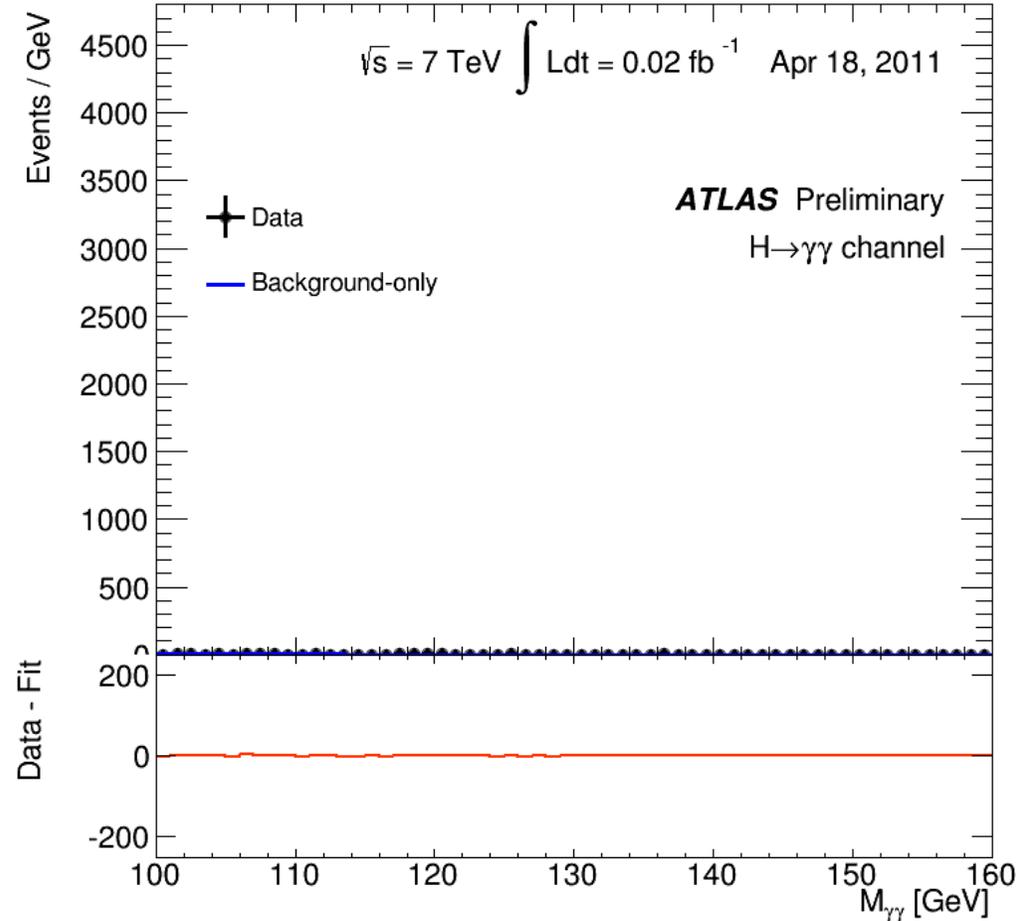


# A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

Higgs → fotone-fotone

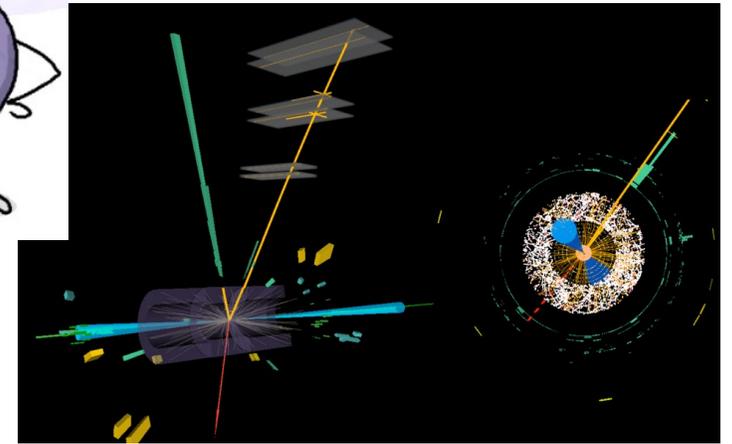
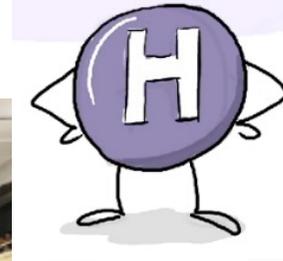


Le grandezze misurate dei due fotoni (energia, direzione) vengono combinate per ricostruire la massa del genitore

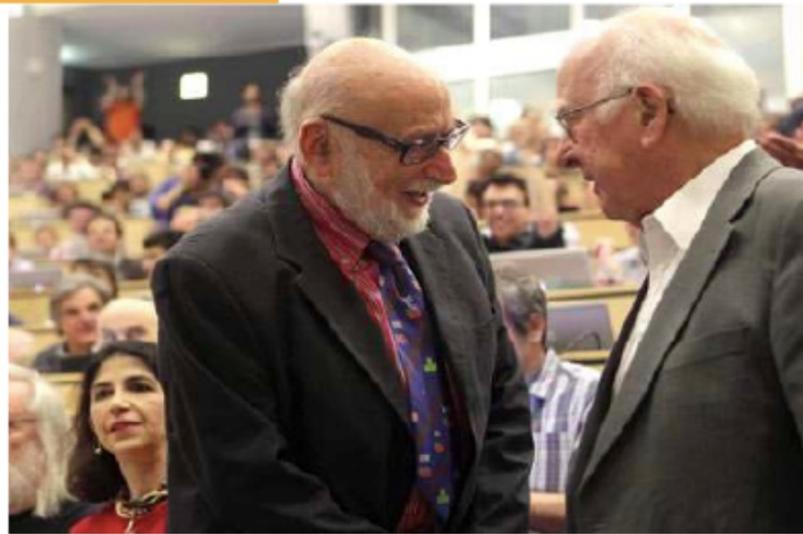
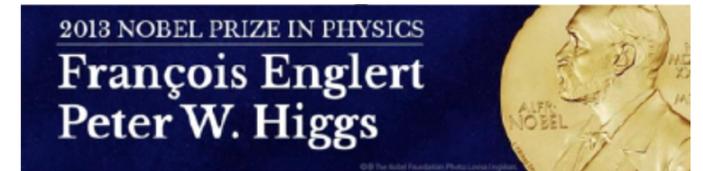


Per misurare un segnale sopra il background serve MOLTA statistica  
Possono essere necessari ANNI di presa dati

# L'annuncio della scoperta del Bosone di Higgs al CERN



4 Luglio 2012



# Non solo particelle - dal CERN importanti ricadute tecnologiche

qui è stato inventato il World Wide Web



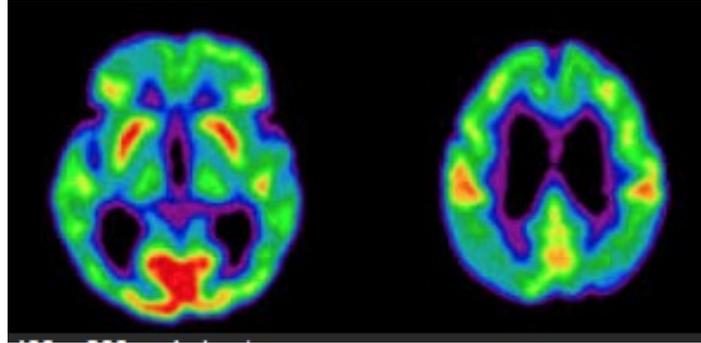
Tim Berners-Lee invented the World Web in 1989

il Touch Screen



The Touch Terminal as developed for the Antiproton Accumulator (AA).

e la PET



CERN DD/OC

Information Management: A Proposal

Tim Berners-Lee, CERN/DD

March 1989

Information Management: A Proposal

Abstract

This proposal concerns the management of general information about accelerators and experiments at CERN. It discusses the problems of loss of information about complex evolving systems and derives a solution based on a distributed hypertext system.



# E ora ?

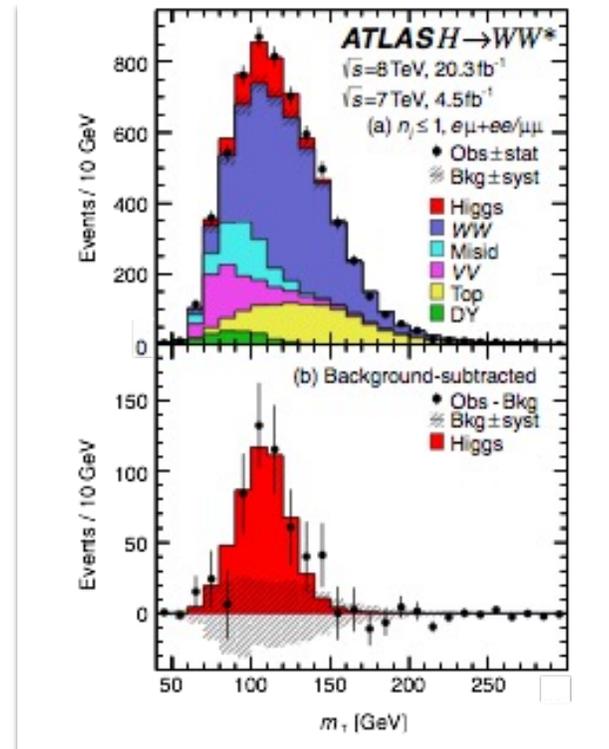
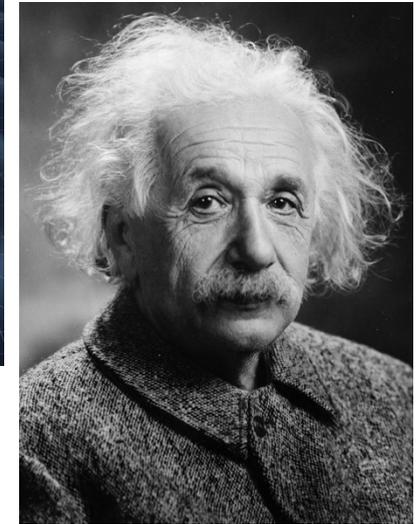
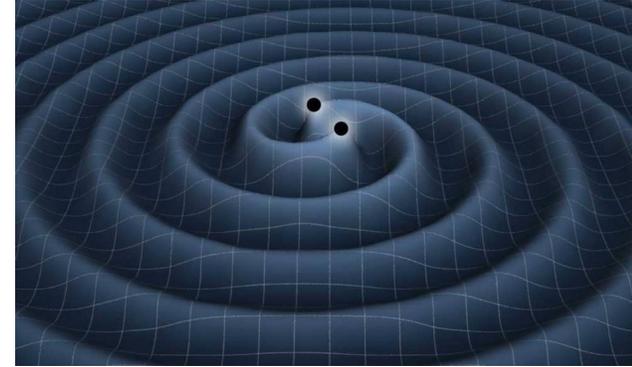
I due modelli standards delle interazioni fondamentali sono completi:

- Onde gravitazionali: Ulteriore conferma della Teoria della Relativita' Generale:

Gravita'

- Bosone di Higgs:

Modello Standard delle Interazioni Fondamentali:  
Interazione Forte,  
Elettromagnetica, Debole



Non solo P. Higgs. Molti altri fisici hanno contribuito allo sviluppo del Modello Standard delle particelle elementari

# E ora ?

I due modelli standard fondamentali sono con

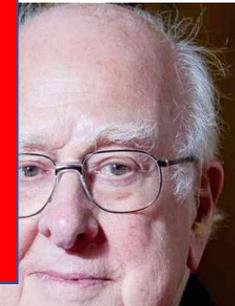
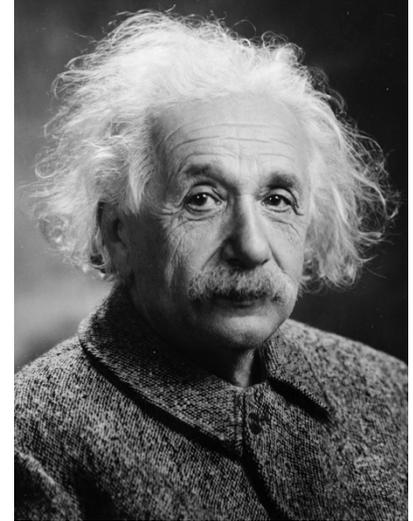
- Onde gravitazionali: Ulteriore conferma della Teoria della Relatività Generale:

Gravità

- Bosone di Higgs:

Modello Standard delle Interazioni Fondamentali.

Interazioni Elettromagnetiche



**Questi due modelli Standard sembrano inconciliabili, nuova Fisica potrebbe nascondersi dietro l'angolo per spiegarne il legame.**

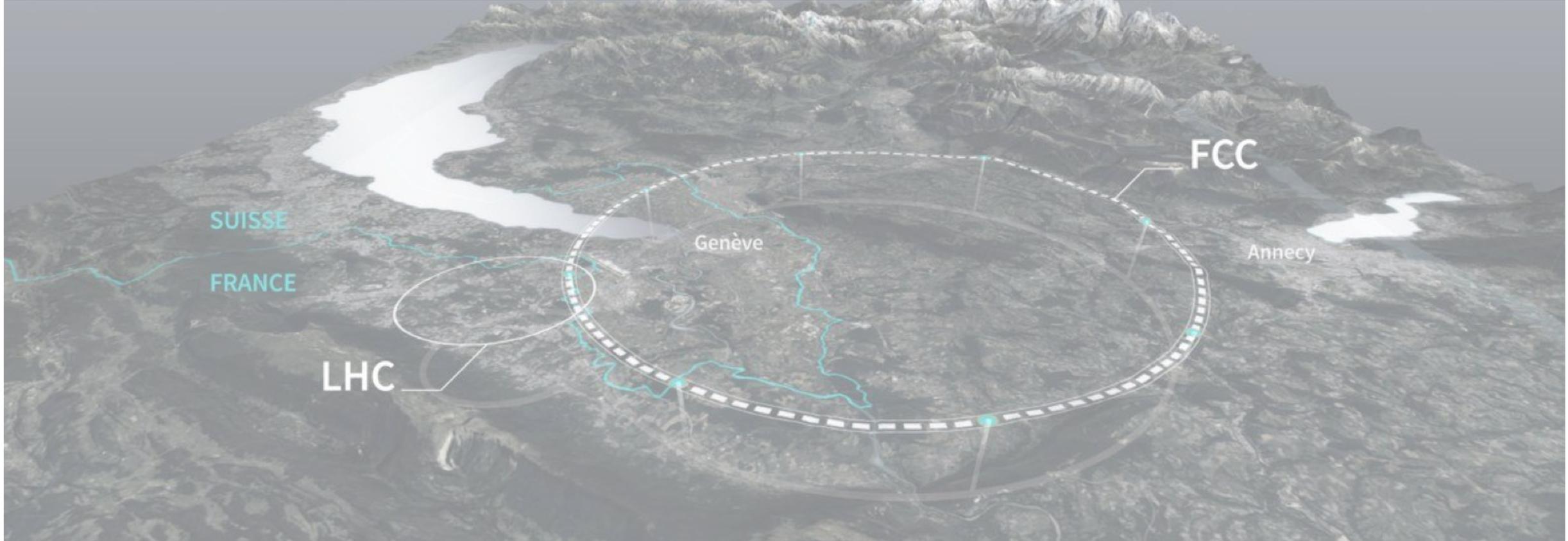
$m, \text{ [GeV]}$

delle particelle elementari

# Presente e Futuri acceleratori

---

- 1) LHC permetterà agli esperimenti di raccogliere dati fino al ~2040.  
→ cercare segnali di nuova Fisica ad LHC, usando canali fino ad oggi inesplorati: p.es. produzione doppio Higgs hh (rarissimo) e/o nuove particelle
- 2) Iniziare a pensare alle macchine del futuro



# FCC research infrastructure for the 21<sup>st</sup> century

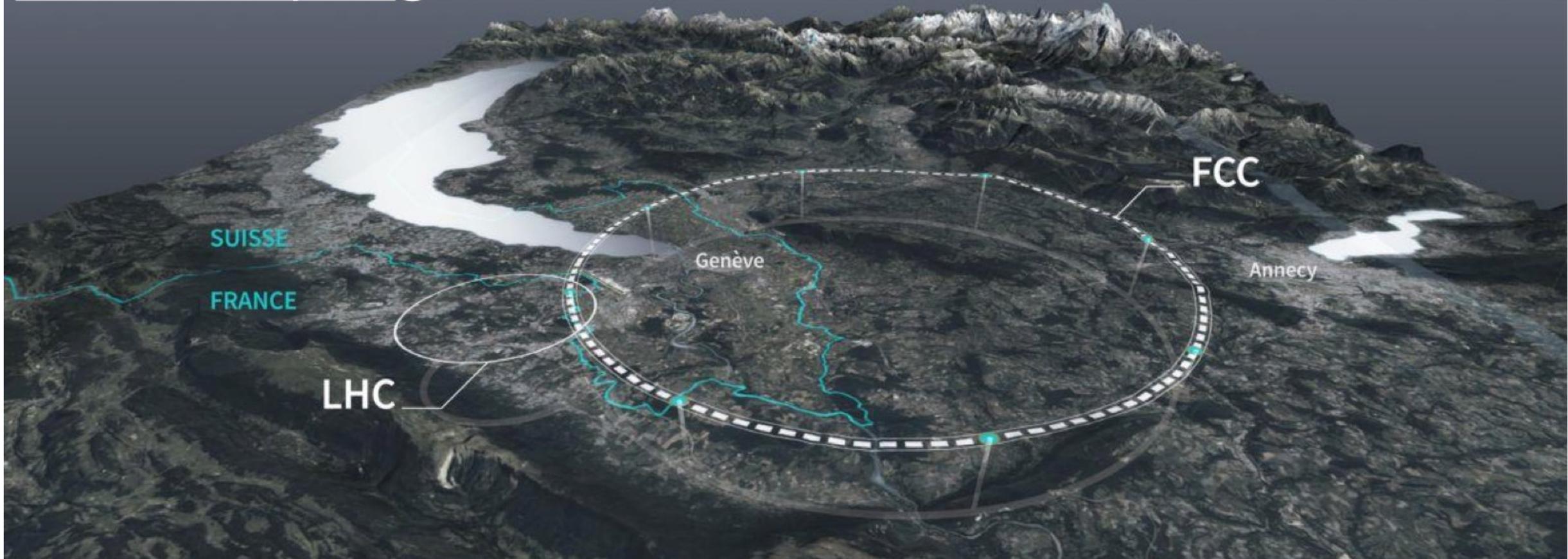
A new 91 km tunnel to host multiple colliders

100 – 300 m under ground, 8 surface sites

FCC-ee: electron-positron @ 91, 160, 240, 365 GeV

FCC-hh: proton-proton @ 100 TeV, and heavy-ions (Pb) @39 TeV

FCC-eh: electron-proton@ 3.5 TeV



A futuristic, blue-lit exhibition space. The scene is dominated by various spherical and circular interactive displays. In the foreground, a large, glowing blue sphere sits on a thin, vertical stand with a circular base. To its right, another similar sphere is positioned on a circular platform. In the center, a large, flat, circular display is illuminated with a bright blue glow, showing some faint, illegible text or graphics. The background is filled with numerous smaller spheres of varying sizes, some floating in the air and others resting on stands. The overall atmosphere is high-tech and modern, with a strong emphasis on blue light and smooth, rounded forms.

GRAZIE per l'attenzione!

BACKUP

# Oggi parliamo del mestiere del Fisico sperimentale

E parleremo di LHC al CERN l'acceleratore più potente al mondo...

30 Marzo 2010:  
le prime  
collisioni al  
CERN in LHC

E l'energia più alta mai raggiunta. Ora la "particella di Dio" è più vicina Cern. 50 collisioni al secondo alla velocità della luce

Lhc, collisioni record al Cern: scienziati vicini al Big-Bang: "Il sogno diventa realtà"

IL CERN APRE UNA FINESTRA SULL'UNIVERSO  
Si cerca la "particella di Dio" e molte altre risposte

Il Cern sta creando un nuovo mondo

**The New York Times**  
Late Edition  
"All the News That's Fit to Print"  
VOL. CLIX - No. 54,296 - 12 cent. (incl. tax) - NEW YORK, WEDNESDAY, MARCH 31, 2010 \$2.00

**Plan to Widen Use of Statins Has Skeptics**  
Cholesterol Pills Aimed at Healthy People

**OBAMA TO OPEN OFFSHORE AREAS TO OIL DRILLING**  
SEEKS MAJOR EXPANSION

**ATLAS Cost Rate Evol**

Particle Collide, and Champagne Glasses Clink

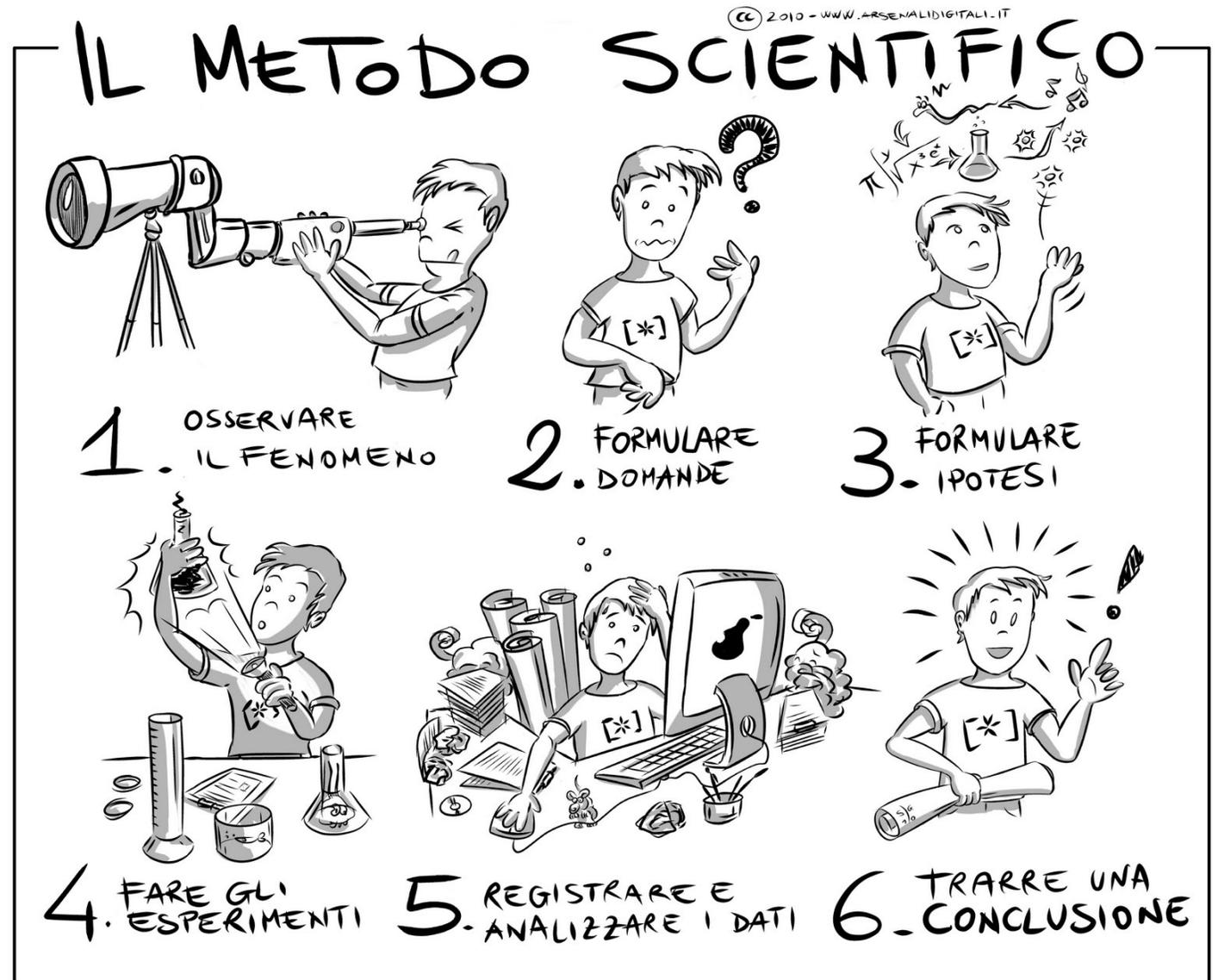
# Il metodo scientifico e il mestiere dei Fisici



Galileo Galilei  
(1564 - 1642)

Articola il lavoro della scienza in:

- Il momento "risolutivo" o analitico
- Il momento "compositivo" o sintetico



# Le Origini

---

- ◆ Alla fine degli anni '40 si decide di intraprendere un progetto di ricerca Europeo.
- ◆ **1951** accordo tra 11 paesi (Dutry, Auger, Kowarski-FR, Amaldi-IT, Bohr-DK).
- ◆ **1952** viene scelto l'acronimo CERN ed individuata la località: Ginevra.
- ◆ **1954** nasce ufficialmente l'Organizzazione ed iniziano i lavori di costruzione.
- ◆ Presto diventa il primo laboratorio di ricerca costruito tra due stati (FR e CH).



I primi scavi



il primo acceleratore del CERN,  
il Sincrociclotrone



il proto-Sincrotrone

# Il CERN di oggi

---

23 paesi membri  
9 paesi associati  
3 paesi osservatori  
61 paesi con accordi

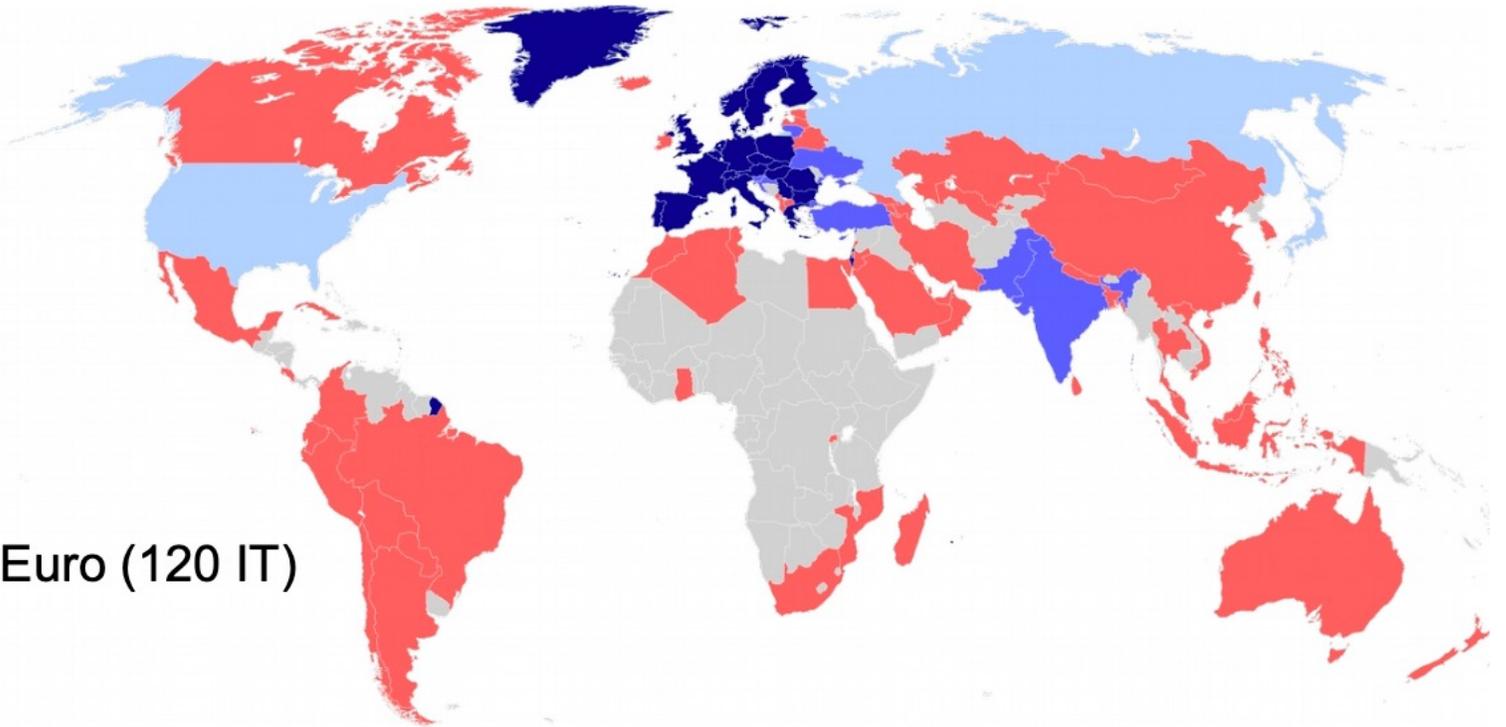
Budget nel 2020 of 1196 milioni di Euro (120 IT)

3430 membri del personale

550 studenti

2000 lavoratori da aziende esterne

15000 users (1500 IT)



# La missione del CERN

**Obiettivo:**

**scoprire di cosa è fatto  
l'universo e come  
funziona.**

Missione del CERN:

- fornire una gamma unica di strutture per l'accelerazione di particelle che consentono la ricerca all'avanguardia della conoscenza umana.
- svolgere ricerche di livello mondiale nella fisica fondamentale.
- unire persone da tutto il mondo per spingere le frontiere della scienza e della tecnologia, a beneficio di tutti.



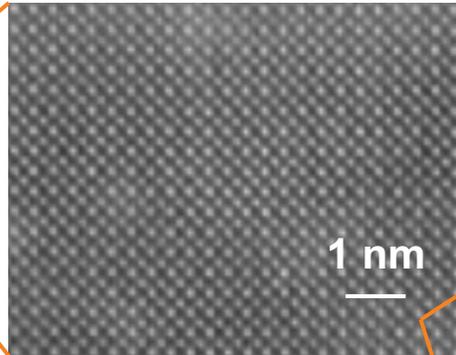
# L'oggetto di studio

I costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni

Materia macroscopica



Struttura Atomica

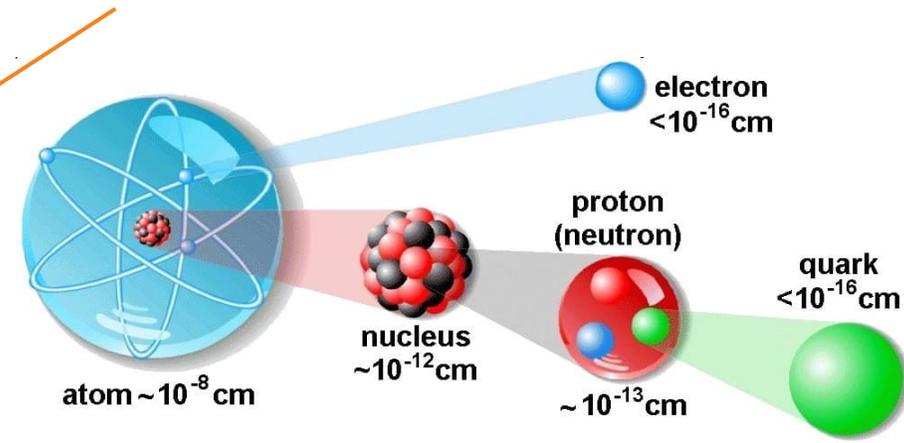


Fine XIX secolo

Inizio XX secolo

1960s

Scala  $10^{-10}$ - $10^{-15}$  m



# Unita' di misura

---

In fisica delle particelle, l'energia si misura in **elettronvolt (eV)** e non in Joule (J)

**1 eV** e' l'aumento di energia di un elettrone quando è accelerato da una differenza di potenziale di 1 Volt

$$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Sono molto utilizzati i multipli dell'elettronvolt

- **1 keV** → mille elettronvolt ( $10^3$  eV) !
- **1 MeV** → un milione di elettronvolt ( $10^6$  eV) !
- **1 GeV** → un miliardo di elettronvolt ( $10^9$  eV) !
- **1 TeV** → mille miliardi di elettronvolt ( $10^{12}$  eV) !

Vedremo che gli acceleratori nel corso della loro storia hanno fornito alle particelle energie sempre più alte (MeV → TeV)

# Diversi tipi di acceleratori

- La dimensione dell'acceleratore determina la massima energia raggiungibile
  - Ma non solo...anche i campi magnetici applicati giocano un ruolo importante → servono per far seguire alle particelle traiettorie circolari

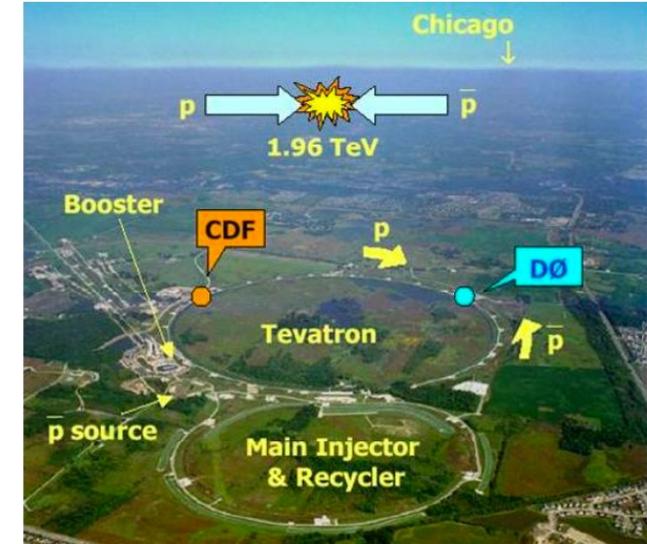
**SLAC (California, USA)**  
Collider elettrone positrone  
3 km, E~100 GeV



**Hera (Amburgo, Germania)**  
Collider elettrone protone  
6.3 km, E~300 GeV

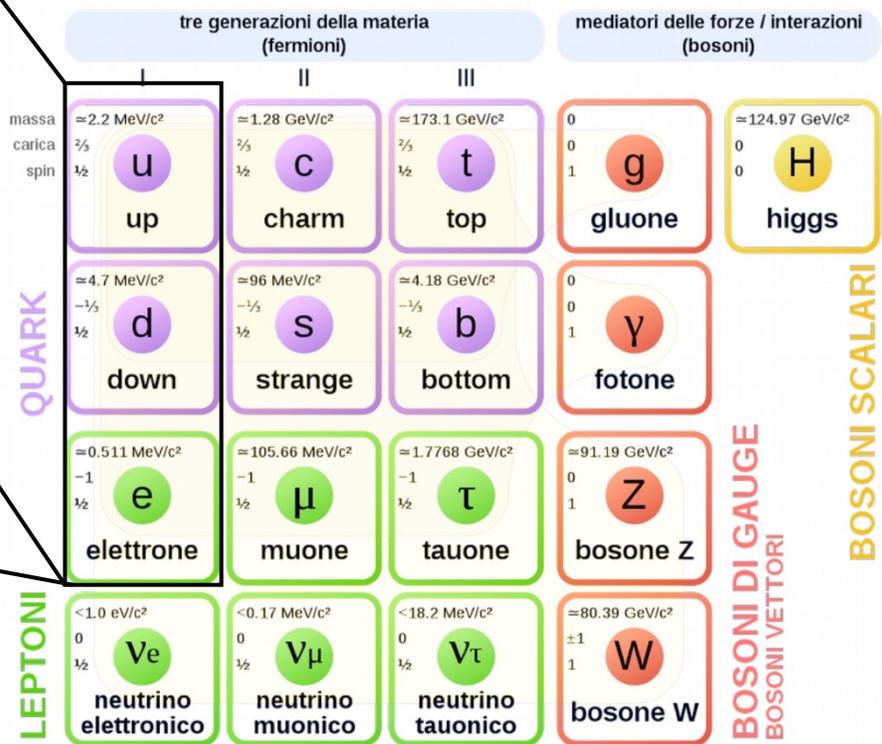


**Tevatron (Illinois, USA)**  
Collider protone anti-protone  
6.3 km, E~2 TeV



# Dalla tavola periodica al Modello Standard

## Modello Standard delle Particelle Elementari

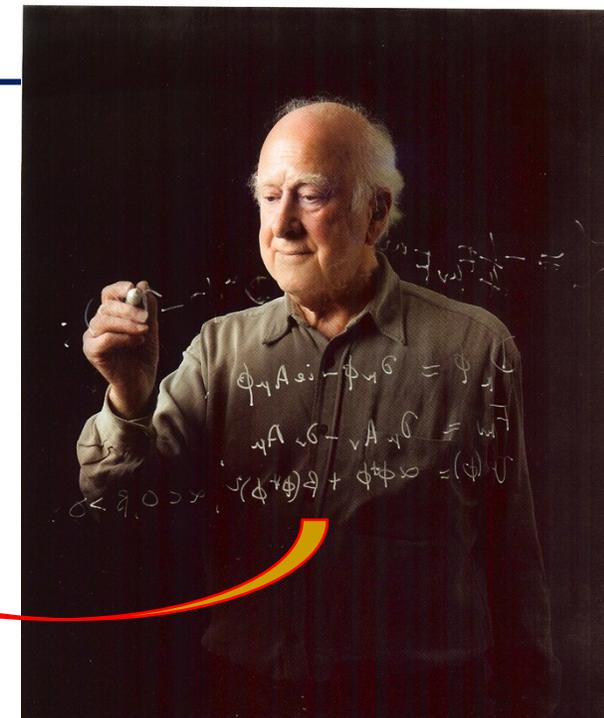
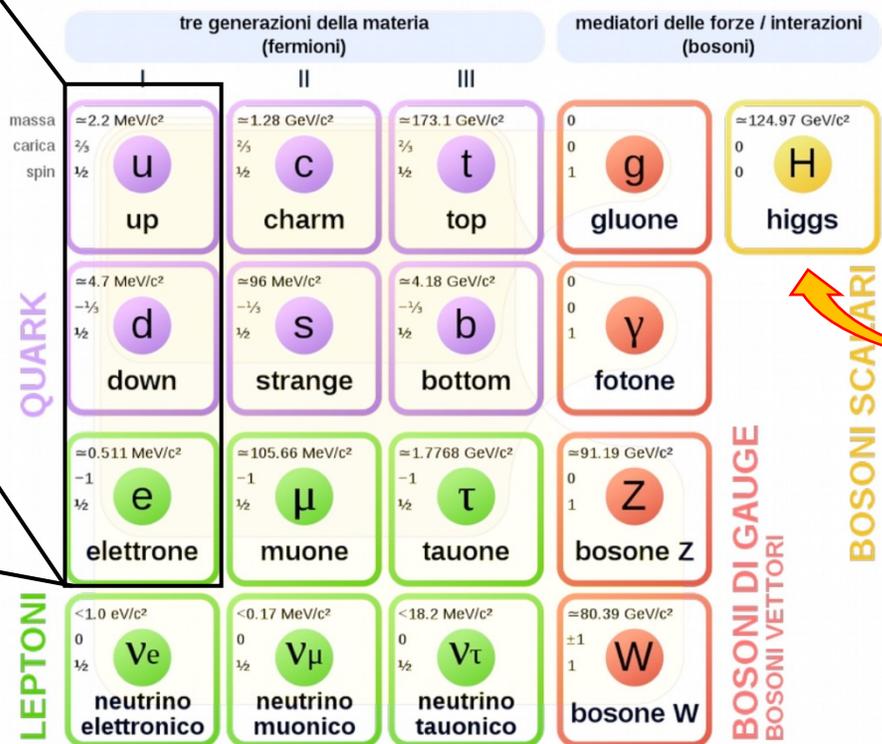


La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

Questo è il quadro completo che conosciamo oggi. Ad ogni particella corrisponde una sua antiparticella

# Dalla tavola periodica al Modello Standard

## Modello Standard delle Particelle Elementari

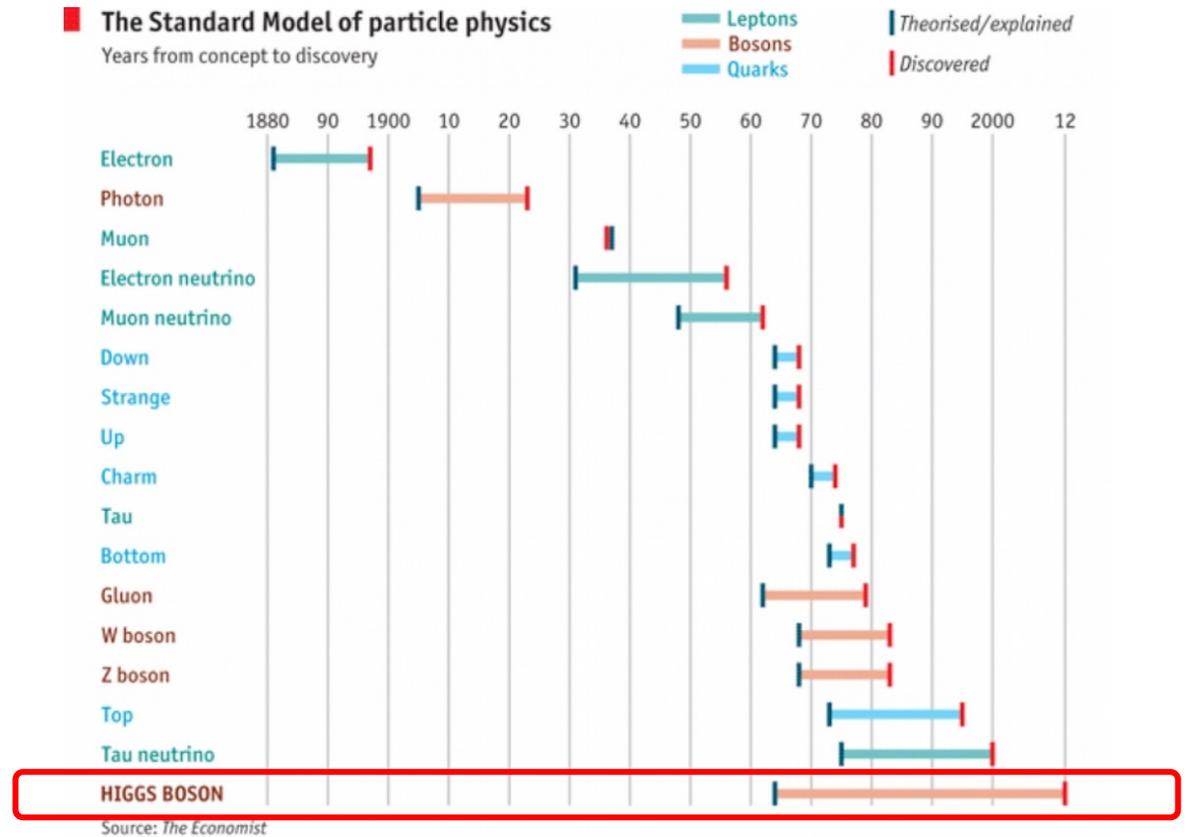
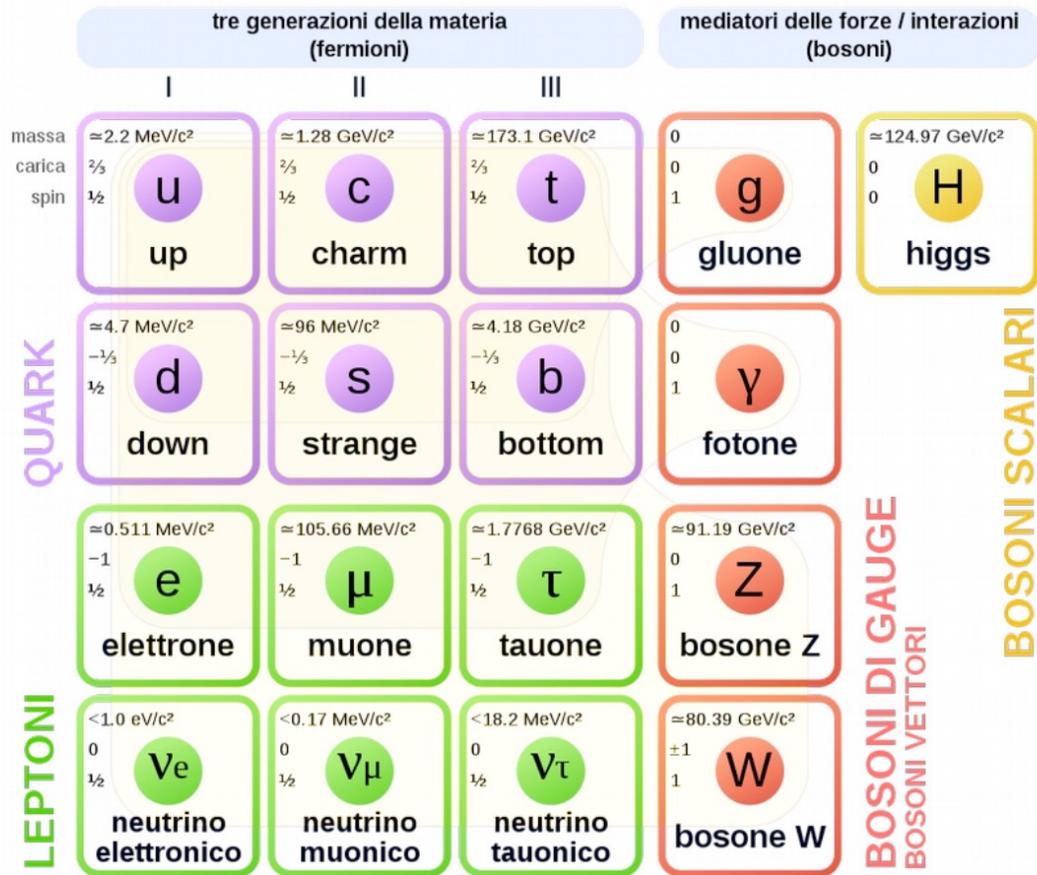


La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

Questo è il quadro completo che conosciamo oggi. Ad ogni particella corrisponde una sua antiparticella

Il meccanismo di Higgs permette di attribuire una massa alle particelle elementari, tramite l'interazione con il campo generato da una nuova particella, il bosone di Higgs.

# Il Modello Standard delle Particelle Elementari



Il Modello standard della fisica delle particelle: è una teoria ben confermata da numerosi esperimenti.

Il bosone di Higgs: Teorizzato nel 1964 – ricercato per quasi 60 anni (in Europa, in USA)  
Finalmente scoperto nel 2012 al CERN ad LHC

# Come si identifica un neutrino?

I neutrini, così come i muoni sono le uniche particelle che emergono dal sistema dei rivelatori

Al contrario dei muoni i neutrini interagiscono molto poco con i materiali dei rivelatori e non sono direttamente rivelabili

Ad LHC vengono identificati come quantità di moto mancante

○ Ci si aspetta di avere nello stato finale la stessa quantità di moto che c'era nello stato iniziale (principio di conservazione)

○ se manca qualcosa probabilmente l'ha portato via un neutrino!!!!

○ Ai colliders adronici il bilanciamento  
nel piano trasverso

energia/quantità di moto si calcola



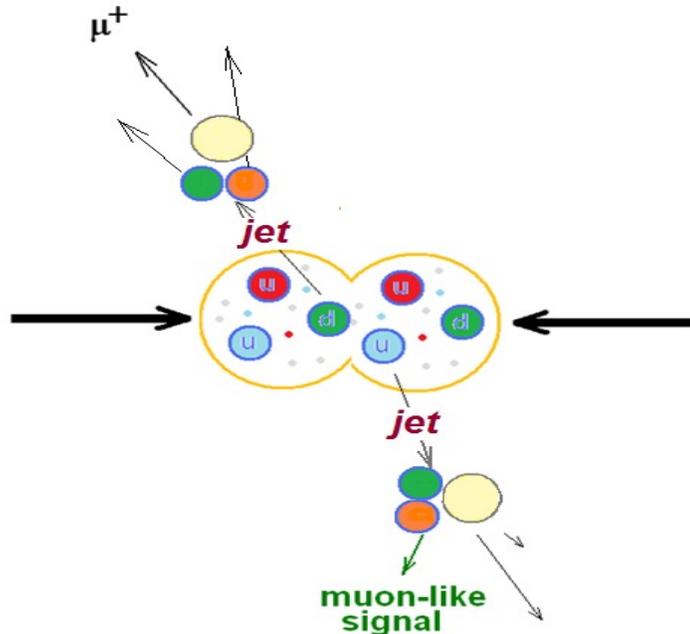
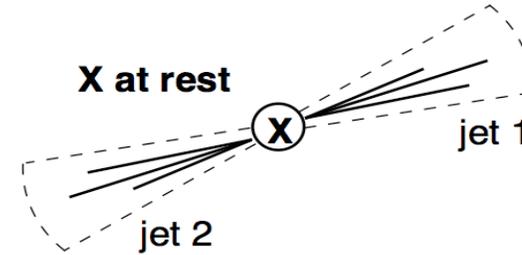
# ...e come appaiono i quarks ?

non esistono allo stato libero, a causa della forza forte, eccitano particelle (coppie materia-antimateria) di ogni tipo che cercano di frenarli e gli impediscono di muoversi liberamente.

convertono subito la loro energia in fiotti di particelle detti **jet**

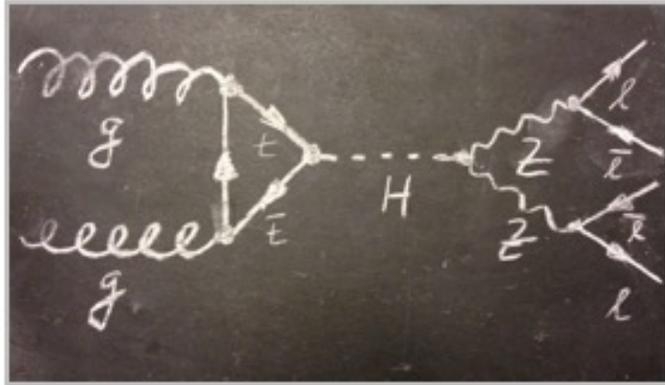
I **jet** possono contenere particelle di ogni tipo, concentrate in una stretta regione angolare

particelle di campo dal vuoto

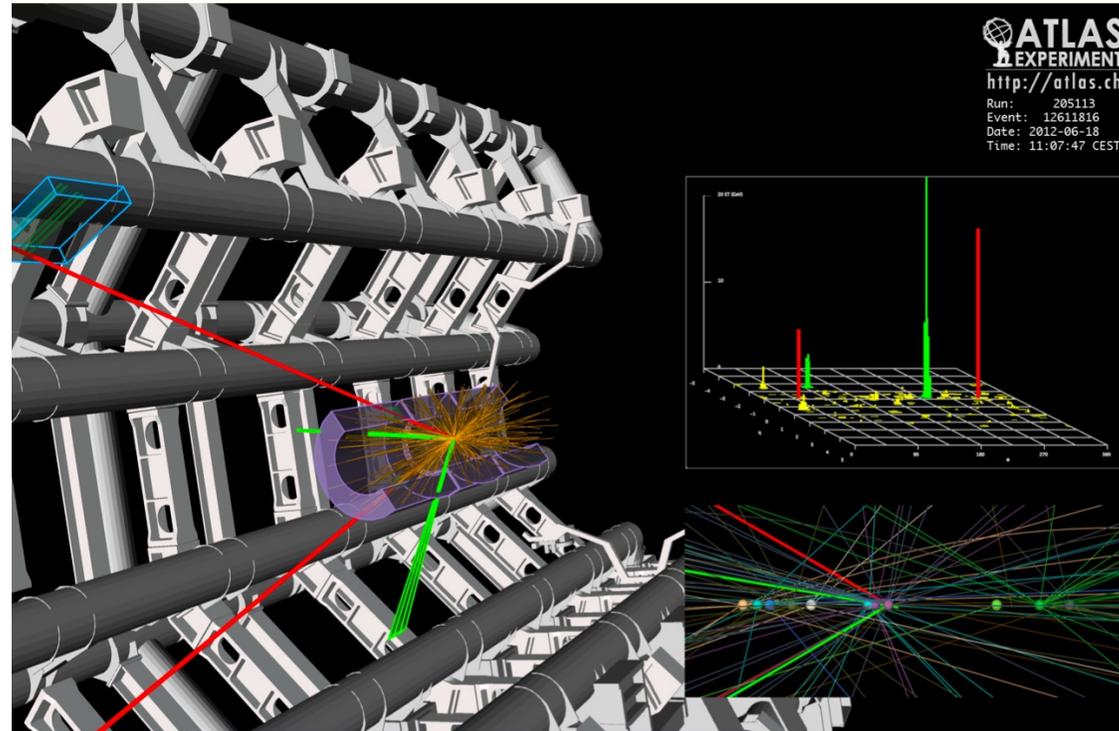


# A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

Higgs  $\rightarrow$  Z Z  $\rightarrow$  4 leptoni



Ogni particella Z decade in due leptoni (es elettroni, muoni)  
Nello stato finale ci sono 4leptoni  
La massa viene ricostruita combinando le misure di queste 4 particelle

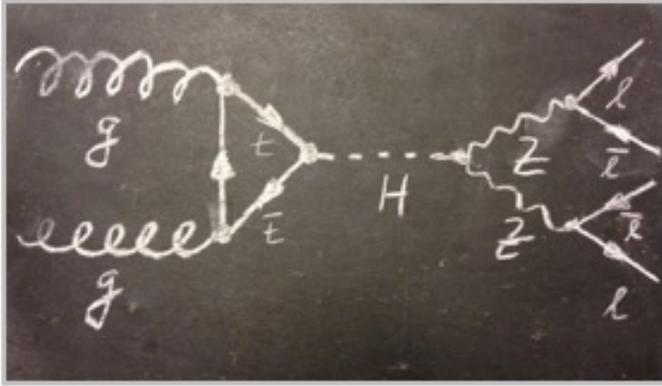


Evento candidato Bosone di Higgs in  $2e 2\mu$



# A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

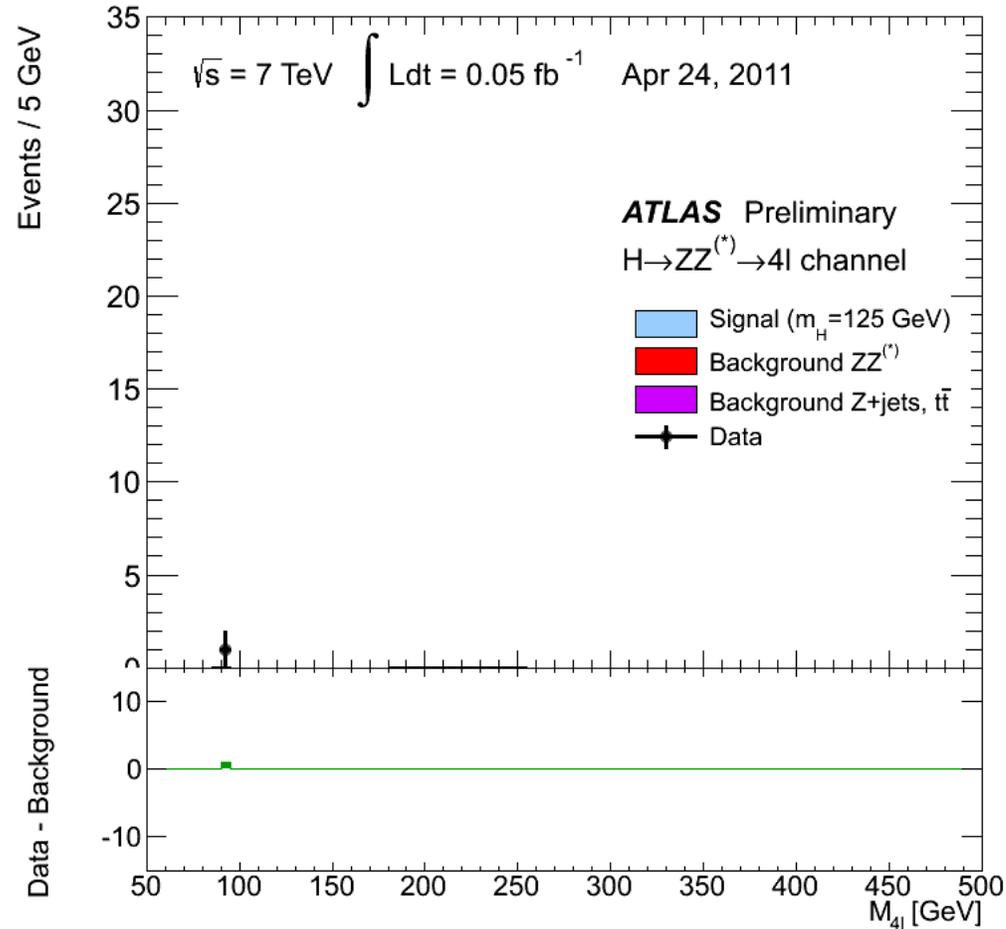
Higgs  $\rightarrow$  Z Z  $\rightarrow$  4 leptoni



Ogni particella Z decade in due leptoni (es elettroni, muoni)

Nello stato finale ci sono 4 leptoni

La massa viene ricostruita combinando le misure di queste 4 particelle



# Rivelazione di eventi rari – il bosone di Higgs

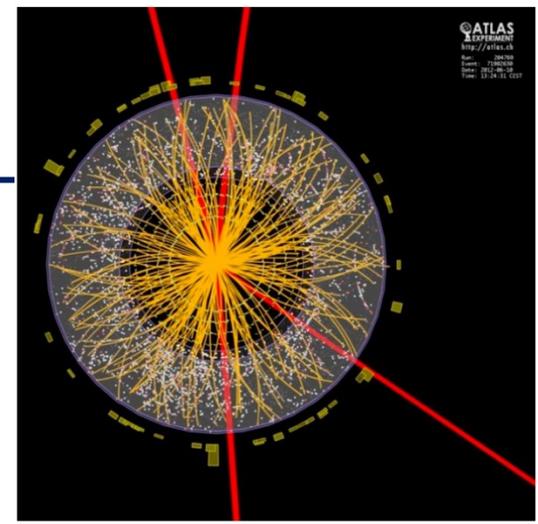
Molte fra le particelle più interessanti da studiare (o da scoprire) non possono essere rivelate direttamente.

Decadono in tempi brevissimi. Le riveliamo attraverso i prodotti del loro decadimento.

Un esempio: il **Bosone di Higgs** può decadere in una varietà di modi e particelle.

Tutti decadimenti predetti dal Modello Standard che ne predice anche la frequenza.

- La probabilità di osservare in una collisione un evento che coinvolge un bosone di Higgs è 1 su  $10^{12}$  (1 su mille miliardi)
- E' necessario accumulare una GRAN quantità di dati per identificare senza ambiguità la scoperta di una nuova particella.
- Sono necessari sistemi hardware e software con altissima tecnologia per selezionare i dati
- Il data center del CERN salva  $30 \times 10^{15}$  byte/anno (in CD una pila di 20 km di altezza !!! → GRID )



Osservare un bosone di Higgs – un evento estremamente raro

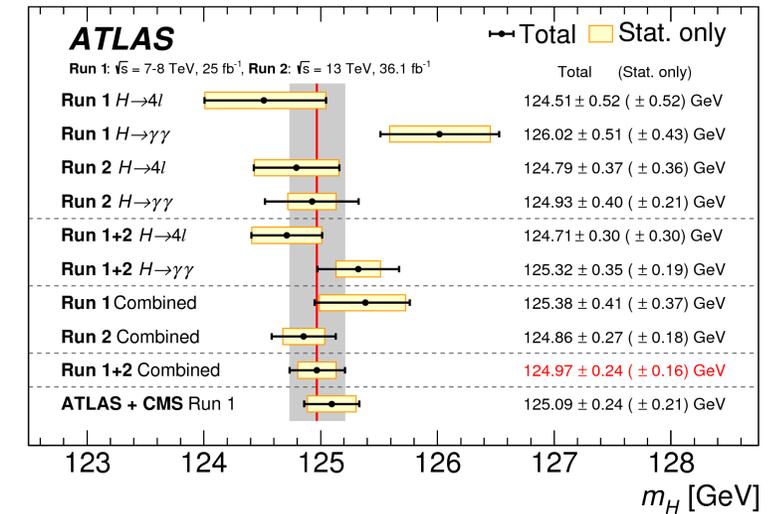


Stessa probabilità di ottenere «testa» in 41 lanci di una moneta

# Higgs ha compiuto DIECI anni !

In questi dieci anni:

- Sono stati fatti progressi enormi nella comprensione di tutte le caratteristiche di questa importantissima particella
- Si sono misurati (quasi) tutti i decadimenti previsti dal MS e gli accoppiamenti con le altre particelle
- Altre misure fondamentali saranno fatte nei prossimi anni



....e la fisica dell'Higgs e' solo una (piccola) parte di tutti gli studi fatti a LHC !

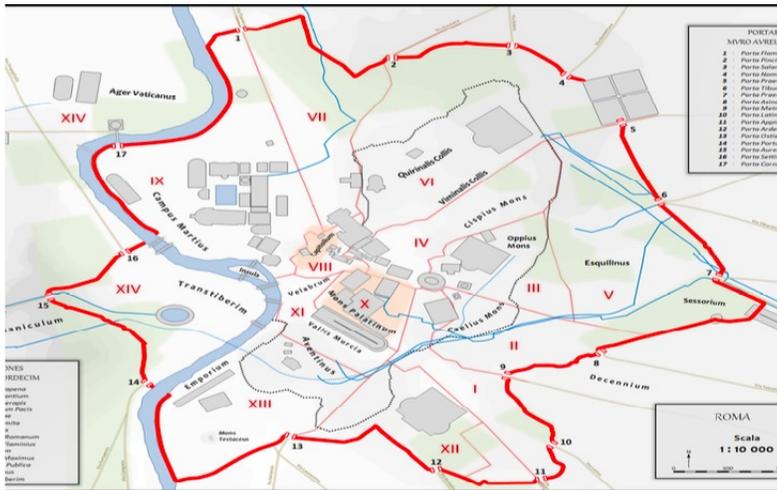
Il 4 Luglio 2022 il bosone di Higgs compie 10 anni!

...stay tuned!

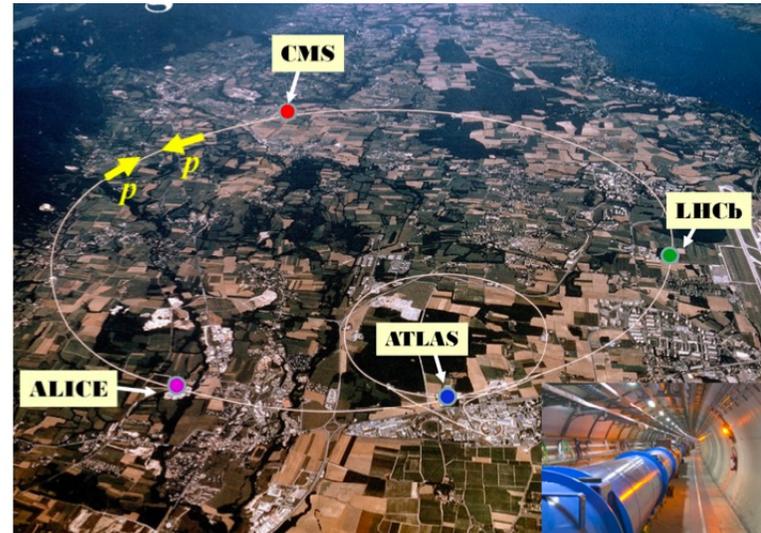
Molti eventi celebreranno questa importante scoperta

# LHC: un collider da 27 km

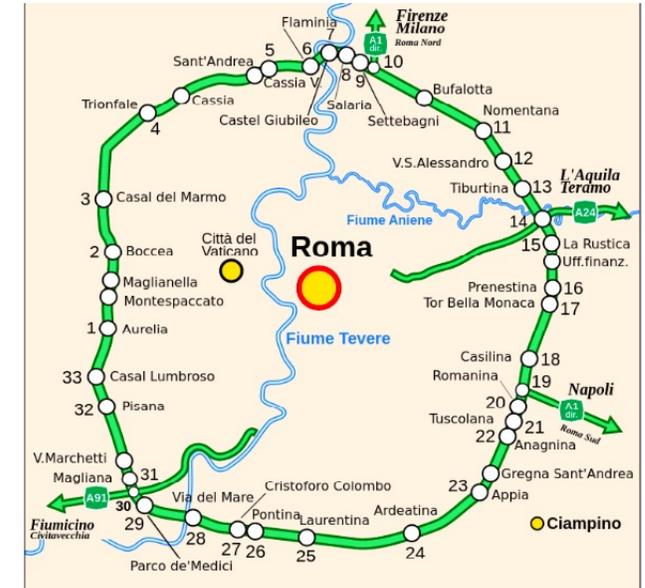
Mura Aureliane  
~19 km



Large Hadron Collider  
~27 km



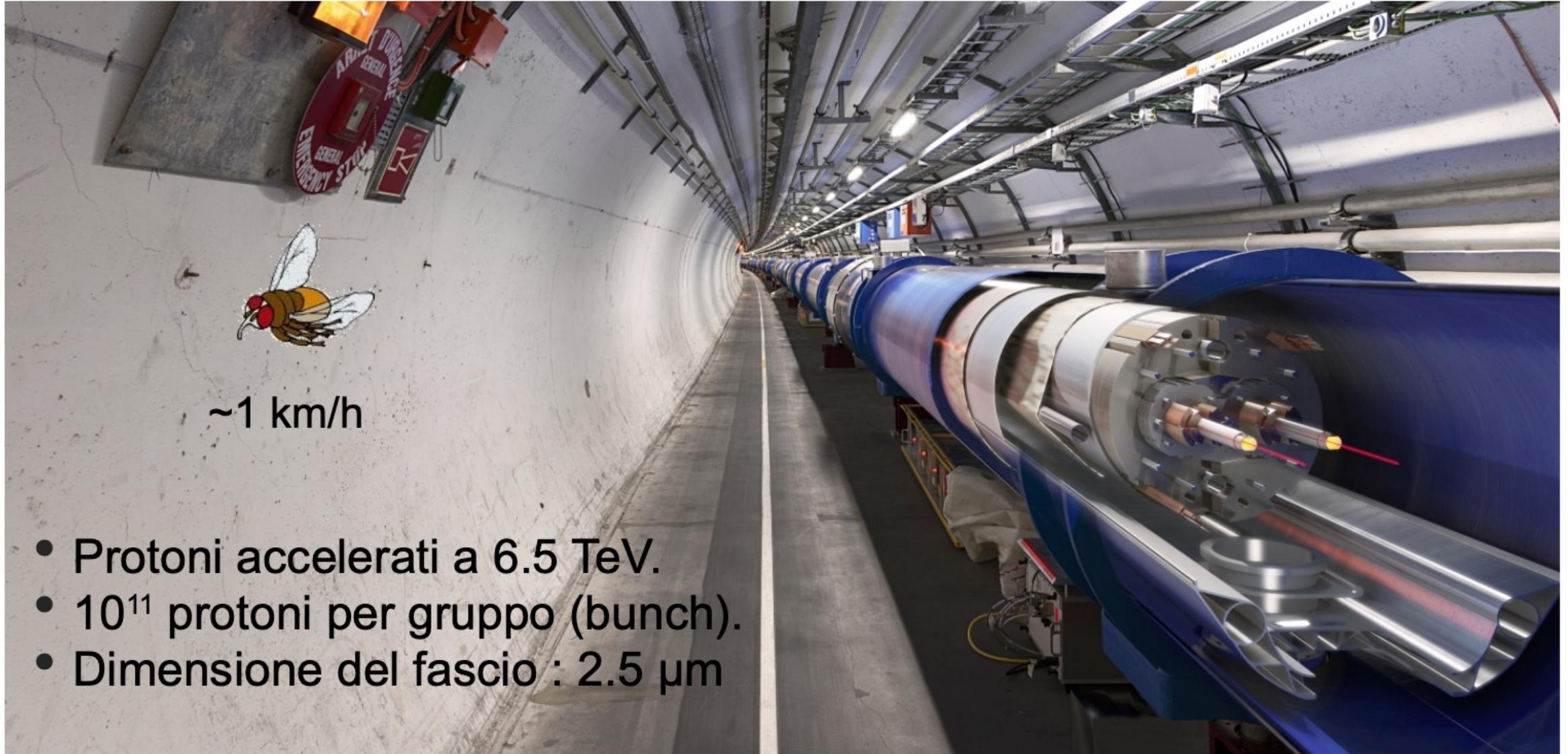
Grande Raccordo Anulare  
~68 km



- 27 km di circonferenza a 100 m di profondità
- ~1200 magneti superconduttori da ~8 T

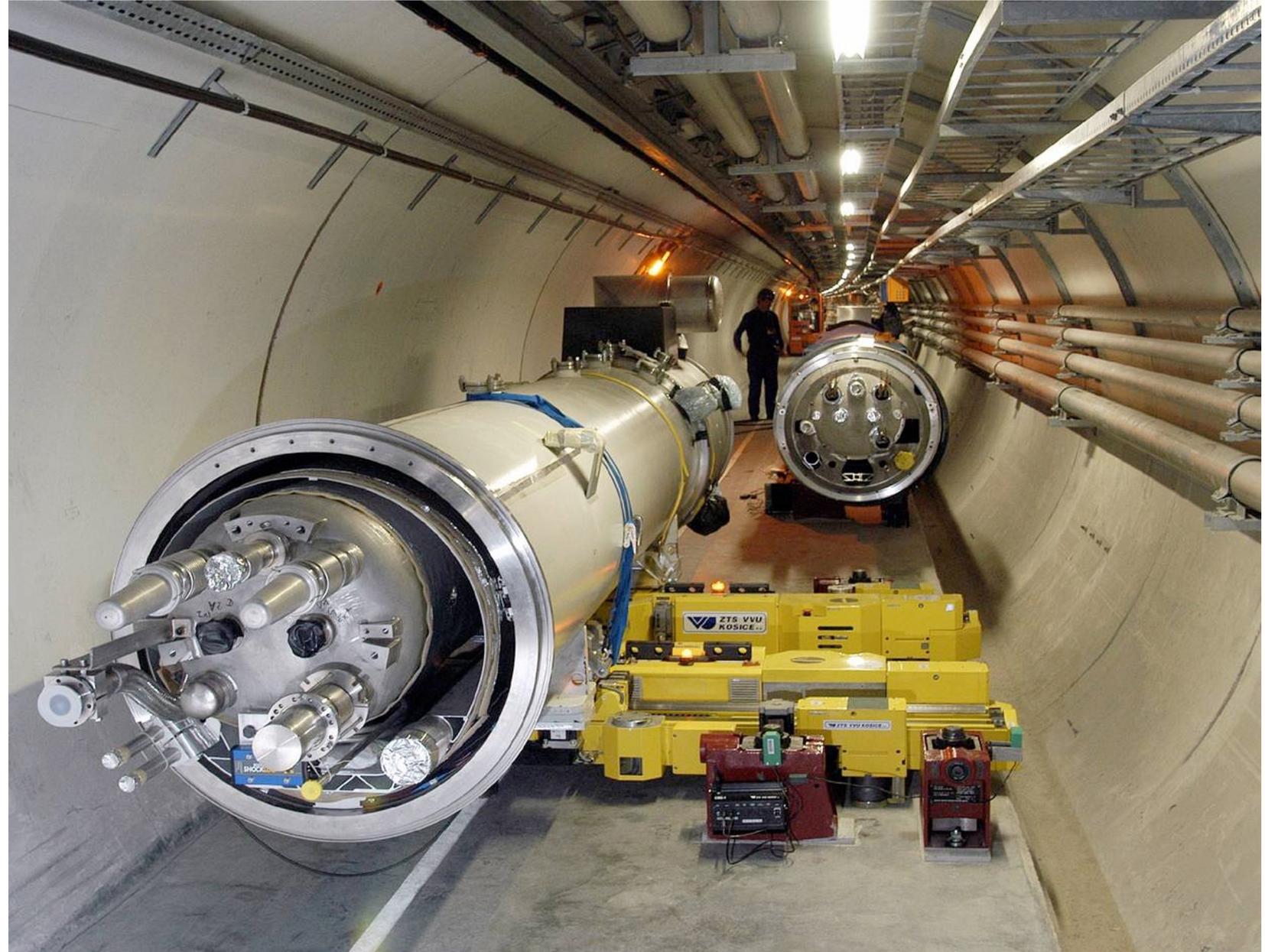
Lo strumento scientifico  
più grande del mondo!

# Il Large Hadron Collider - LHC



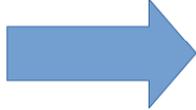
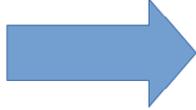
- Protoni accelerati a 6.5 TeV.
- $10^{11}$  protoni per gruppo (bunch).
- Dimensione del fascio :  $2.5 \mu\text{m}$

LHC  
è il più potente  
strumento per  
studiare  
l'infinitamente  
piccolo



# Quanto costa LHC ?

---

|                                                                                                   |         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| 1 Km di autostrada                                                                                | 30 M€   |
| 1 caccia F16 :                                                                                    | 25 M€   |
| 1 bombardiere B-2 stealth                                                                         | 1000 M€ |
| Acceleratore DAPHNE + esp. KLOE                                                                   | 150 M€  |
| Bilancio annuale INFN                                                                             | 270 M€  |
|  ATLAS o CMS     | 330 M€  |
| 1 lancio di uno shuttle                                                                           | 400 M€  |
|  Costruzione LHC | 2 G€    |
| Space shuttle                                                                                     | 4 G€    |
| Ponte sullo stretto di Messina                                                                    | 5 G€    |
| Bilancio annuale difesa americana                                                                 | 400 G€  |

# Quanto costa LHC ?

---

LHC, pagato in **10 anni** dall'intera comunita' scientifica internazionale, costa come:

**Una settimana** di guerra in Iraq

**Un centesimo** di quanto stanziato dagli USA per contrastare il crack delle banche

Quanto viene speso al mondo in **una settimana**, per pubblicita'

**Quattro** bombardieri B-2

**Meno di un centesimo** della spesa militare mondiale **annua**

LHC e' costato ad **ogni cittadino italiano**:

**1 euro e 20 centesimi l'anno**, per 10 anni.

Per ogni euro speso dallo stato italiano per LHC, 1 euro e mezzo e' rientrato come commesse alle industrie italiane.

**La ricerca scientifica e' anche un ottimo ritorno economico !**