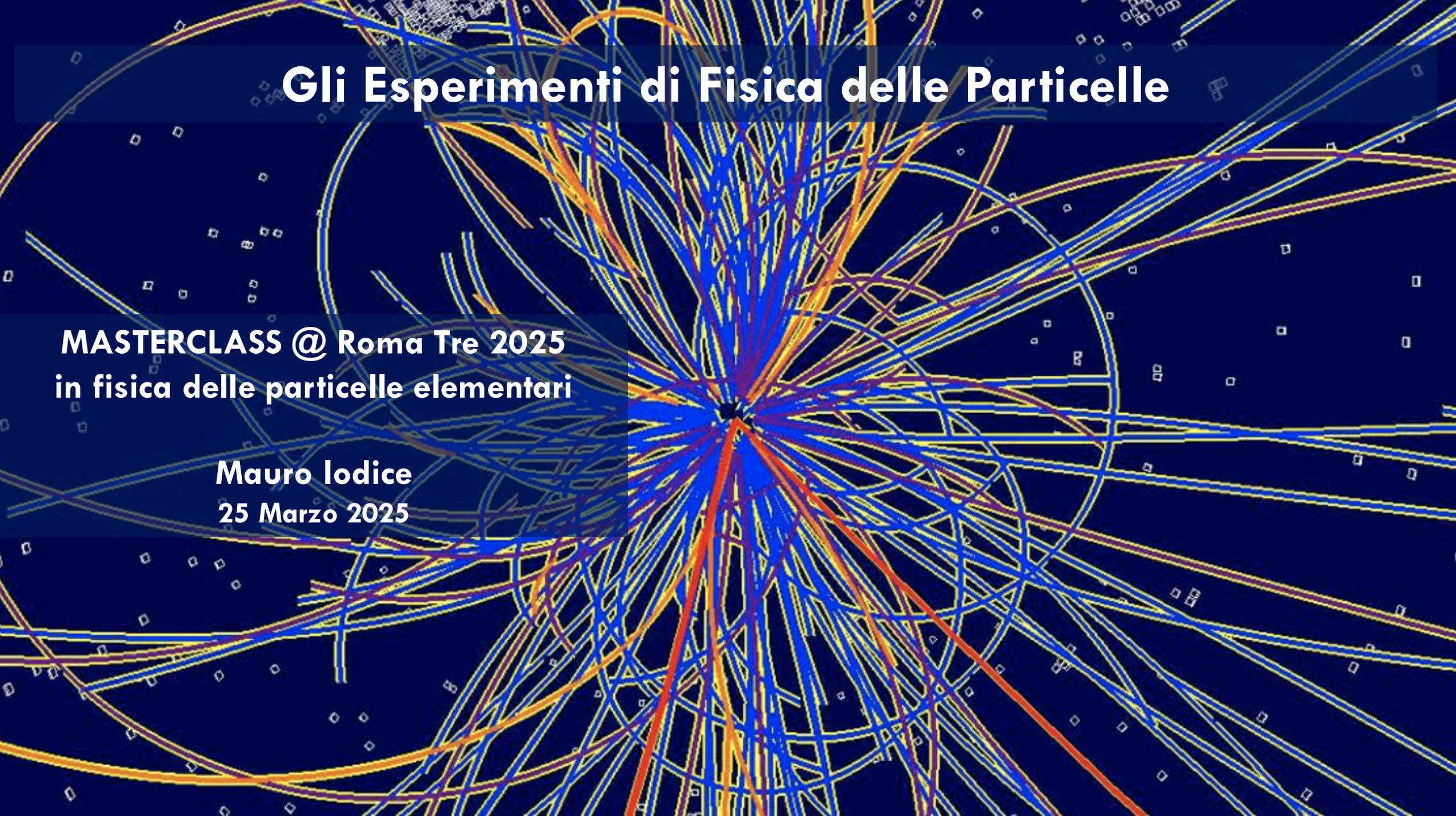


Gli Esperimenti di Fisica delle Particelle

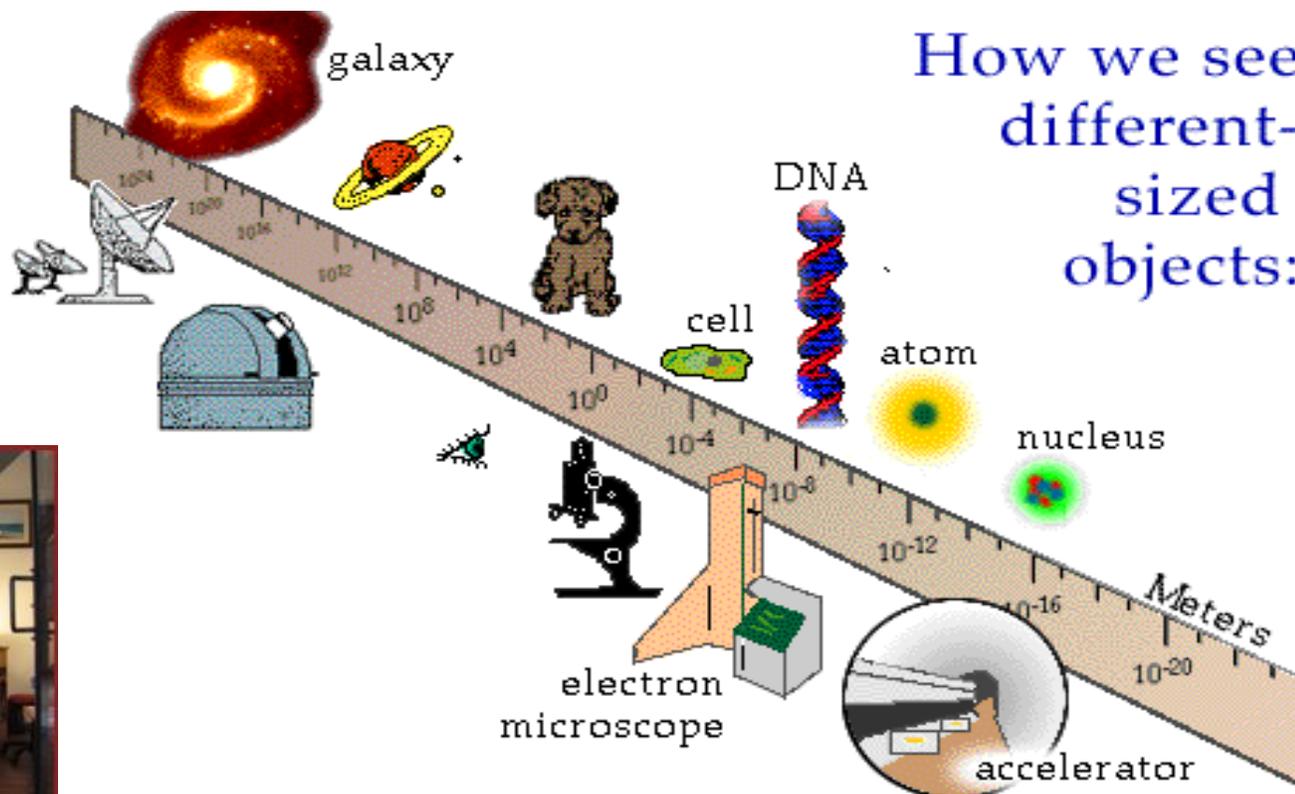
A complex visualization of particle detector data, showing a central point from which numerous tracks of various colors (blue, yellow, orange, red) radiate outwards. The tracks are dense and intricate, with many overlapping lines. Small white squares are scattered throughout the background, representing individual detector hits or data points.

MASTERCLASS @ Roma Tre 2025
in fisica delle particelle elementari

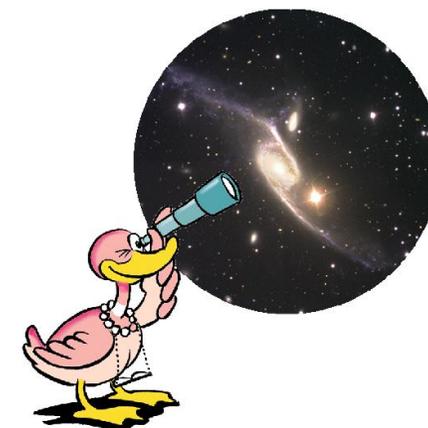
Mauro Iodice
25 Marzo 2025

Come osserviamo gli oggetti ?

Lo strumento di osservazione dipende dalla scala del sistema da studiare



La luce visibile è un'onda con lunghezza d'onda tra 0.4–0.8 μm quindi può essere usata per osservare oggetti non inferiori al μm



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

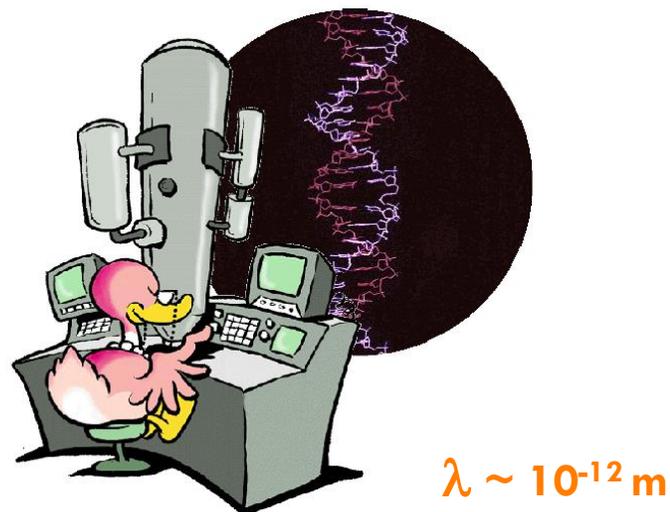
Ma come guardiamo gli oggetti microscopici ?

Osservazione degli oggetti microscopici

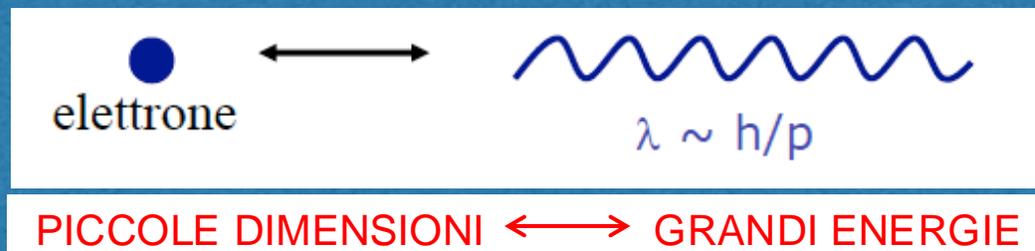
I **microscopi ottici** ci consentono di ingrandire gli oggetti. Possiamo ad esempio osservare particolari di minuscoli insetti



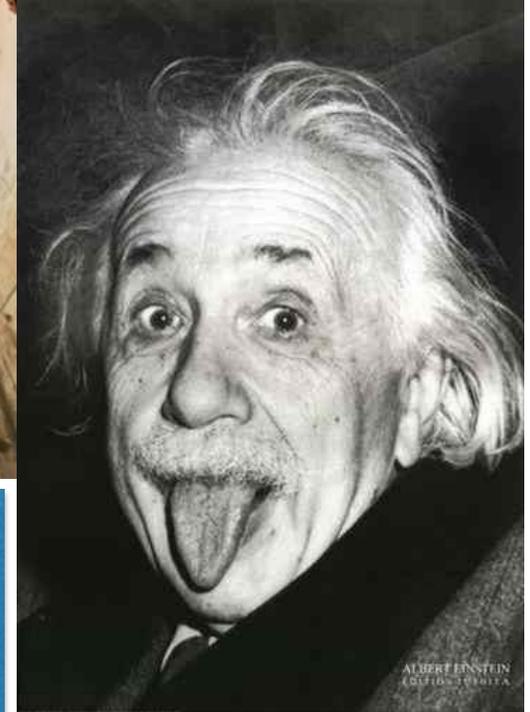
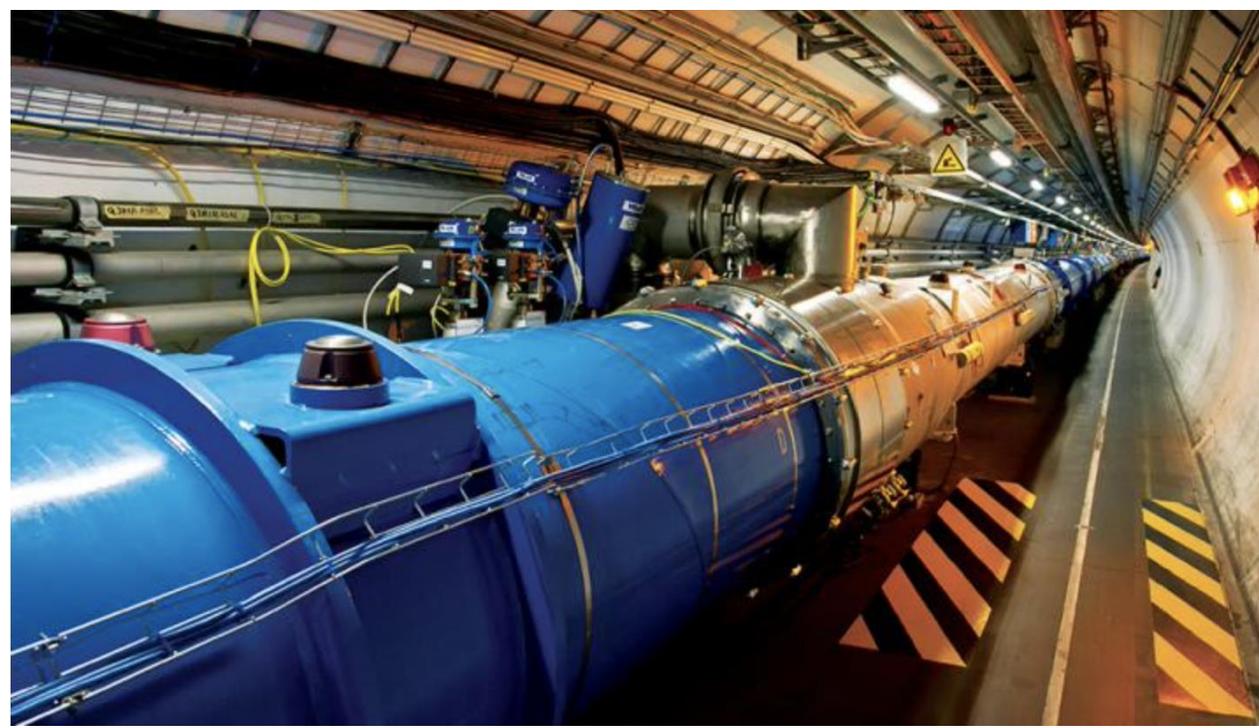
I **microscopi ad elettroni** ci consentono di osservare oggetti ancora più piccoli, fino al livello della struttura atomica. Usano piccoli fasci di elettroni come sonda



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

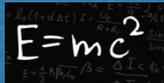


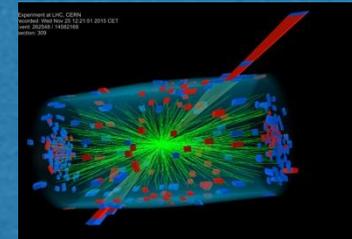
Perché gli acceleratori di particelle ?



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** non presenti nella materia ordinaria.
Equivalenza fra massa e energia


$$E=mc^2$$



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

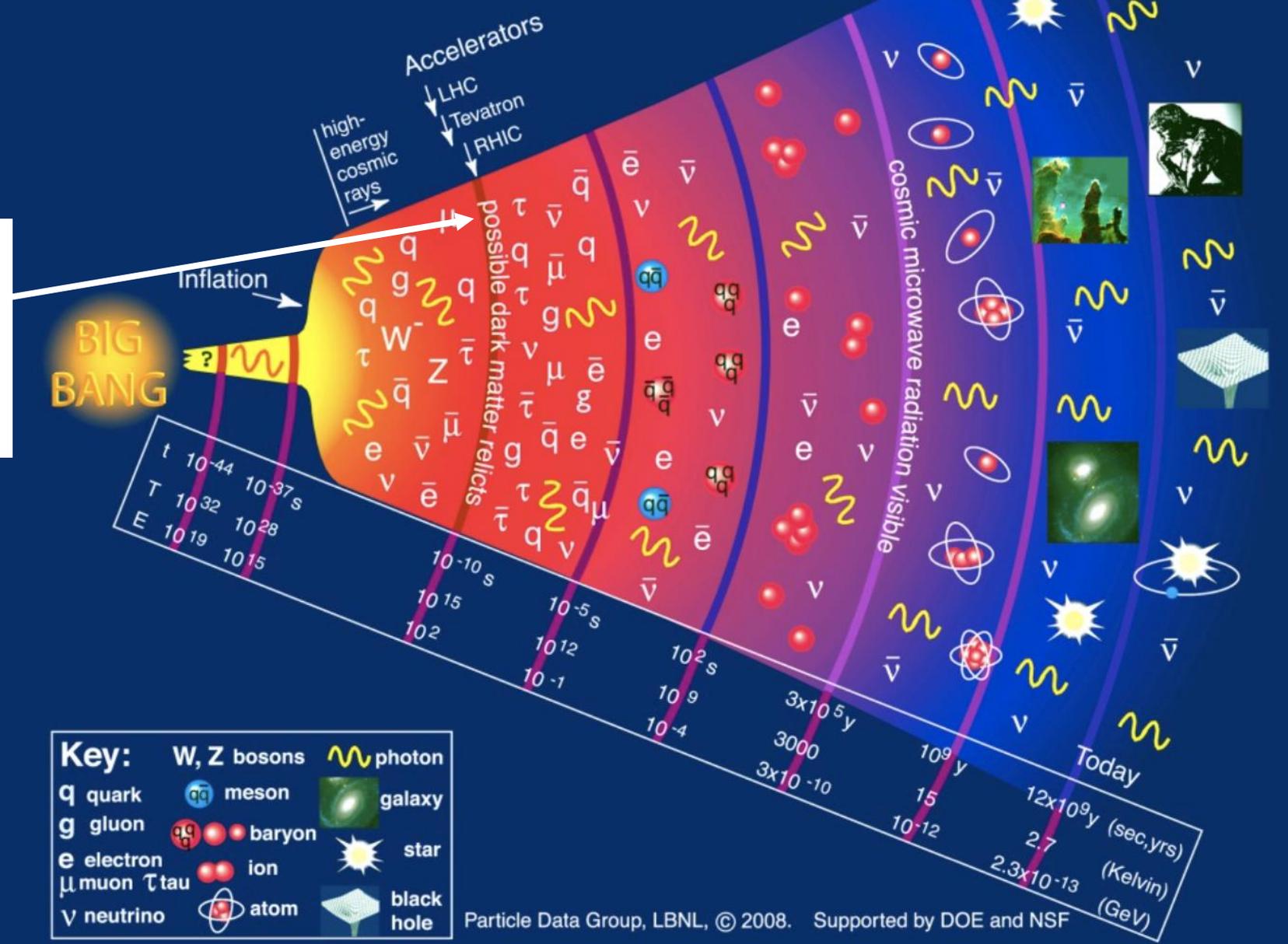


Un viaggio alle origini dell'Universo

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

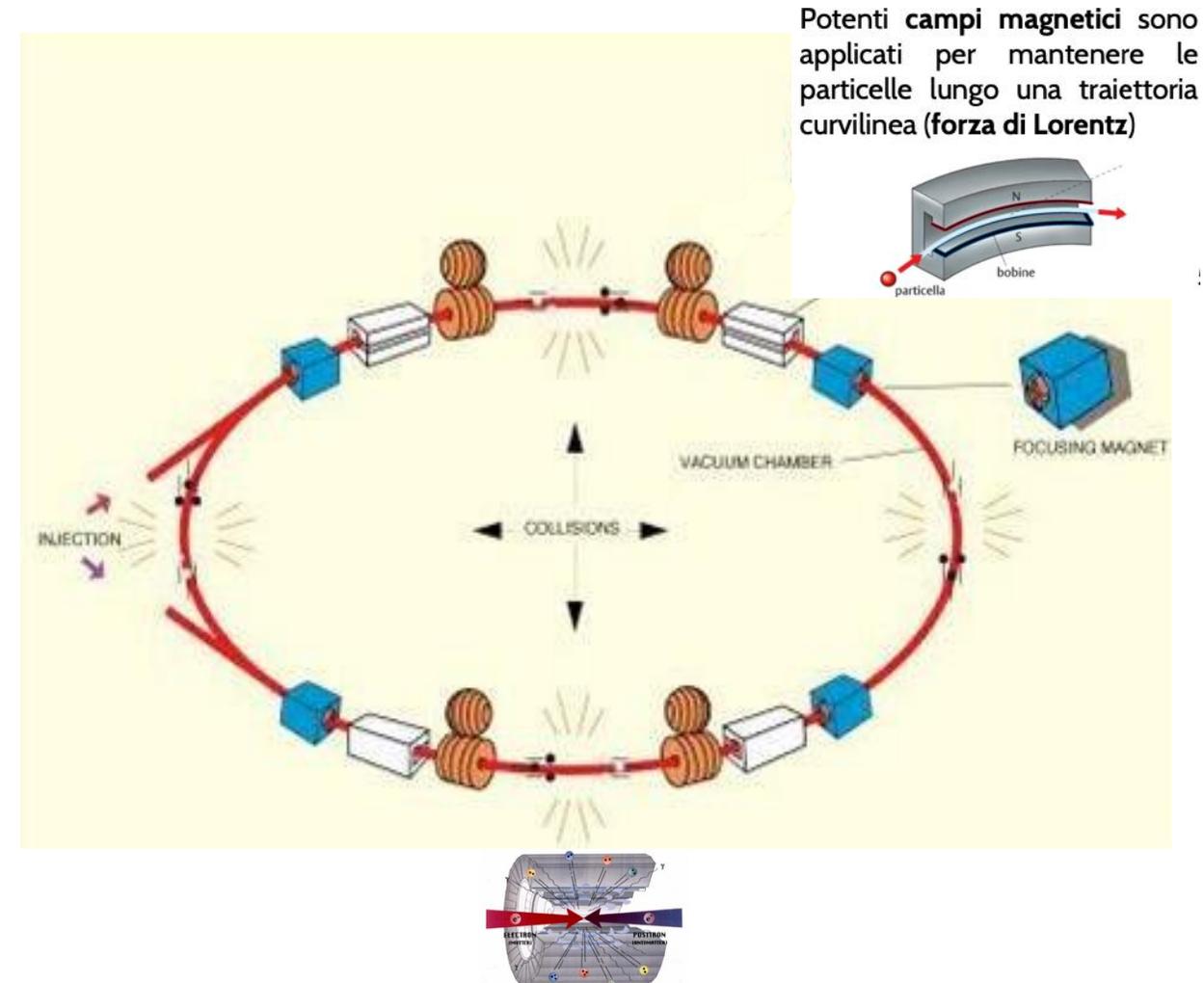
- 10^{-10} s dopo il Big Bang
- 10^{15} gradi K

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



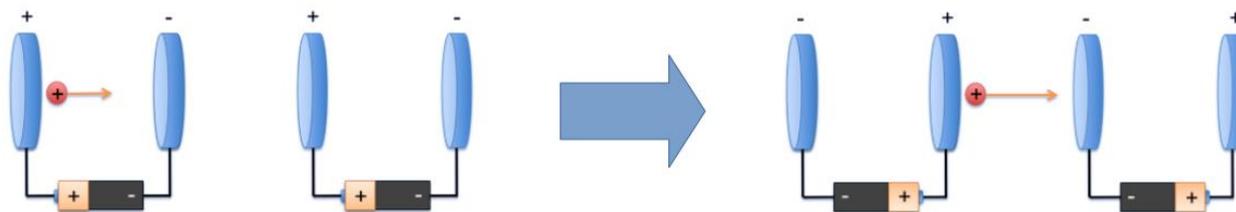
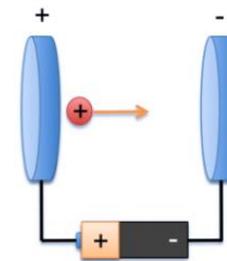
I Collider

Ai Laboratori Nazionali di 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?

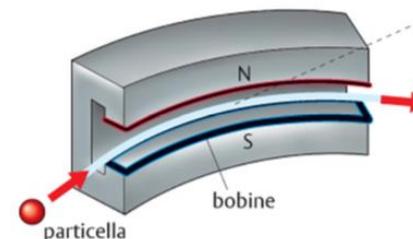
- Le particelle cariche vengono accelerate da un **campo elettrico**
 - un solo elettrodo necessiterebbe di una **differenza di potenziale** elevatissima
- Serie di elettrodi cilindrici bucati (all'interno dei quali c'è il vuoto e che i protoni possono attraversare) tra i quali viene alternata la direzione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



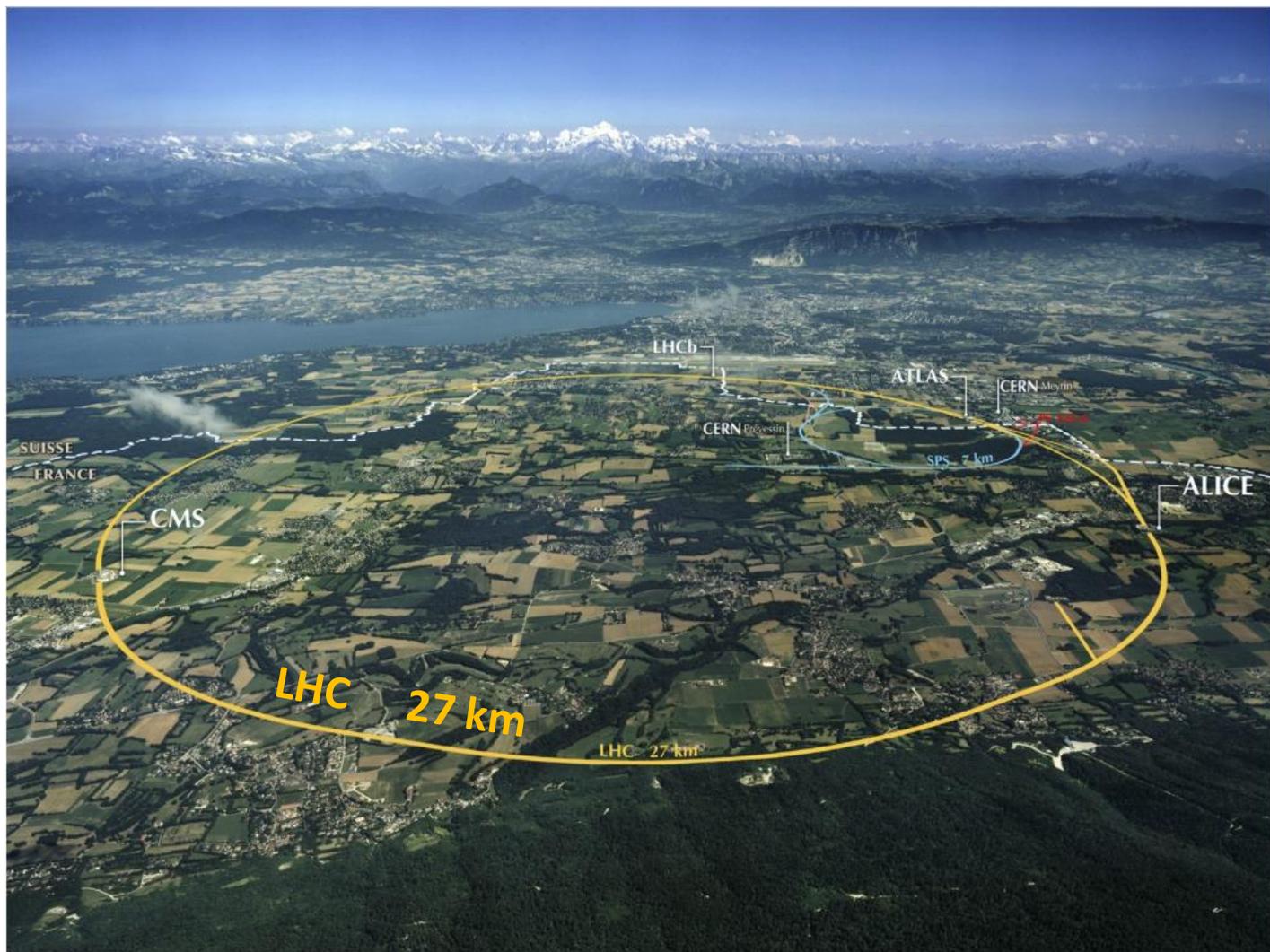
- Nella realtà, l'inversione della polarità del campo elettrico viene svolta da un **generatore di radiofrequenza** e la successione di elettrodi è rimpiazzata da **cavità risonanti**



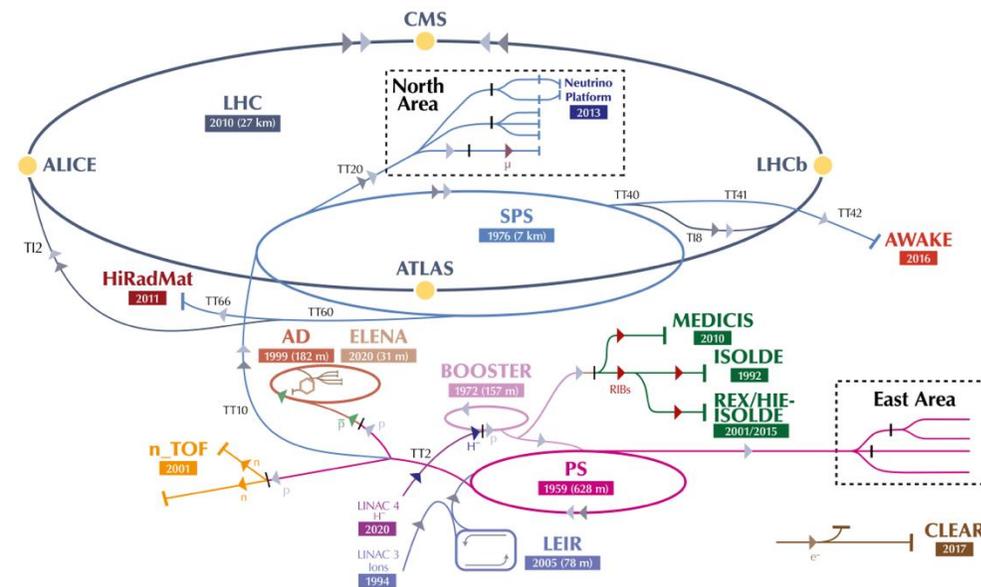
- Potenti **campi magnetici** sono applicati per mantenere le particelle lungo una traiettoria curvilinea (**forza di Lorentz**)



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

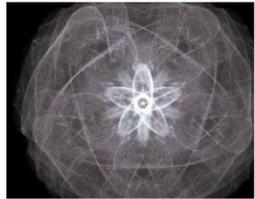
Numerosi esperimenti sono disposti in diversi punti del sistema di acceleratori.

Che cos'è il CERN ?

CERN significa: Consiglio Europeo per la ricerca nucleare

E' un grandissimo laboratorio di Fisica

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

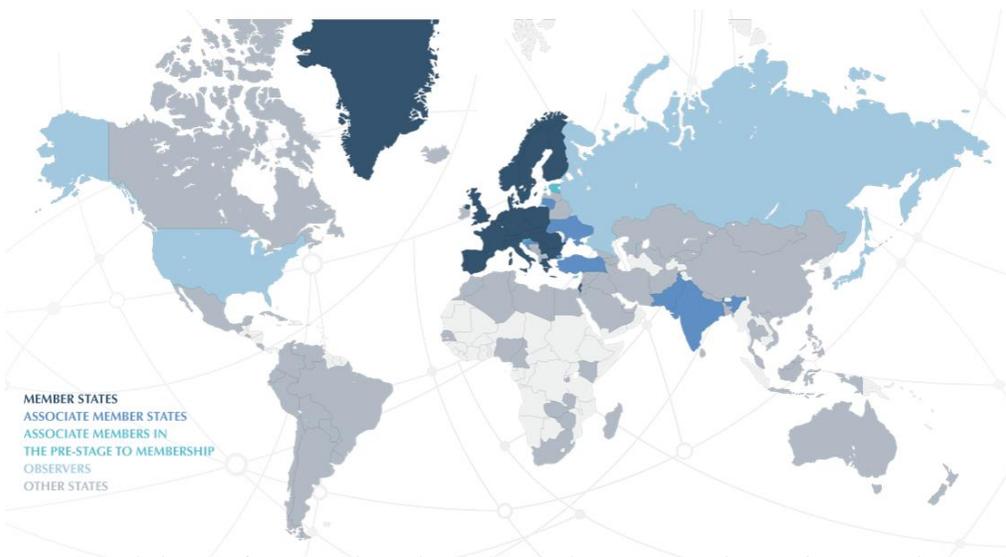


Nasce alla fine della seconda guerra mondiale dall'intuizione visionaria di scienziati europei:

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

Il CERN di oggi

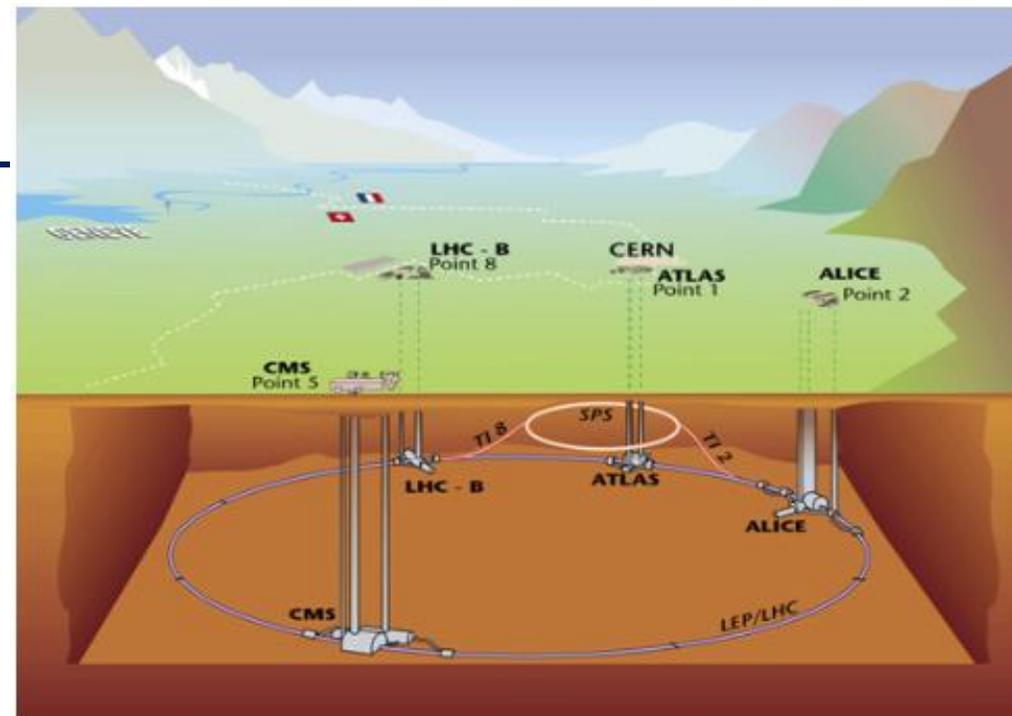
- Il CERN è il più grande laboratorio al mondo per la fisica delle particelle
- Fondato nel 1954, si trova nei pressi di Ginevra, al confine franco-svizzero
- Ha 23 stati membri → l'Italia è fra i paesi fondatori
- L'italiana, Fabiola Gianotti, è direttrice del CERN da 2016



Il Large Hadron Collider - LHC

E' lo strumento scientifico più grande del mondo!

- 27 km di circonferenza
- Energia di collisione dei fasci di protoni 13.6 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 μm**
- **e collidono ogni 25 ns (40 milioni al secondo!)**



Il Large Hadron Collider è costruito a 100 metri di profondità

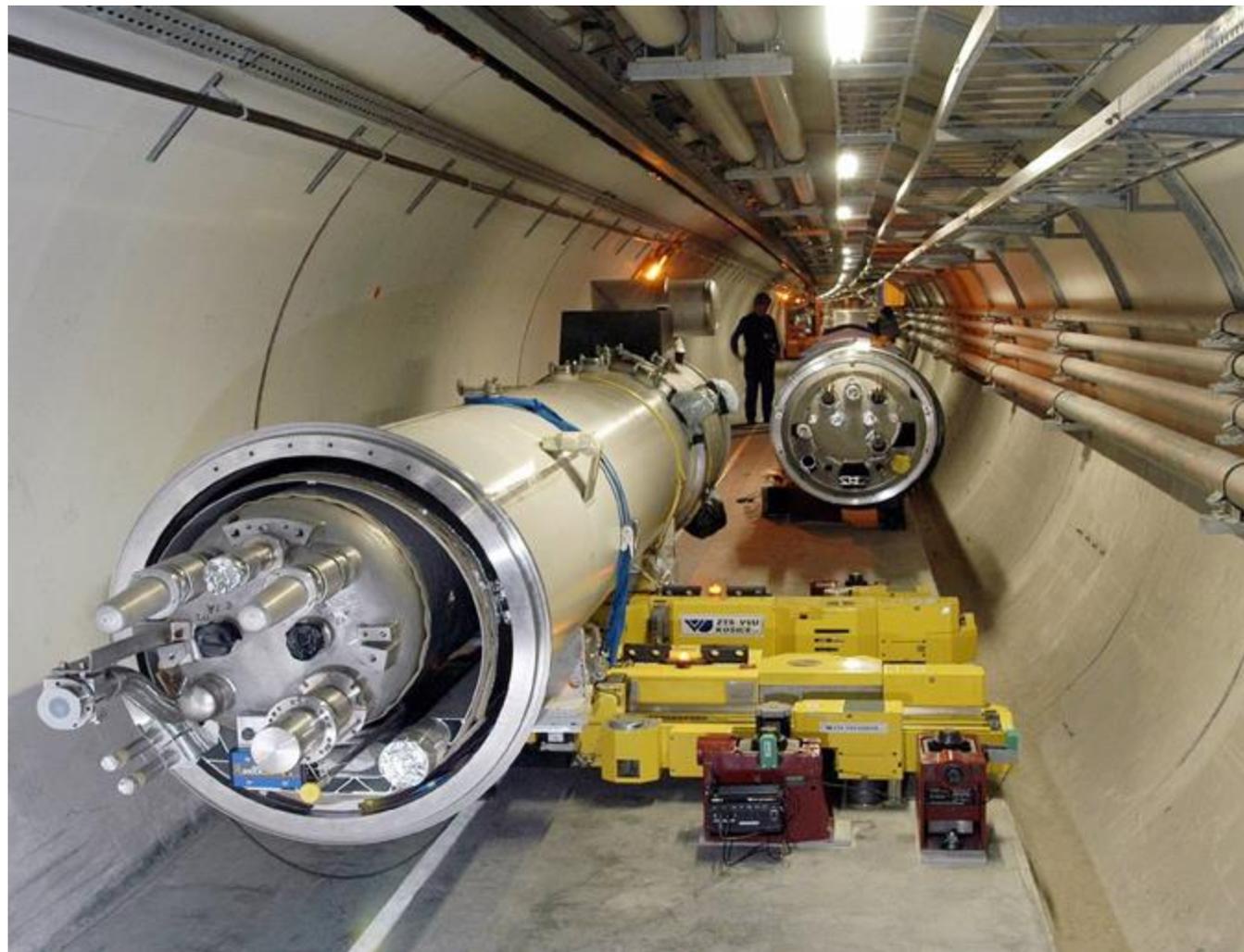


...talmente grande che ci si sposta in treno o in moto!

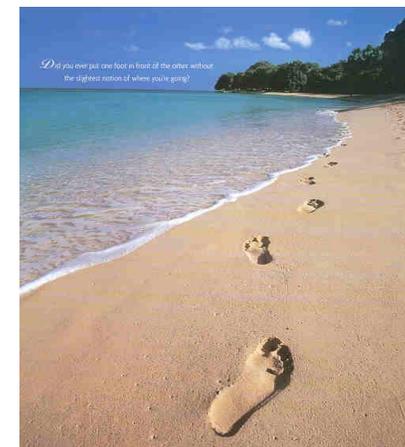


LHC è una macchina da record

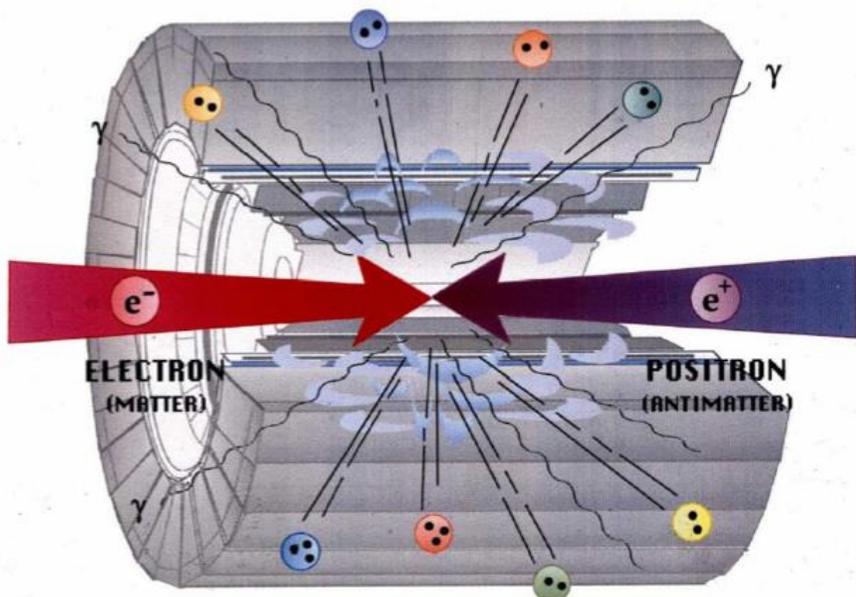
- 1 232 dipoli magnetici superconduttori **che producono un campo da 8.36 Tesla** (campo magnetico terrestre ~ 0.00000040 Tesla)
- 700.000 litri di Elio liquido alla temperatura di 1.9K (-271 °C)
- 30.000 tonnellate di materiale a **1.9K** ...è più freddo dello spazio profondo !
- 27 km di vuoto spinto (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.

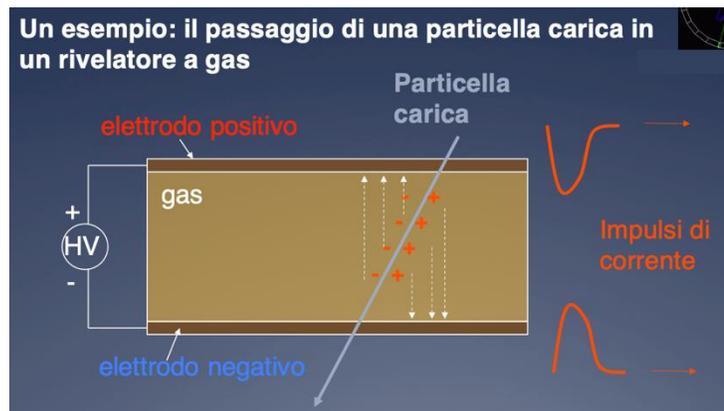


Scopi

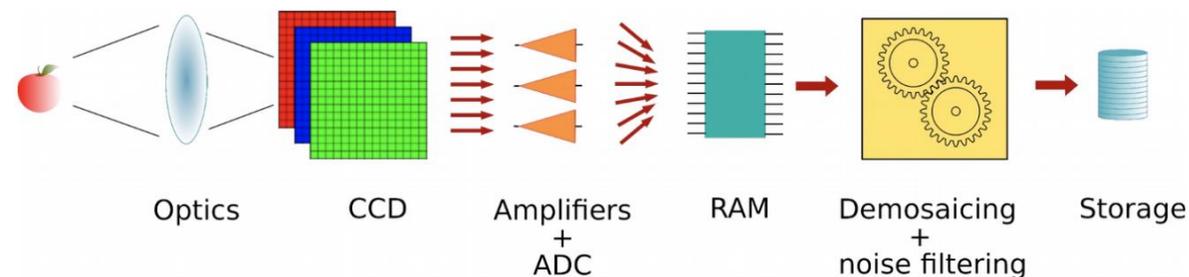
- Identificare le particelle
- misurarne le caratteristiche (energia, carica..)

Come?

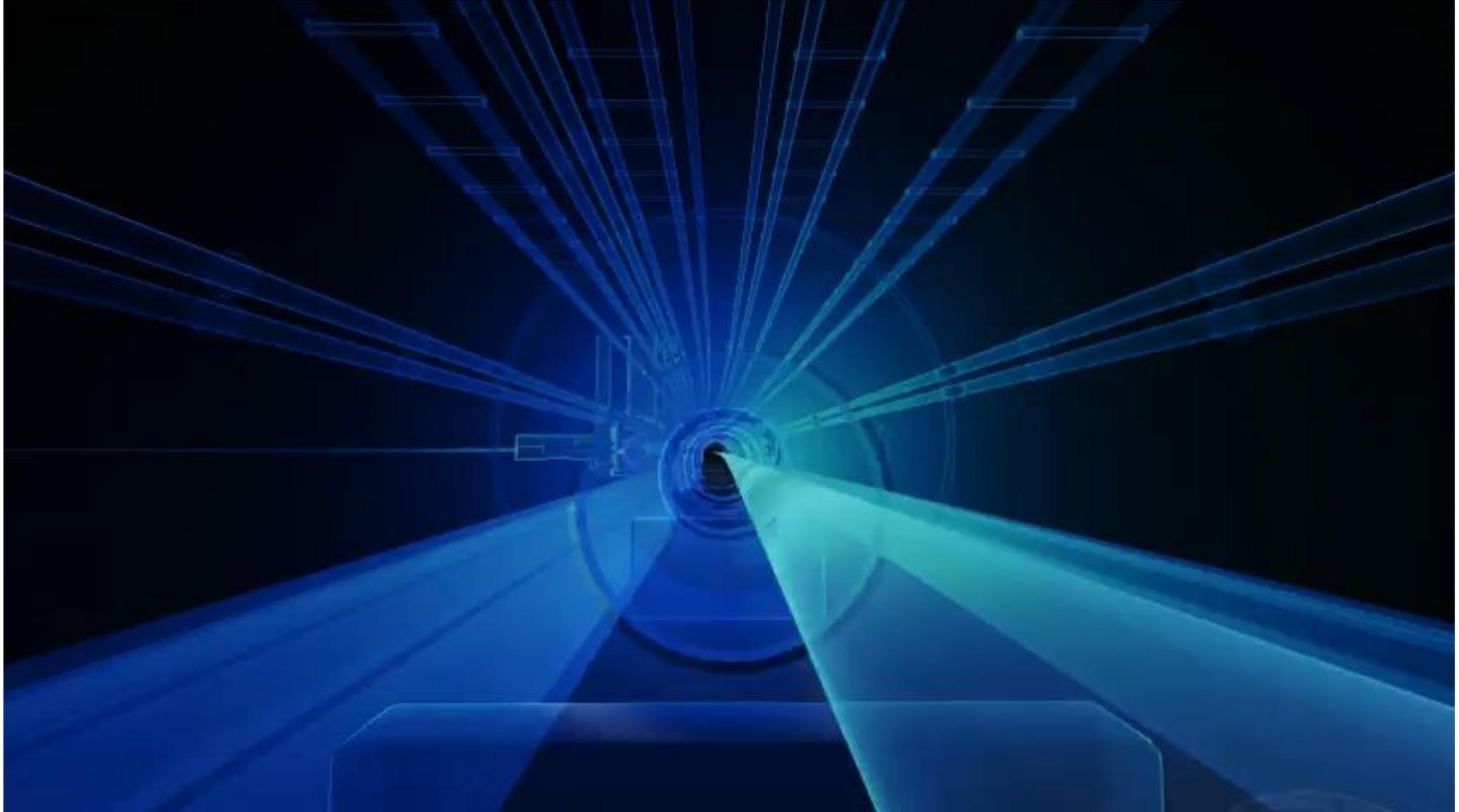
... lavoro da detective ... seguire gli indizi per ricostruire quello che è successo



Una macchina fotografica

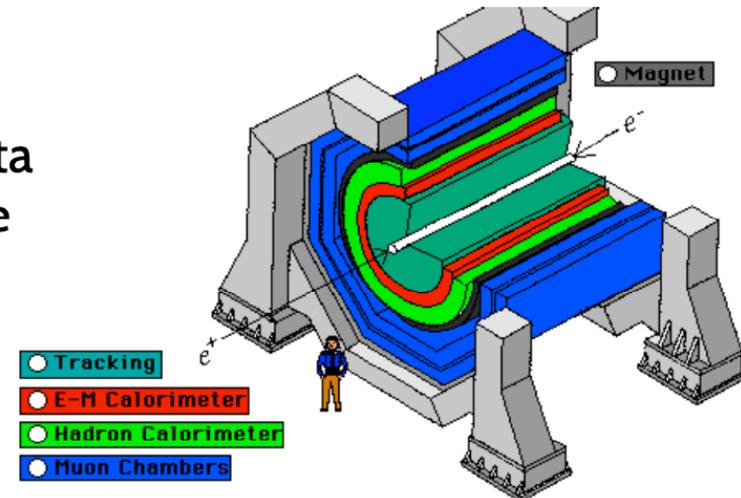
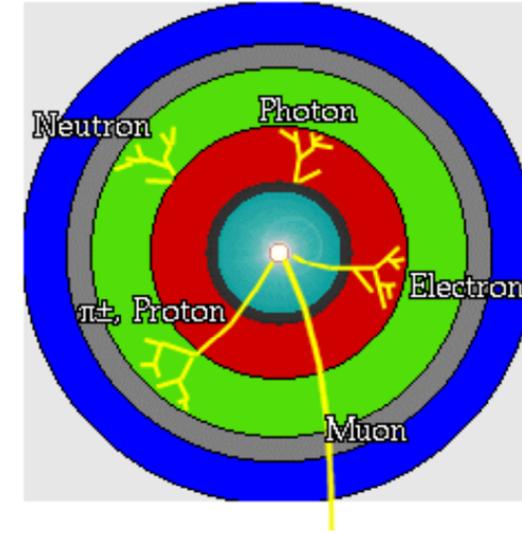


Cosa osserviamo da una collisione fra particelle

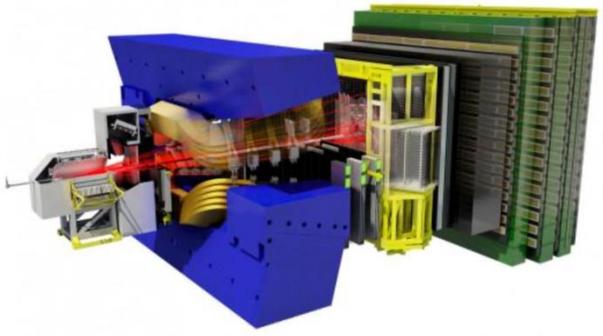


Apparati sperimentali - i Rivelatori

- 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

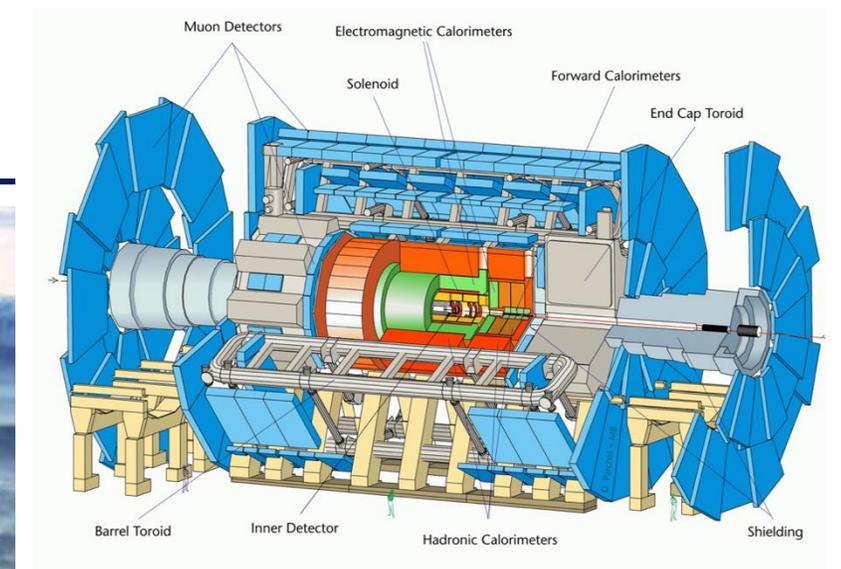
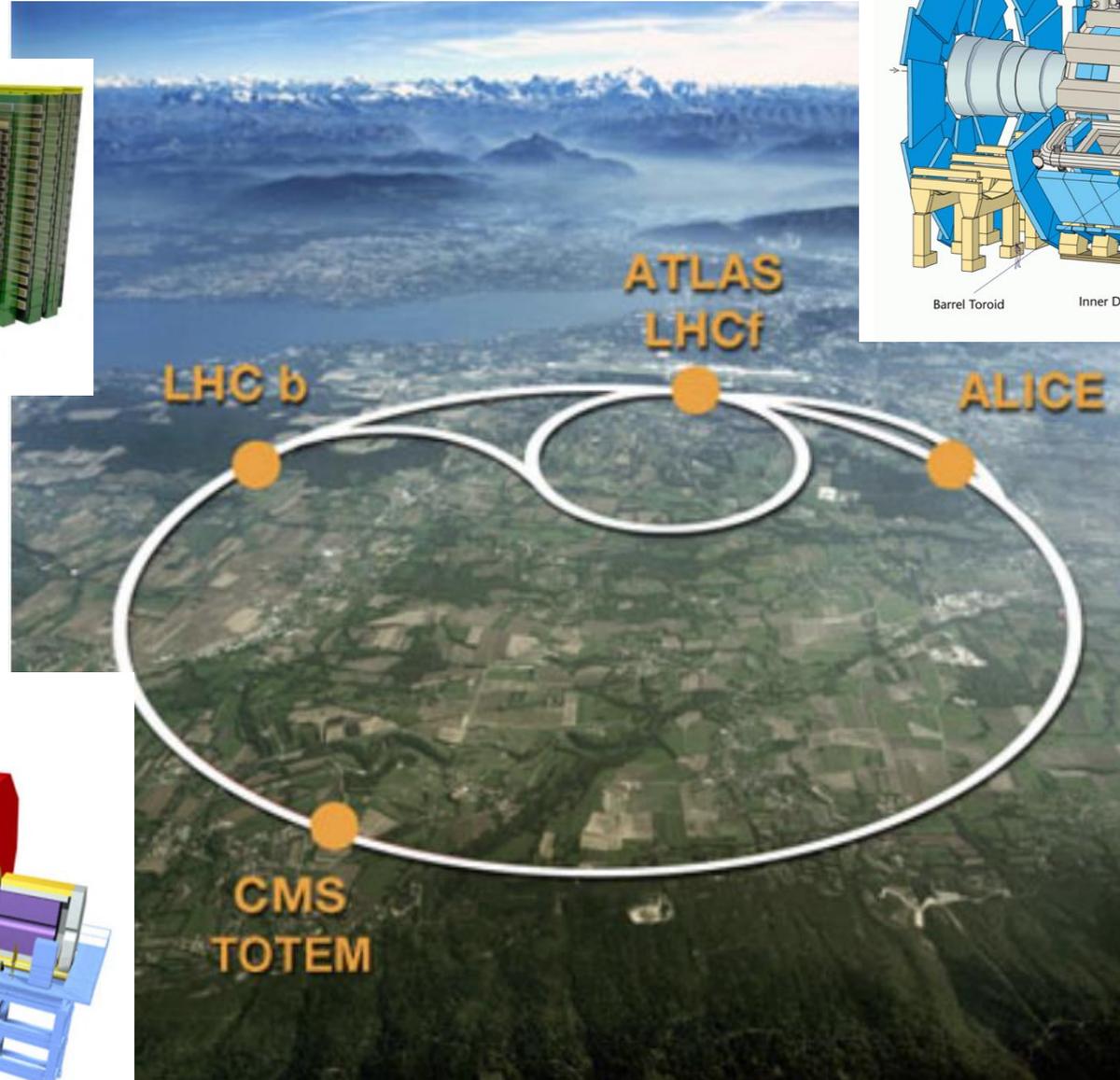
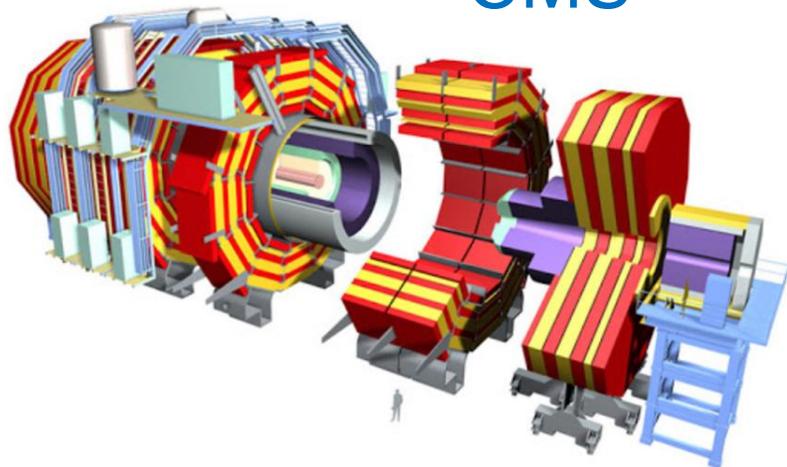


Gli esperimenti dell' LHC

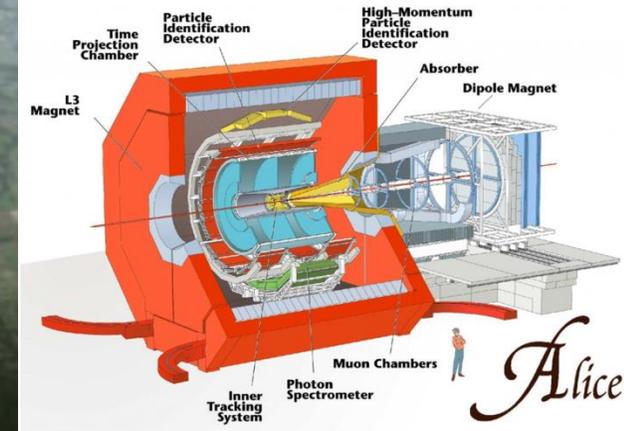


LHCb

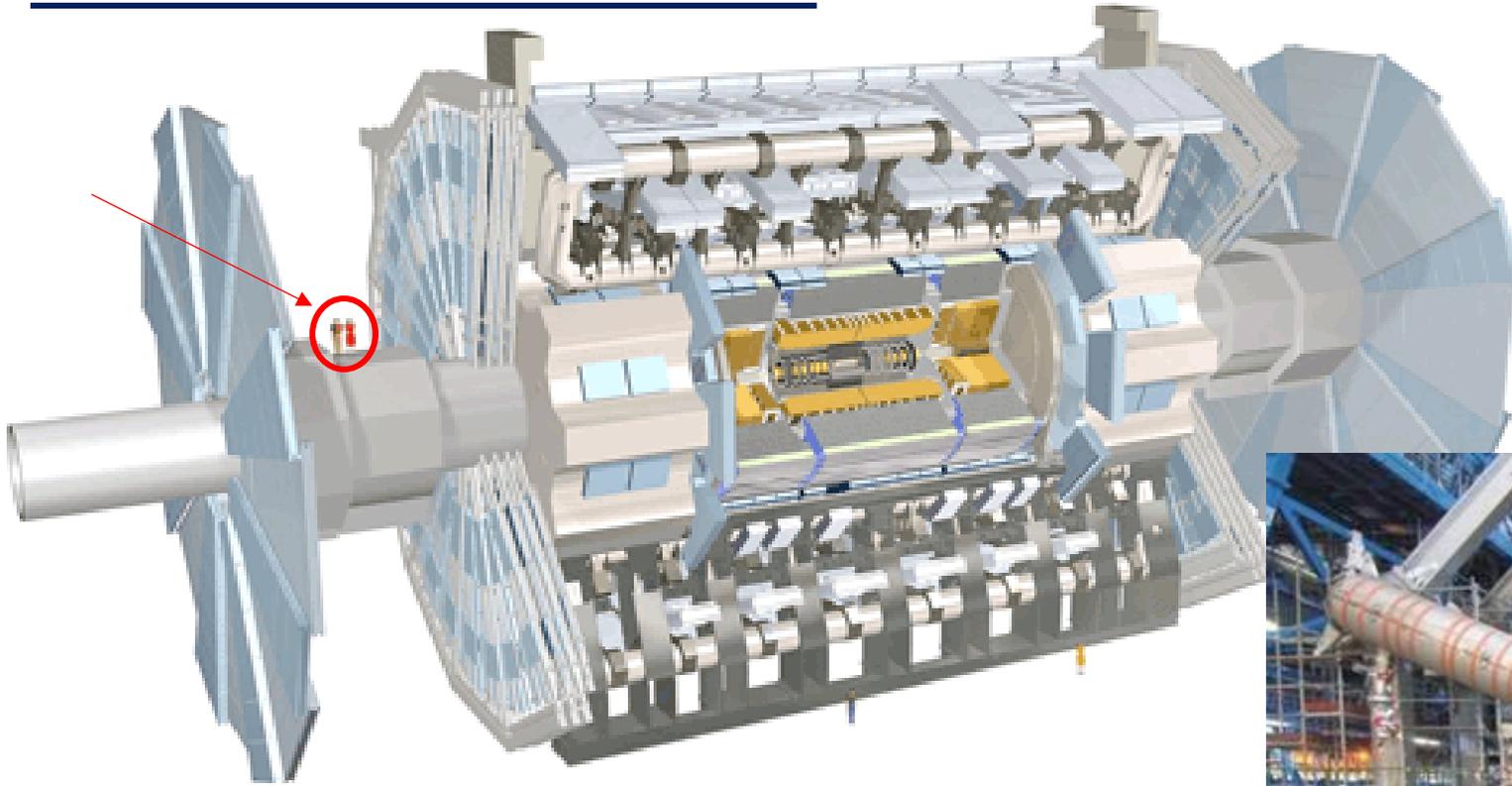
CMS



ATLAS

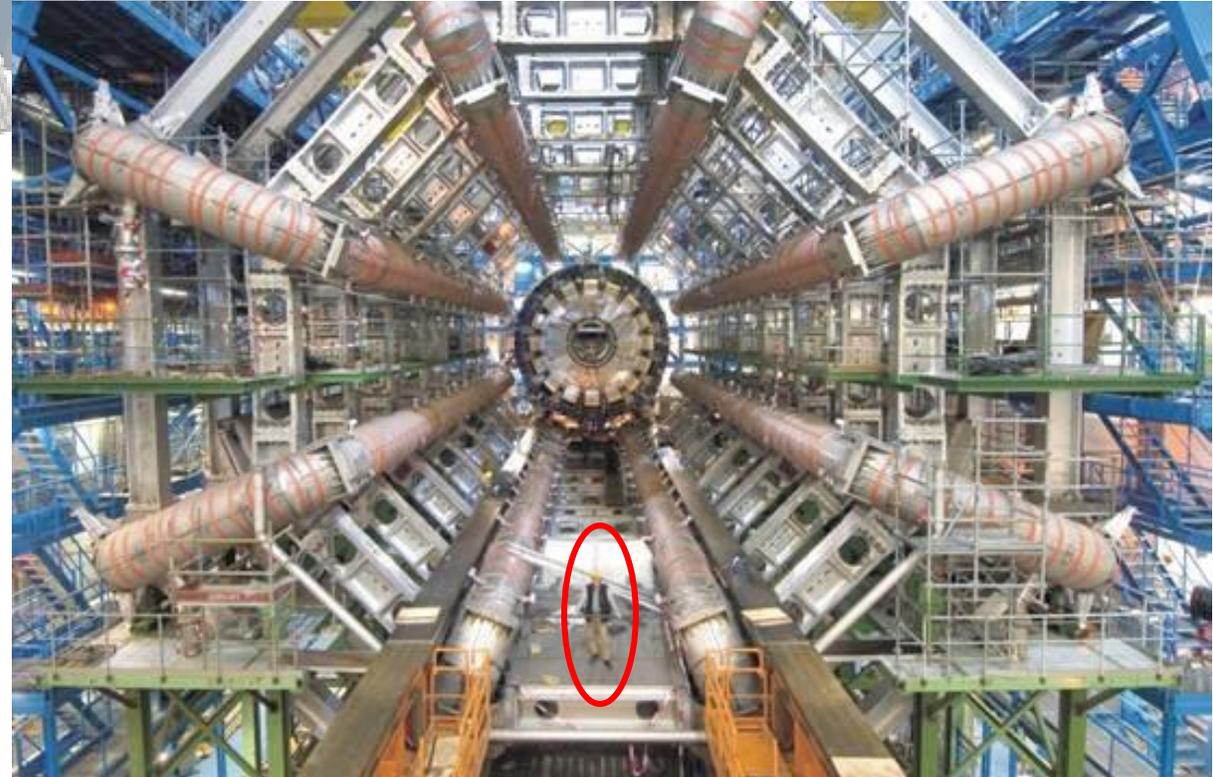


Il rivelatore ATLAS



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



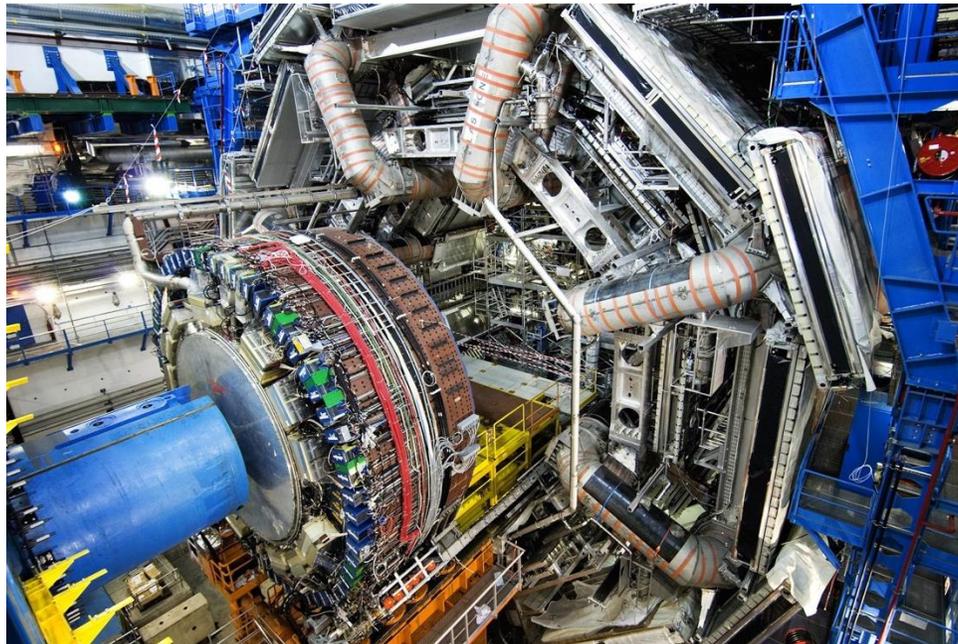
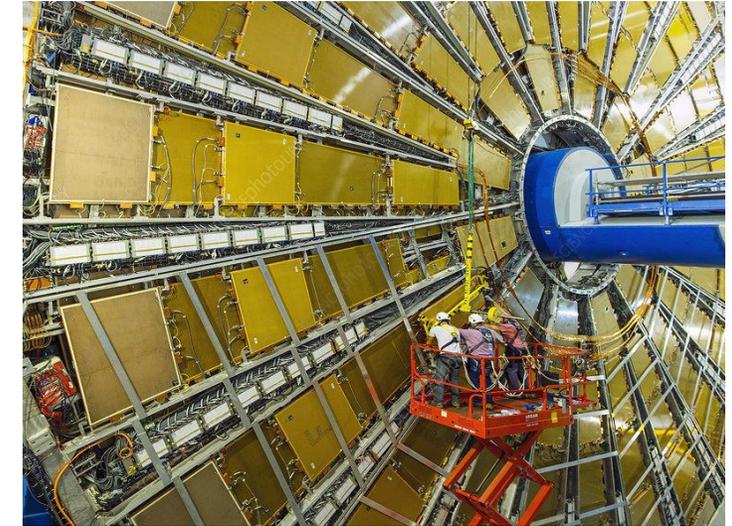
Costruiamo i nostri strumenti – acquisiamo e analizziamo i dati

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

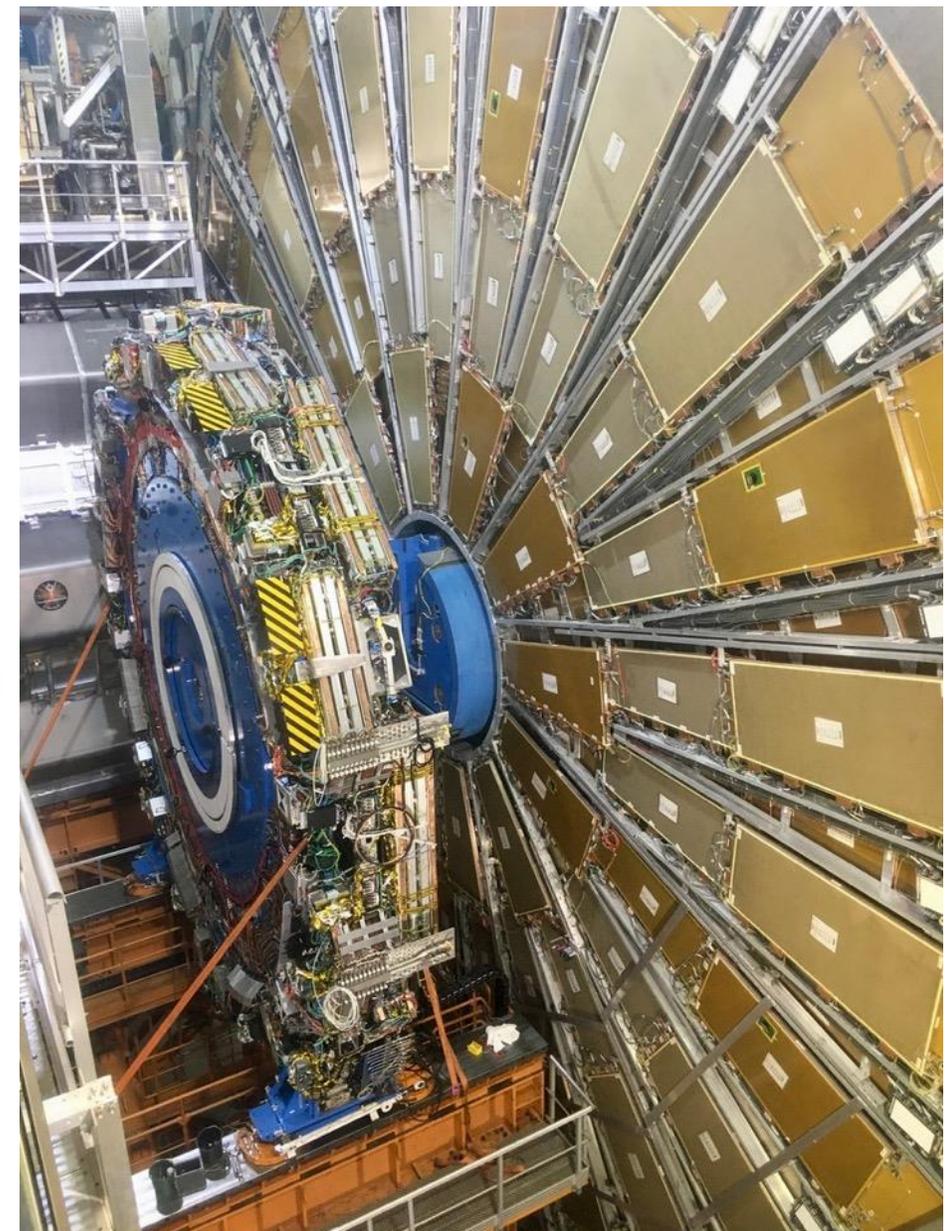
- Costruire i rivelatori di particelle
- Monitorare le performance dei rivelatori
- Analizzare i dati

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

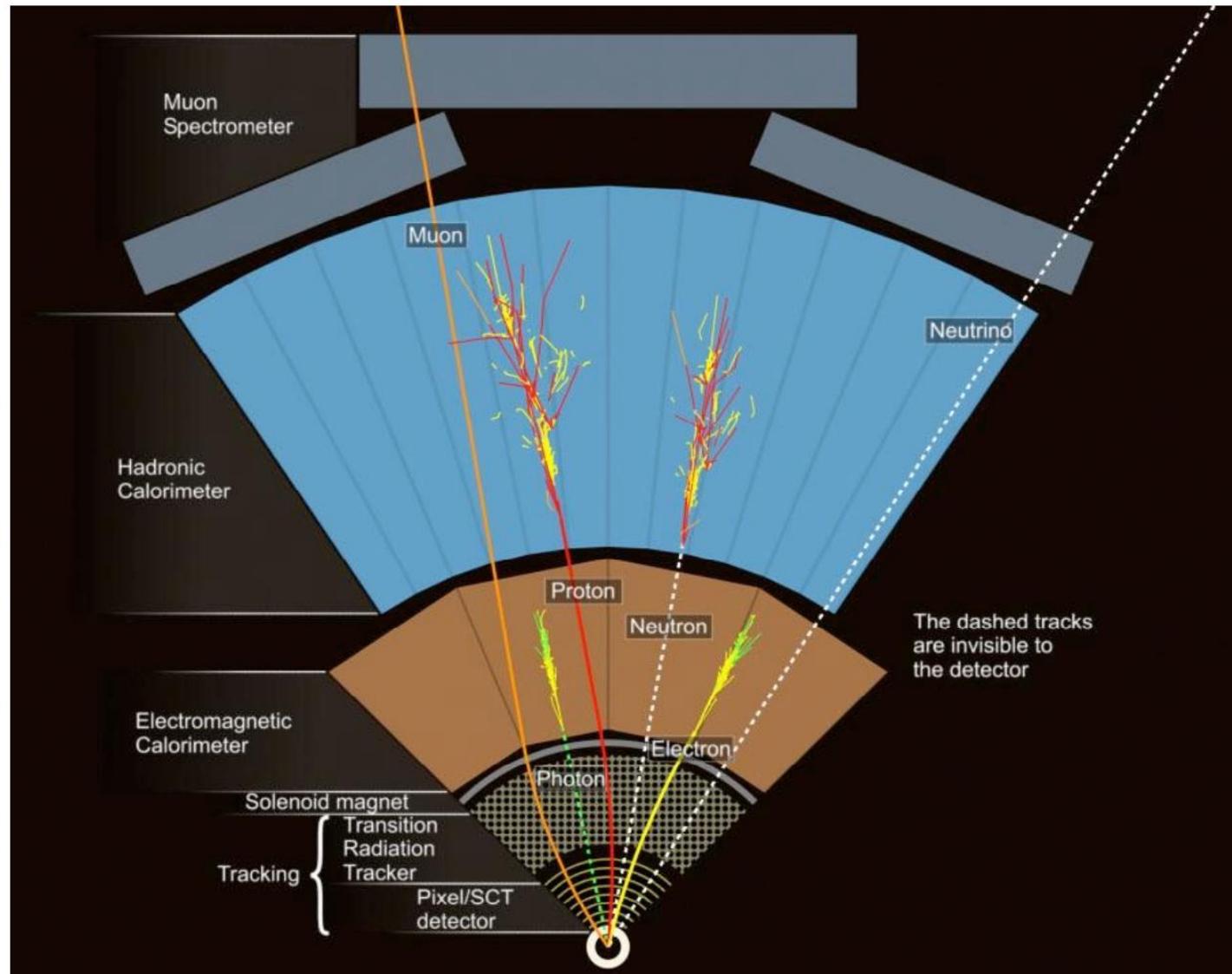
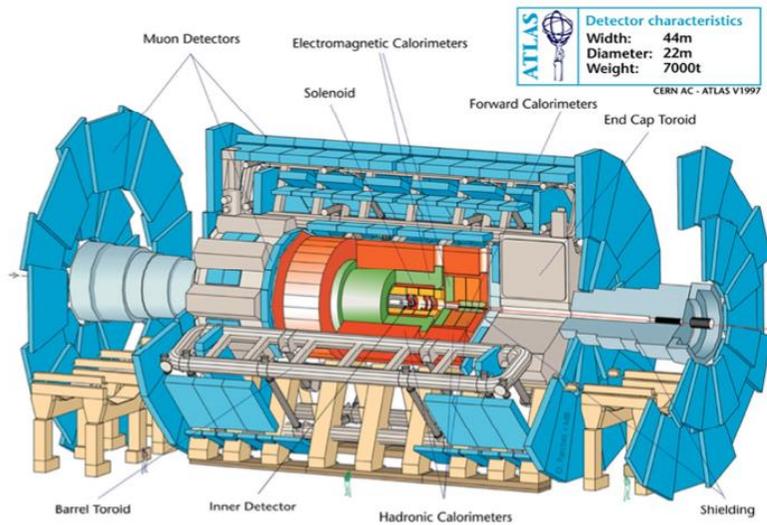
Alcuni dei rivelatori per muoni sono stati progettati e costruiti nei nostri laboratori



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



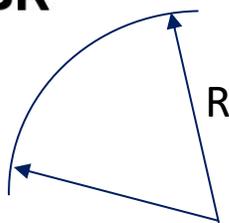
Uno «Spicchio» di ATLAS



Misura della carica e della quantità di moto

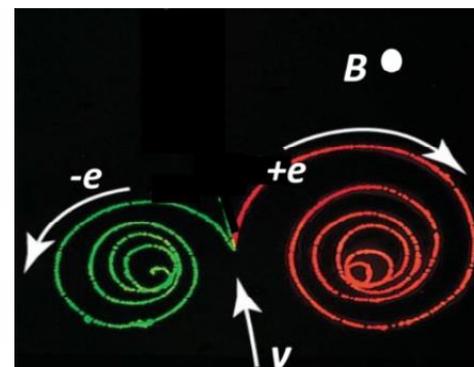
- Una particella carica in moto in un campo magnetico segue una traiettoria curvilinea a causa della forza di Lorentz
- la traiettoria segue un arco di circonferenza dal raggio di curvatura posso ricavare:

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



- dal tipo di curvatura è anche possibile capire la carica

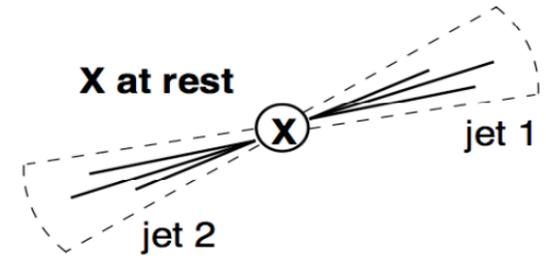
Evento in una camera a bolle



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



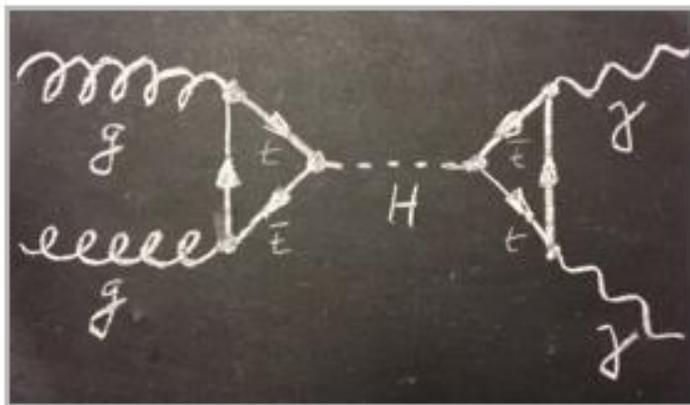
E i neutrini?

- 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)

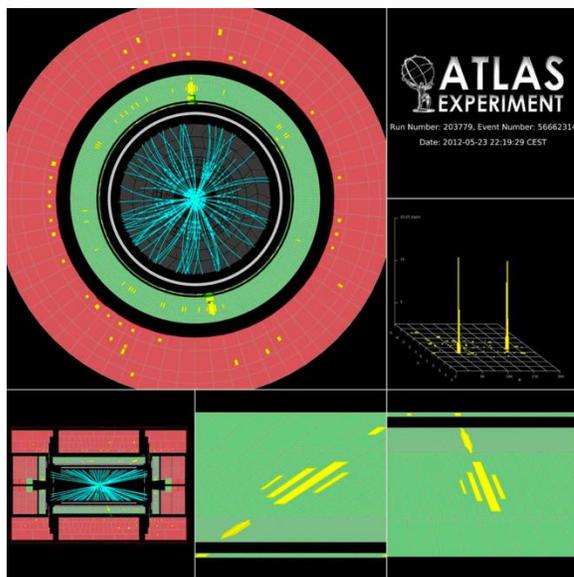
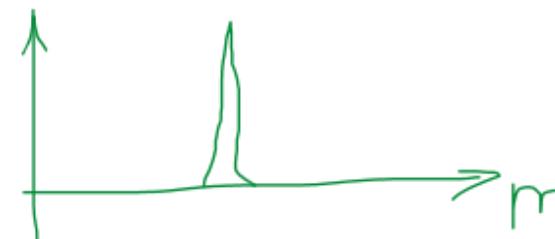
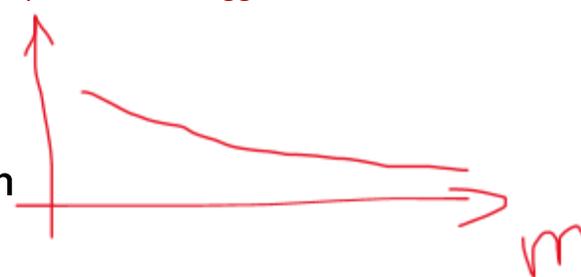
Seleziono tutti gli eventi dove osservo e misuro le proprietà dei due fotoni. Da queste posso ricavare la MASSA di un eventuale «genitore» ...**se esiste davvero!**

Per ogni evento riporto su un grafico la massa ricostruita

Ci sono due possibilità:

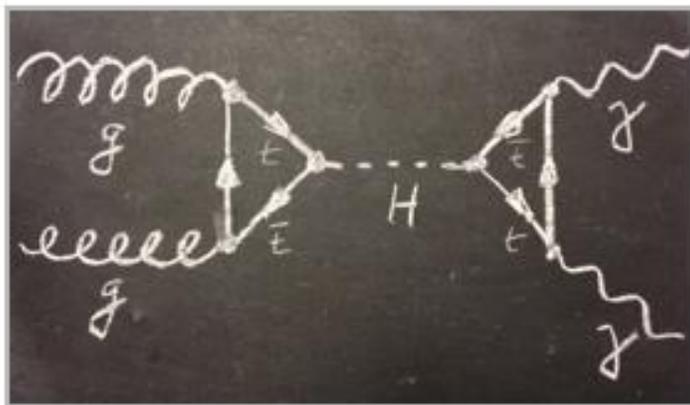
1. I due fotoni sono prodotti in modo scorrelato (NON dallo stesso genitore) \rightarrow La massa ricostruita avrà un valore casuale (**background**)
2. I due fotoni SONO prodotti entrambi da una particella: la massa ricostruita sarà esattamente la massa della particella genitore.

Frequenza di conteggio

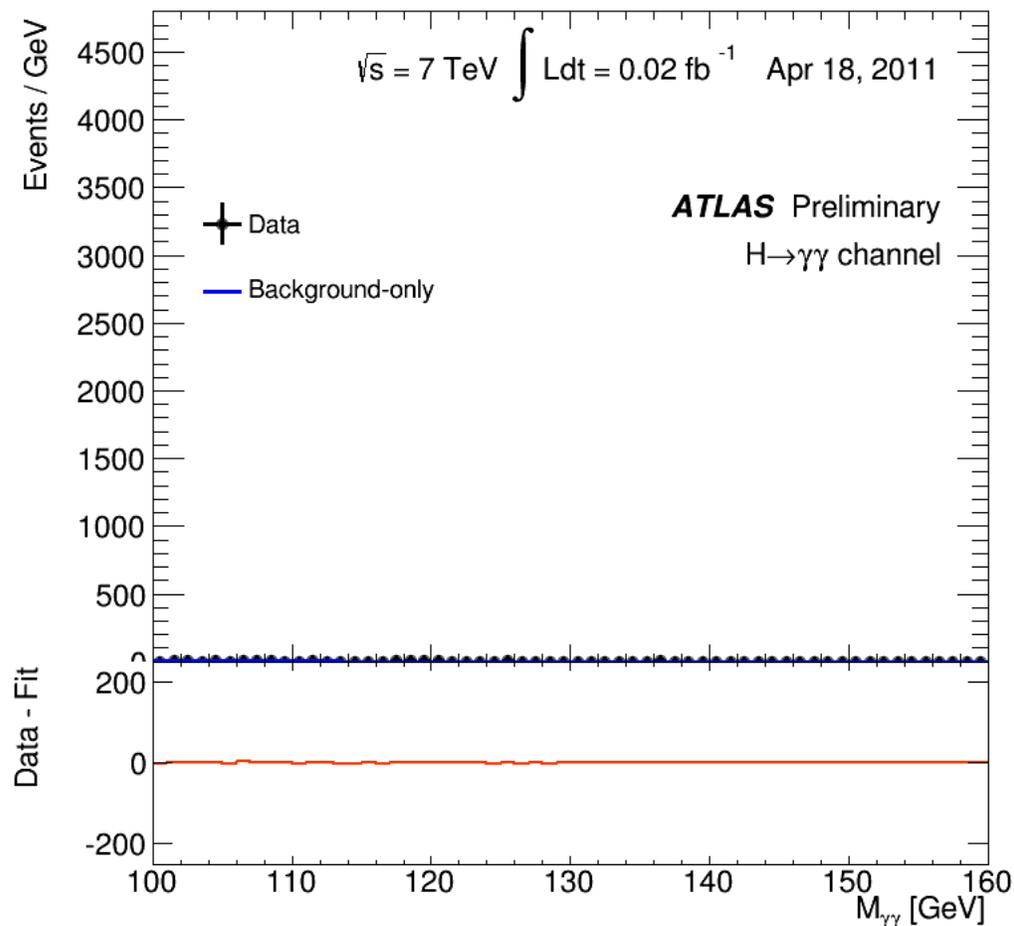


A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

Higgs → fotone-fotone

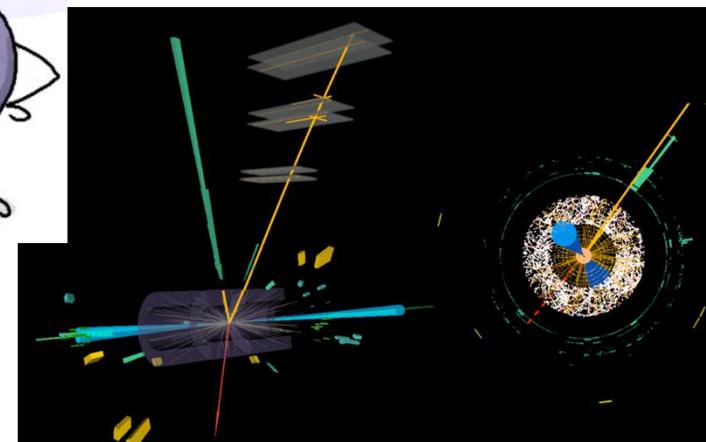


Le grandezze misurate dei due fotoni (energia, direzione) vengono combinate per ricostruire la massa del genitore

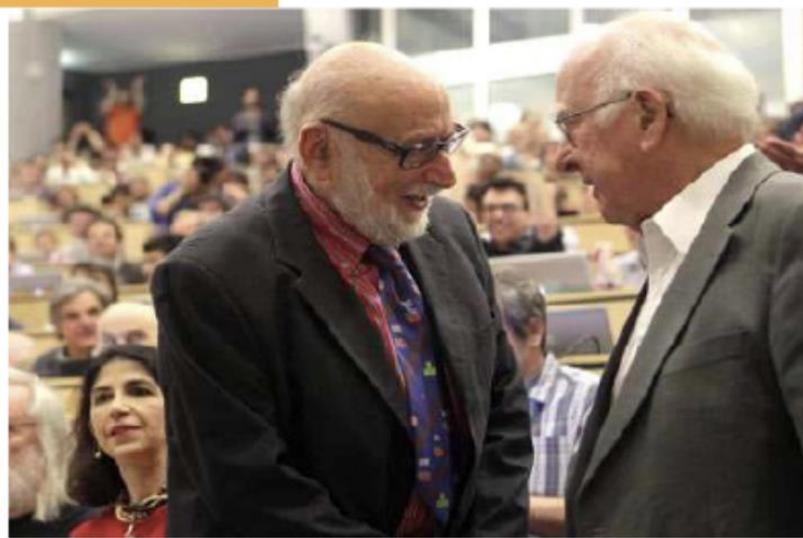
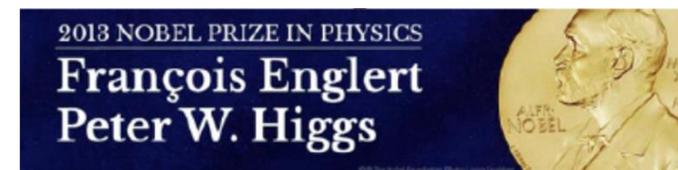


Per misurare un segnale sopra il background serve MOLTA statistica
Possono essere necessari ANNI di presa dati

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 W-
Wide Web



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 1989

CERN DD/OC

Information Management: A Proposal

Vague but exciting ...

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 **W-
Wide Web**



Tim Berners-Lee invented the World Web in 1989

CERN DD/OC

Information Management: A Proposal

Vague but exciting ...

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).



Non solo particelle - dal CERN importanti ricadute tecnologiche

qui è stato inventato il **W-
Wide Web**



Tim Berners-Lee invented the World Web Web in 1989

CERN DD/OC

Information Management: A Proposal

Vague but exciting ...

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.

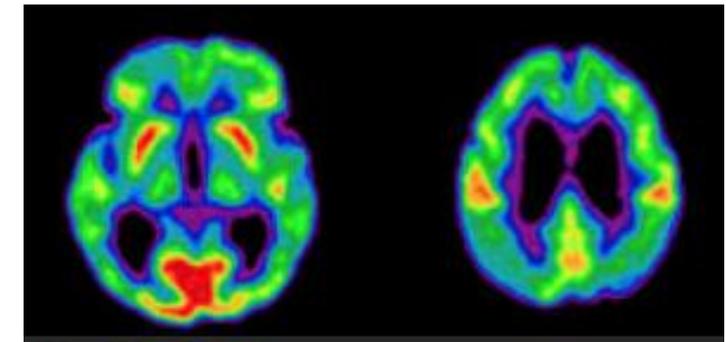
il Touch Screen



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



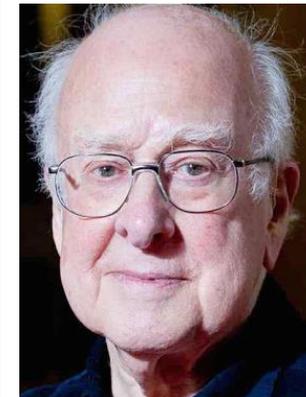
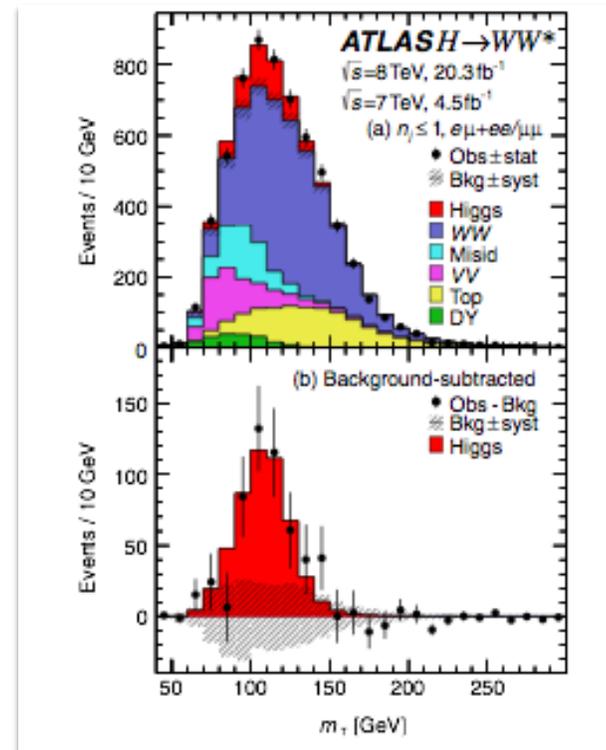
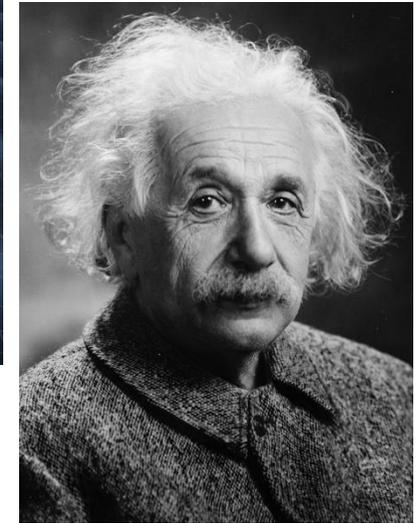
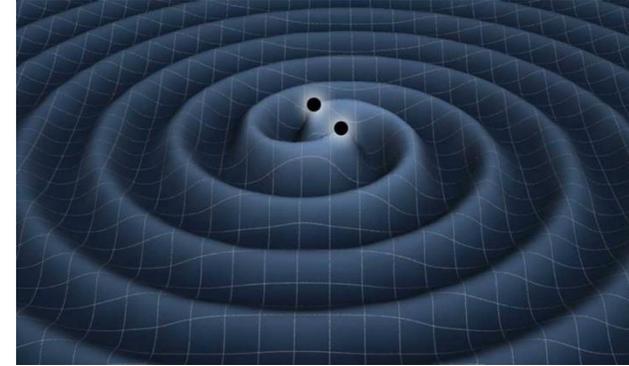
e la PET



E ora ?

I due modelli standard delle interazioni fondamentali sono completi:

- Onde gravitazionali: Ulteriore conferma della Teoria della Relatività Generale: Gravita'
- Bosone di Higgs:
Modello Standard delle Interazioni Fondamentali:
Interazione Forte,
Elettromagnetica, Debole

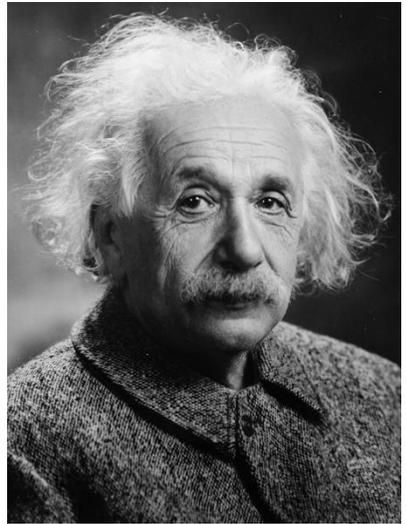


Non solo P. Higgs. Molti altri fisici hanno contribuito allo sviluppo del Modello Standard delle particelle elementari

E ora ?

I due modelli standards
sono completi:

- Onde gravitazionali: Ulteriore conferma della Teoria della Relativita' Generale: Gravita'
- Bosone di Higgs:
Modello Standard delle Interazioni Fondamentali:
Interazione Forte,
Elettromagnetismo



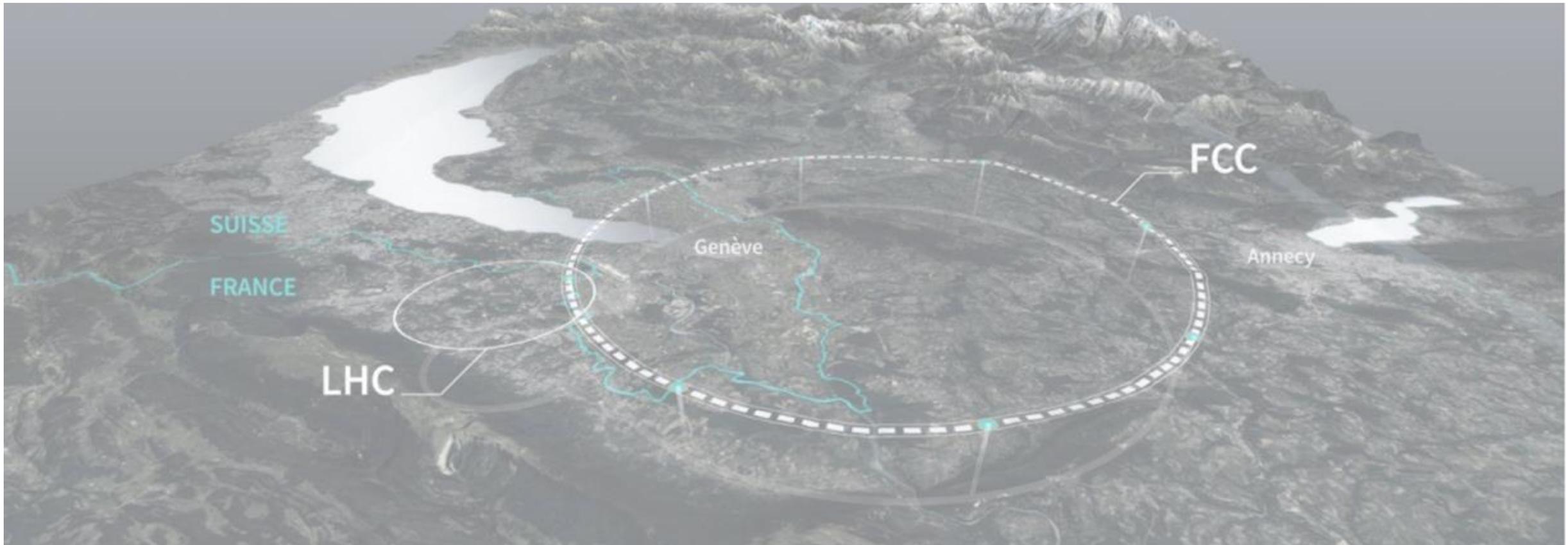
**Questi due modelli Standard sembrano inconciliabili,
nuova Fisica potrebbe nascondersi dietro l'angolo
per spiegarne il legame.**



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 21st century

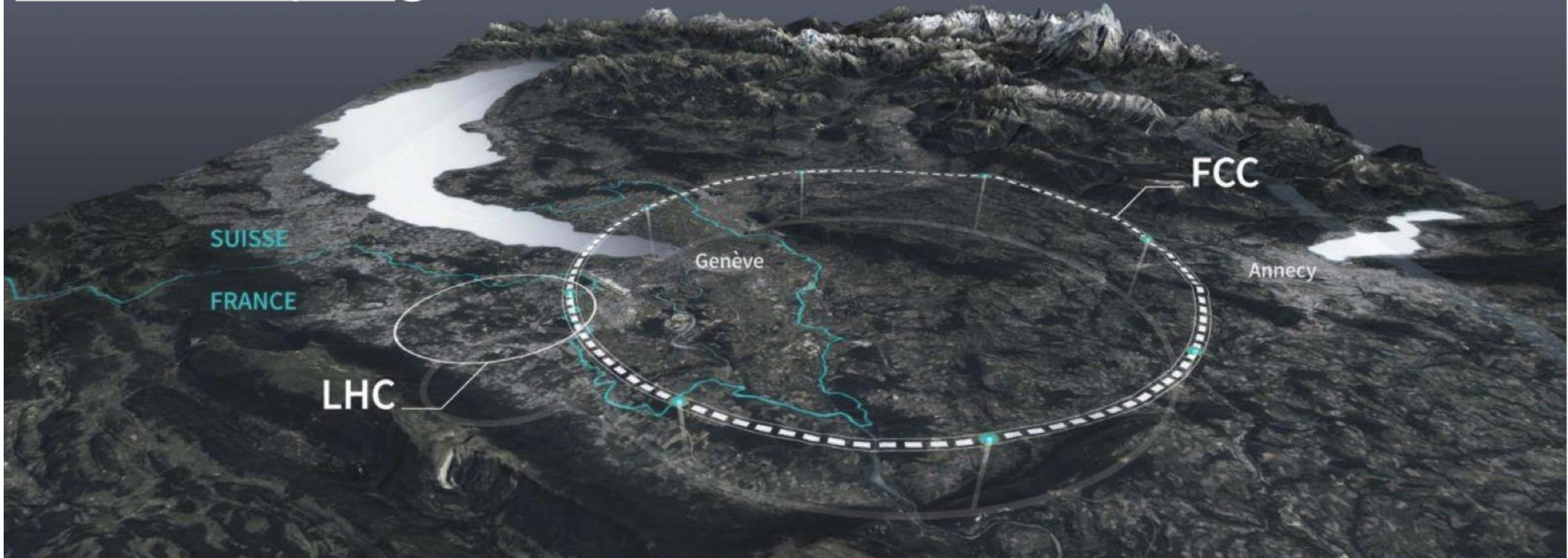
A new 91 km tunnel to host multiple colliders

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-themed exhibition space. The scene is dominated by glowing blue spheres of various sizes, some on stands and others floating in the air. A central circular display is illuminated with a bright blue glow. The floor is dark blue with glowing lines and circles. The overall atmosphere is high-tech and modern.

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"
FDL-CLX - No. 54,096 - 12 cent (No tax on this)
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 Cal Rate Evol

Particle Collide, and Champagne Glasses Clink
In a record week, a record crowd the start of the Large Hadron Collider outside Geneva on Tuesday. The \$10-billion machine is designed to smash subatomic particles together at high energy levels, giving insight into the universe's beginnings. Page A12.

Il metodo scientifico e il mestiere dei Fisici

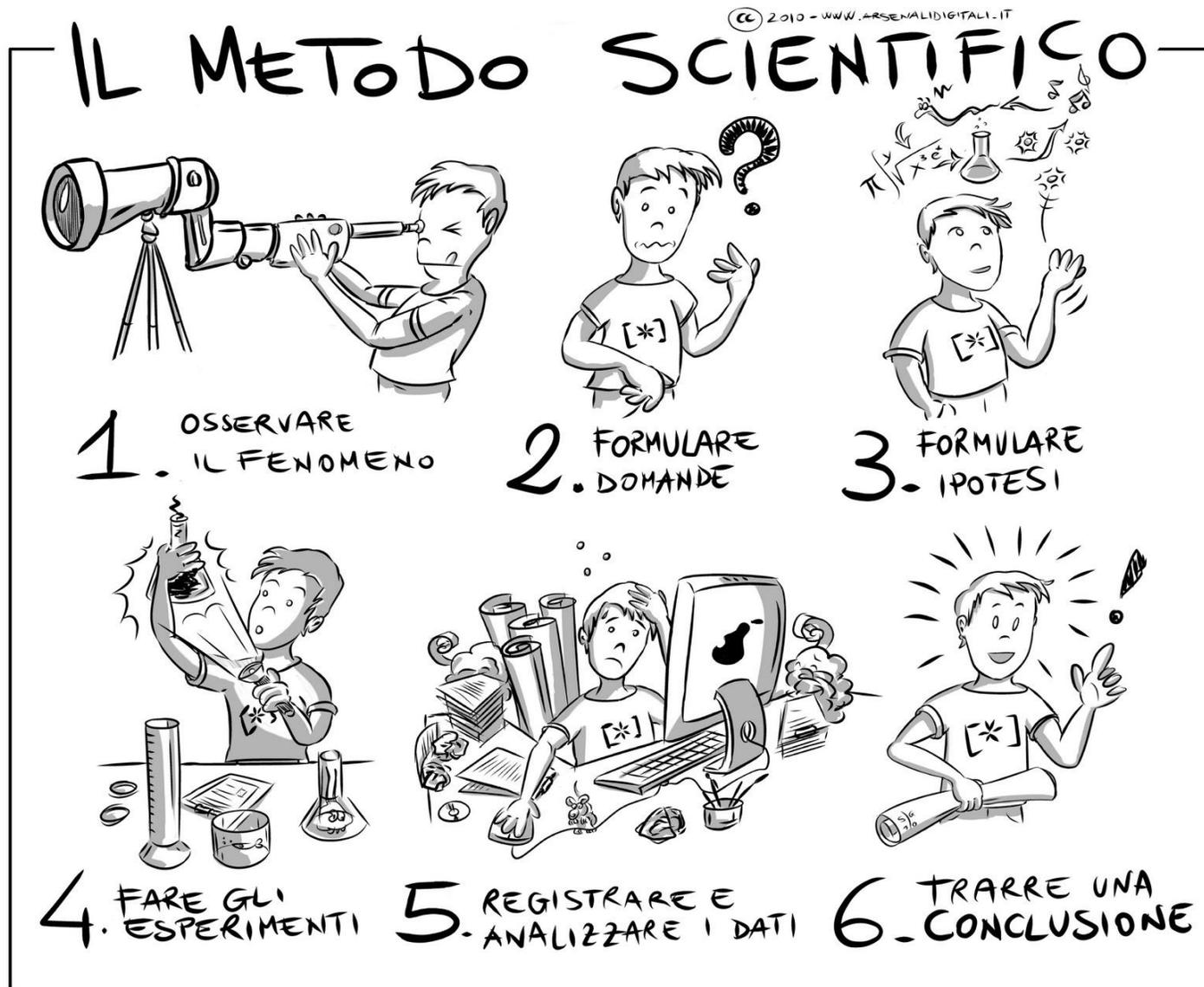


Galileo Galilei

(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

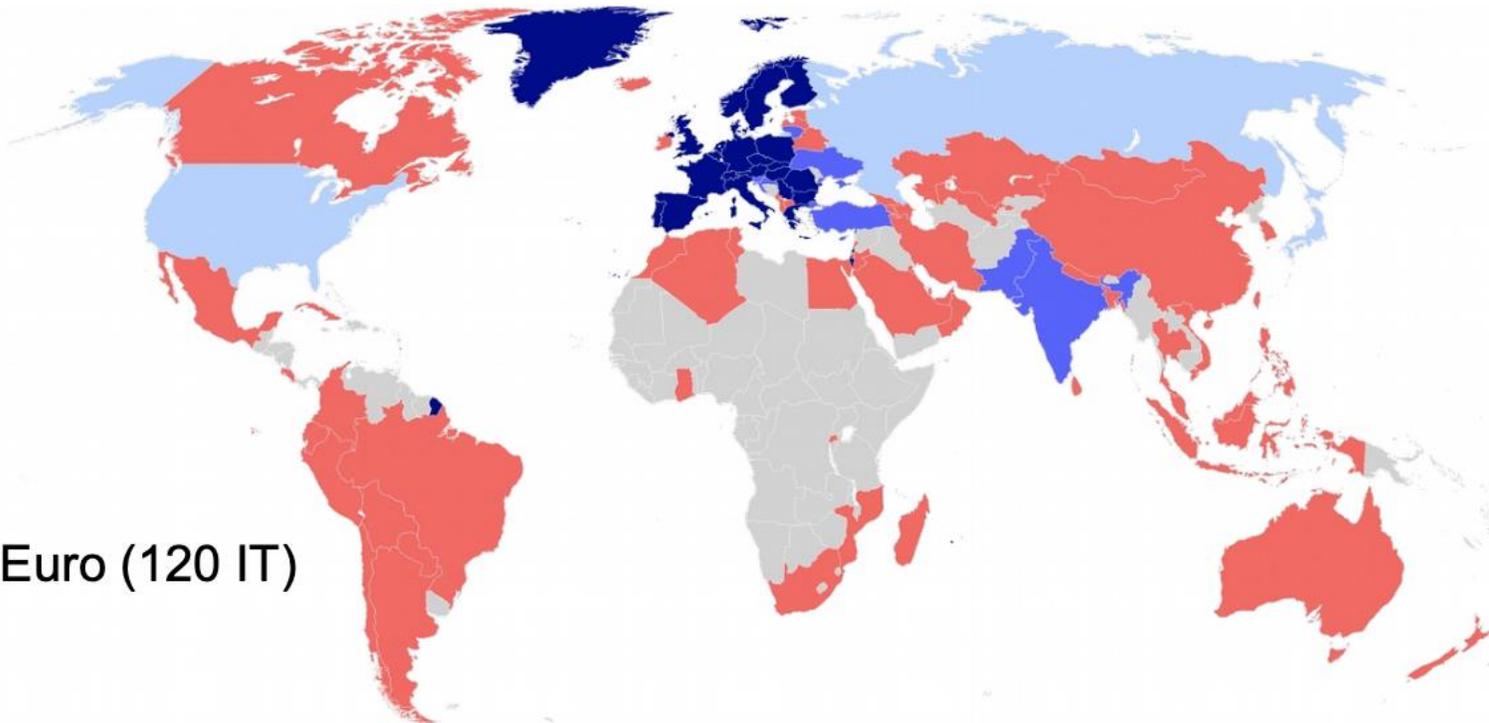
Budget nel 2020 of 1196 milioni di Euro (120 IT)

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:

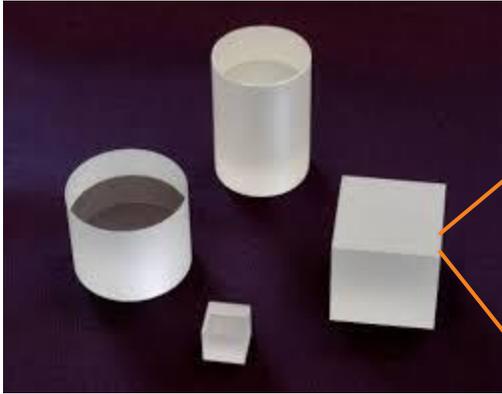
- fornire una gamma unica di strutture per l'accelerazione di particelle che consentono la ricerca all'avanguardia della conoscenza umana.
- svolgere ricerche di livello mondiale nella fisica fondamentale.
- **unire persone da tutto il mondo per spingere le frontiere della scienza e della tecnologia,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



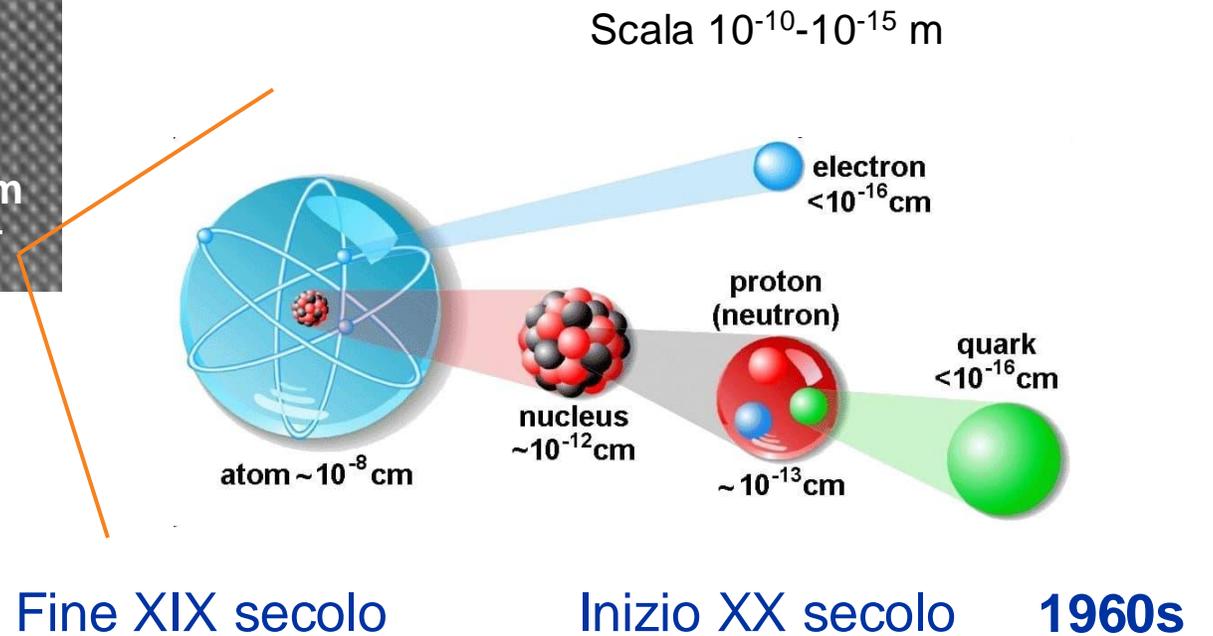
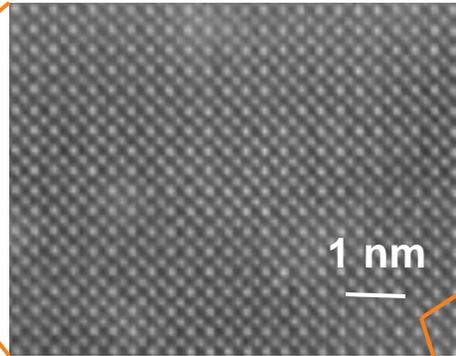
L'oggetto di studio

I costituenti fondamentali della materia e le loro interazioni

Materia macroscopica



Struttura Atomica



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)

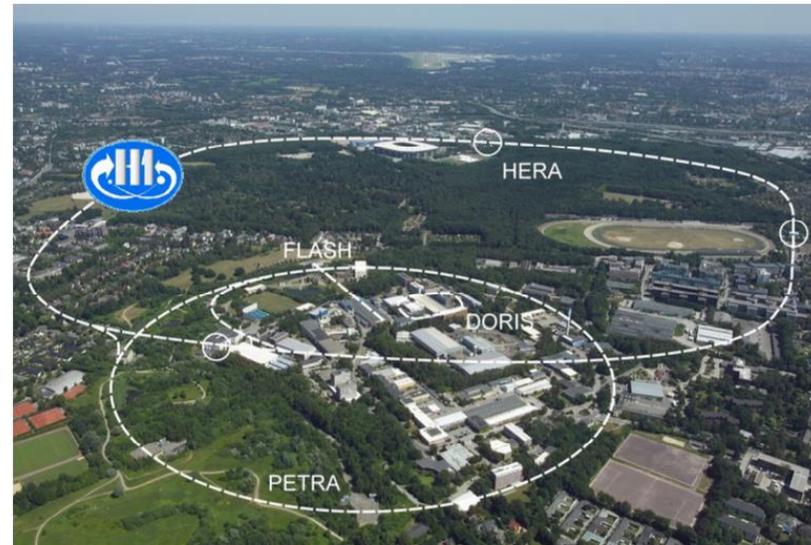
Diversi tipi di acceleratori

- 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

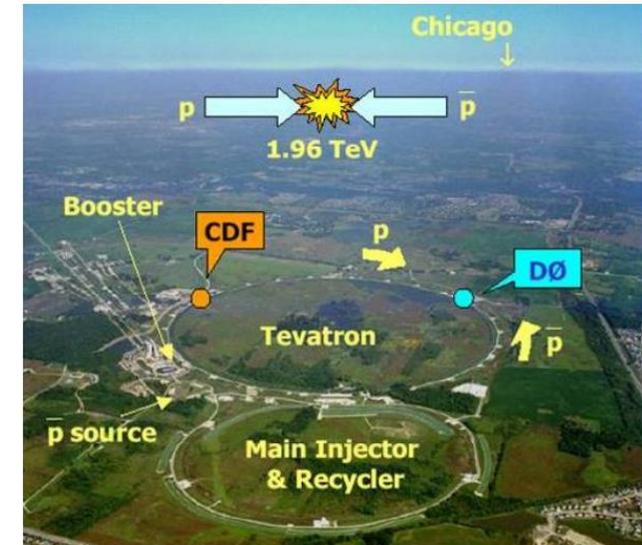
SLAC (California, USA)
Collider elettrone positrone
3 km, E~100 GeV



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

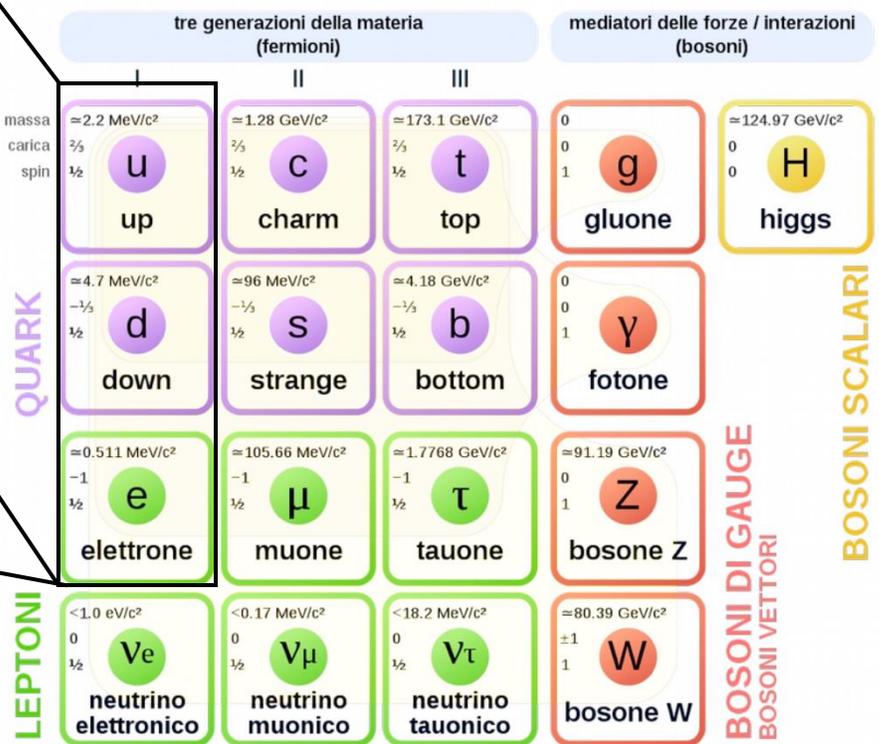


Tevatron (Illinois, USA)
Collider protone anti-protone
6.3 km, E~2 TeV



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

1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12 13 14 15 16 17 18

1 H Atomic Symbol [C] Solid
Hydrogen Name Weight
1.008

2 He [H] Liquid
Helium Name Weight
4.0026

3 Li [H] Gas
Lithium Name Weight
6.94

4 Be [H] Gas
Beryllium Name Weight
9.0122

5 B [H] Gas
Boron Name Weight
10.81

6 C [H] Gas
Carbon Name Weight
12.011

7 N [H] Gas
Nitrogen Name Weight
14.007

8 O [H] Gas
Oxygen Name Weight
15.999

9 F [H] Gas
Fluorine Name Weight
18.998

10 Ne [H] Gas
Neon Name Weight
20.180

11 Na [H] Gas
Sodium Name Weight
22.990

12 Mg [H] Gas
Magnesium Name Weight
24.305

13 Al [H] Gas
Aluminum Name Weight
26.982

14 Si [H] Gas
Silicon Name Weight
28.085

15 P [H] Gas
Phosphorus Name Weight
30.974

16 S [H] Gas
Sulfur Name Weight
32.06

17 Cl [H] Gas
Chlorine Name Weight
35.45

18 Ar [H] Gas
Argon Name Weight
39.948

19 K [H] Solid
Potassium Name Weight
39.098

20 Ca [H] Solid
Calcium Name Weight
40.078

21 Sc [H] Solid
Scandium Name Weight
44.956

22 Ti [H] Solid
Titanium Name Weight
47.867

23 V [H] Solid
Vanadium Name Weight
50.942

24 Cr [H] Solid
Chromium Name Weight
51.996

25 Mn [H] Solid
Manganese Name Weight
54.938

26 Fe [H] Solid
Iron Name Weight
55.845

27 Co [H] Solid
Cobalt Name Weight
58.933

28 Ni [H] Solid
Nickel Name Weight
58.693

29 Cu [H] Solid
Copper Name Weight
63.546

30 Zn [H] Solid
Zinc Name Weight
65.38

31 Ga [H] Solid
Gallium Name Weight
69.723

32 Ge [H] Solid
Germanium Name Weight
72.630

33 As [H] Solid
Arsenic Name Weight
74.922

34 Se [H] Solid
Selenium Name Weight
78.971

35 Br [H] Solid
Bromine Name Weight
79.904

36 Kr [H] Gas
Krypton Name Weight
83.798

37 Rb [H] Solid
Rubidium Name Weight
85.468

38 Sr [H] Solid
Strontium Name Weight
87.62

39 Y [H] Solid
Yttrium Name Weight
88.906

40 Zr [H] Solid
Zirconium Name Weight
91.224

41 Nb [H] Solid
Niobium Name Weight
92.906

42 Mo [H] Solid
Molybdenum Name Weight
95.95

43 Tc [H] Solid
Technetium Name Weight
(98)

44 Ru [H] Solid
Ruthenium Name Weight
101.07

45 Rh [H] Solid
Rhodium Name Weight
102.91

46 Pd [H] Solid
Palladium Name Weight
106.42

47 Ag [H] Solid
Silver Name Weight
107.87

48 Cd [H] Solid
Cadmium Name Weight
112.41

49 In [H] Solid
Indium Name Weight
114.82

50 Sn [H] Solid
Tin Name Weight
118.71

51 Sb [H] Solid
Antimony Name Weight
121.76

52 Te [H] Solid
Tellurium Name Weight
127.60

53 I [H] Solid
Iodine Name Weight
126.90

54 Xe [H] Gas
Xenon Name Weight
131.29

55 Cs [H] Solid
Cesium Name Weight
132.91

56 Ba [H] Solid
Barium Name Weight
137.33

57-71 La [H] Solid
Lanthanum Name Weight
138.91

72 Hf [H] Solid
Hafnium Name Weight
178.49

73 Ta [H] Solid
Tantalum Name Weight
180.95

74 W [H] Solid
Tungsten Name Weight
183.84

75 Re [H] Solid
Rhenium Name Weight
186.21

76 Os [H] Solid
Osmium Name Weight
190.23

77 Ir [H] Solid
Iridium Name Weight
192.22

78 Pt [H] Solid
Platinum Name Weight
195.08

79 Au [H] Solid
Gold Name Weight
196.97

80 Hg [H] Solid
Mercury Name Weight
200.59

81 Tl [H] Solid
Thallium Name Weight
204.38

82 Pb [H] Solid
Lead Name Weight
207.2

83 Bi [H] Solid
Bismuth Name Weight
208.98

84 Po [H] Solid
Polonium Name Weight
(209)

85 At [H] Solid
Astatine Name Weight
(210)

86 Rn [H] Gas
Radon Name Weight
(222)

87 Fr [H] Solid
Francium Name Weight
(223)

88 Ra [H] Solid
Radium Name Weight
(226)

89-103 Ac [H] Solid
Actinium Name Weight
(227)

104 Rf [H] Solid
Rutherfordium Name Weight
(261)

105 Db [H] Solid
Dubnium Name Weight
(262)

106 Sg [H] Solid
Seaborgium Name Weight
(263)

107 Bh [H] Solid
Bohrium Name Weight
(264)

108 Hs [H] Solid
Hassium Name Weight
(265)

109 Mt [H] Solid
Meitnerium Name Weight
(266)

110 Ds [H] Solid
Darmstadtium Name Weight
(267)

111 Rg [H] Solid
Roentgenium Name Weight
(268)

112 Cn [H] Solid
Copernicium Name Weight
(269)

113 Nh [H] Solid
Nihonium Name Weight
(270)

114 Fl [H] Solid
Flerovium Name Weight
(271)

115 Mc [H] Solid
Moscovium Name Weight
(272)

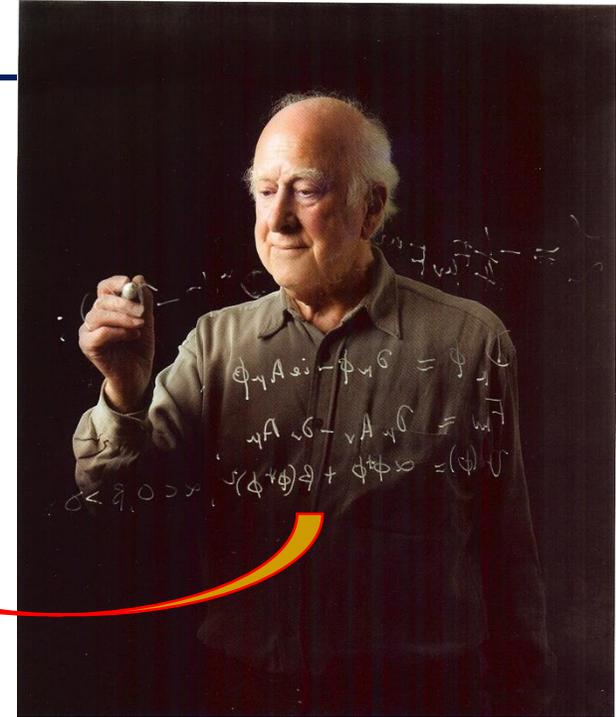
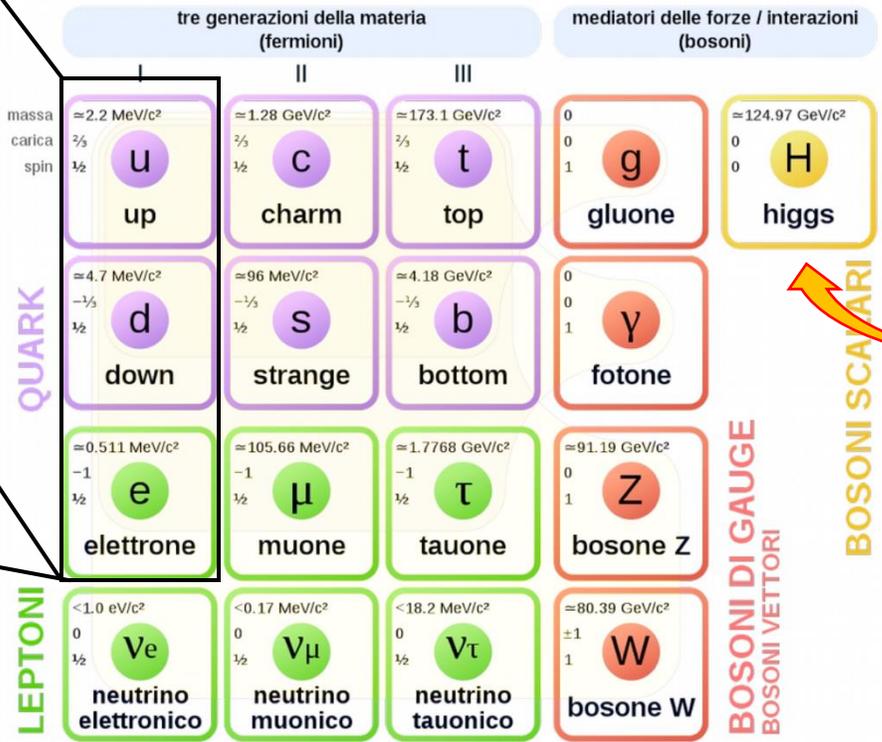
116 Lv [H] Solid
Livermorium Name Weight
(273)

117 Ts [H] Solid
Tennessine Name Weight
(274)

118 Og [H] Solid
Oganesson Name Weight
(276)

For elements with no stable isotopes, the mass number of the isotope with the longest half-life is in parentheses.

Modello Standard delle Particelle Elementari

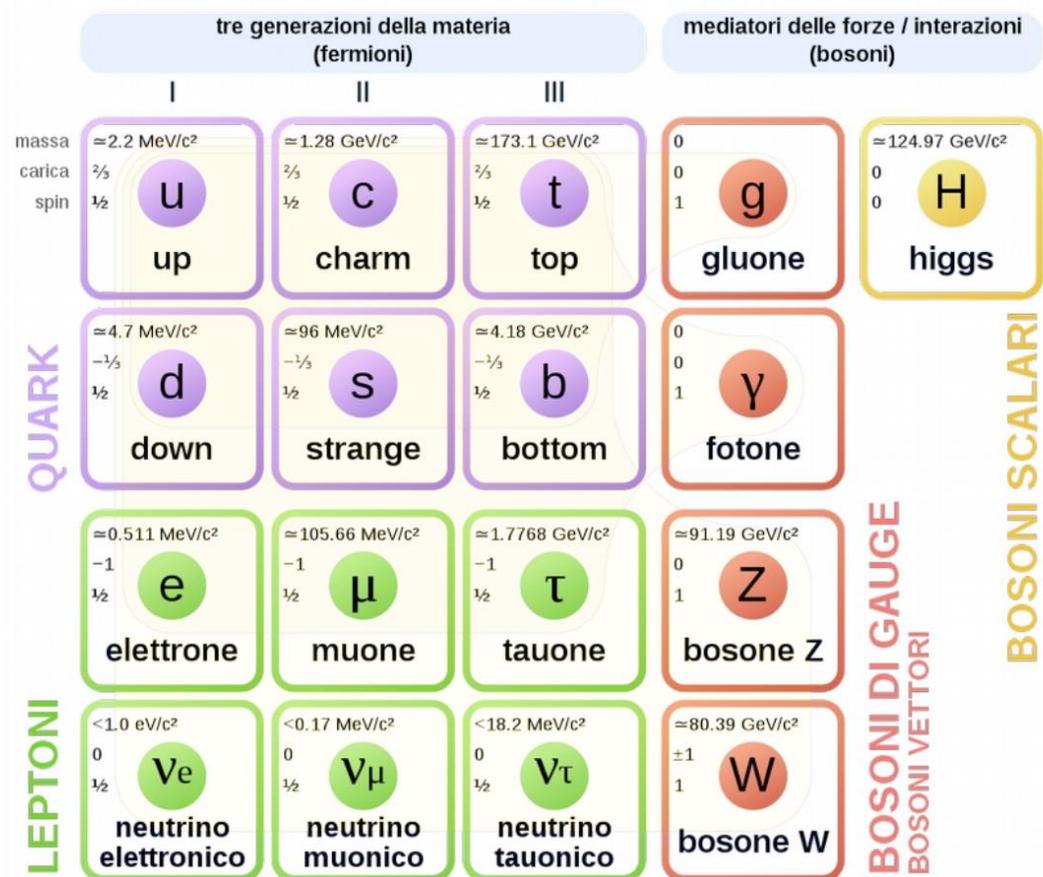


La materia ordinaria è formata essenzialmente da elettroni e quark up e down – Conosciamo bene anche il mediatore della forza elettromagnetica, il fotone. Ma esistono tante altre particelle

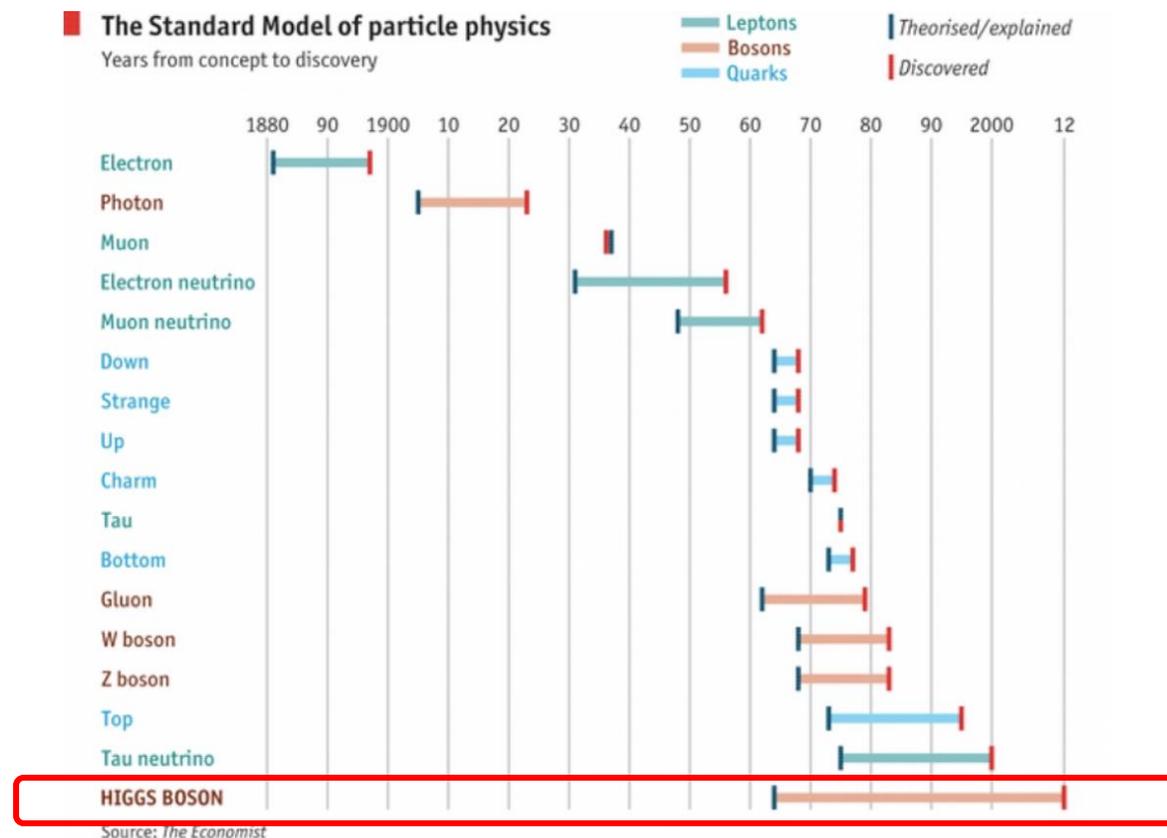
Questo è il quadro completo che conosciamo oggi. Ad ogni particella corrisponde una sua antiparticella

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



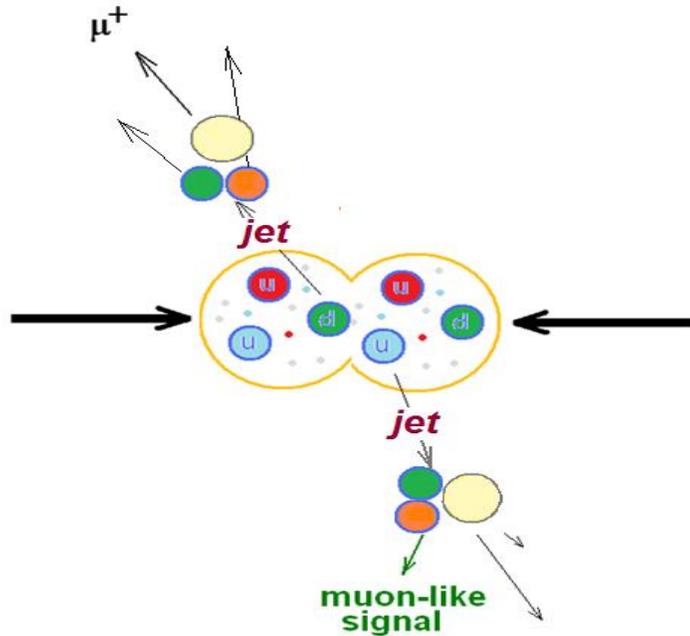
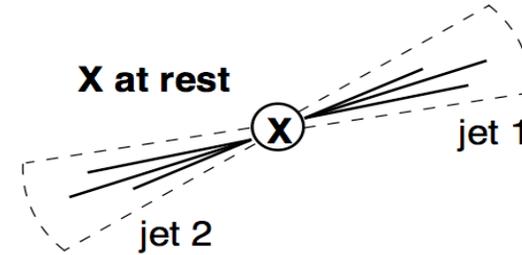
...e come appaiono i quarks ?

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**

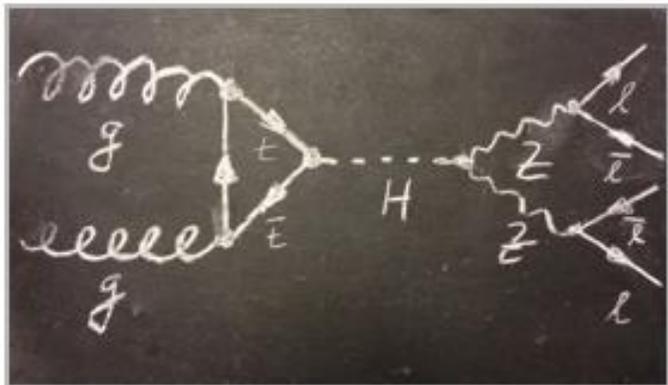
I **jet** possono contenere particelle di ogni tipo, concentrate in una stretta regione angolare

particelle di campo dal vuoto



A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

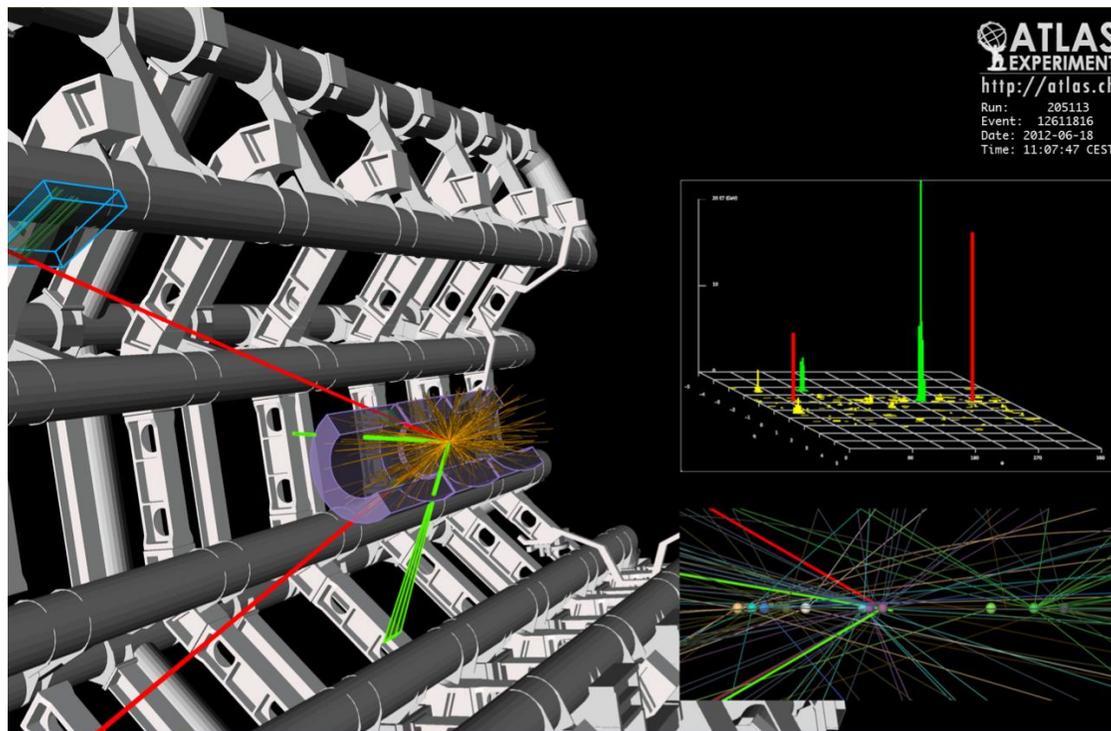
Higgs \rightarrow Z Z \rightarrow 4 leptoni



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

Nello stato finale ci sono 4 leptoni

La massa viene ricostruita combinando le misure di queste 4 particelle

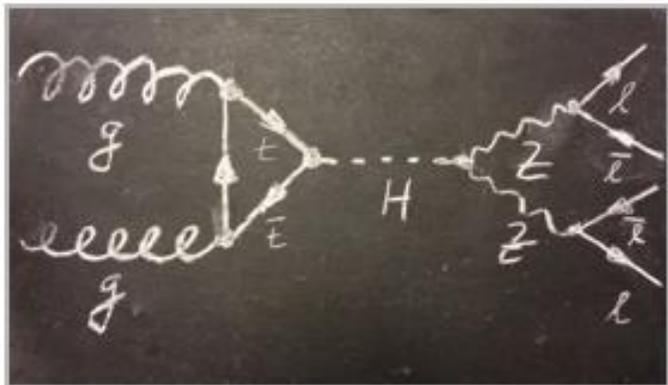


Evento candidato Bosone di Higgs in $2e 2\mu$



A caccia del bosone di Higgs – analisi dei dati

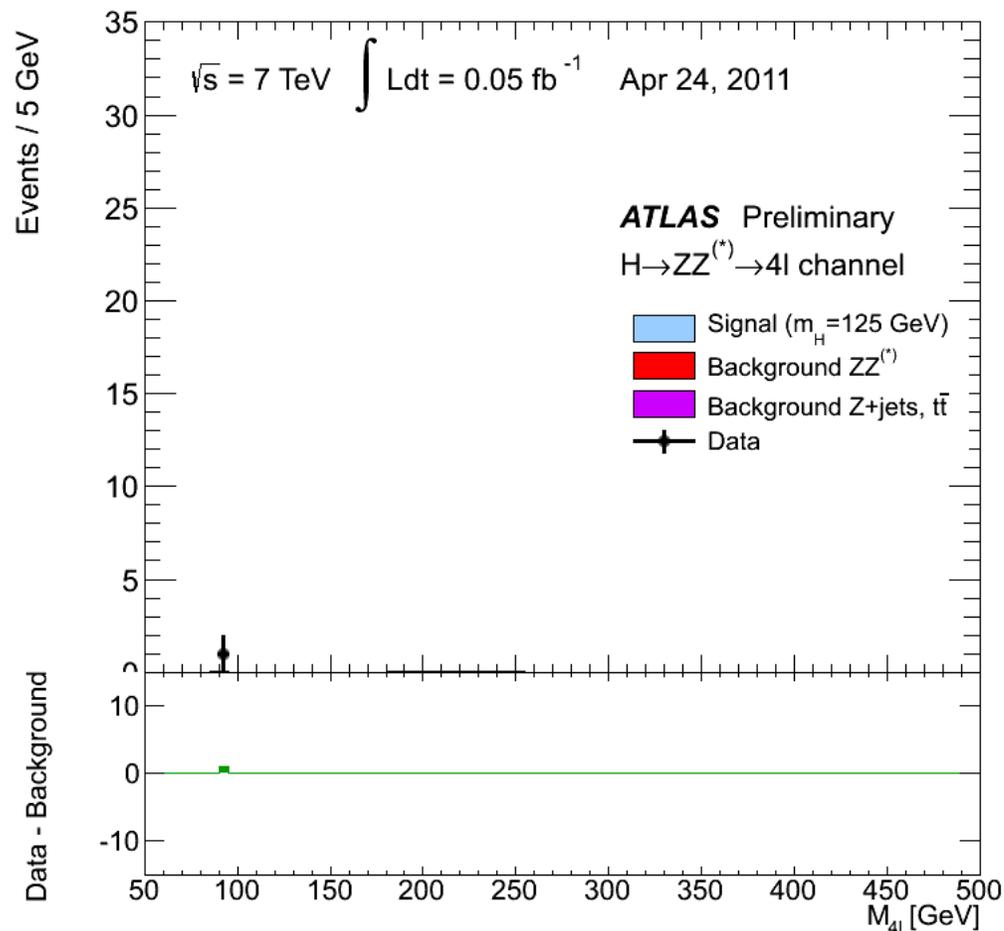
Higgs \rightarrow Z Z \rightarrow 4 leptoni



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

Nello stato finale ci sono 4leptoni

La massa viene ricostruita combinando le misure di queste 4 particelle



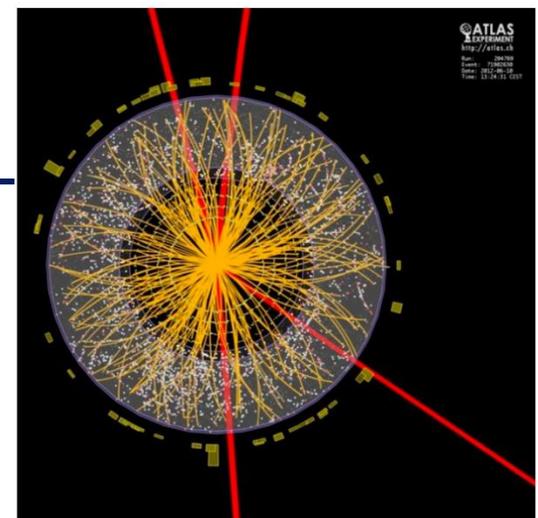
Rivelazione di eventi rari – il bosone di Higgs

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



Osservare un bosone di Higgs – un evento estremamente raro

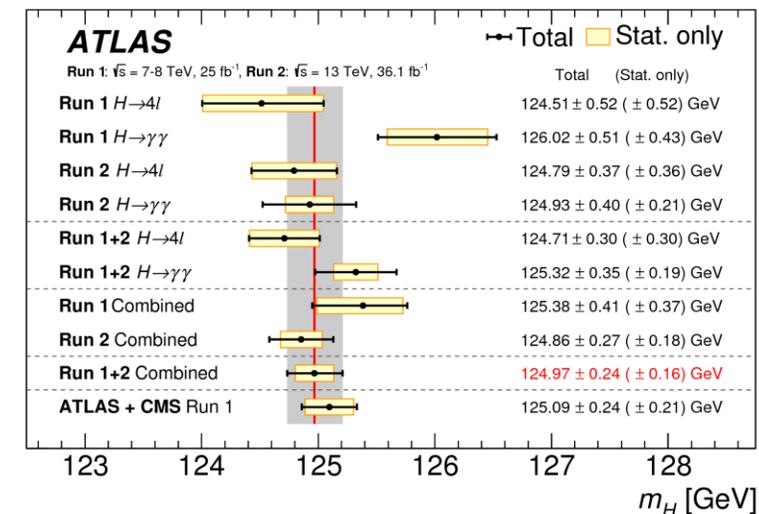


Stessa probabilità di ottenere «testa» in 41 lanci di una moneta

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 !

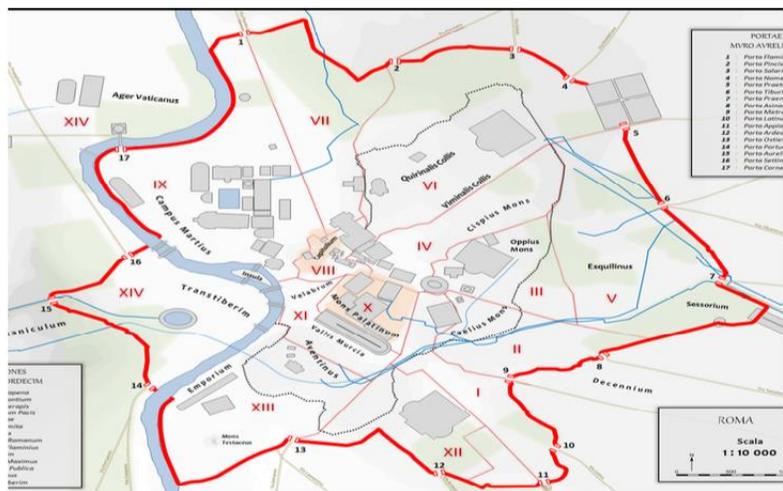
Il 4 Luglio 2022 il bosone di Higgs compie 10 anni!

...stay tuned!

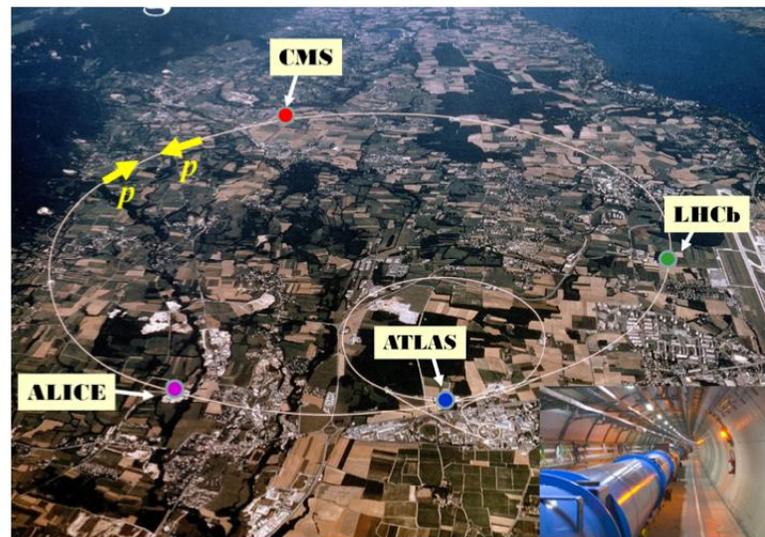
Molti eventi celebreranno questa importante scoperta

LHC: un collider da 27 km

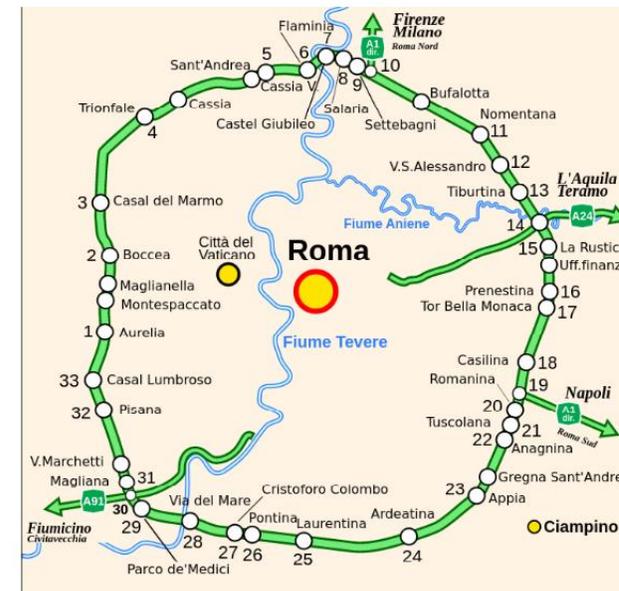
Mura Aureliane
~19 km



Large Hadron Collider
~27 km



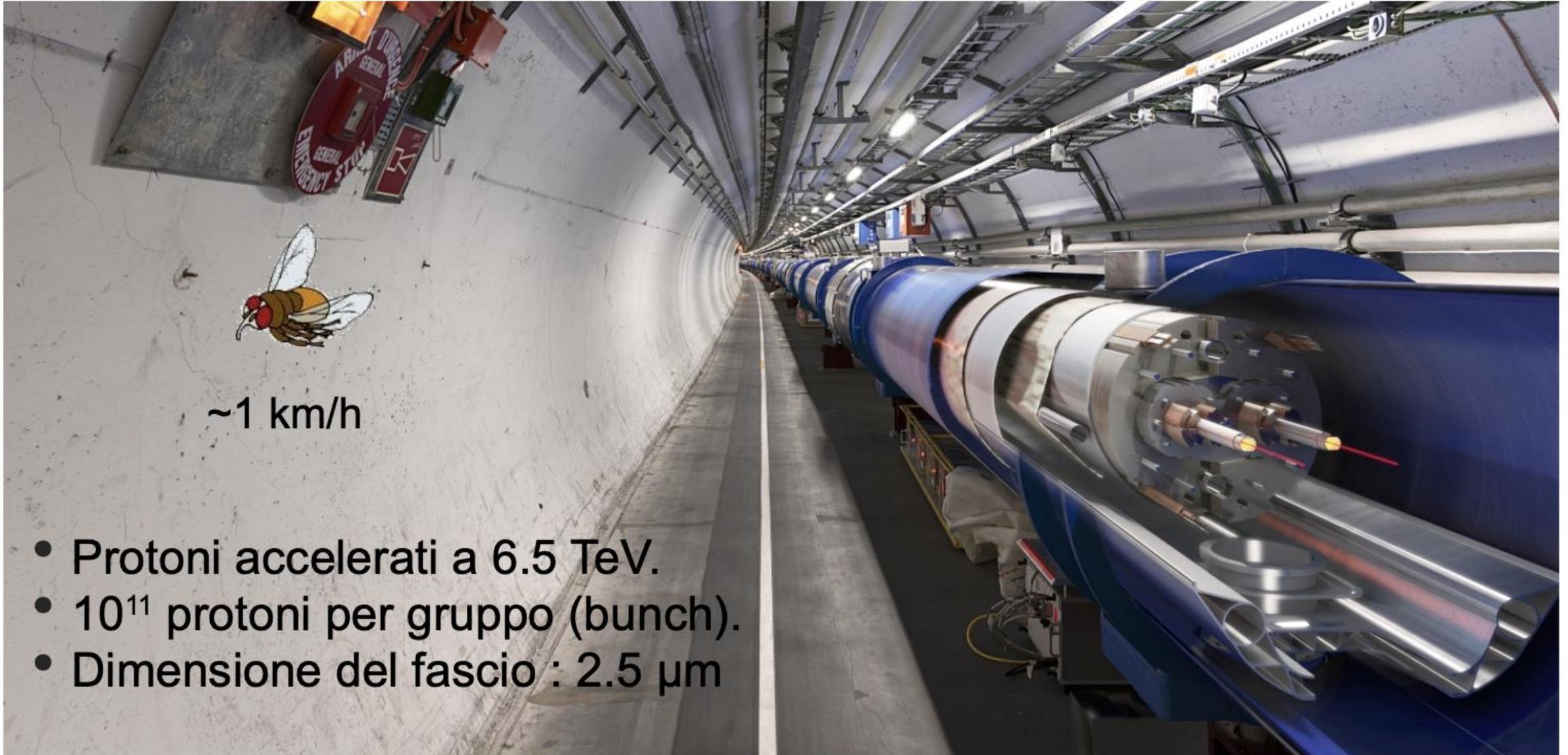
Grande Raccordo Anulare
~68 km



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

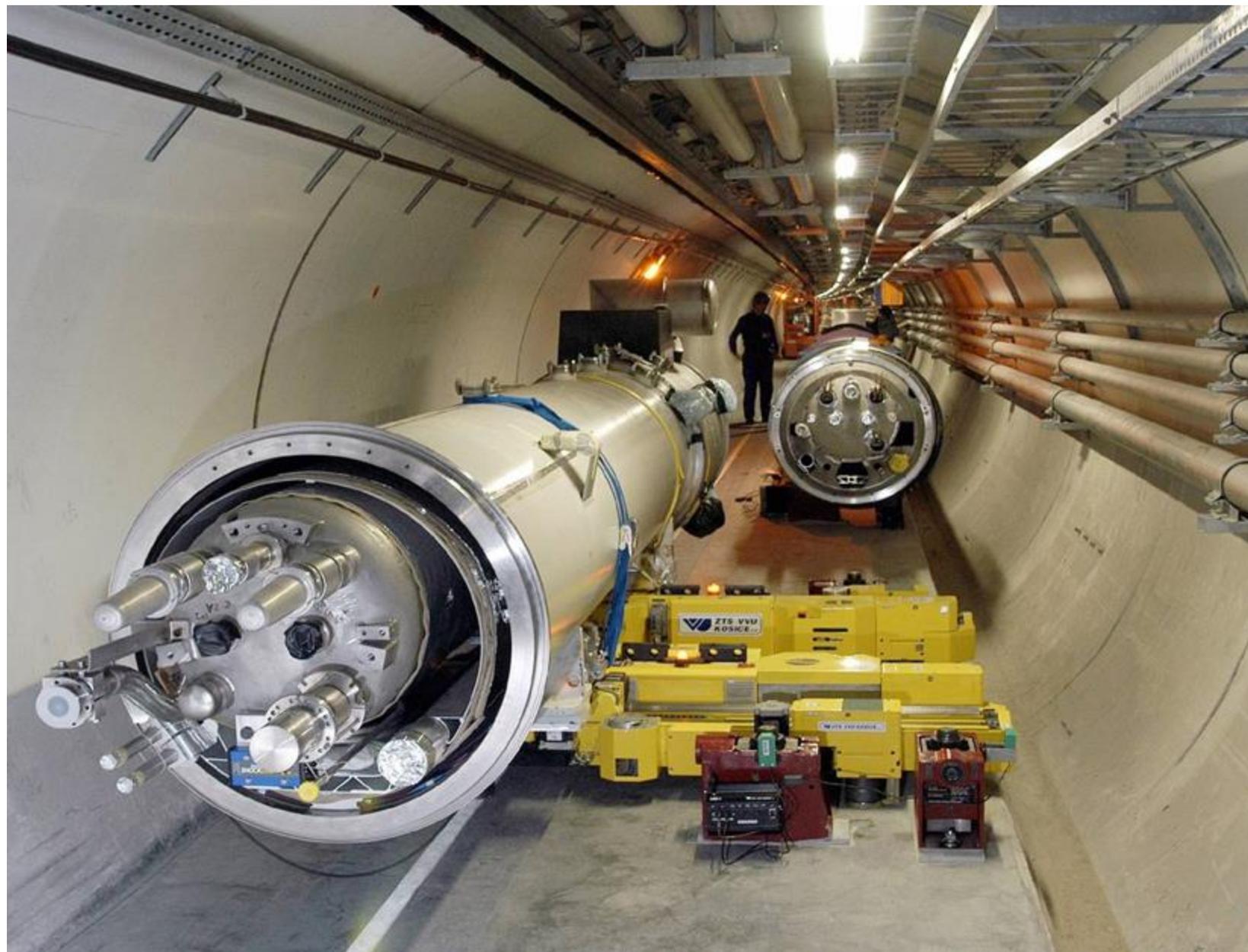
Lo strumento scientifico
più grande del mondo!

Il Large Hadron Collider - LHC

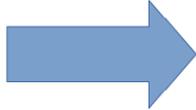


- Protoni accelerati a 6.5 TeV.
- 10^{11} protoni per gruppo (bunch).
- Dimensione del fascio : 2.5 μm

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.

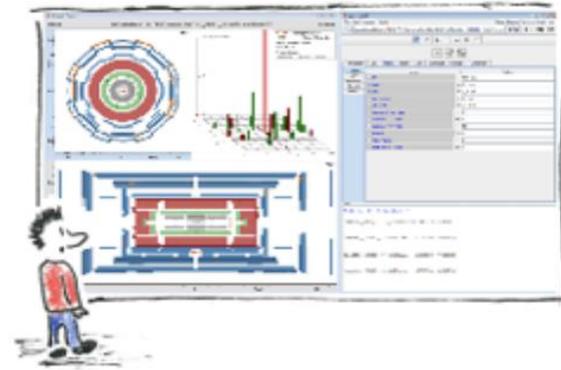
Per ogni euro speso dallo stato italiano per LHC, 1 euro e mezzo e' rientrato come commesse alle industrie italiane.

La ricerca scientifica e' anche un ottimo ritorno economico !

Masterclass



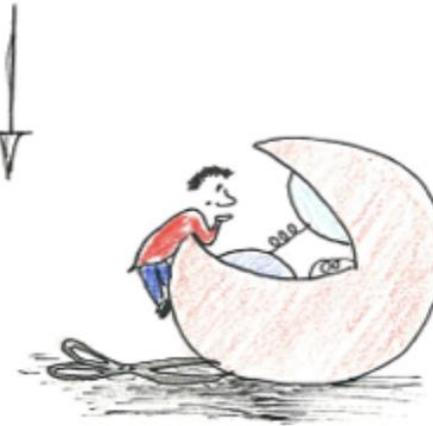
Identifying particles



Identifying events



Looking for the Higgs



Exploring the Proton