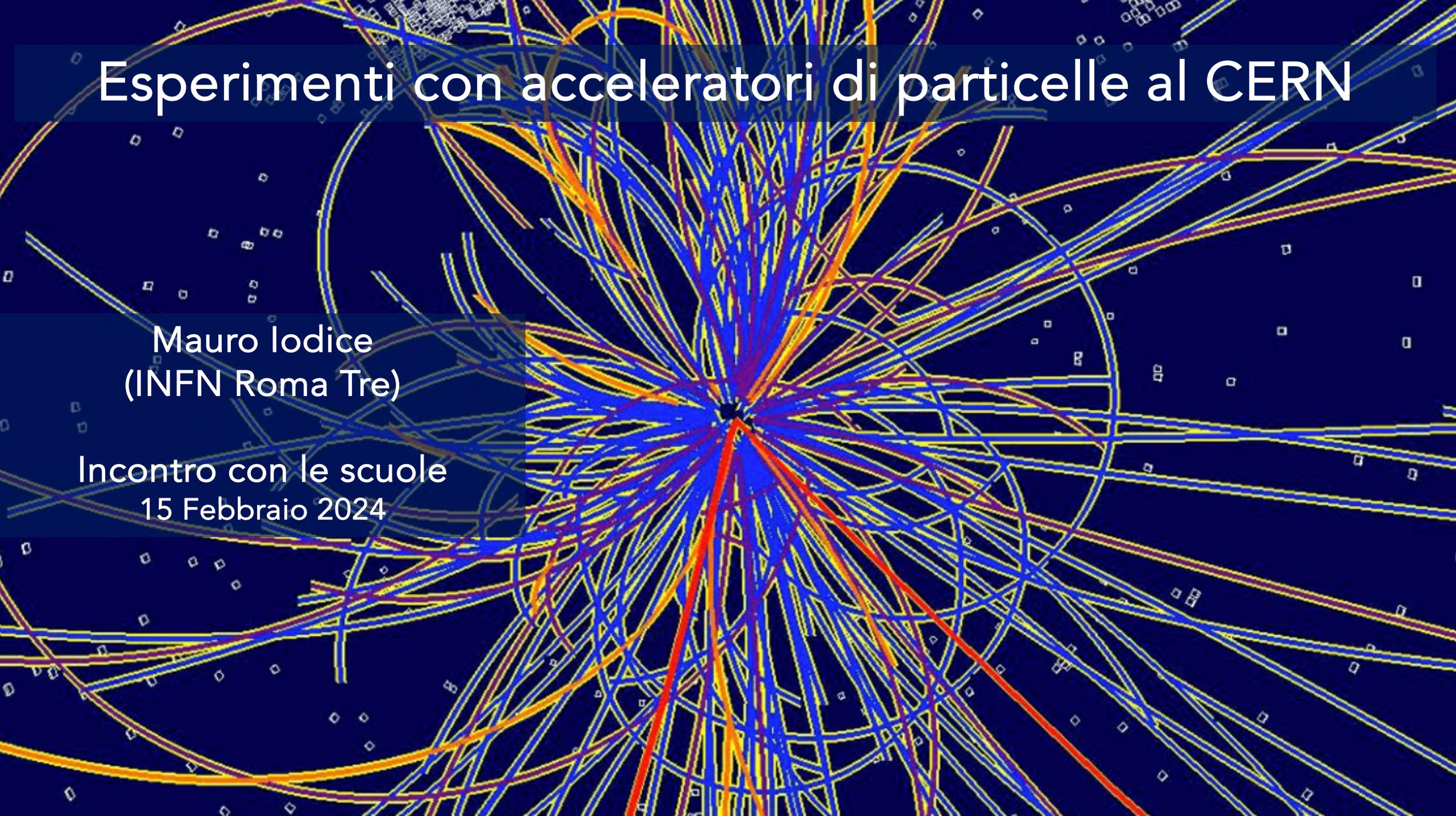


Esperimenti con acceleratori di particelle al CERN

A complex visualization of a particle collision event, likely from a detector like ATLAS or CMS at CERN. The image shows a central black vertex from which hundreds of tracks radiate outwards. The tracks are color-coded, with a prominent red track extending downwards. The background is dark blue with scattered white square markers, possibly representing detector hits or secondary vertices.

Mauro Iodice
(INFN Roma Tre)

Incontro con le scuole
15 Febbraio 2024

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

**IL LARGE HADRON COLLIDER STA LAVORANDO
Si cerca la "particella di Dio" e molte altre risposte**

The New York Times
Late Edition
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 Collision Rate Evid

Particle Collide, and Champagne Glasses Clink

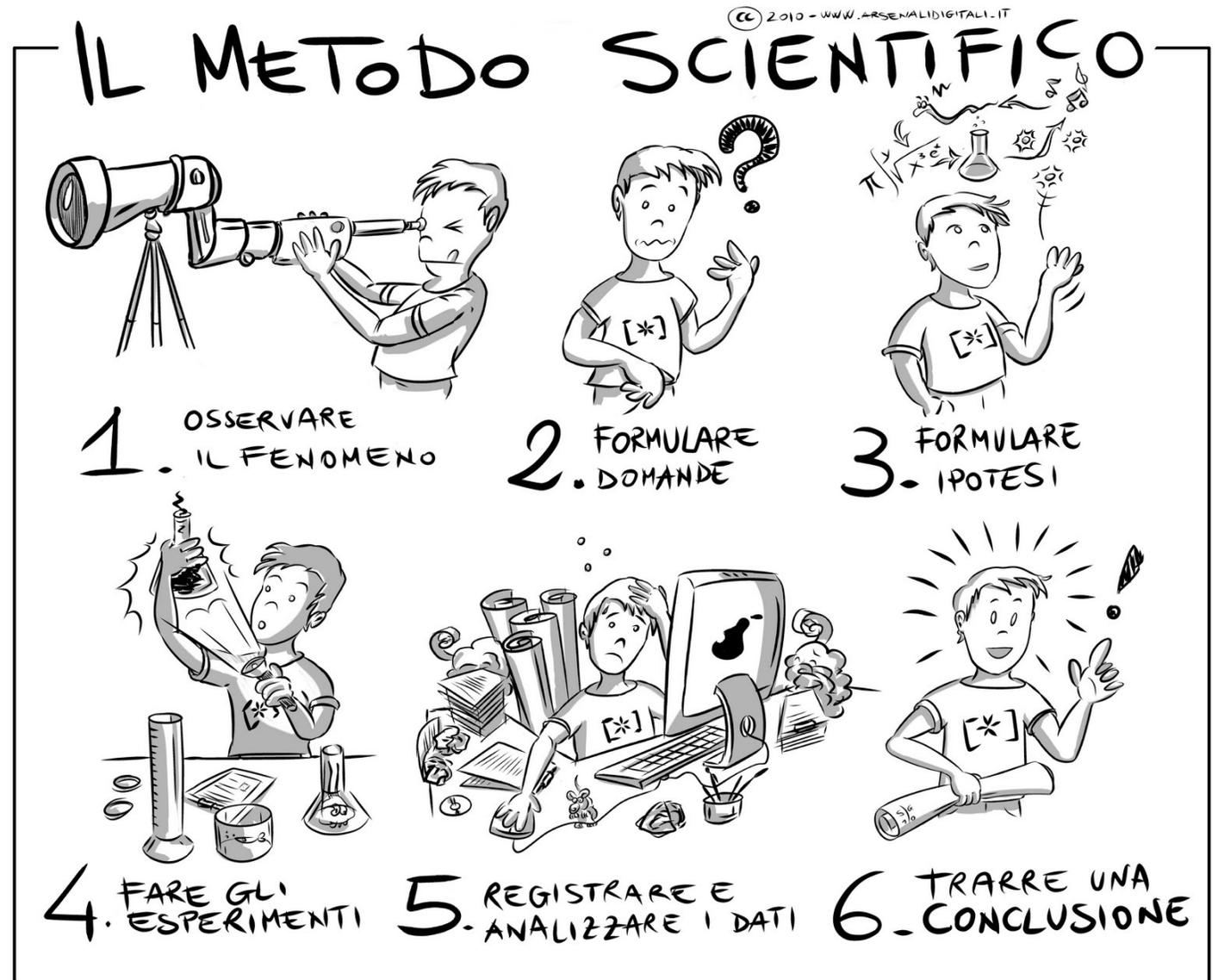
Il metodo scientifico e il mestiere dei Fisici



Galileo Galilei
(1564 - 1642)

Articola il lavoro della scienza in:

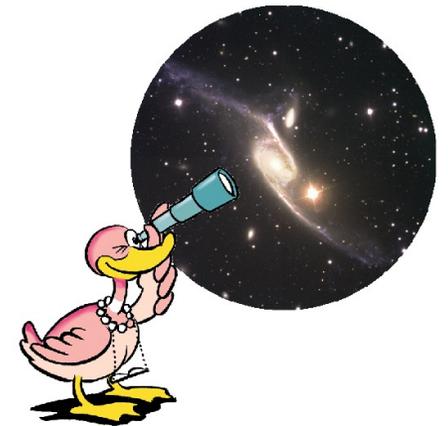
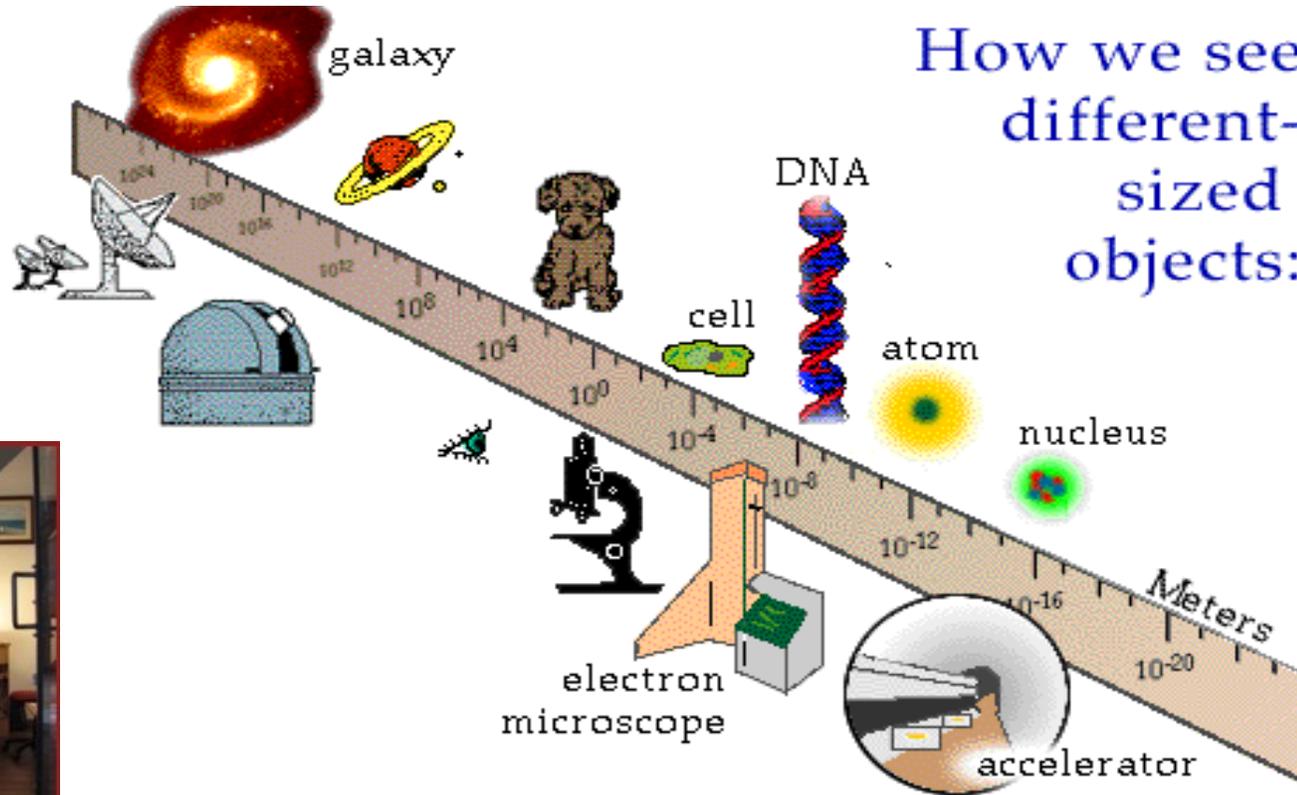
- Il momento "risolutivo" o analitico
- Il momento "compositivo" o sintetico



Come osserviamo gli oggetti ?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare

How we see different-sized objects:



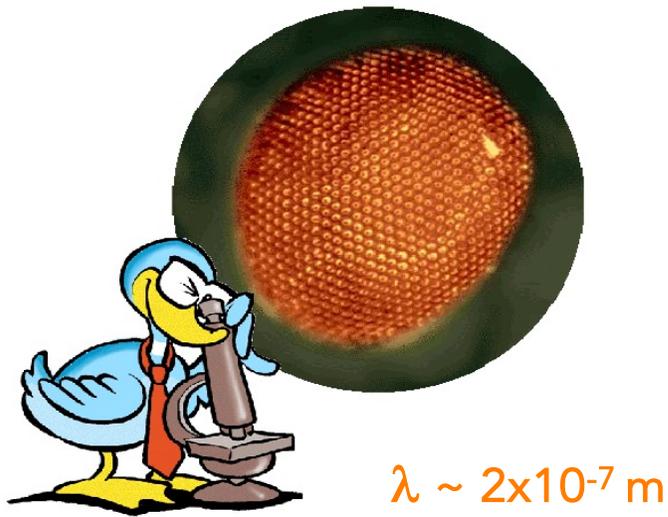
La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra $0.4\text{--}0.8\ \mu\text{m}$ quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al μm

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

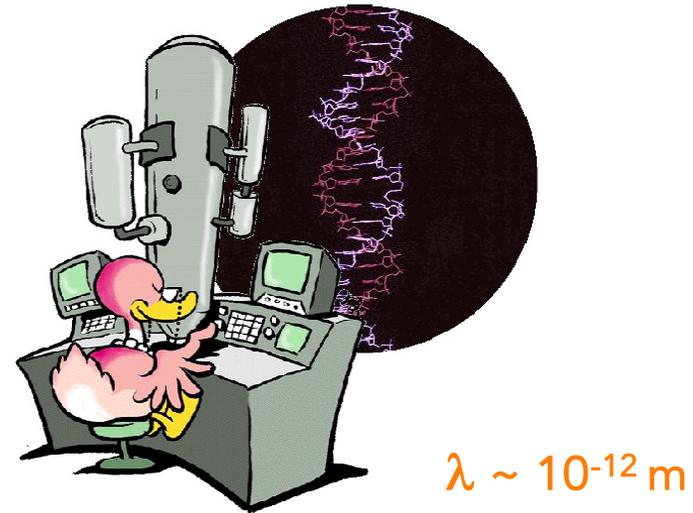
Ma come guardiamo gli oggetti microscopici ?

Osservazione degli oggetti microscopici

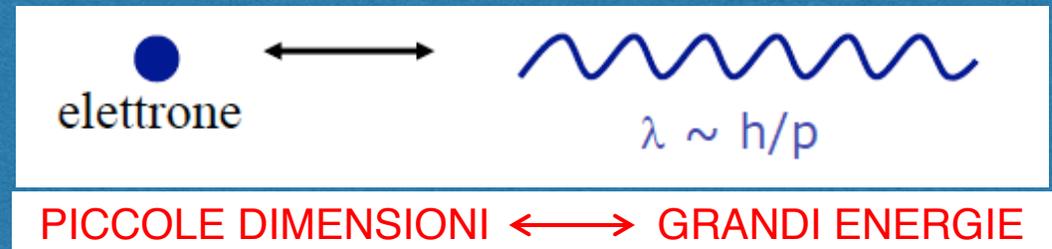
I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



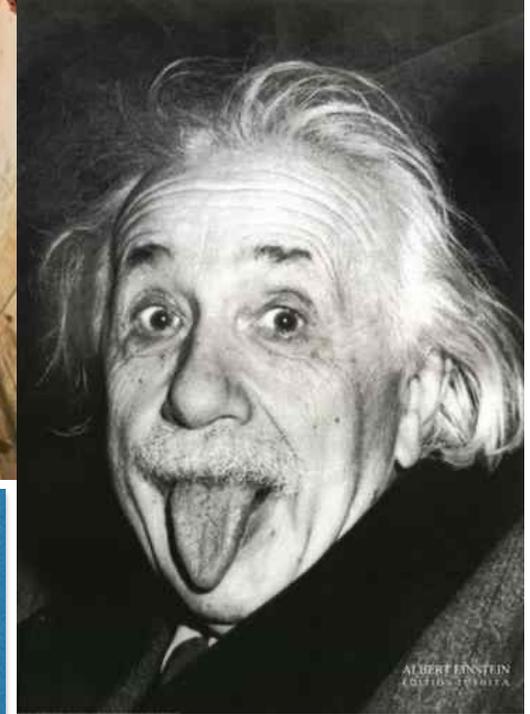
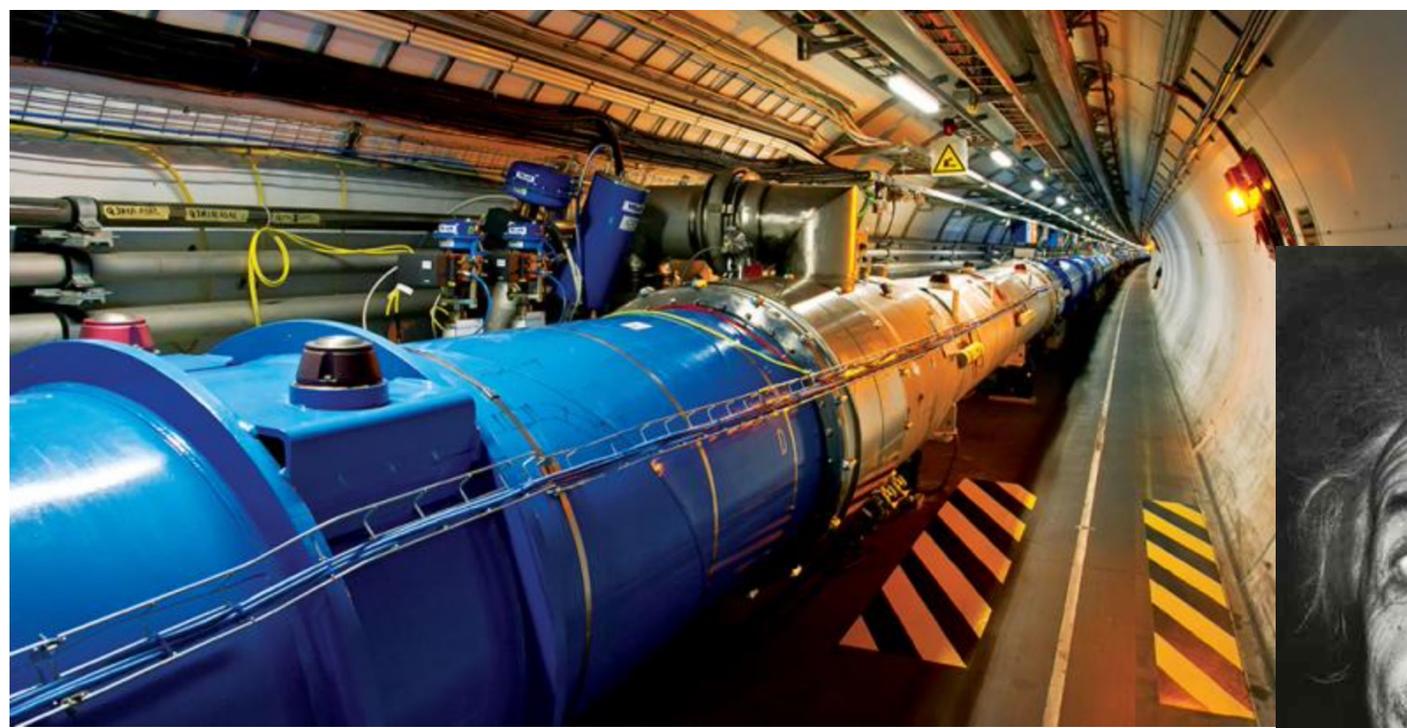
I **microscopi ad elettroni** ci consentono di osservare oggetti ancora più piccoli, fino al livello della struttura atomica. Usano piccoli fasci di elettroni come sonda



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

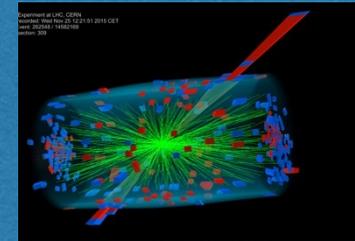


Perché gli acceleratori di particelle ?



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 $E=mc^2$



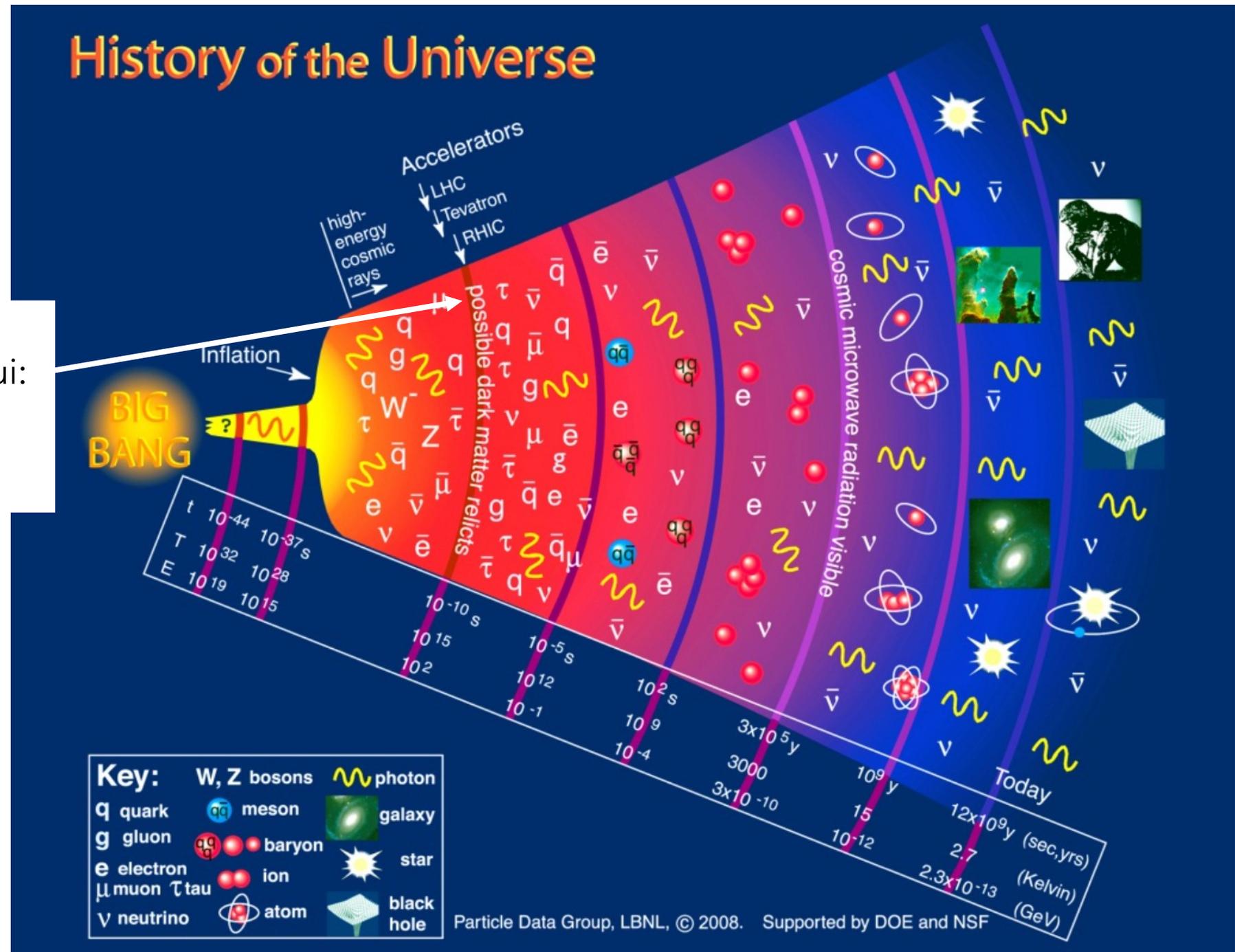
3. Per fare un viaggio indietro nel tempo...



Un viaggio alle origini dell'Universo

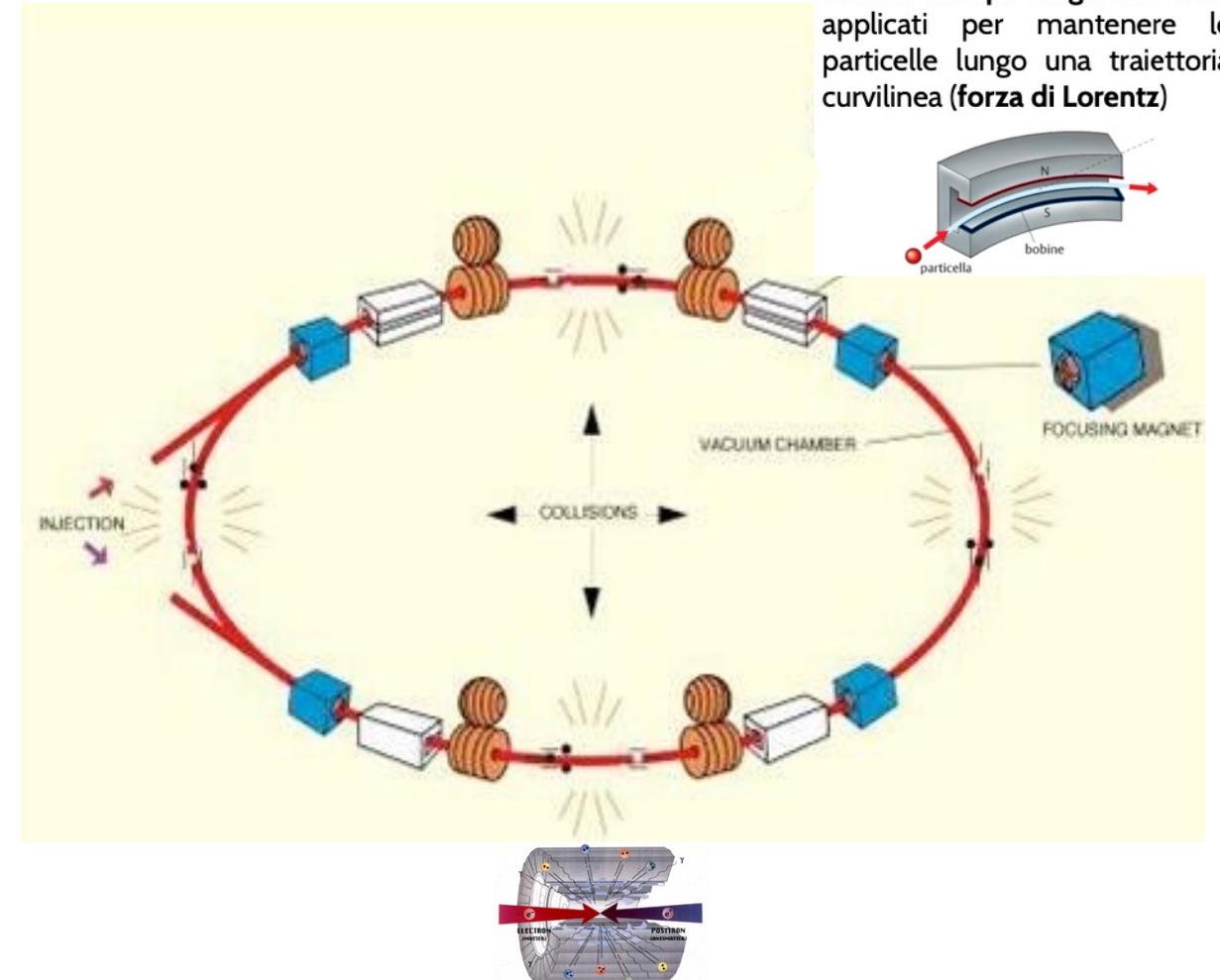
Le collisioni p-p a LHC ci riportano indietro fino a qui:

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



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

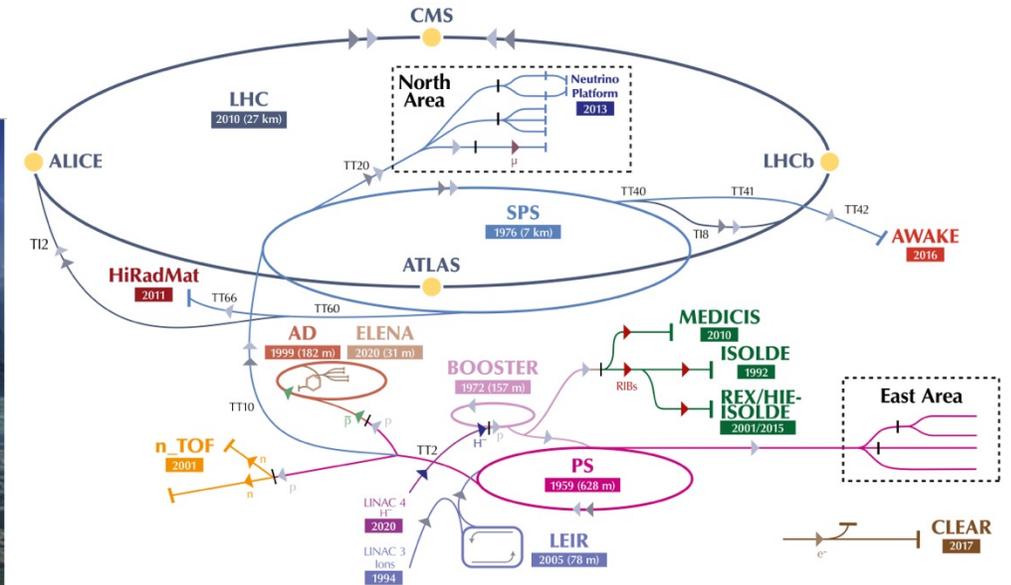
Ai Laboratori Nazionali di Frascati è stato progettato e costruito il primo collisore (elettrone – positrone) della storia, grazie a Bruno Touschek negli anni 60



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

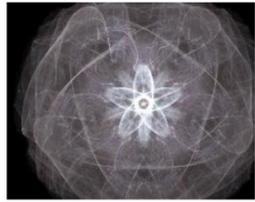
Numerosi esperimenti sono disposti in diversi punti del sistema di acceleratori.

Che cos'è il CERN ?

CERN significa: Consiglio Europeo per la ricerca nucleare

E' un grandissimo laboratorio di Fisica

C	Conseil	European
E	Européen pour	Organization for
R	la	Nuclear
N	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

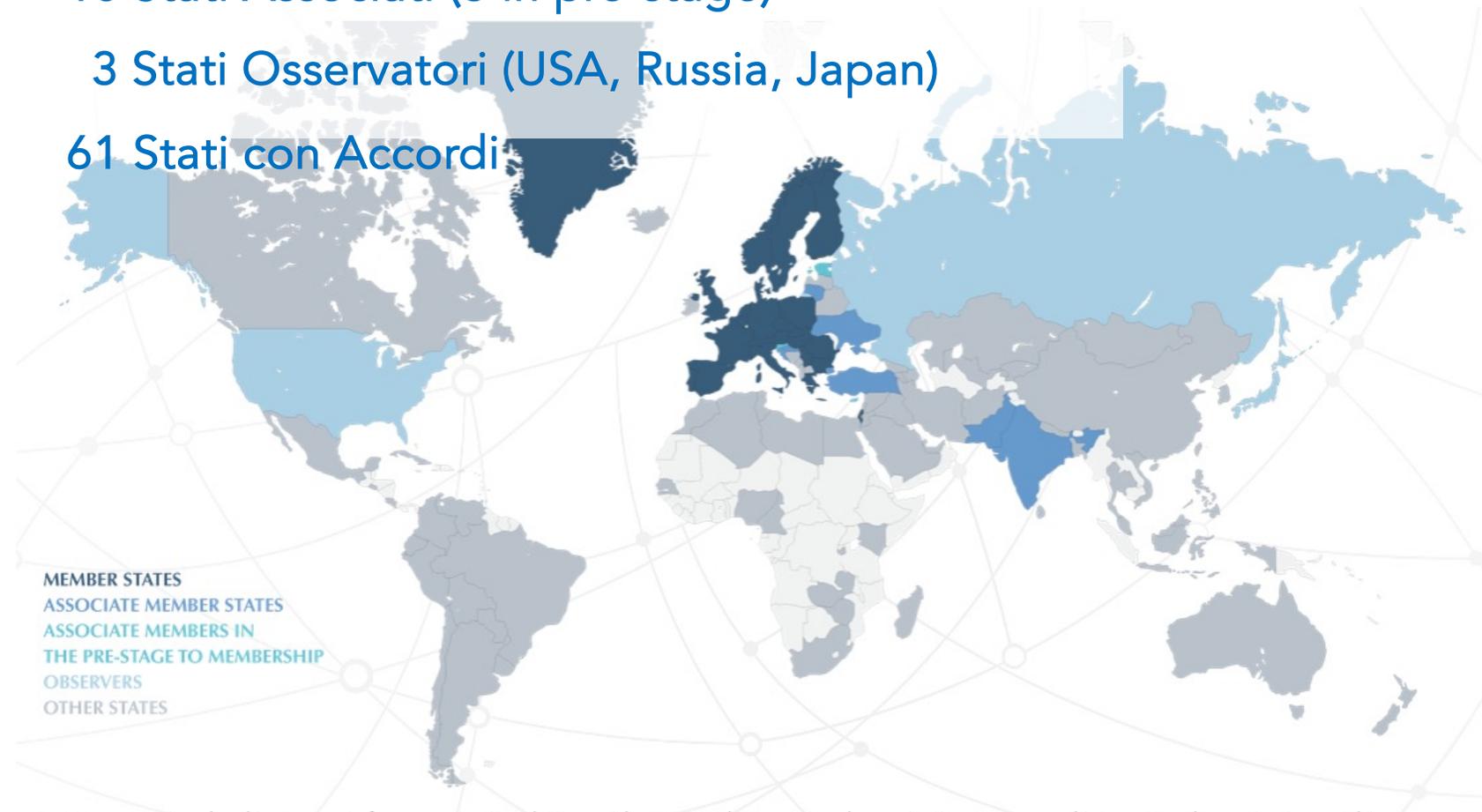
Il CERN di oggi

23 Stati Membri (Italia è uno dei paesi fondatori)

10 Stati Associati (3 in pre-stage)

3 Stati Osservatori (USA, Russia, Japan)

61 Stati con Accordi



L'italiana, Fabiola Gianotti, è direttrice del CERN da 2016



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.



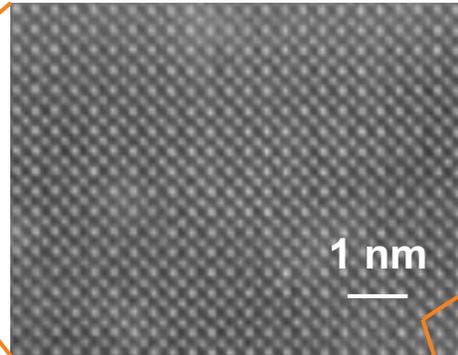
L'oggetto di studio

I costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni

Materia macroscopica



Struttura Atomica

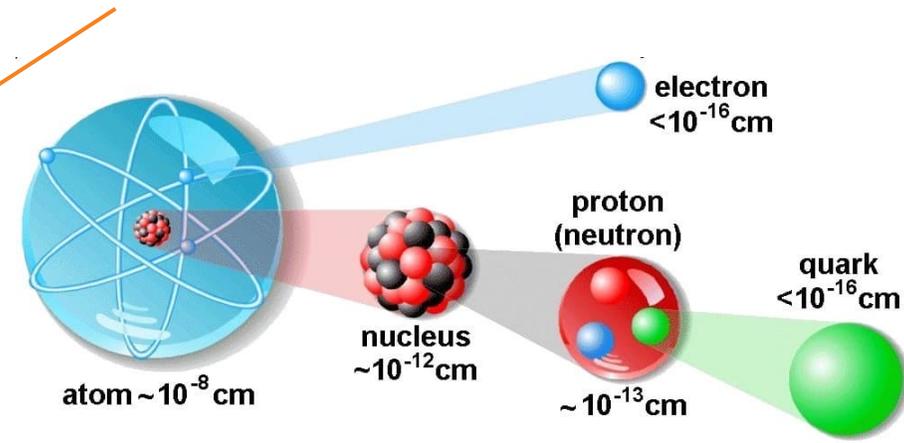


Fine XIX secolo

Inizio XX secolo

1960s

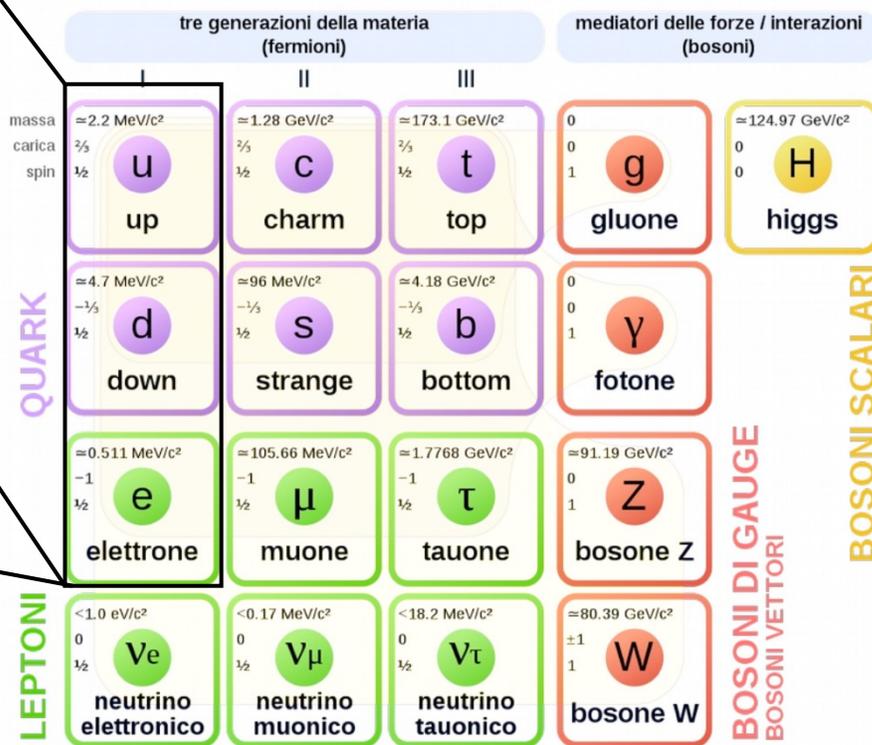
Scala 10^{-10} - 10^{-15} m



Dalla tavola periodica al Modello Standard

Table of elements with columns 1-18 and rows 1-7. Includes element names, symbols, atomic numbers, and mass numbers. Groups are labeled: Alkali metals, Alkaline earth metals, Lanthanoids, Actinoids, Transition metals, Post-transition metals, Metalloids, Nonmetals, Reactive nonmetals, Noble gases. States are indicated: Solid (C), Liquid (Hg), Gas (H), Unknown (Rf).

Modello Standard delle Particelle Elementari



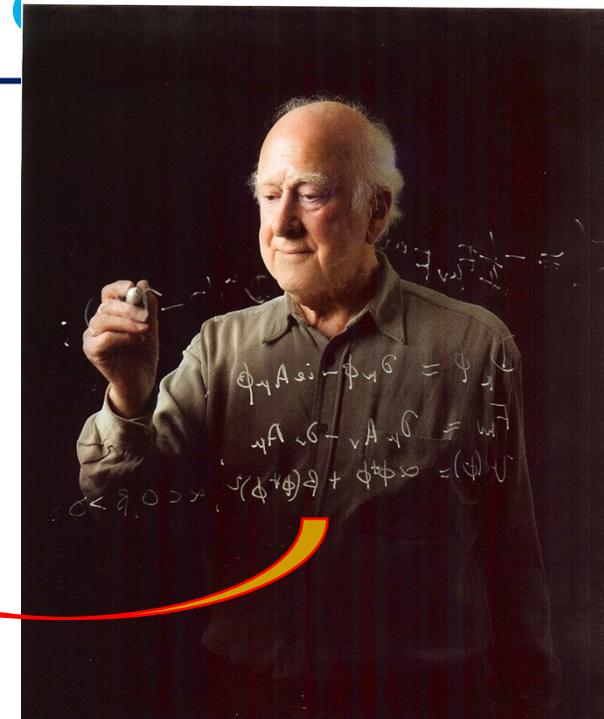
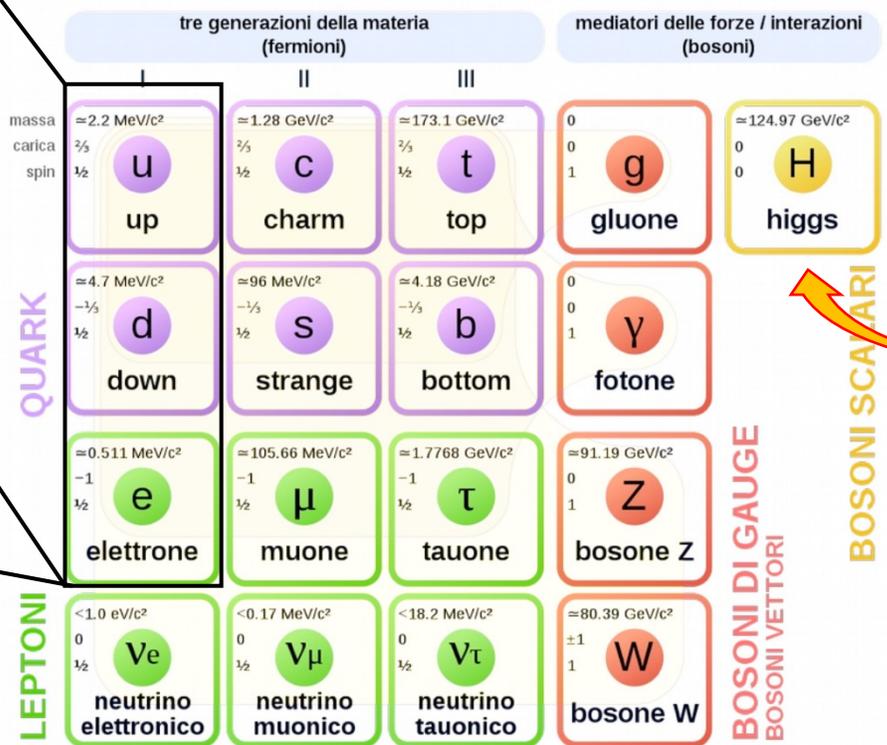
La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

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

Dalla tavola periodica al Modello Standard

Table of Elements (Periodic Table) showing atomic number, symbol, name, and state (Solid, Liquid, Gas, Unknown). The table is color-coded by groups: Alkali metals, Alkaline earth, Lanthanoids, Actinoids, Transition metals, Post-transition metals, Metalloids, Nonmetals, and Noble gases.

Modello Standard delle Particelle Elementari

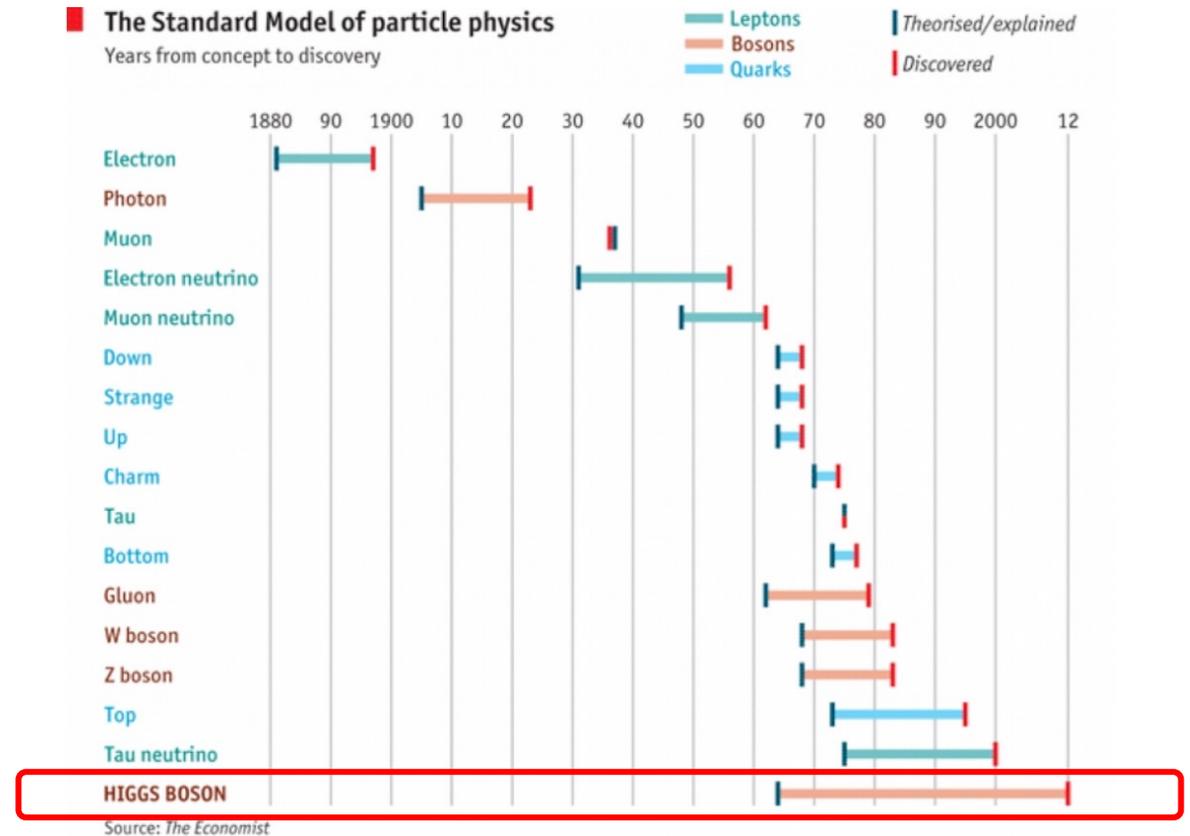
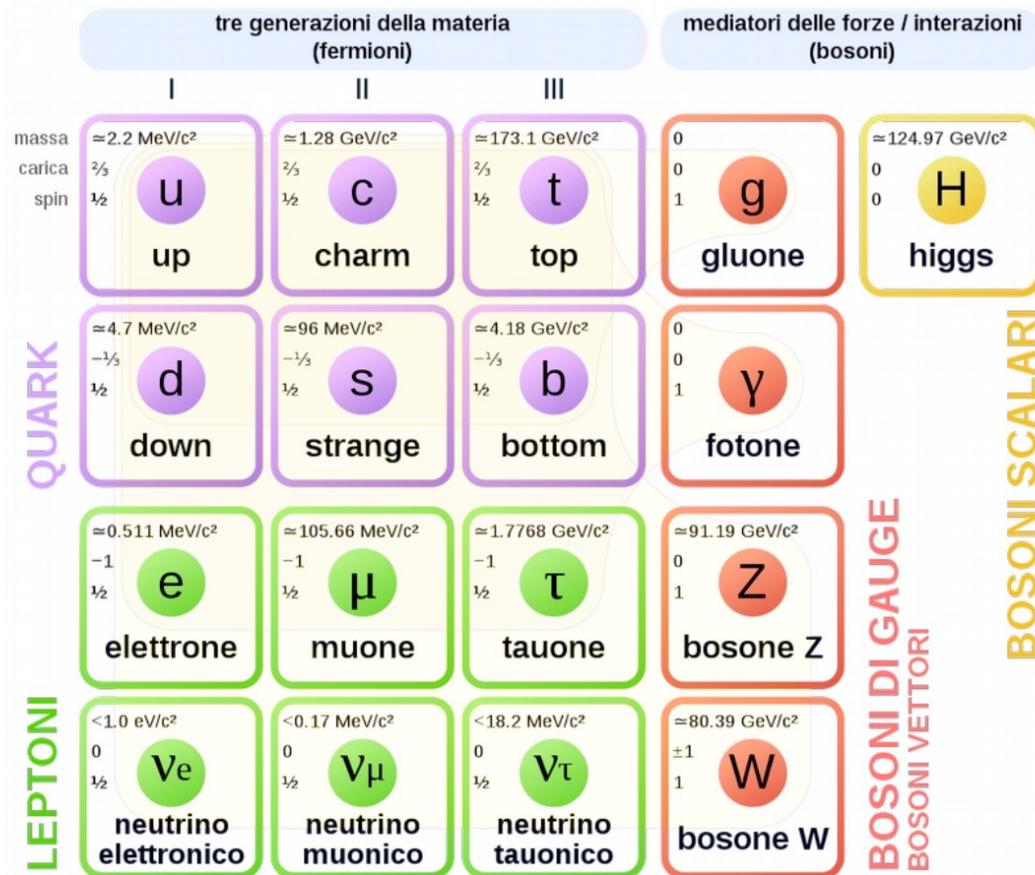


La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

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



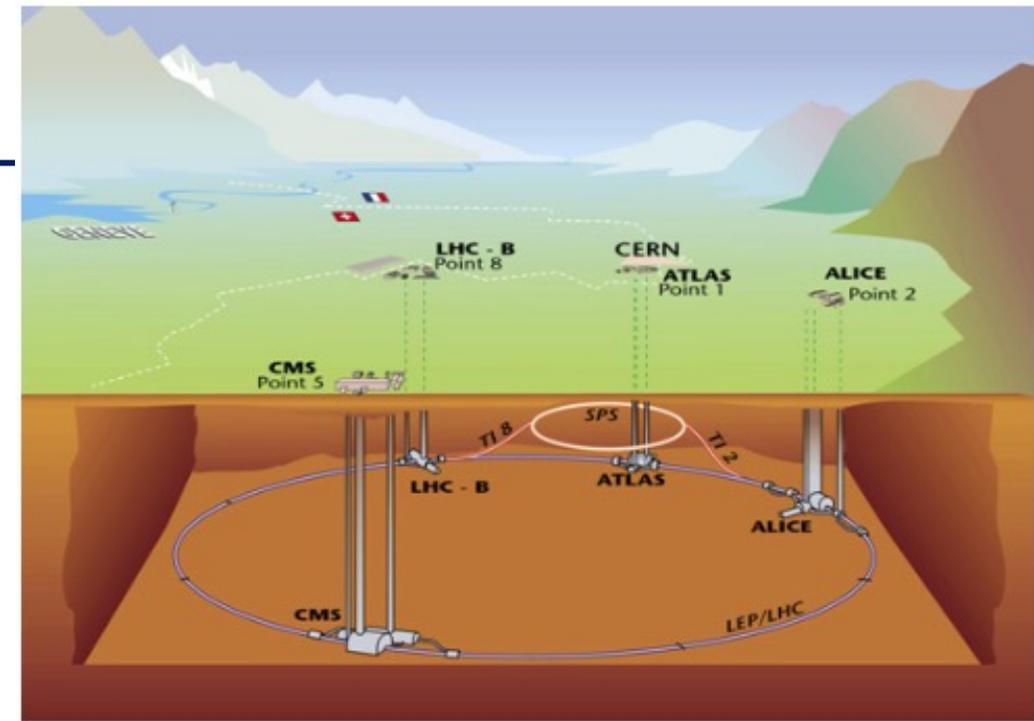
Il Modello standard della fisica delle particelle: è una teoria ben confermata da numerosi esperimenti.

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

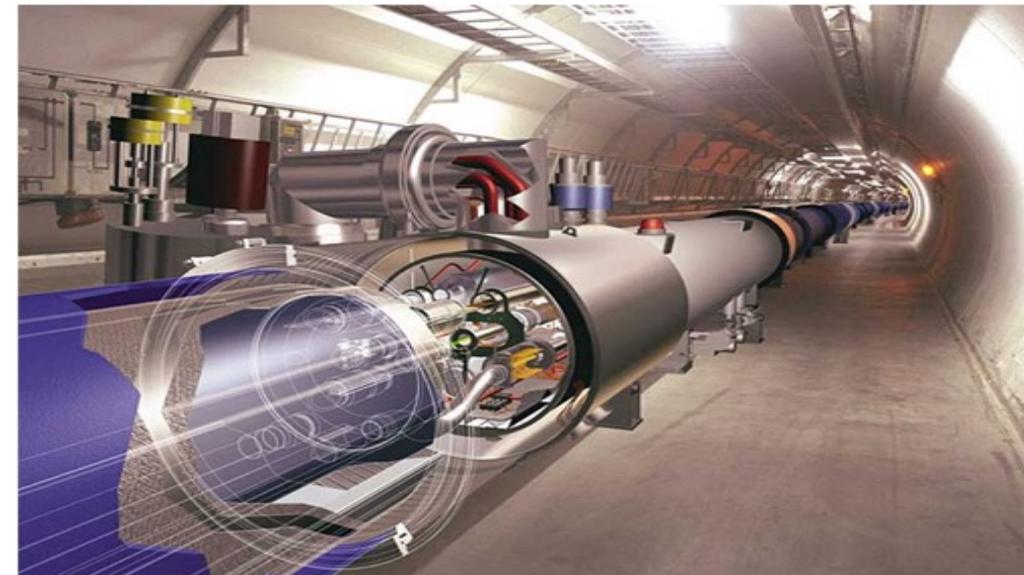
Il Large Hadron Collider - LHC

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



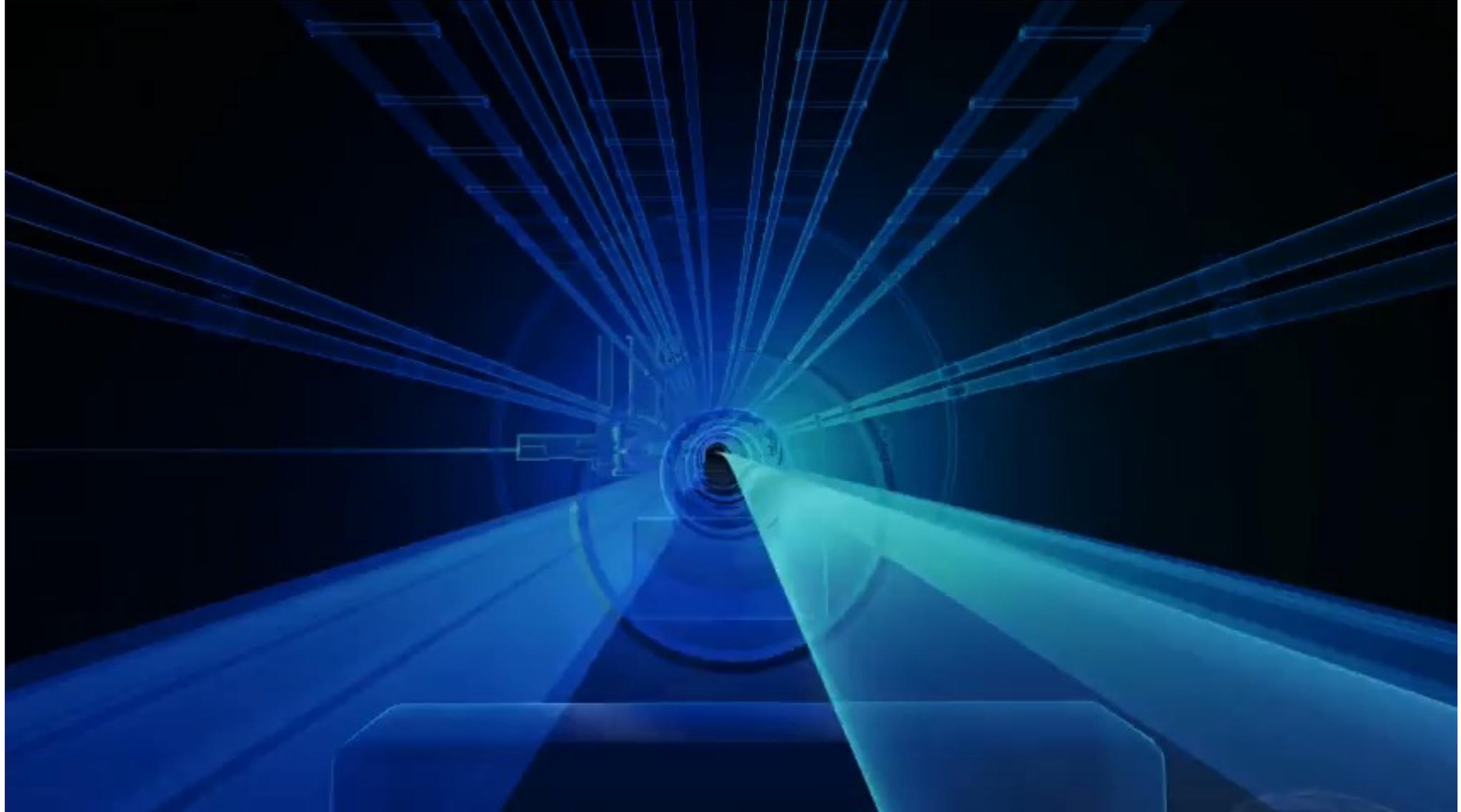
Il Large Hadron Collider è costruito a 100 metri di profondità



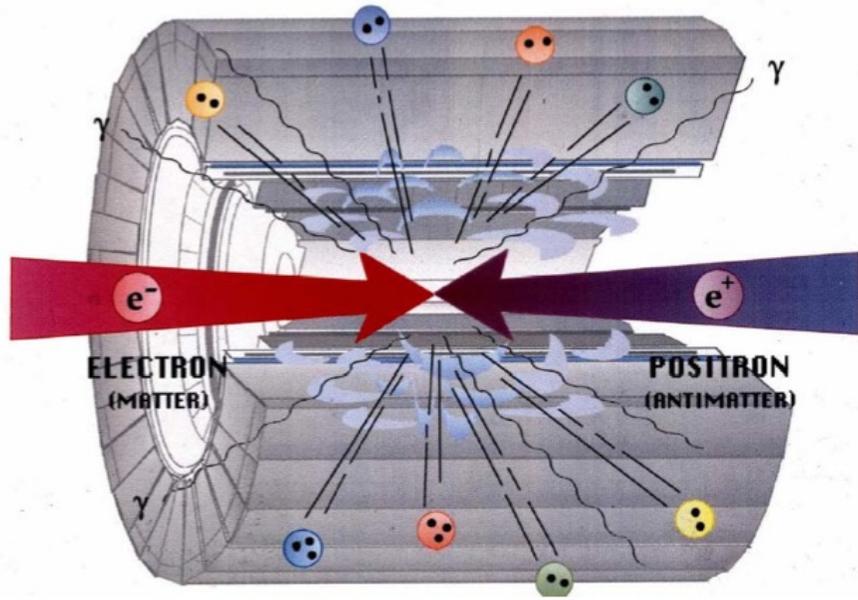
...talmente grande che ci si sposta in treno o in moto!



Cosa osserviamo da una collisione fra particelle



I rivelatori



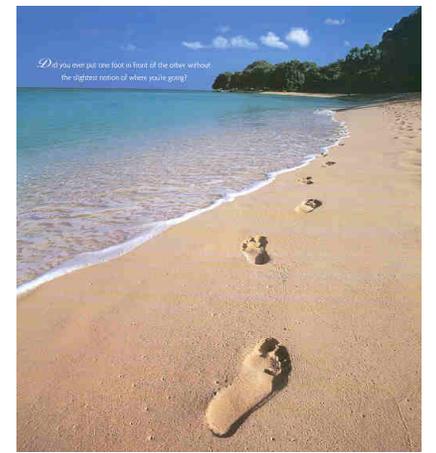
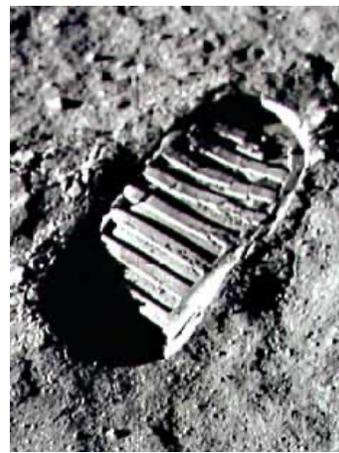
Scopi

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

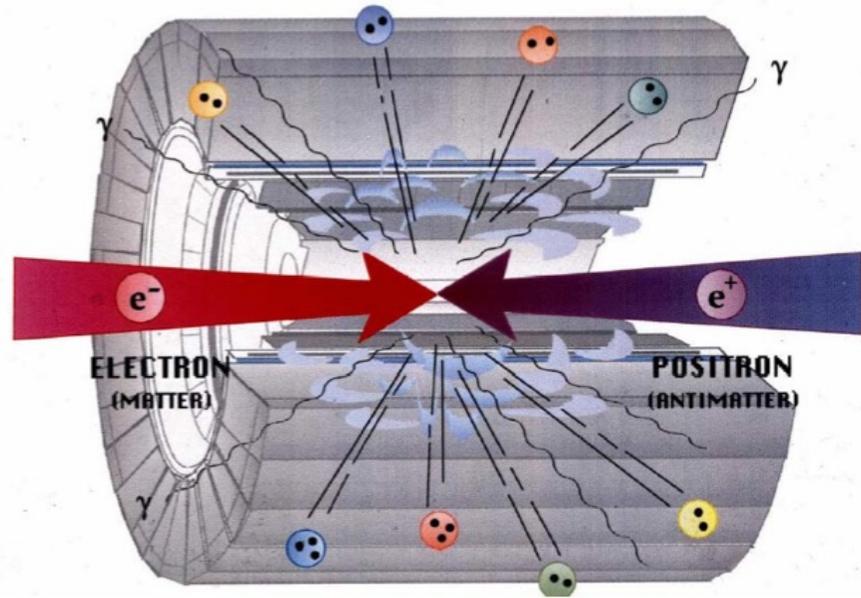
Come?

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

I rivelatori



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



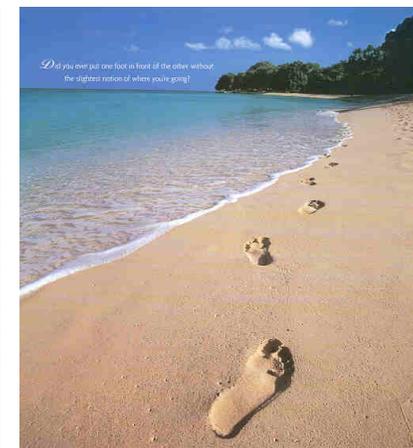
Scopi

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

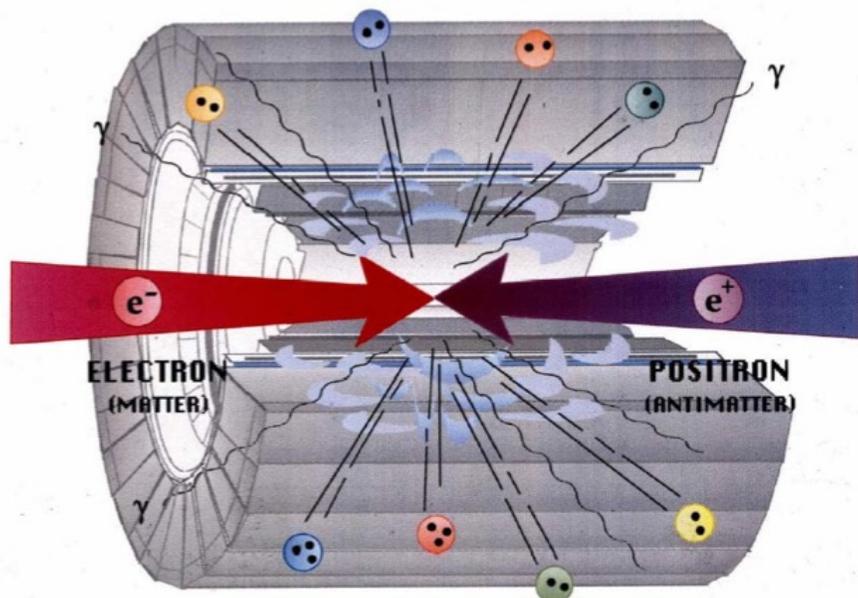
Come?

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

I rivelatori



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



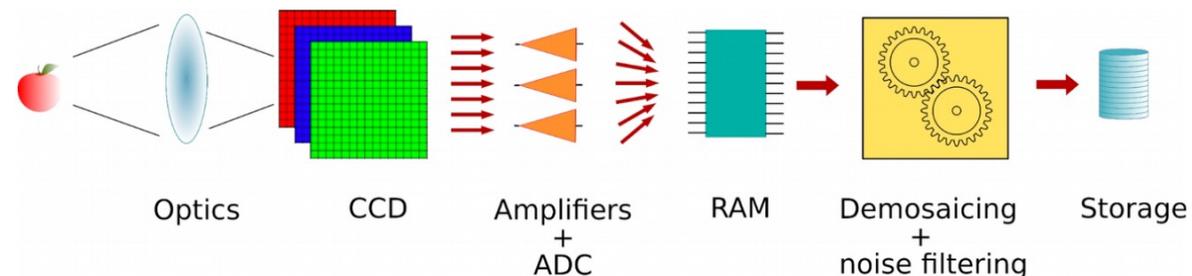
Scopi

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

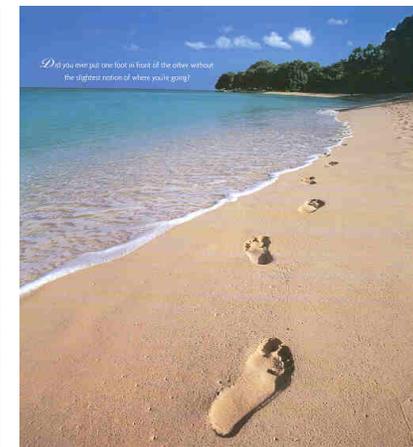
Come?

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

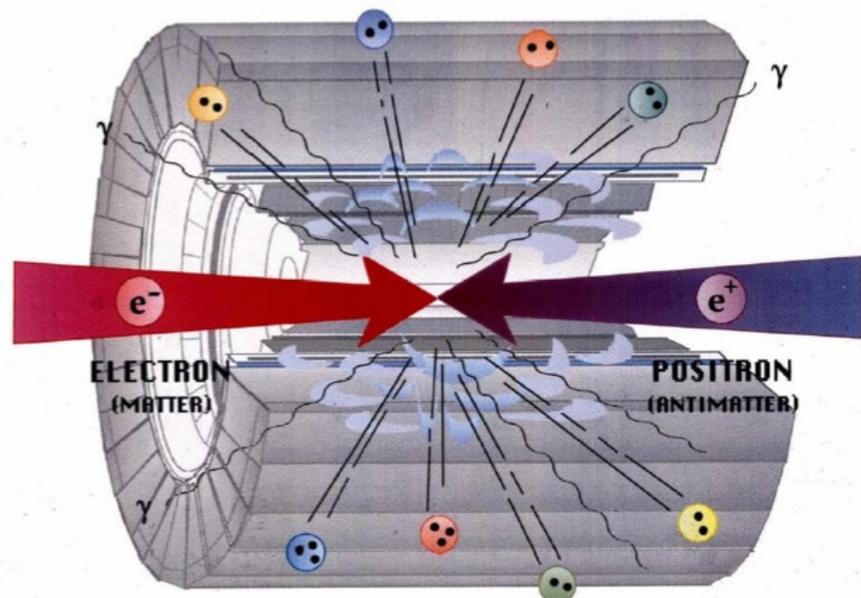
Una macchina fotografica



I rivelatori



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

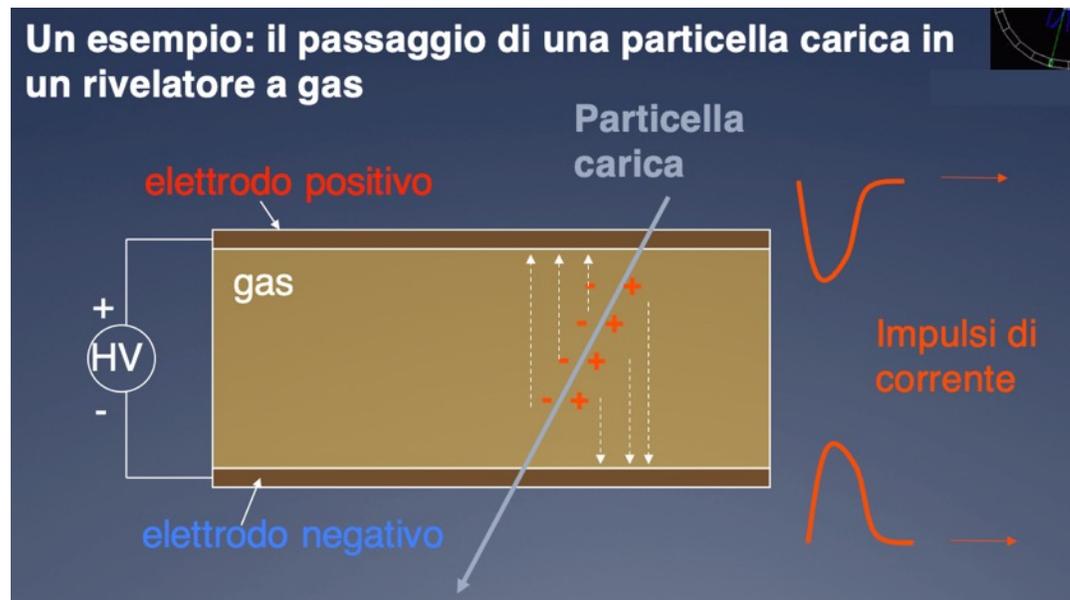


Scopi

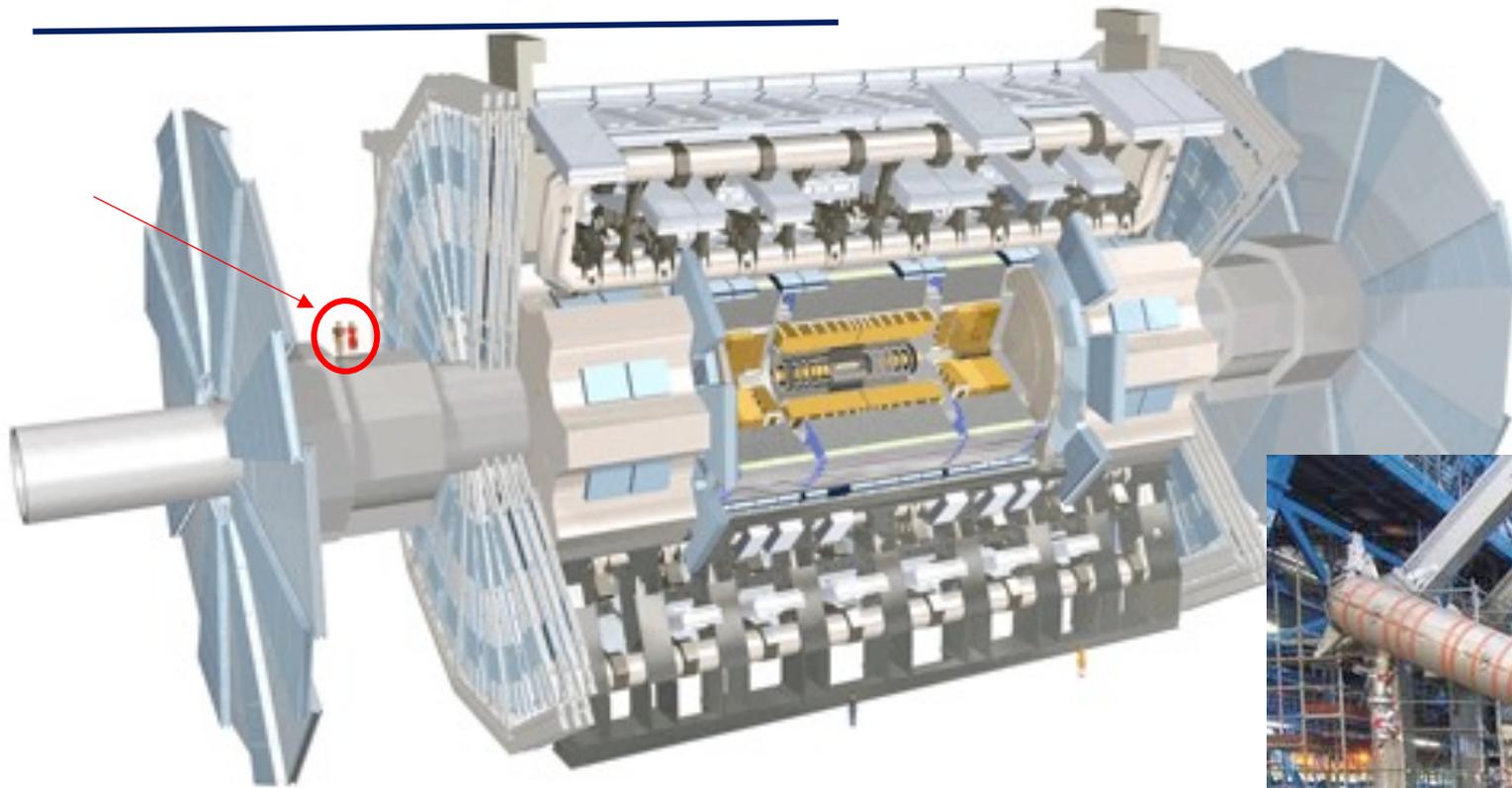
- Identificare le particelle
- misurarne le caratteristiche (energia, carica..)

Come?

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

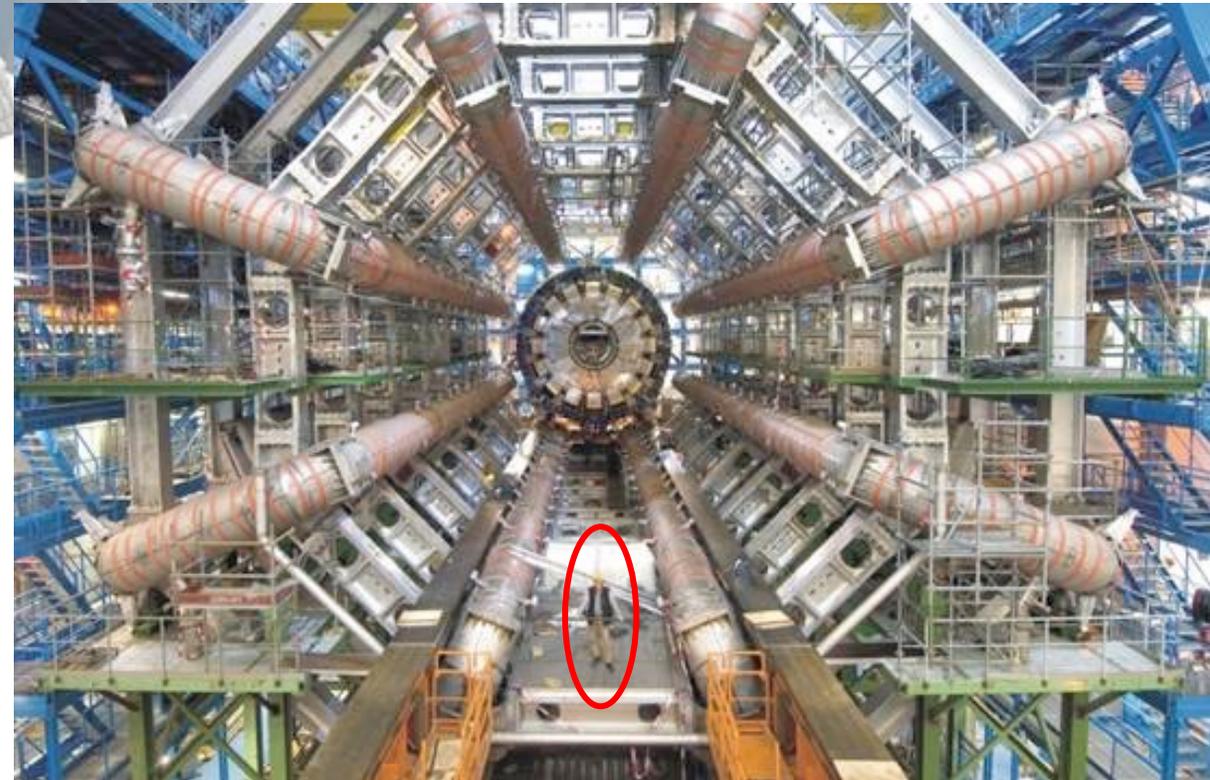


Il rivelatore ATLAS



Il più grande rivelatore
mai costruito

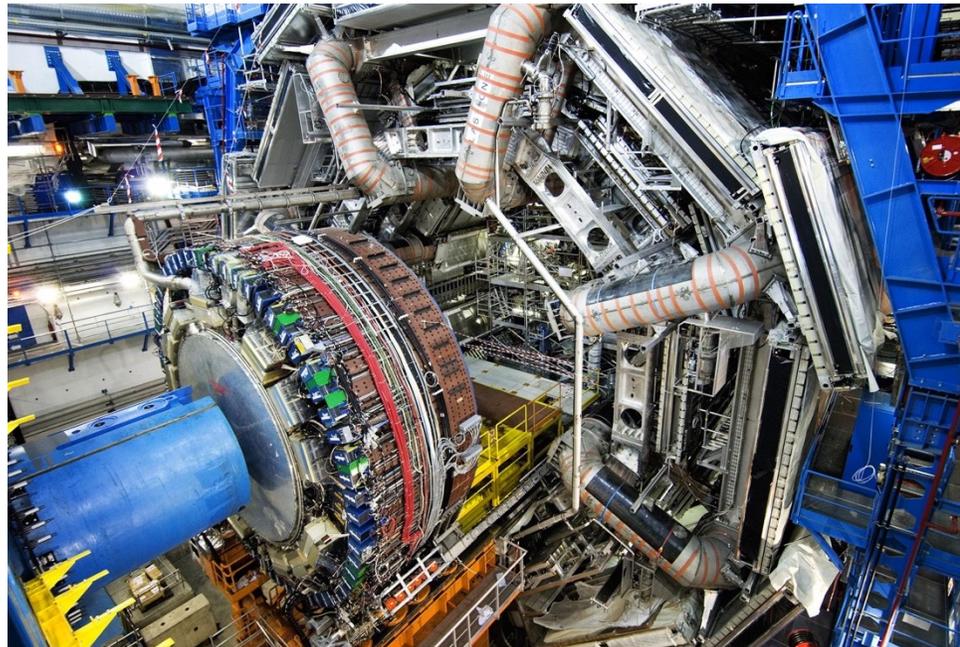
lunghezza ≈ 40 m
Altezza > 20 m
peso ≈ 7000 tons
canali di elettronica $\approx 10^8$
.... e ≈ 3000 km di cavi



Costruiamo i nostri strumenti – acquisiamo e analizziamo i dati

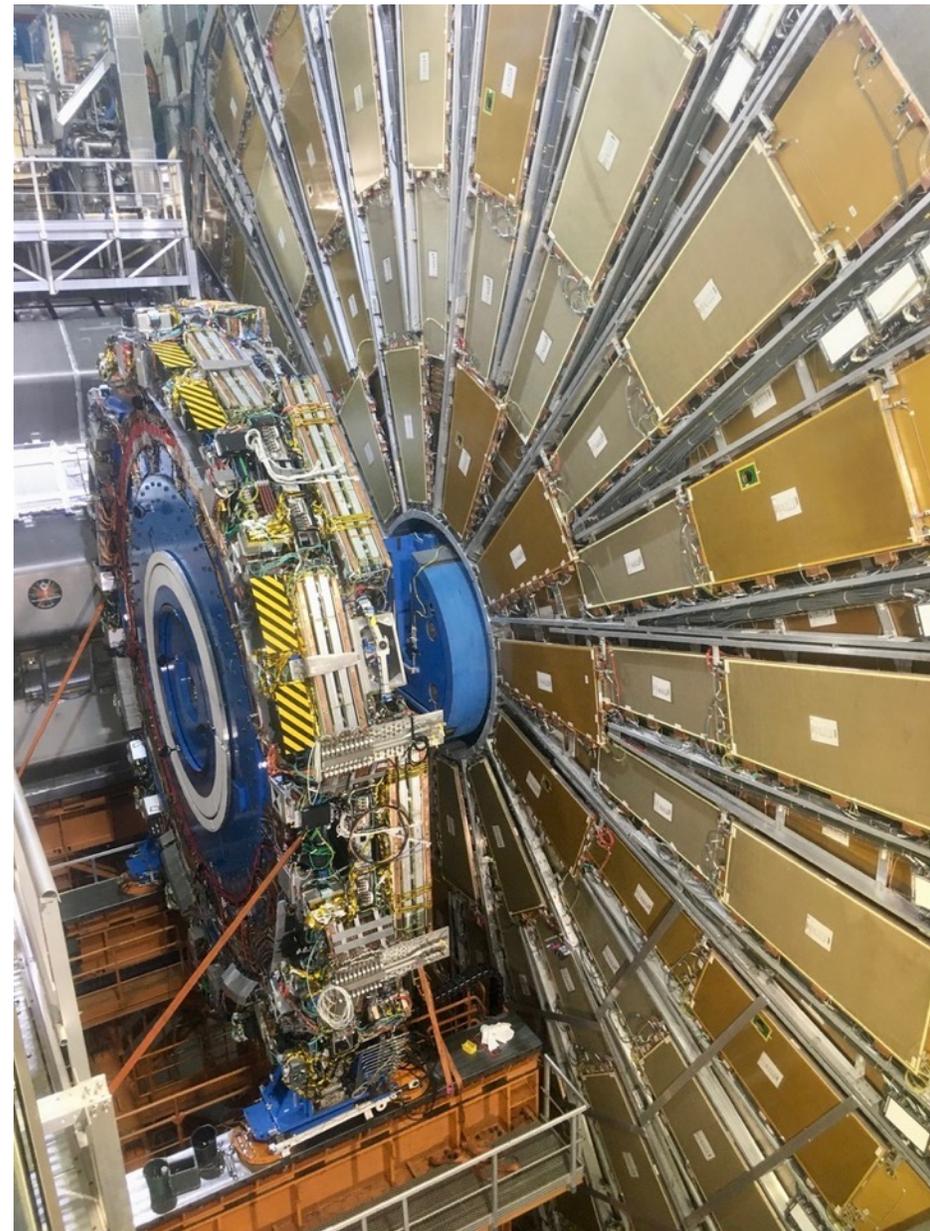
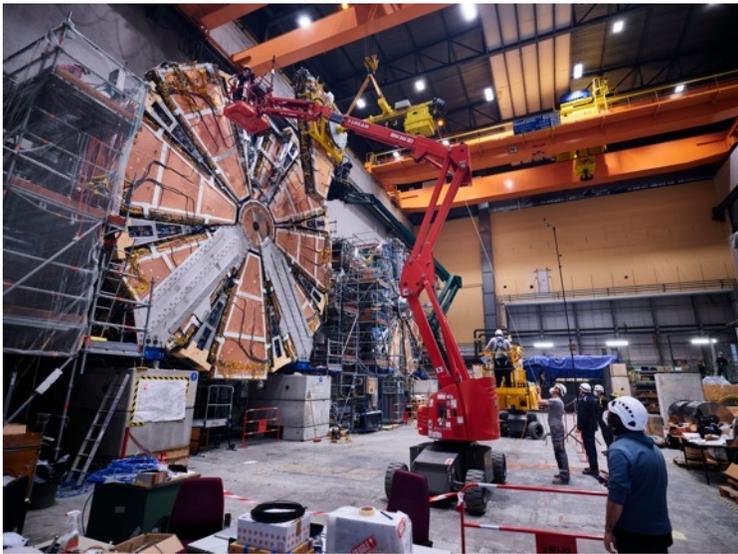
Il lavoro del fisico sperimentale è anche quello di costruire gli strumenti di misura

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

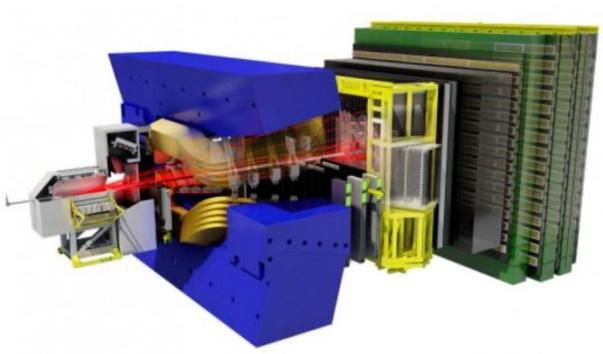


...qui era il lontano 2008 ! ;-)

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

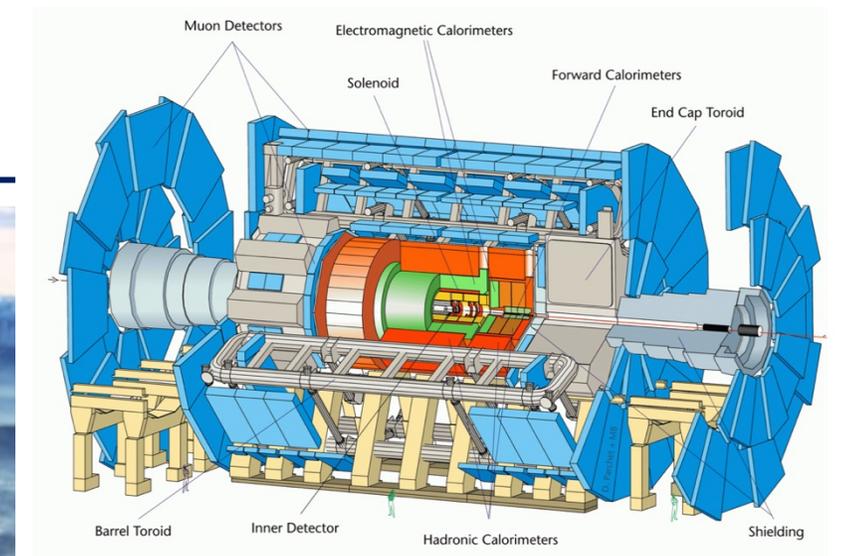
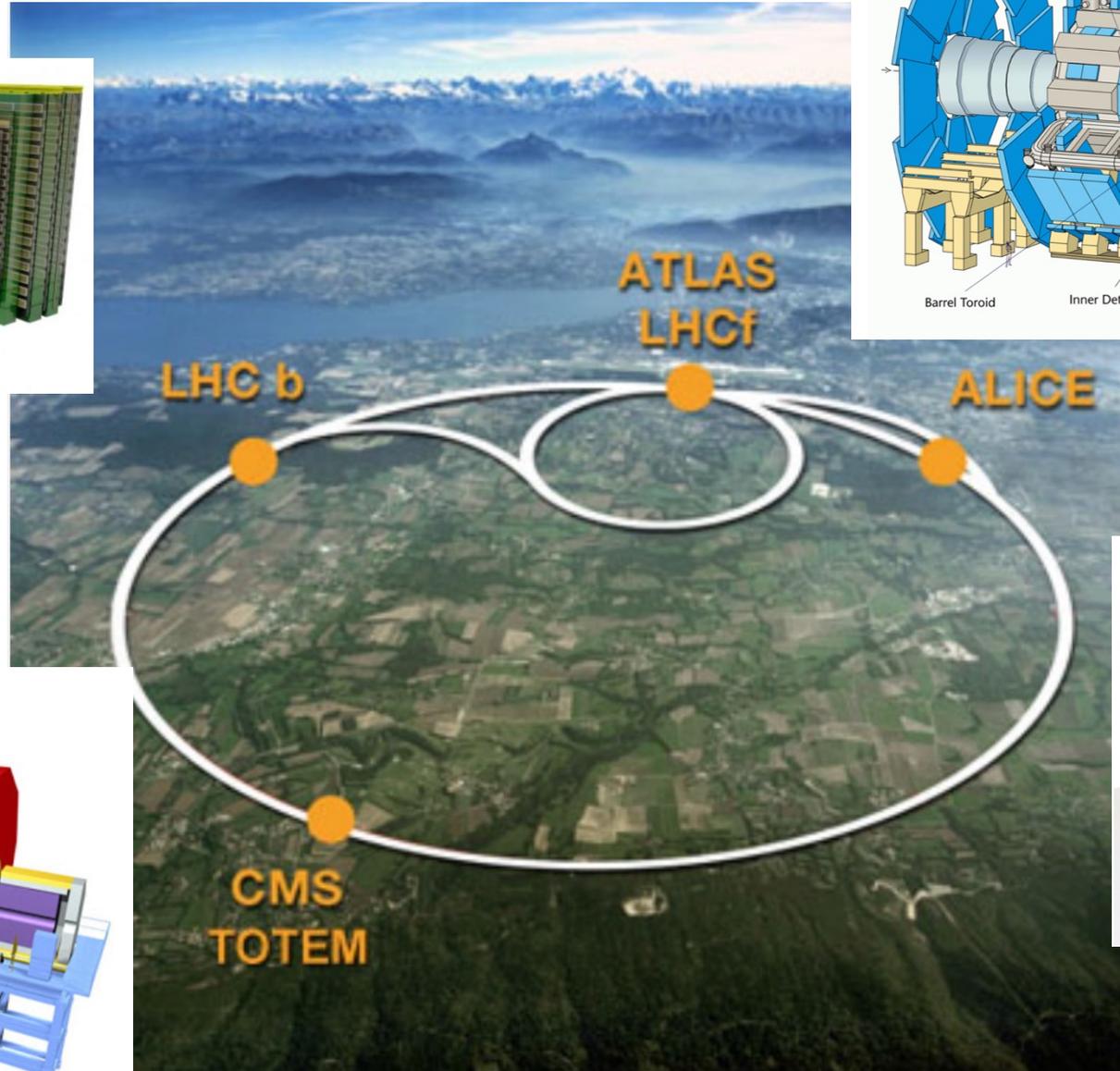
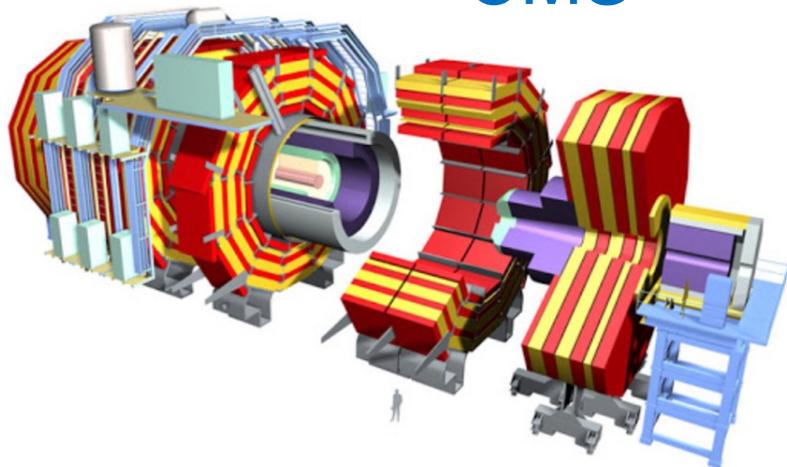


Gli esperimenti dell' LHC

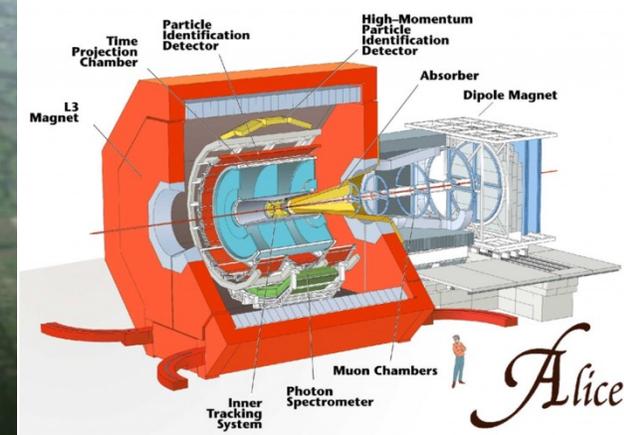


LHCb

CMS

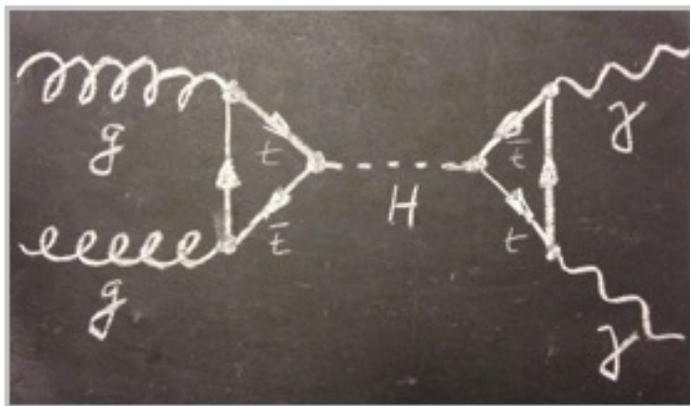


ATLAS



Rivelazione di eventi rari - A caccia del bosone di Higgs

Higgs \rightarrow fotone-fotone

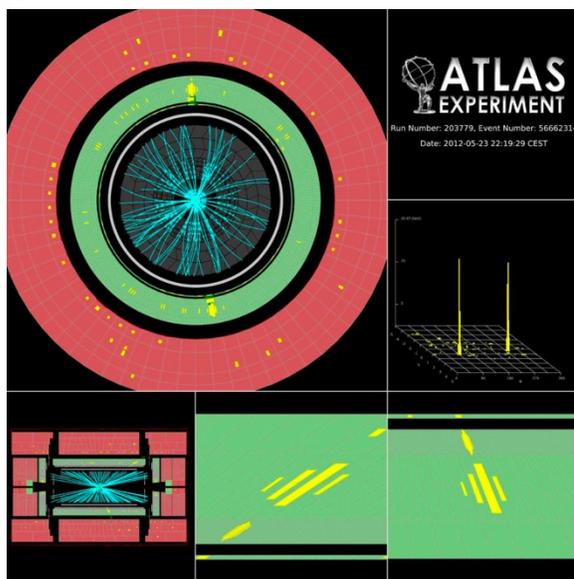


Un bosone di Higgs può decadere in due fotoni (evento predetto dal modello standard – ma la massa NON è predetta)

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!*

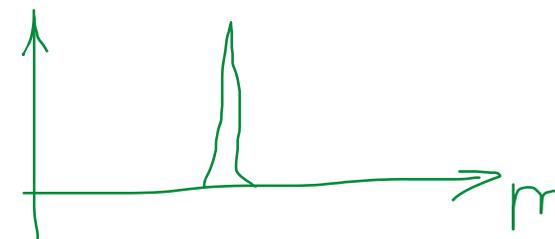
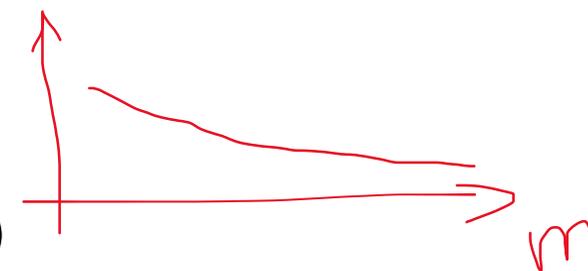
Per ogni evento riporto su un grafico la massa ricostruita

Ci sono due possibilità:



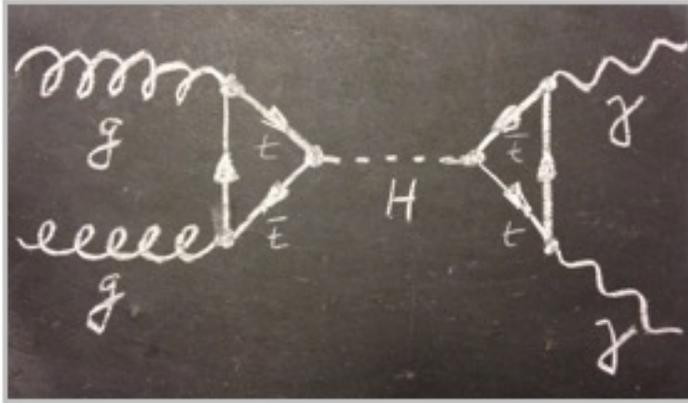
1. I due fotoni sono prodotti in modo scorrelato (NON dallo stesso genitore) \rightarrow La massa ricostruita avrà un valore casuale (*background*)
2. I due fotoni SONO prodotti entrambi da una particella: la massa ricostruita sarà esattamente la massa della particella genitore.

Frequenza di conteggio

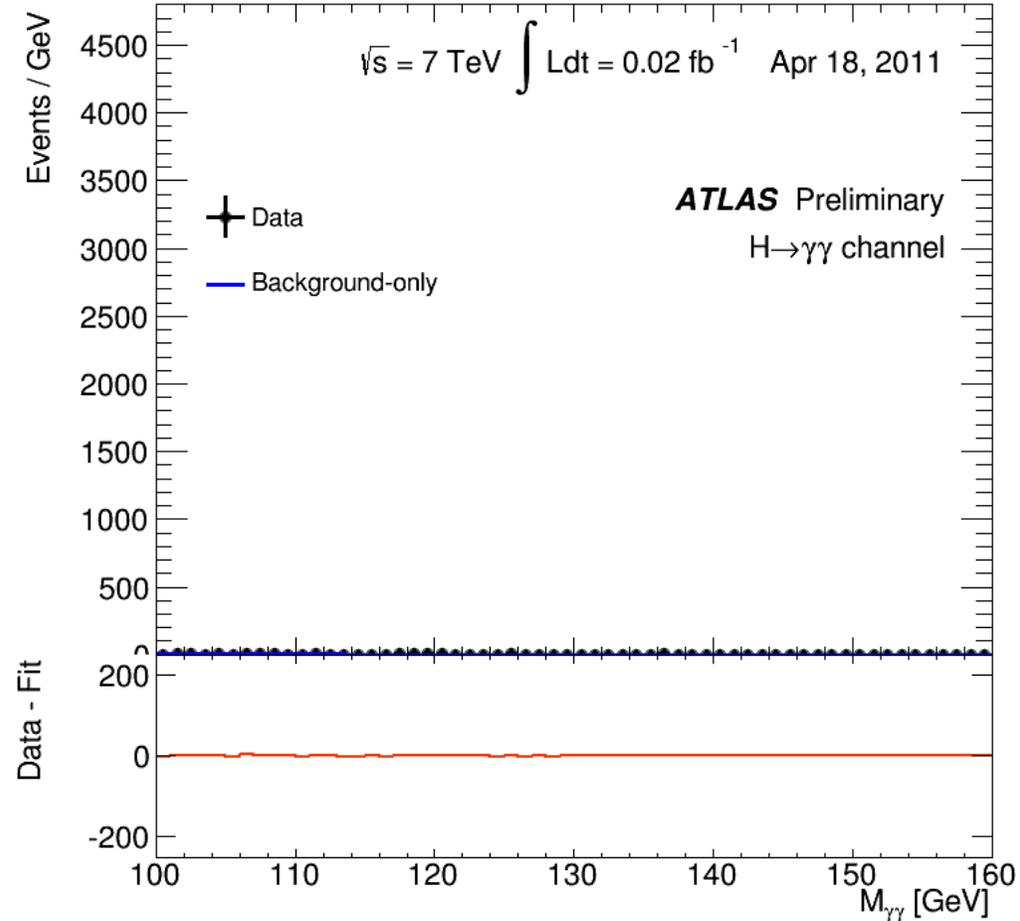


A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

Higgs → fotone-fotone



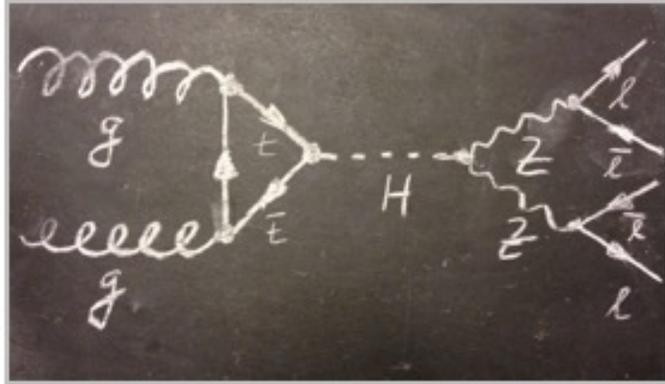
Le grandezze misurate dei due fotoni (energia, direzione) vengono combinate per ricostruire la massa del genitore



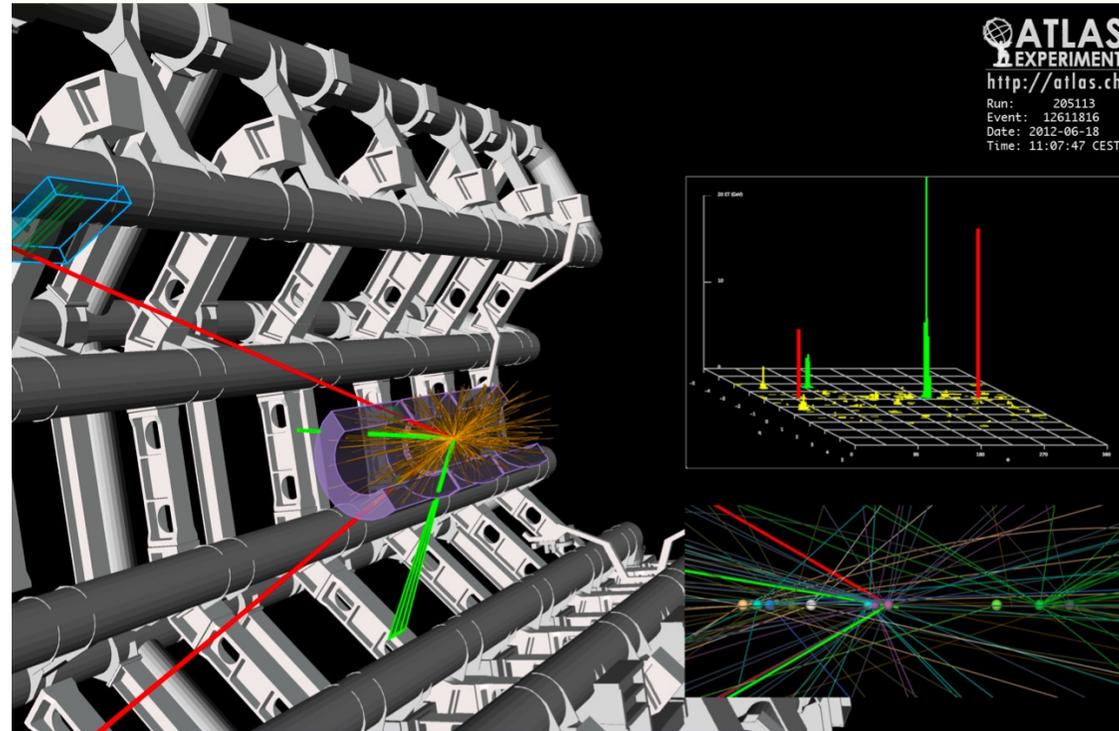
Per misurare un segnale sopra il background serve MOLTA statistica
Possono essere necessari ANNI di presa dati

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

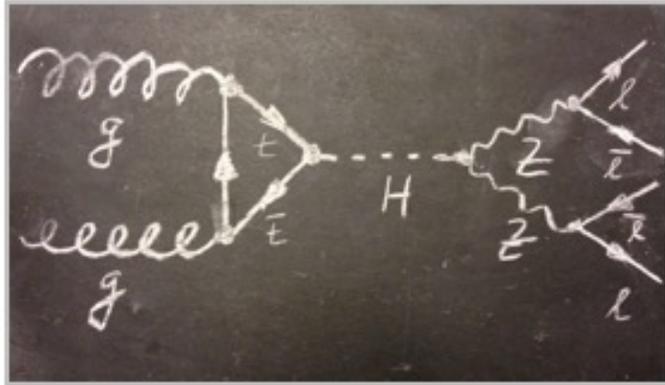


Evento candidato Bosone di Higgs in $2e 2\mu$



A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

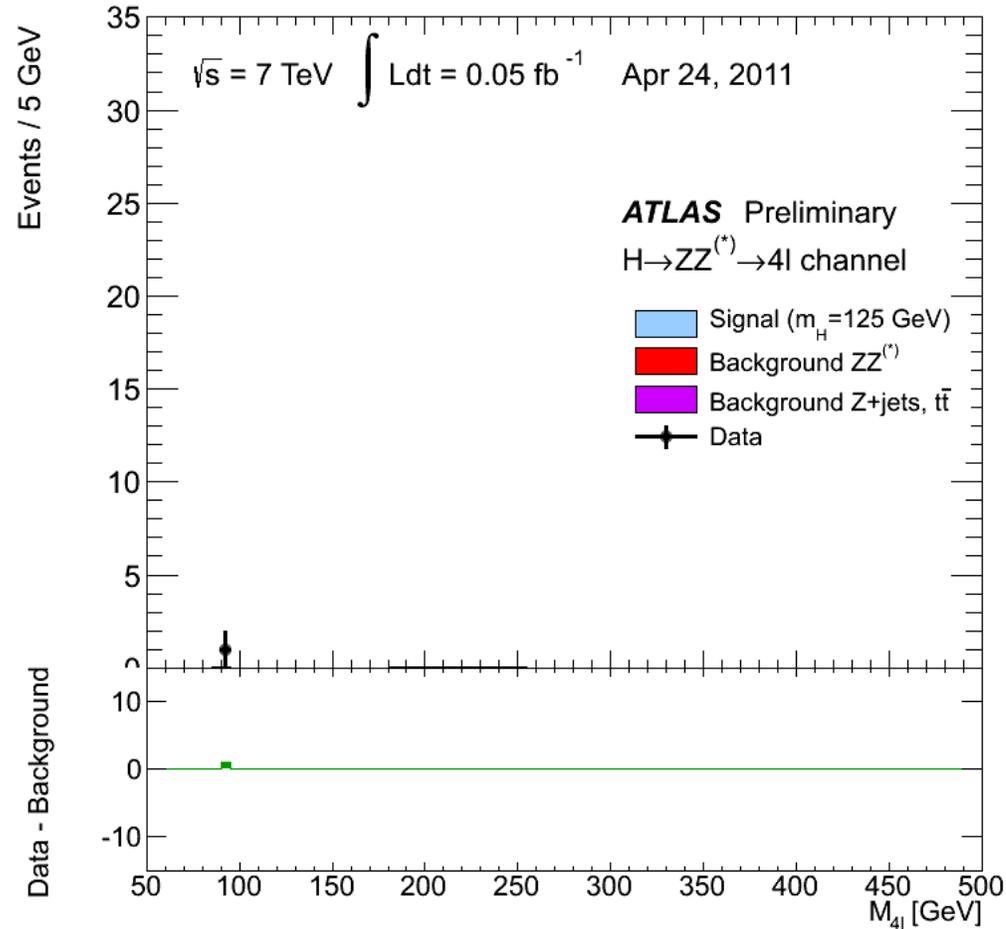
Higgs \rightarrow Z Z \rightarrow 4 leptoni



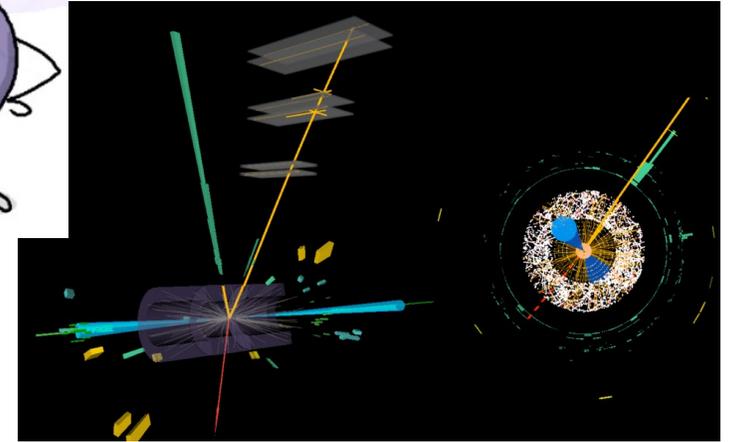
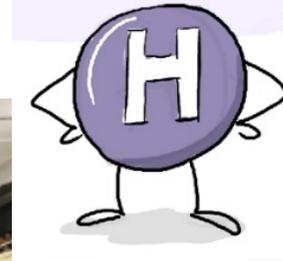
Ogni particella Z decade in due leptoni (es elettroni, muoni)

Nello stato finale ci sono 4 leptoni

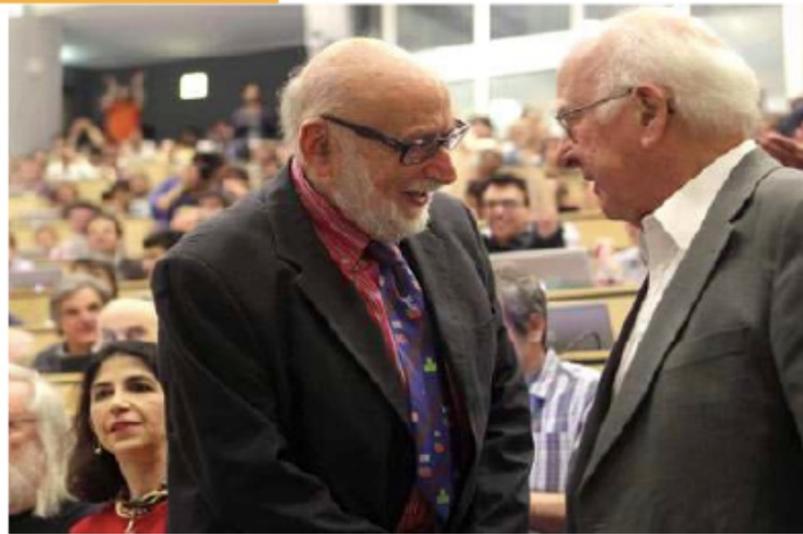
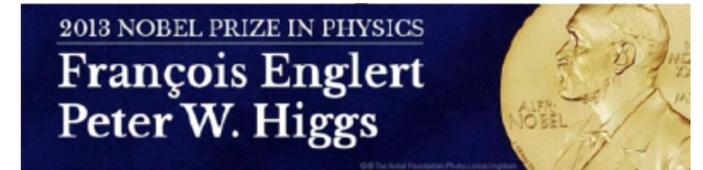
La massa viene ricostruita combinando le misure di queste 4 particelle



L'annuncio della scoperta del Bosone di Higgs al CERN



4 Luglio 2012

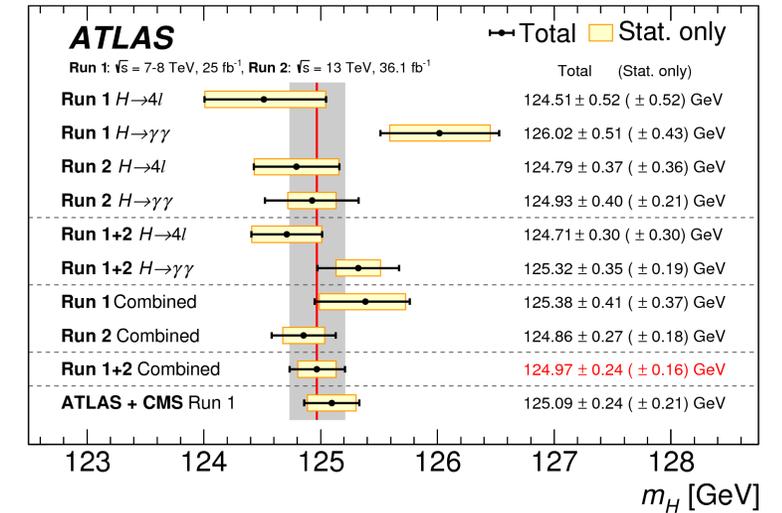
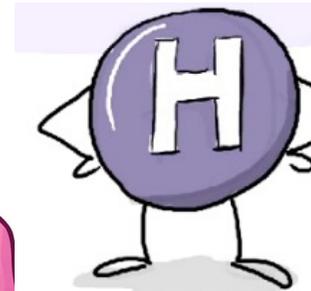


Higgs ha compiuto DIECI anni !

...nel 2022!

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!

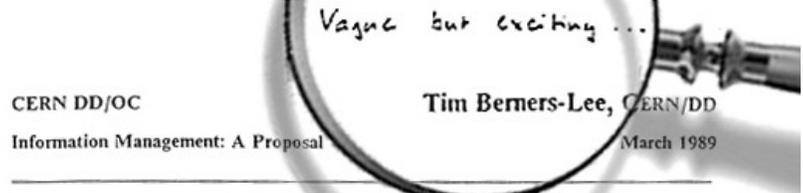
Molti eventi celebreranno questa importante scoperta

Non solo particelle - dal CERN importanti ricadute tecnologiche

qui è stato inventato il
World Wide Web



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 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.

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).

Vague but exciting ...

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.



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

Vague but exciting ...

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.

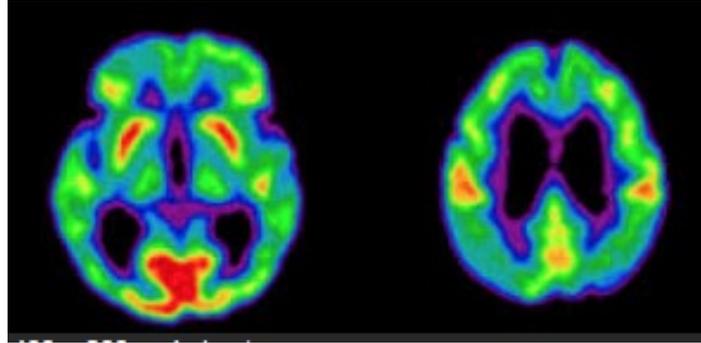
il Touch Screen



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



e la PET



E ora ?

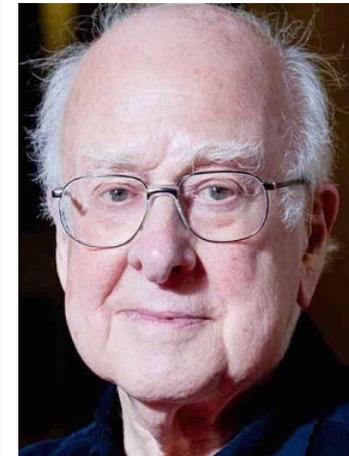
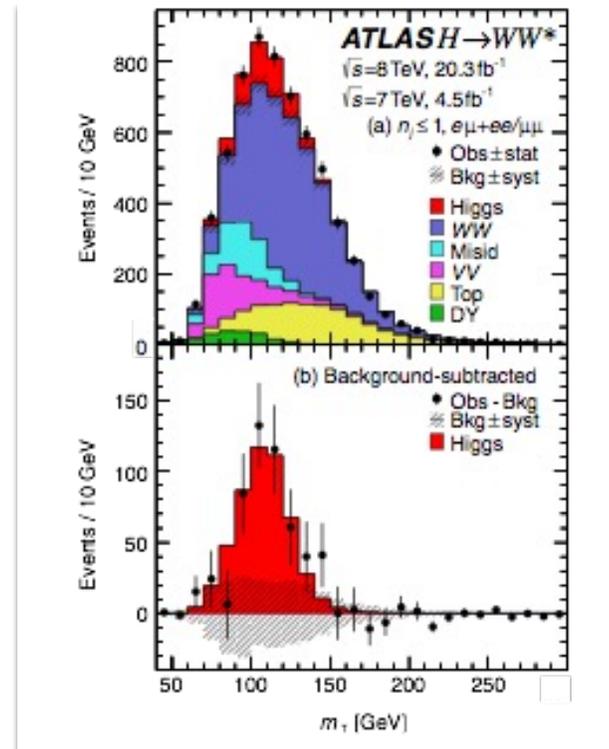
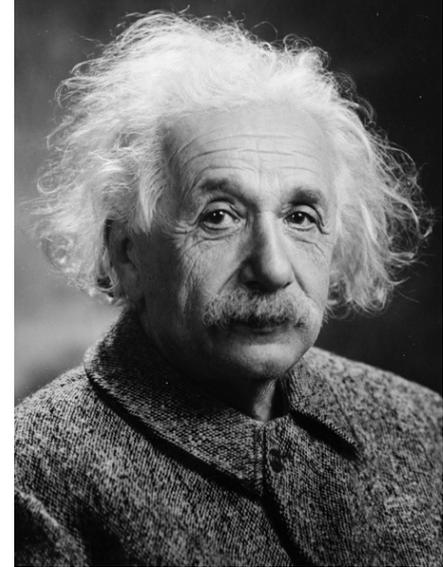
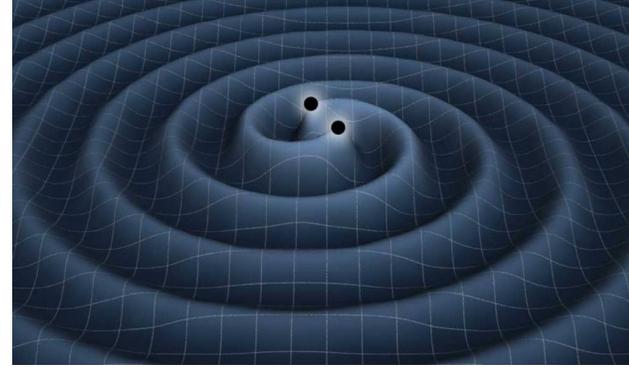
I due modelli standards delle interazioni fondamentali sono completi:

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

Gravità

- 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

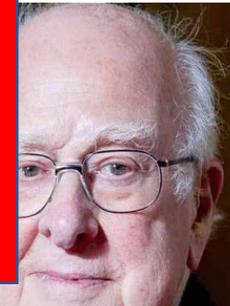
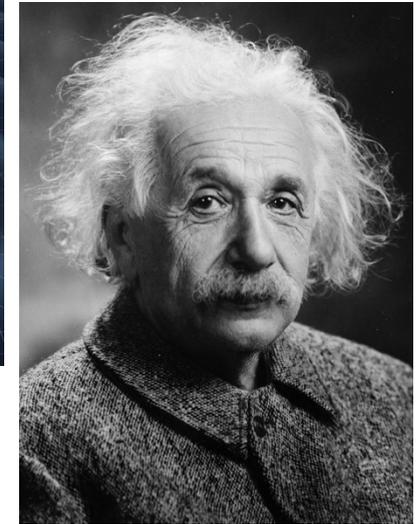
- Onde gravitazionali: Ulteriore conferma della Teoria della Relatività Generale:

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.



delle particelle elementari

Presente e Futuri acceleratori

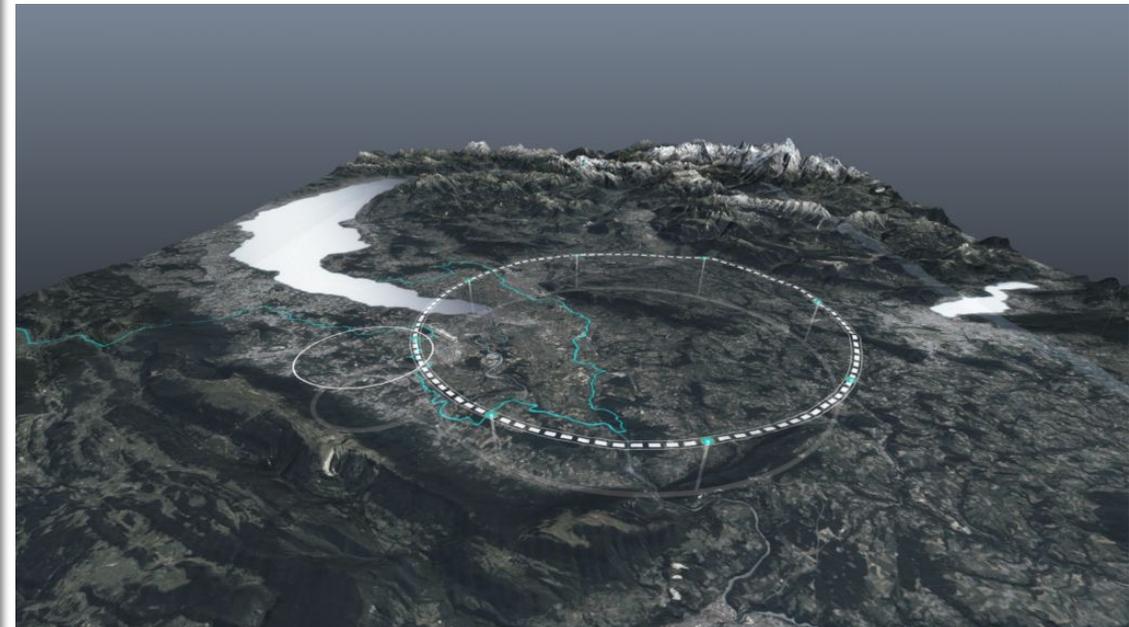
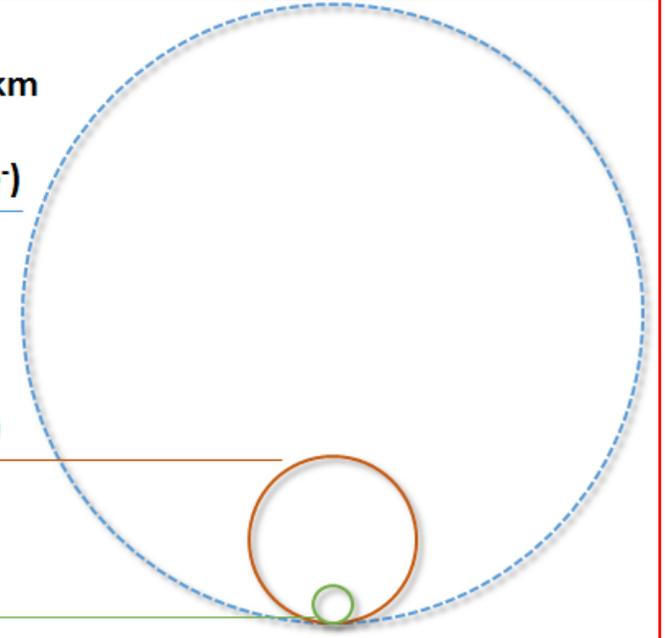
- 1) cercare segnali di nuova Fisica ad LHC, usando canali fino ad oggi inesplorati: studio produzione HH o *nuove particelle*
- 2) Iniziare a pensare alle macchine del futuro



Future Circular Collider
Circumference: 80-100 km
Energy: 100 TeV (pp)
>350 GeV (e^+e^-)

Large Hadron Collider
Circumference: 27 km
Energy: 14 TeV (pp)
209 GeV (e^+e^-)

Tevatron (closed)
Circumference: 6.2 km
Energy: 2 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 large sphere is positioned on a similar stand. In the center, a large, flat, circular display with a glowing blue border is visible. 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 geometric shapes.

GRAZIE per l'attenzione!

BACKUP

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

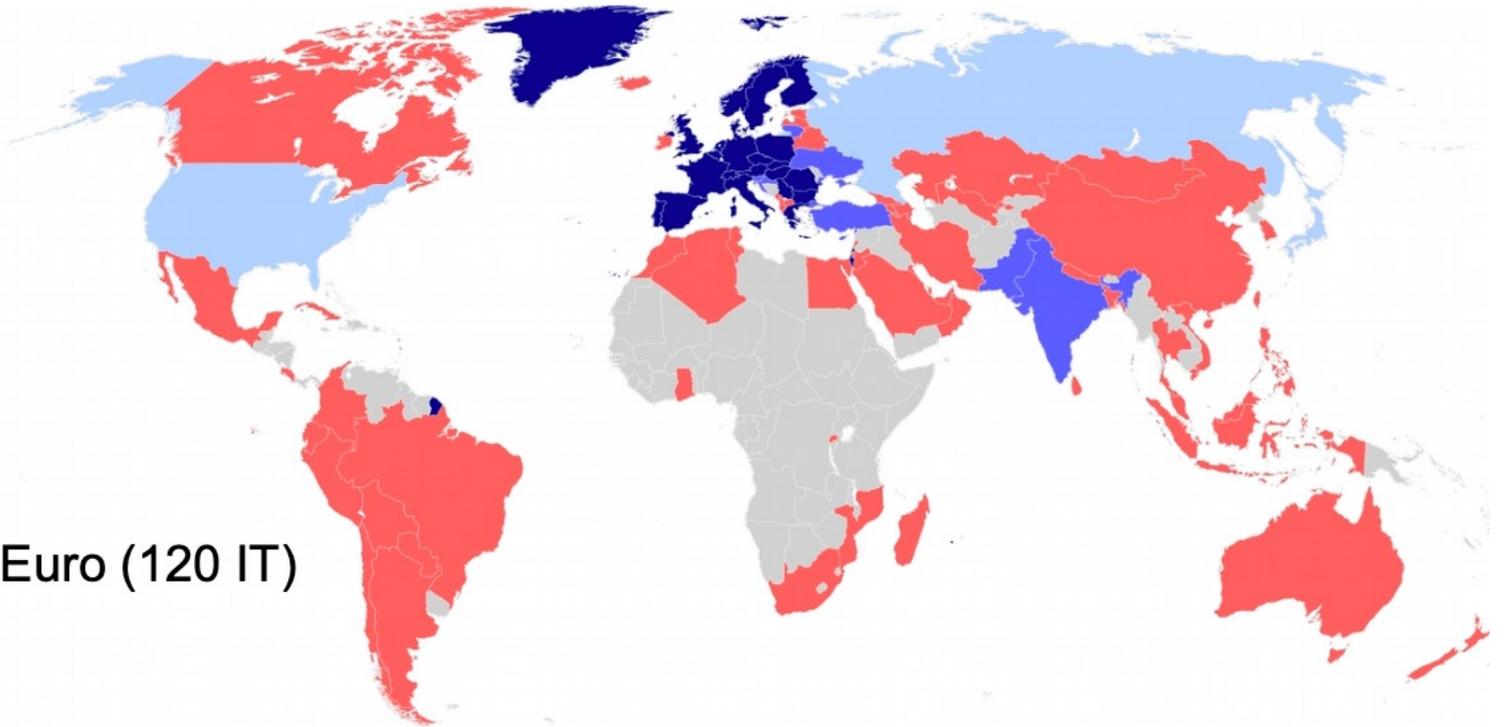
Budget nel 2020 of 1196 milioni di Euro (120 IT)

3430 membri del personale

550 studenti

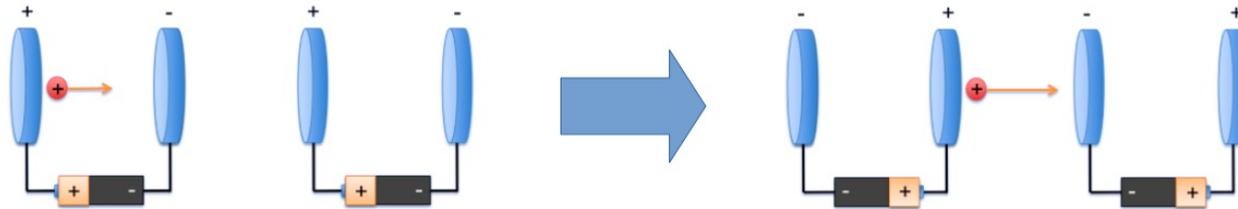
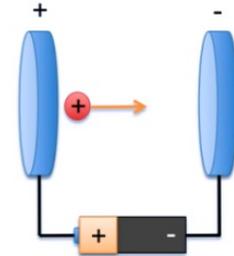
2000 lavoratori da aziende esterne

15000 users (1500 IT)



Come vengono accelerate le particelle?

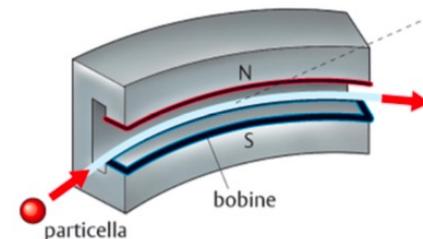
- Le particelle cariche vengono accelerate da un **campo elettrico**
 - un solo elettrodo necessiterebbe di una **differenza di potenziale** elevatissima
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione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



Rivelazione di eventi rari – il bosone di Higgs

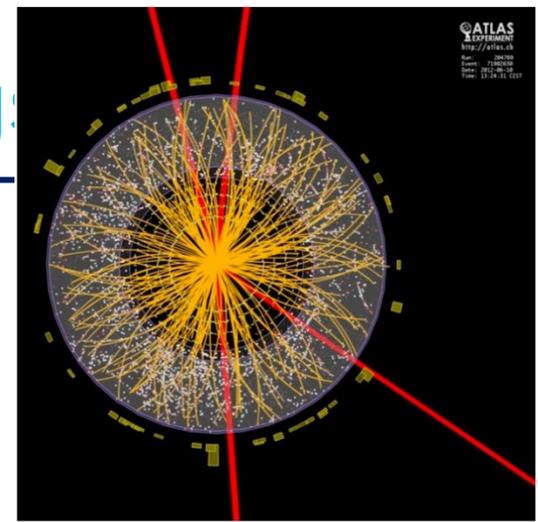
Molte fra le particelle più interessanti da studiare (o da scoprire) non possono essere rivelate direttamente.

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 30×10^{15} byte/anno (in CD una pila di 20 km di altezza !!! → GRID)

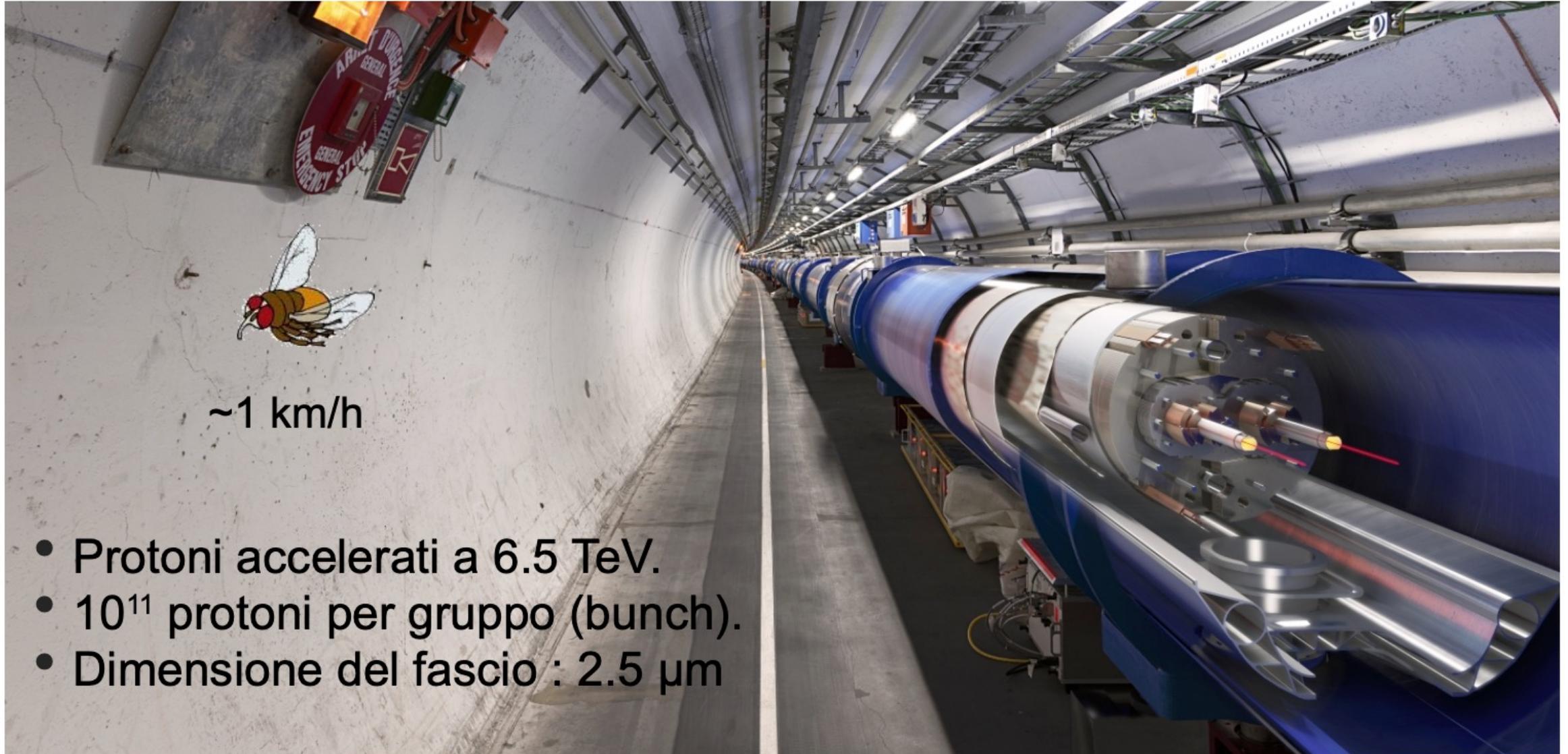


Osservare un bosone di Higgs – un evento estremamente raro



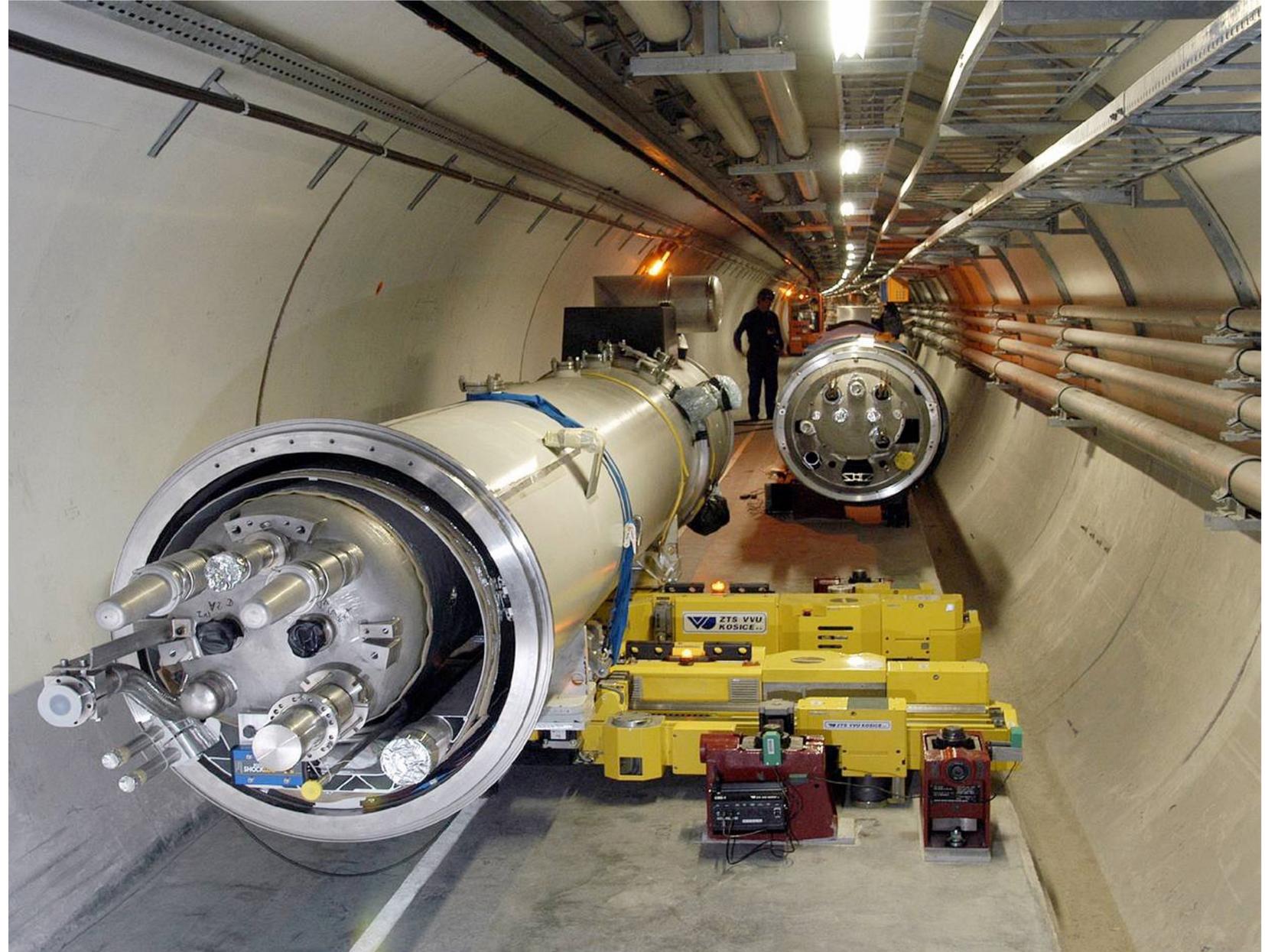
Stessa probabilità di ottenere «testa» in 41 lanci di una moneta

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



- 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 !

