La fisica sperimentale

- τά φυσικά = le cose naturali
- Fisici o naturalisti ?

- Osservo e descrivo
- Misuro ed esperimento

- Cosa e' un esperimento ?

Esperimento

- Fare una domanda alla natura e leggere la risposta
- Meglio la domanda e' formulata, piu' la risposta e' utile
  - Non ci sono ricette: aguzzare l'ingegno
- Cosa e' l'elettricita‘ ?
- Se collego questi due fili, la lampadina si accende ?
- Se lascio cadere una palla di legno e una di ferro dalla torre di Pisa, arrivano a terra assieme ?

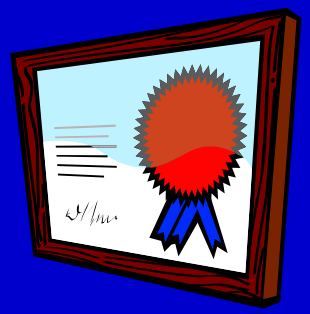
Misura

- Affermazione quantitativa rispetto ad una proprieta' della natura
  - Osservabile
- Ripensiamo al numero di molecole di gas
  - MISURA = NUMERO + INCERTEZZA
- Spesso questa incertezza di chiama errore, ma l’incertezza non e' uno sbaglio !

Lo sbaglio

- Verificare quello che e' stato fatto
  - Mi sono dimenticato qualcosa ?
  - Avere un programma, seguirlo, documentare
  - Documentare = un’altra persona puo’ riprodurre
- Riprovare (riproducibilita')
- Confronto con altre misure
  - Fatte da noi, da altri, con altri strumenti o metodiche
- Discussione con altri sperimentatori
  - Se la stessa cosa ci viene diversa, un motivo ci sara' !
  - Discutere per capire, non per decidere chi ha ragione

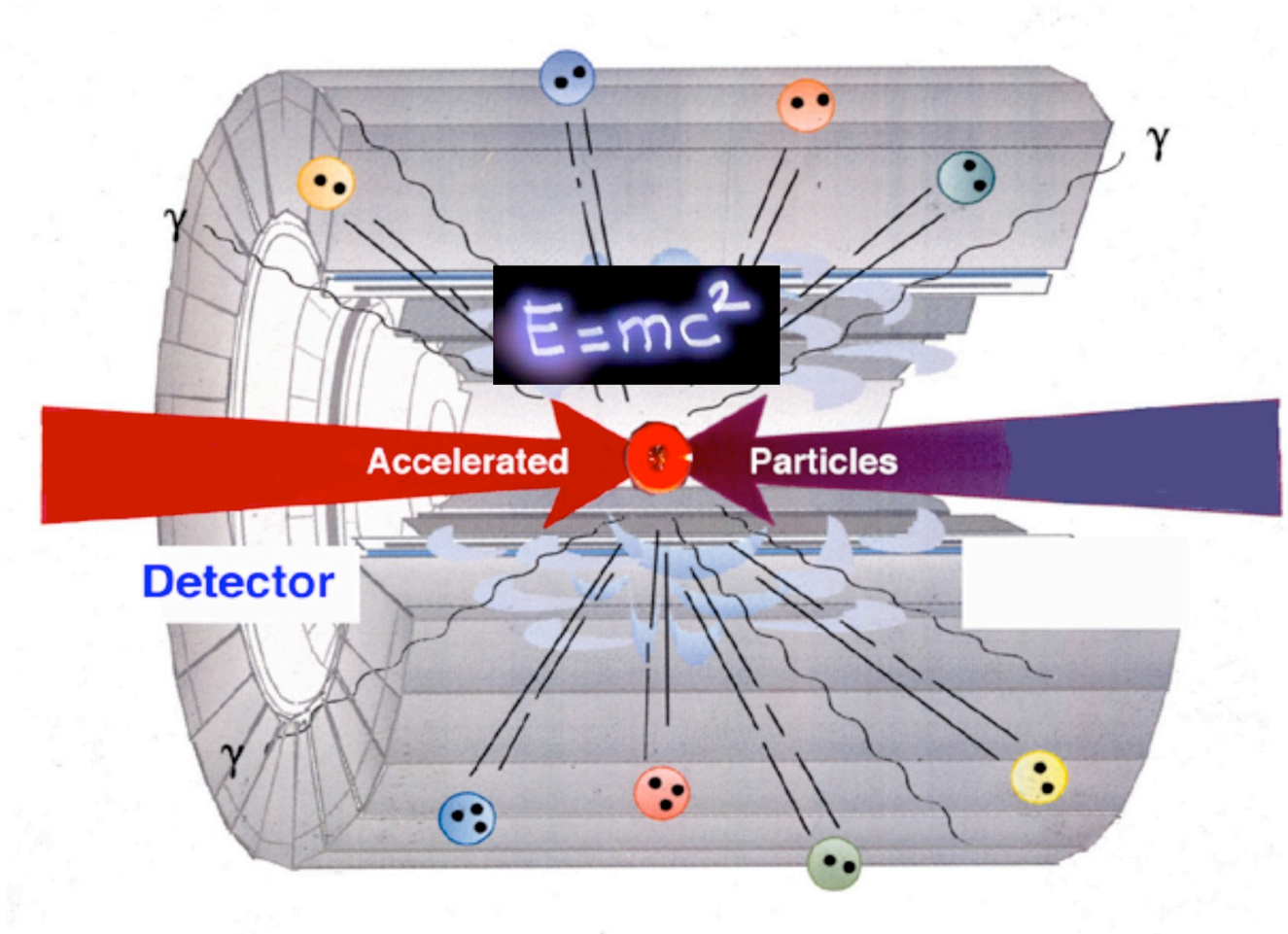
TAPPA 1/6 : noi fisici sperimentali



- Vogliamo fare domande alla natura
- Vogliamo riposte quantitative (misure)
- Vogliamo sapere quanto sono buone
- Il metodo sperimentale:
  - Provare e riprovare
  - Conoscere il proprio strumento
  - Documentare, criticare, discutere, confrontare
    - Procedura definita e documentata ➔ verifica e automatizzazione
  - Non dare nulla per scontato (ma fare tesoro delle cose capite)
- La parola magica: “ Perche’ ? ”

Come produciamo le particelle da rivelare?

- Einstein ci ha insegnato che massa ed energia sono equivalenti: $\boldsymbol{E = mc^2}$.
- Accelerando ad alte energie e facendo collidere due fasci di particelle



lo studio dei prodotti della collisione consente di investigare i costituenti fondamentali della materia e capire le forze che agiscono tra di loro.

Quali particelle sono prodotte?

esiste uno zoo di particelle diverse!

più alta è l'energia della collisione, più particelle “pesanti” possono essere prodotte!

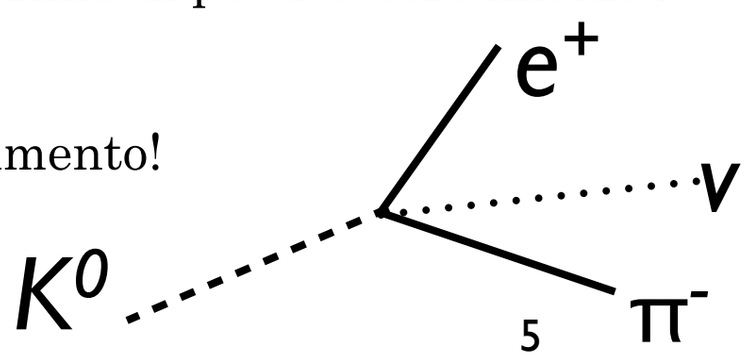
- La maggior parte delle particelle elementari sono *instabili*, cioè dopo un certo periodo di tempo si disintegrano spontaneamente in particelle più leggere (si dice che “decadono”).

Le particelle *stabili* vivono abbastanza a lungo da poter essere in rivelate

- elettroni (simbolo ***e***);
- muoni (simbolo μ), sono come gli elettroni ma 200 volte più pesanti;
- adroni carichi e neutri (particelle composte da ***quark***);
- fotoni (simbolo γ);
- neutrini (simbolo υ), leggerissimi e neutri.

particelle “**instabili**”: decano prima di poter essere misurate

...ma possiamo ricostruirle
dai frammenti del loro decadimento!



pione + elettrone + neutrino = kaone

Cosa misuriamo?

le particelle elementari sono caratterizzate da diverse proprietà
- massa
- carica elettrica
- spin
- *sapore, colore*

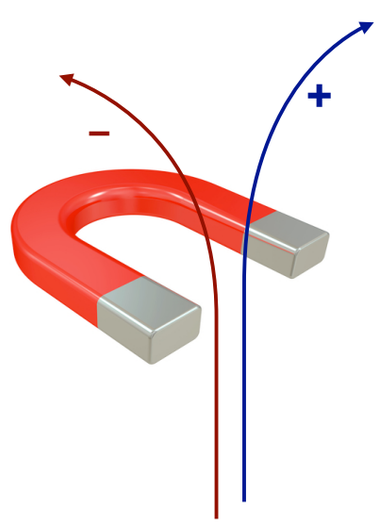
NUMERI QUANTICI

cosa possiamo misurare di queste particelle?

- dove si trovano e quando (posizione a un certo tempo)
- il loro impulso $\mathbf{p = mv \cdot 1/\sqrt{(1-v^2/c^2)}}$
- la loro energia $\mathbf{E^2 = p^2c^2 - m^2c^4}$
- la carica elettrica

serve la teoria della relatività: le particelle sono accelerate a velocità vicine a quelle della luce, 99,9999% !

Misurare l'impulso e la carica elettrica: sfruttiamo l'elettromagnetismo!



- particelle cariche dentro un campo magnetico B percorrono traiettorie circolari di raggio R

$p = 0.3 \cdot B \cdot R$

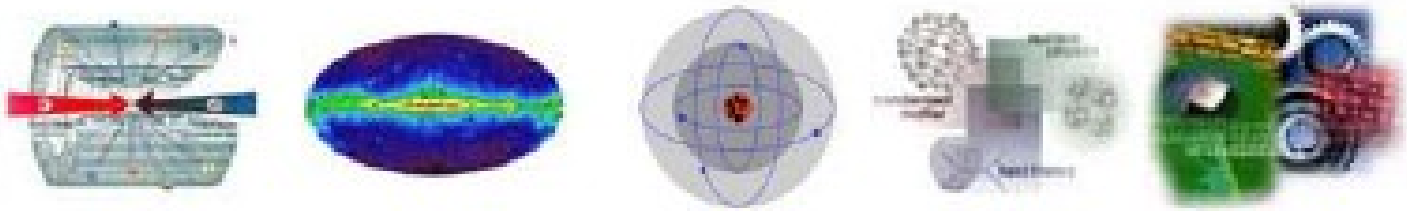
- attraverso i materiali le particelle rilasciano piccole quantità di energia che misuriamo

INFN, cos'è ?

dal nostro sito WEB

- " L'INFN, Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, è l'istituto che promuove, coordina ed effettua la ricerca scientifica nel campo della fisica subnucleare, nucleare e astroparticellare, nonché lo sviluppo tecnologico necessario alle attività in tali settori. Opera in stretta connessione con l'Università e nell'ambito della collaborazione e del confronto internazionale. "

- Le attività di ricerca sono così raggruppate:



FISICA PARTICELLARE | FISICA ASTROPARTICELLARE | FISICA NUCLEARE | FISICA TEORICA | RICERCA TECNOLOGICA

INFN, perchè?

dal nostro sito WEB

- " L'INFN venne istituito l'8 agosto 1951 da gruppi delle Università di Roma, Padova, Torino e Milano al fine di proseguire e sviluppare la tradizione scientifica iniziata negli anni '30 con *le ricerche teoriche e sperimentali di fisica nucleare di Enrico Fermi e della sua scuola."*

- La ricerca in fisica nucleare e (successivamente) delle particelle ha bisogno di STRUTTURE e di risorse per realizzarle:
  - *Laboratori*
  - *Officine*
  - *Personale tecnico (e amministrativo)*

INFN - struttura

- 4 Laboratori Nazionali
  - LNL – Laboratori Nazionali di Legnaro
  - LNGS - Laboratori Nazionali del Gran Sasso
  - LNF - Laboratori Nazionali di Frascati
  - LNS - Laboratori Nazionali del SUD
- 20 "Sezioni" c/o 20 Università (fra cui Trieste)
- 11 "Gruppi Collegati", c/o Università (fra cui Udine, che è Gruppo collegato di Trieste)

il CERN

Centre Européenne pour la Recherche Nucléaire

IERI

il primo esempio di collaborazione tra paesi europei del dopoguerra

il tentativo di ricreare una scuola in un settore dove prima del 1938 c'era supremazia

partecipazione a pieno titolo alla competizione dei grandi acceleratori di particelle

OGGI

il piu' importante laboratorio al mondo per la ricerca nel campo della fisica delle particelle elementari

1949 prima proposta per un laboratorio europeo

L. de Broglie

1950 proposta all'UNESCO

1952 scelta della sede di Ginevra

E. Amaldi nominato Segretario Generale del CERN

1954 ratifica della convenzione tra i 12 Stati Fondatori

Repubblica Federale Tedesca, Belgio, Danimarca, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Olanda, Gran Bretagna, Svezia, Svizzera, Iugoslavia

obiettivo: ricerca fondamentale

costruire l'acceleratore di protoni più potente del mondo

CPS = CERN Proton Synchrotron

focalizzazione forte: TECNICA NUOVA !

1957 entra in funzione il SincroCiclotrone

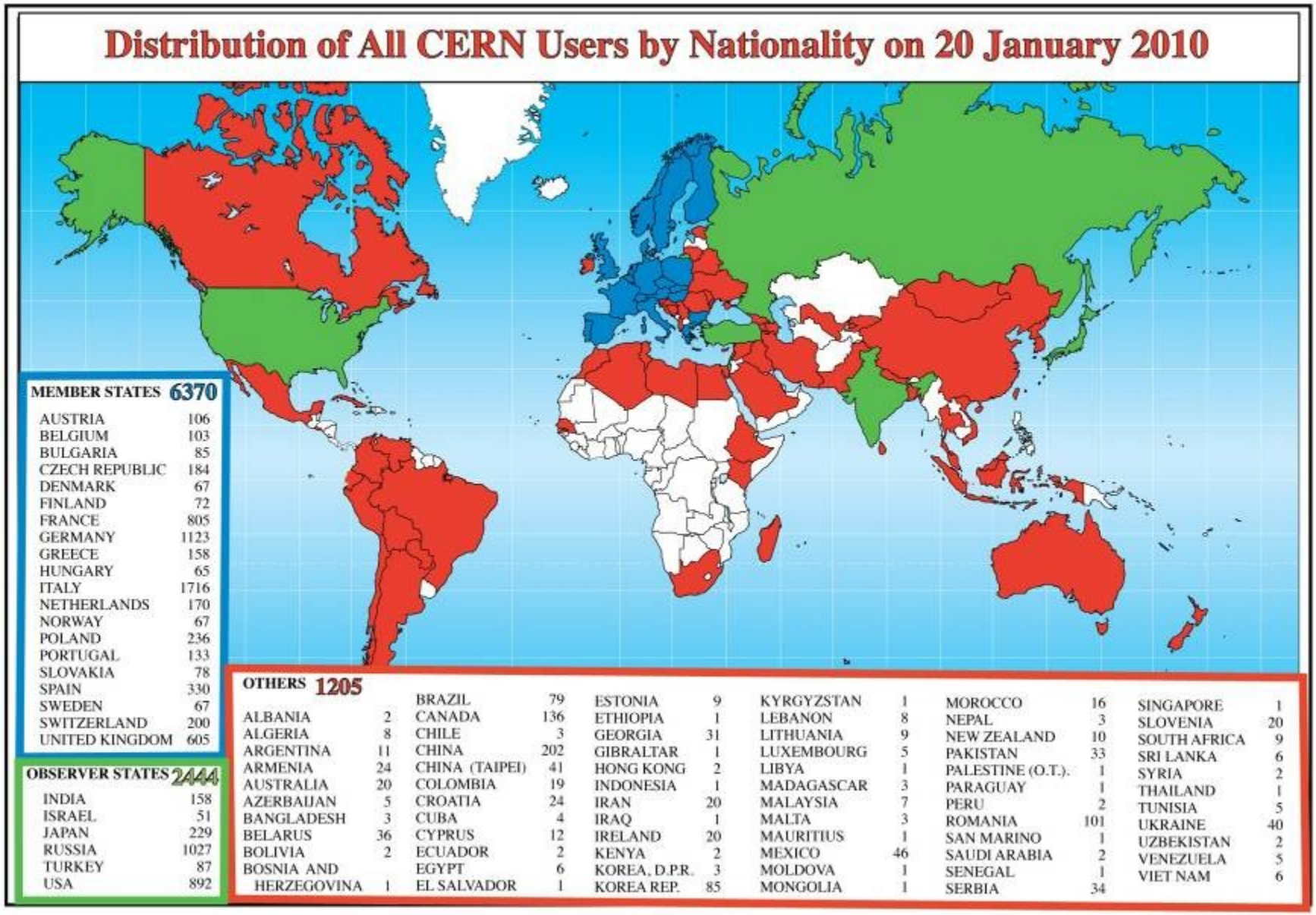
1959 entra in funzione il ProtoSincrotrone

il CERN è gestito da 20 Stati Membri europei

gli Stati Membri hanno doveri e privilegi speciali:

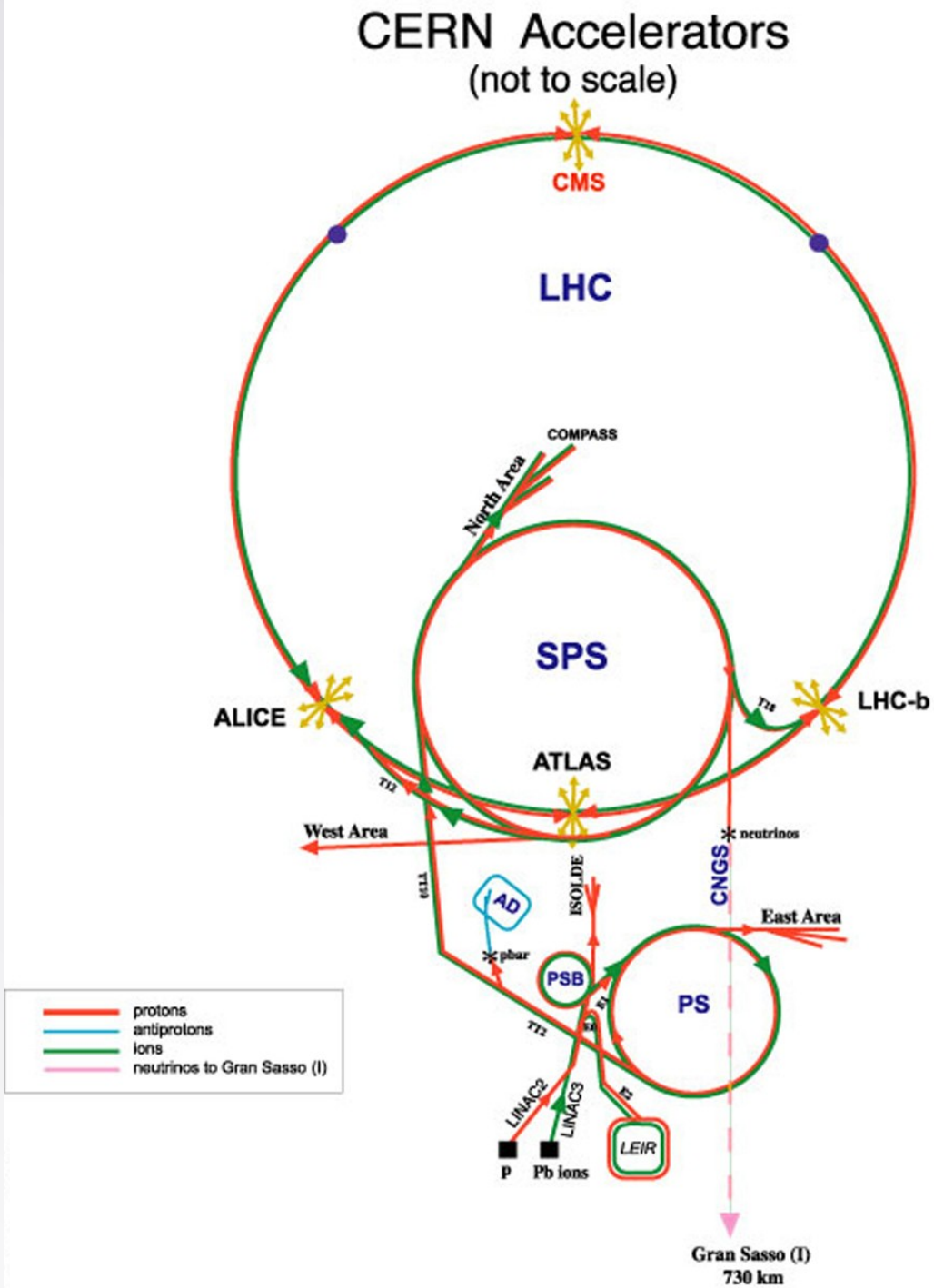
- **contribuiscono ai costi dei programmi del CERN**
- **sono rappresentati nel Council, responsabile per tutte le decisioni importanti sul Laboratorio e le sue attività**

e partecipano anche Paesi non europei:



il complesso degli acceleratori al CERN

il complesso degli acceleratori al CERN



Il Large Hadron Collider al CERN

Large perché è lungo 27 km ed è costituito da oltre 1600 magneti
Hadron perché accelera fasci di adroni: protoni e/o nuclei di piombo;
Collider perché fa collidere le particelle che accelera.

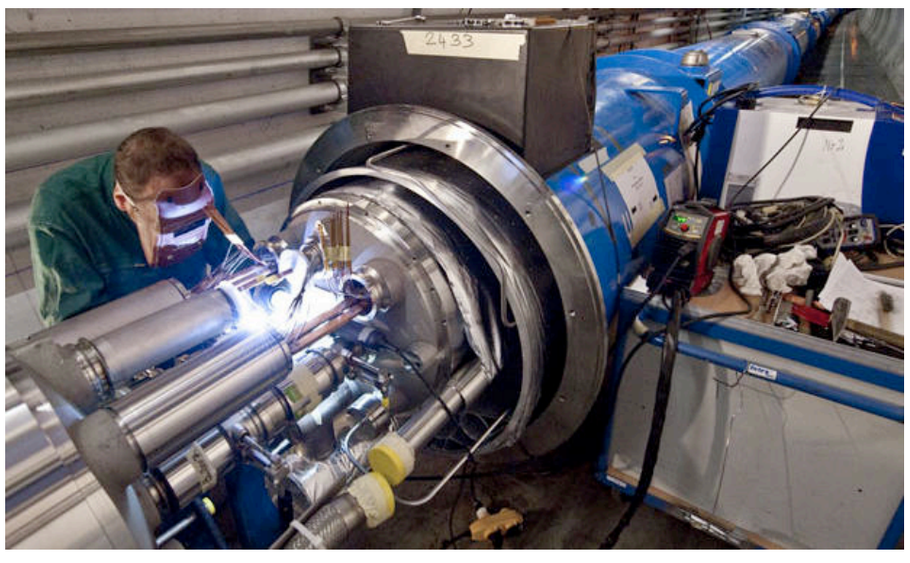
LHC: Istruzioni per l'uso

- Due fasci di protoni circolano in tubi sotto vuoto in direzioni opposte.

- Campi elettrici molto intensi accelerano i fasci di protoni a un'energia di 4000 GeV e velocità 99,9999% di quella della luce.

- Potenti magneti superconduttori, mantenuti alla temperatura di -271,25 °C

[temperatura più fredda dell'Universo]



sono usati per focalizzare i fasci e farli curvare.

[1 milione di volte piu' forte del campo magnetico terrestre]

- I fasci di protoni sono fatti collidere 40.000.000 / s

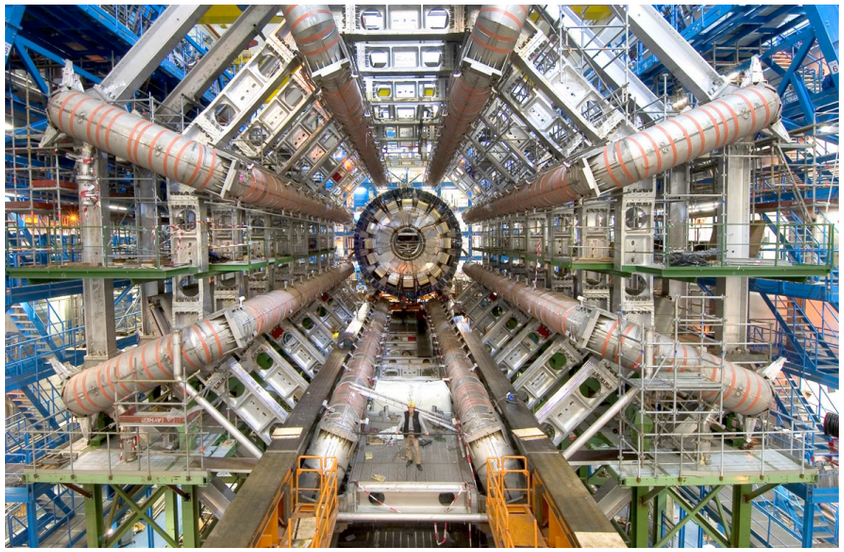
[raggiungendo una temperatura 100000 volte piu' alta del centro del sole]

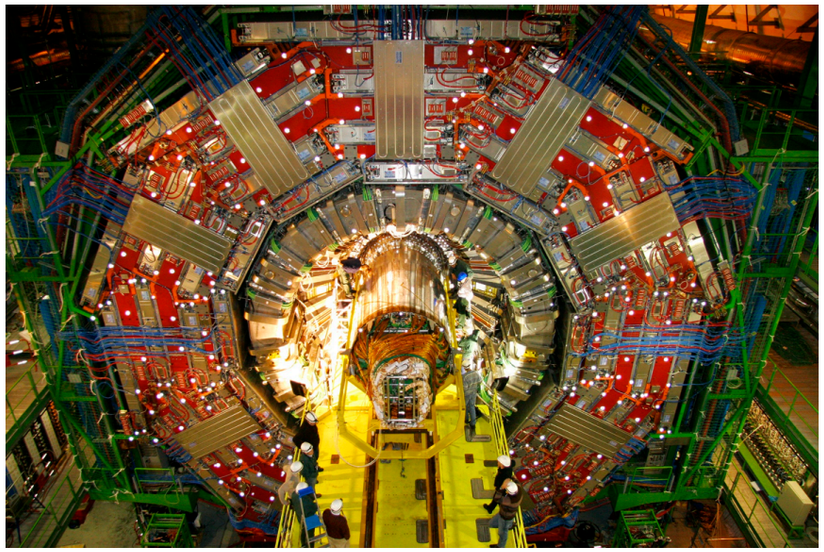
I quattro esperimenti di LHC

I fasci di protoni/nuclei di Pb collidono in corrispondenza di quattro rivelatori:

due esperimenti “general purpose”, progettati cioè per studiare tutti i processi di fisica accessibili a LHC, e ottimizzati per scoprire nuovi fenomeni:

ATLAS

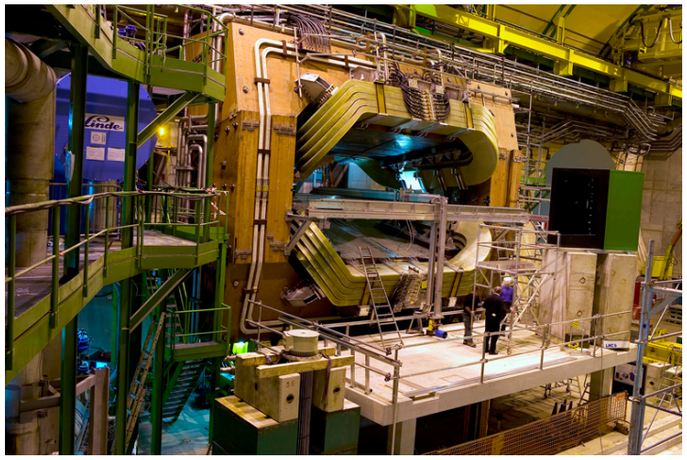


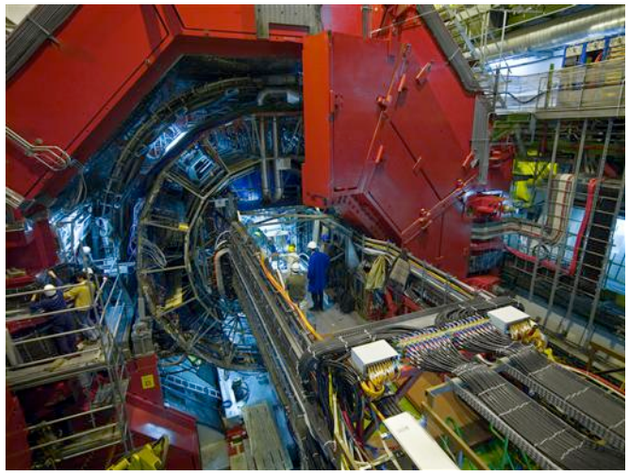


CMS

due esperimenti specializzati per studiare processi particolari di fisica:

ALICE
per studiare
le collisioni
tra ioni Pb





LHCb
per studiare
i quark *beauty*

CMS: magnete superconduttore di 223.5 t

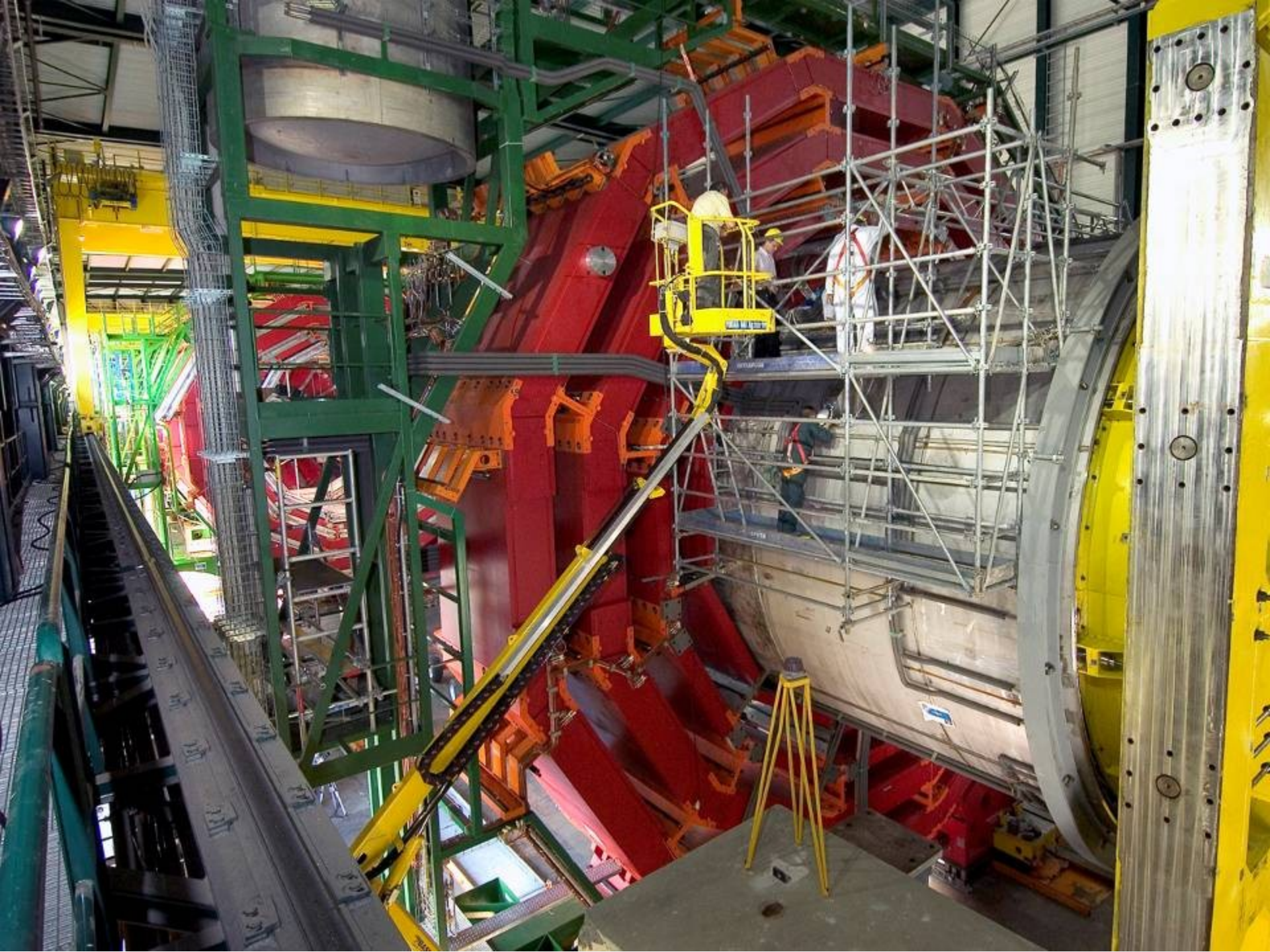
- 14.5 t di cavo superconduttore
- 74 t di Al puro
- 126 t di lega di Al
- 9 t di isolante

I = 20,000 A

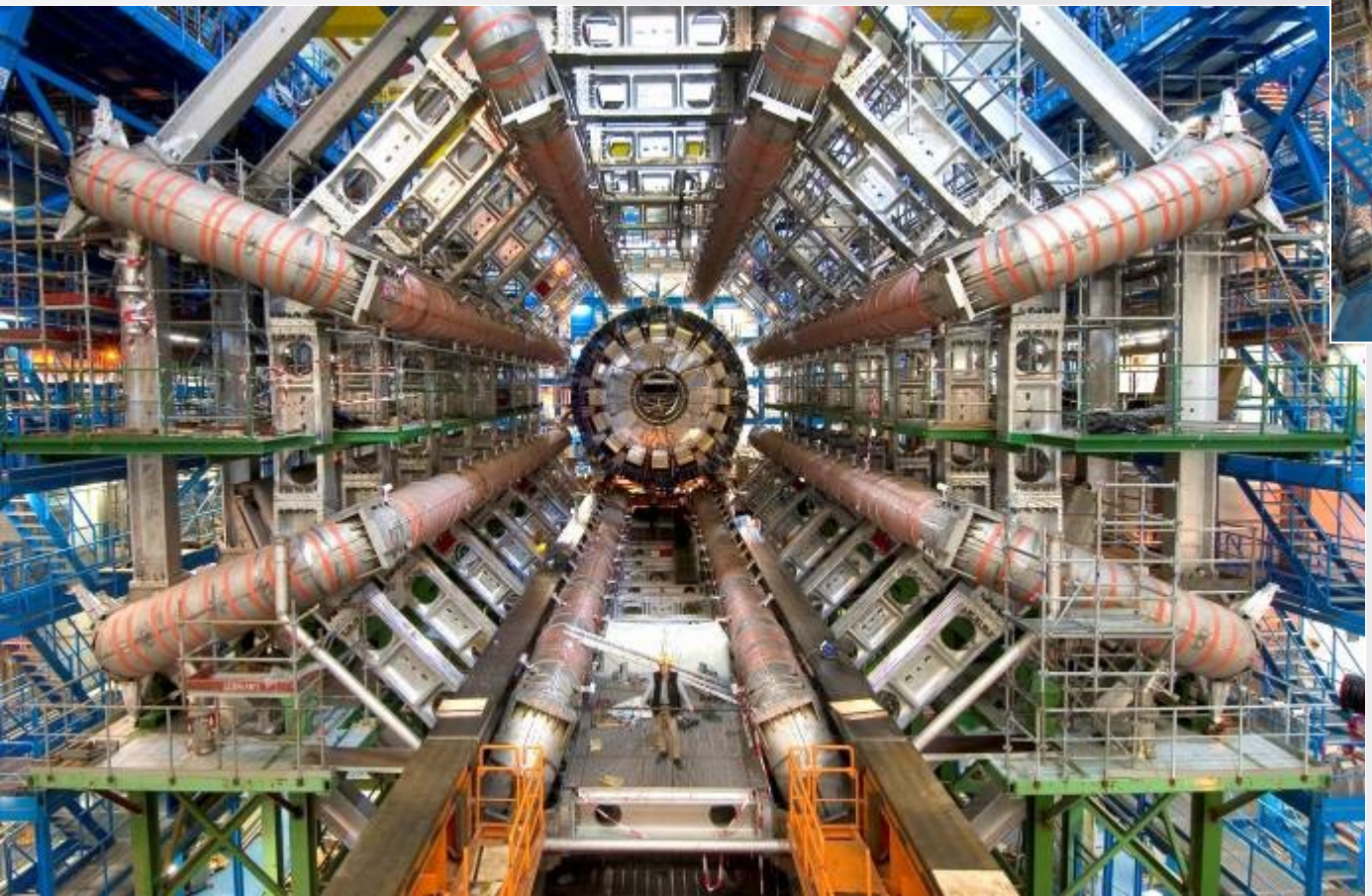
B = 4 T (100000 volte il campo magnetico terrestre)

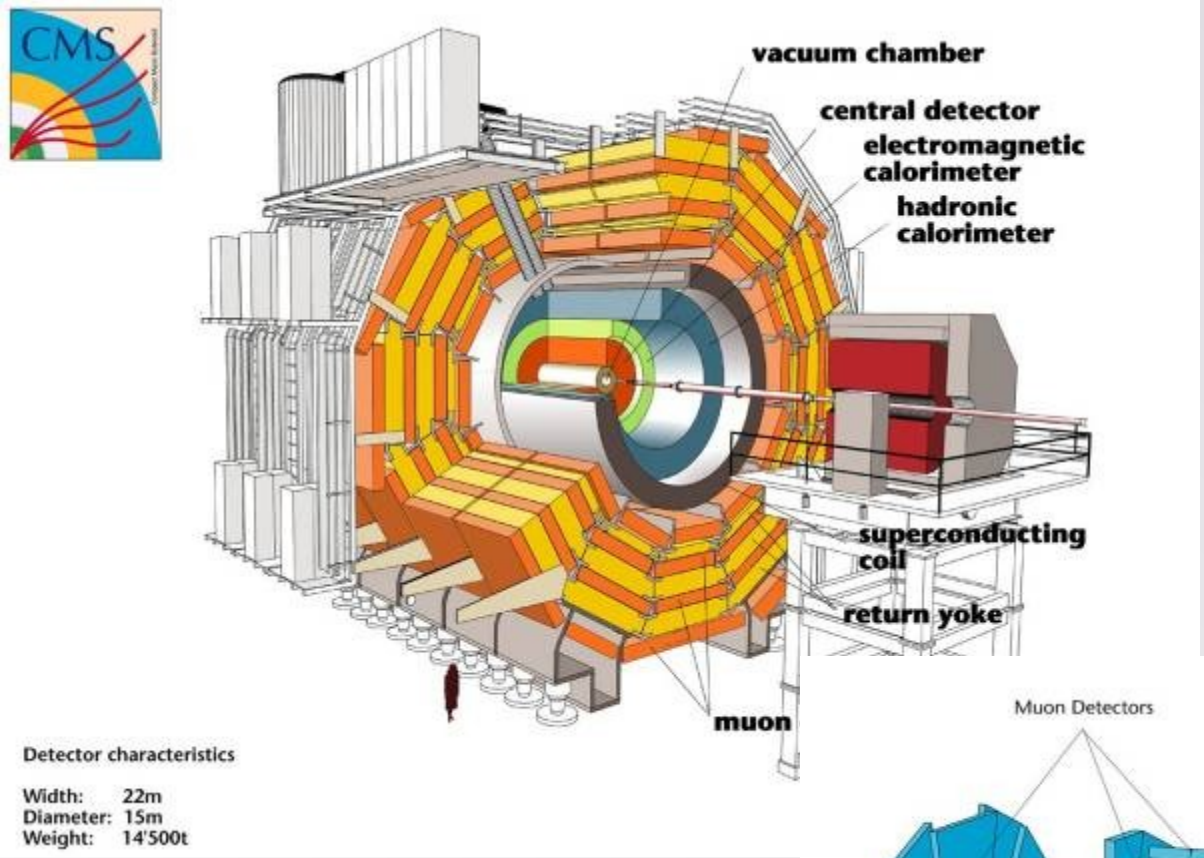
E = 2.7 GJ

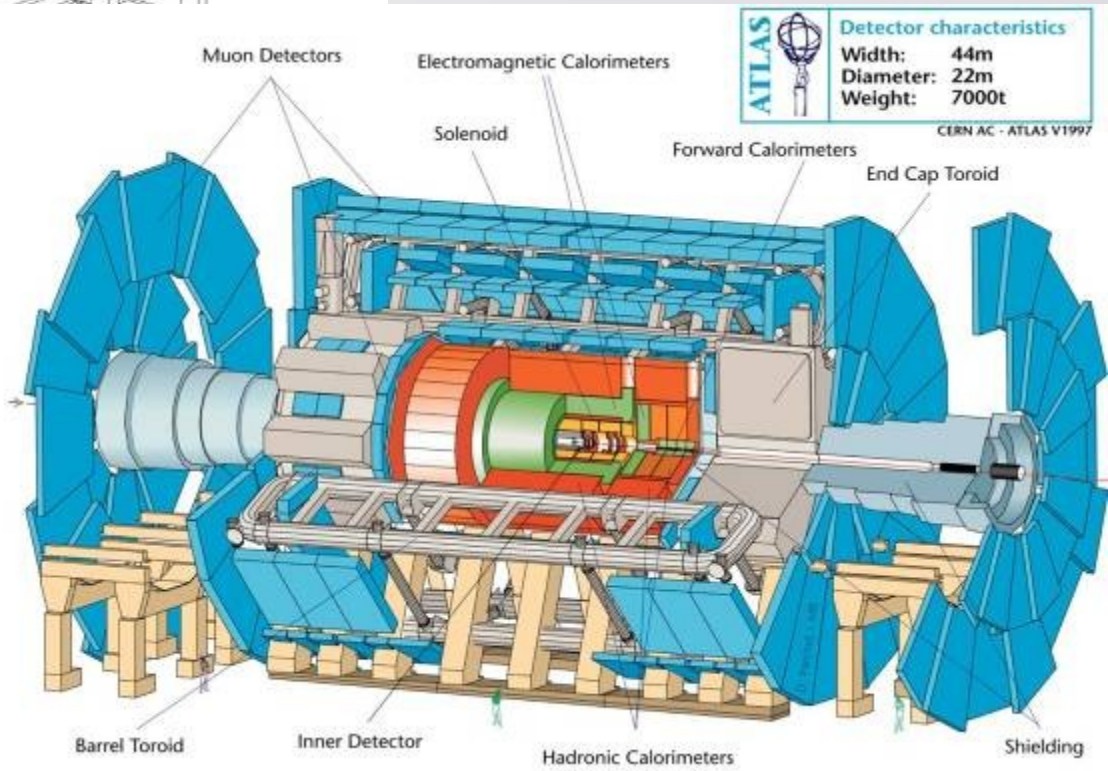
(sufficienti a liquefare 18 t di oro)



il magnete di ATLAS

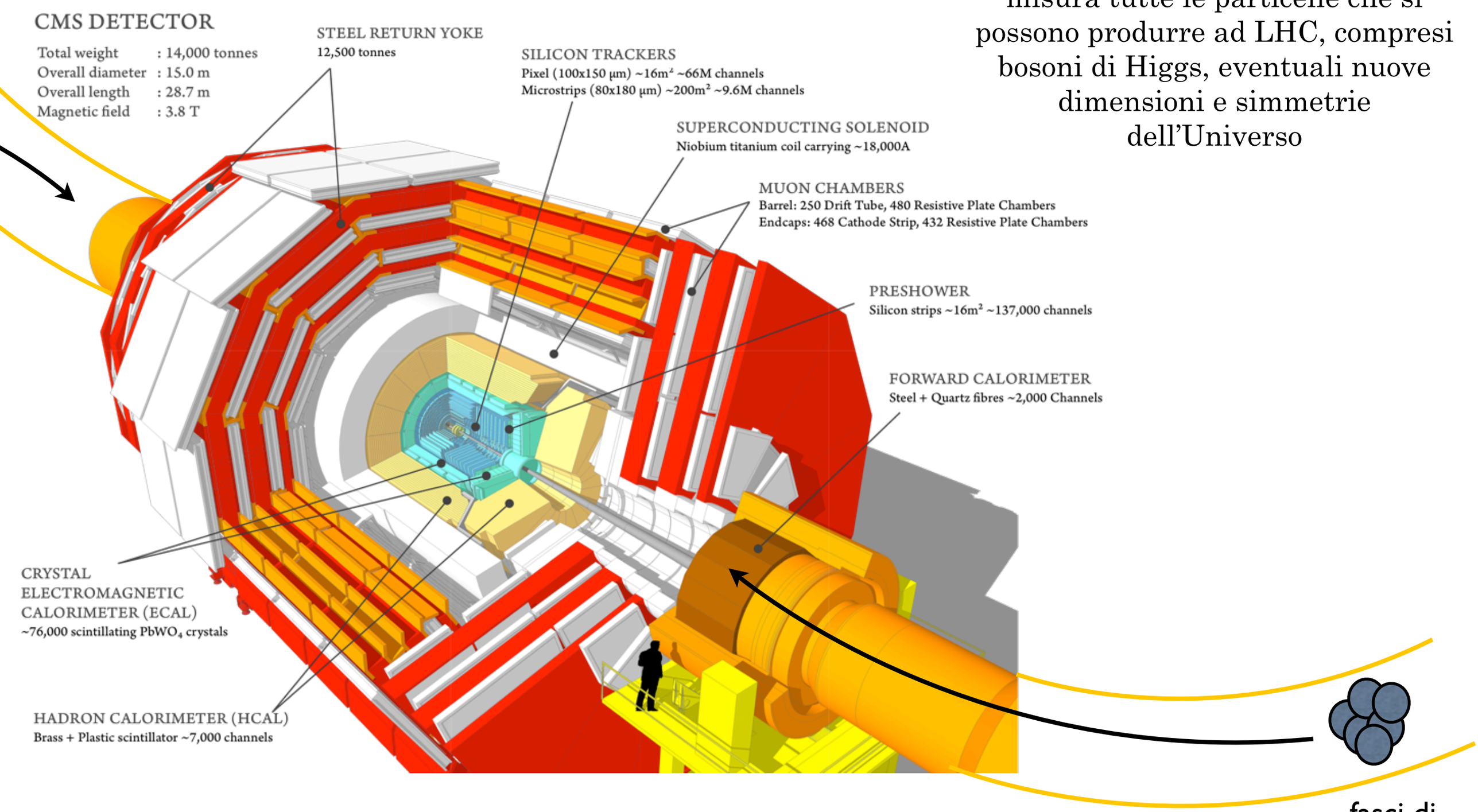



vacuum chamber
central detector
electromagnetic calorimeter
hadronic calorimeter
superconducting coil
return yoke
muon
Detector characteristics
Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t


ATLAS
Detector characteristics
Width: 44m
Diameter: 22m
Weight: 7000t
CERN AC - ATLAS V1997
Muon Detectors
Electromagnetic Calorimeters
Solenoid
Forward Calorimeters
End Cap Toroid
Barrel Toroid
Inner Detector
Hadronic Calorimeters
Shielding

Il Compact Muon Solenoid (CMS)

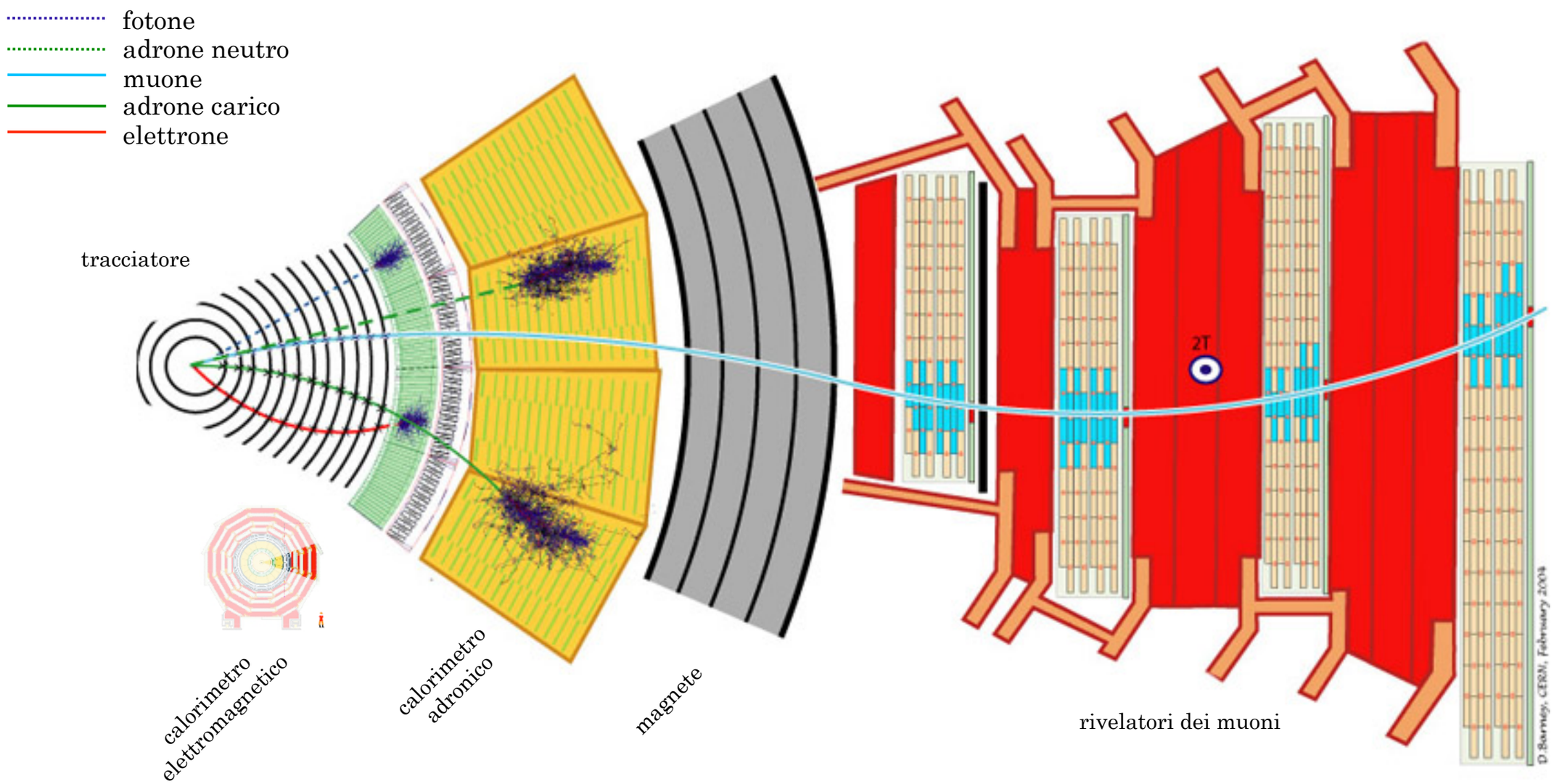
misura tutte le particelle che si possono produrre ad LHC, compresi bosoni di Higgs, eventuali nuove dimensioni e simmetrie dell'Universo



- peso: 12500 tonnellate
- diametro: 15 metri
- lunghezza: 21,6 metri

Cosa succede dentro CMS?

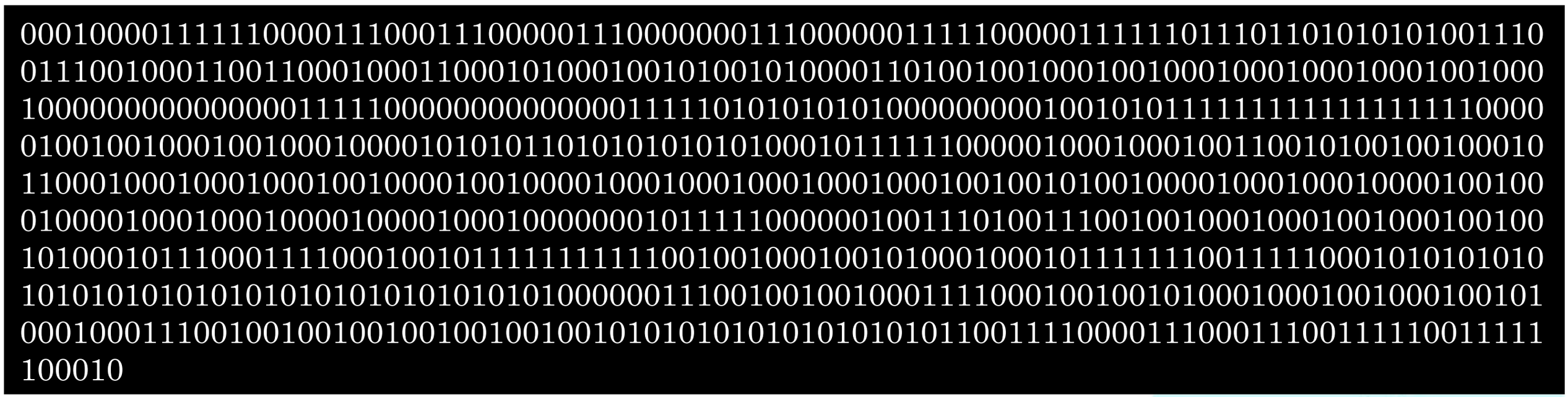
Le particelle che attraversano CMS dal centro verso l'esterno interagiscono a seconda del tipo coi diversi sotto-rivelatori.



Cosa ci trasmette CMS?

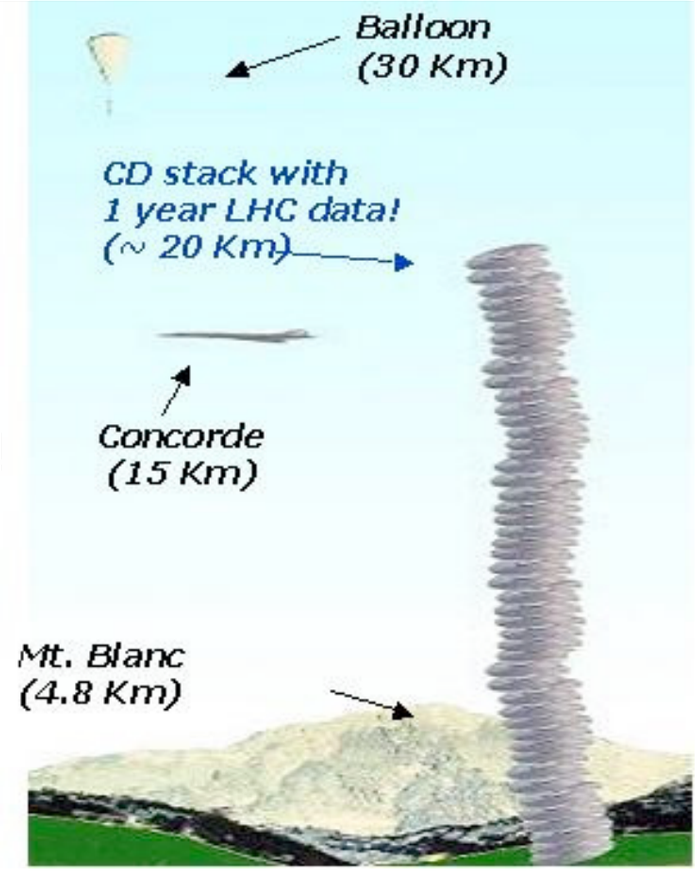
I segnali raccolti dai sotto-rivelatori ad ogni collisione

sono convertiti in formato binario e registrati.



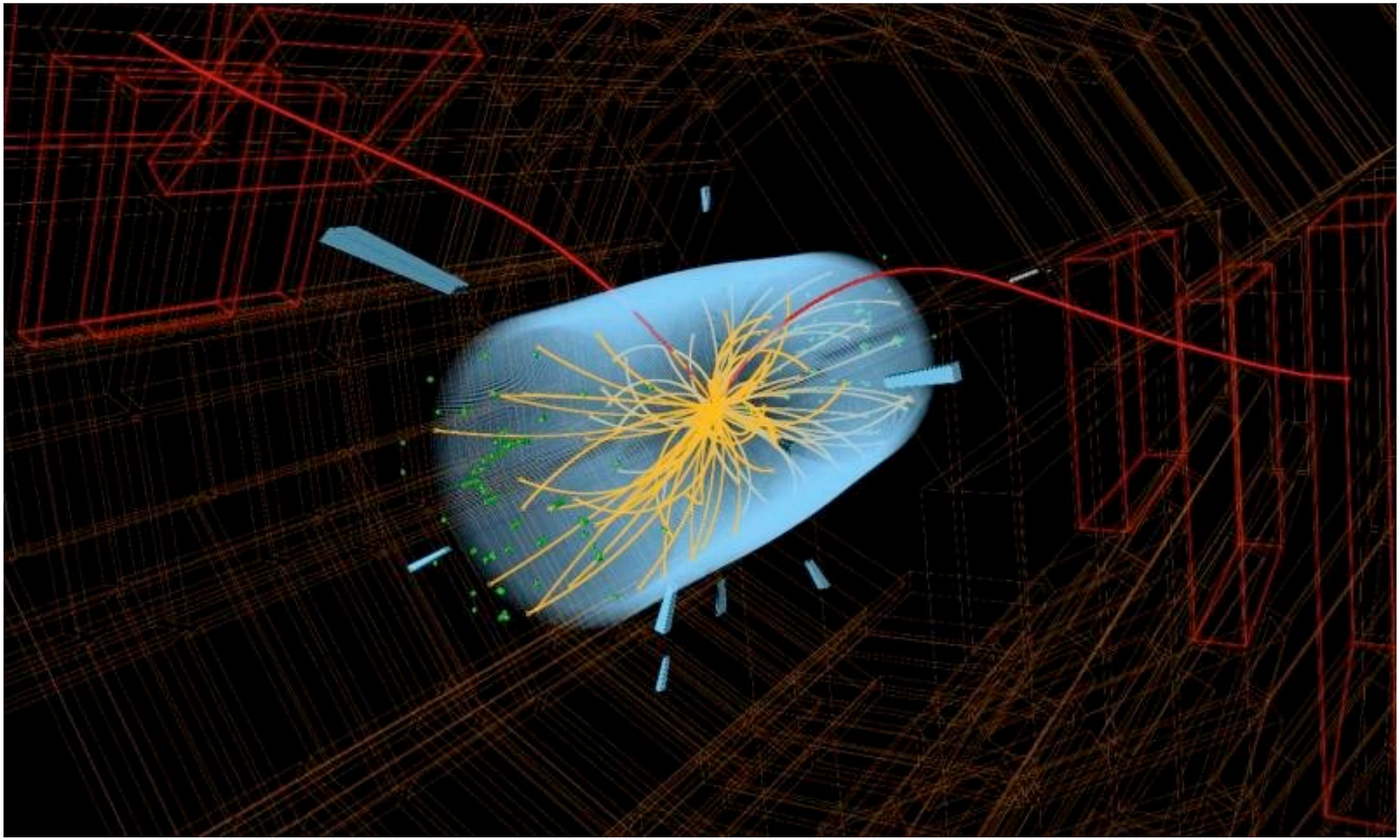
- CMS è come una fotocamera digitale da 78 Megapixels che scatta 40.000.000 di foto al secondo!!

- Ogni secondo vengono prodotti circa 300.000 Gb di dati, un flusso troppo grande per salvare tutti i dati su qualsiasi tipo di supporto 15 Pbyte!!
  - Bisogna selezionare in tempo reale solo i dati più interessanti.
  - Il sistema preposto a questo si chiama trigger:
    - 100 foto al secondo selezionate per analisi dettagliata;
    - 200 Mbyte/secondo scritti su nastro magnetico.



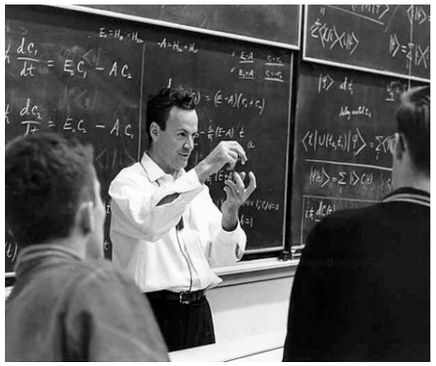
Gli *Eventi*

Decodificando e combinando le informazioni provenienti da tutti i sottorivelatori ad ogni collisione, ricostruiamo gli *eventi*, cioè l'insieme dei prodotti di una collisione, la "foto" di quello che succede al meglio di come il nostro rivelatore permetta.

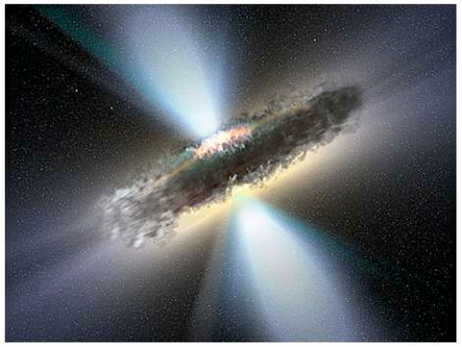


Che ci faccio con gli *Eventi* raccolti?

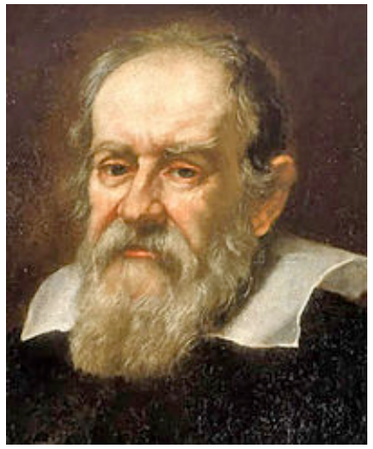
- Si misurano le proprietà di fenomeni noti per confrontarsi con le predizioni della teoria e verificarne la fondatezza;



- Si discriminano modelli teorici diversi; si ricercano fenomeni nuovi non inquadrati in nessuna teoria.



- Le collisioni artificialmente prodotte nell'acceleratore consentono di effettuare le misure in modo controllato e ripetibile.



- I risultati ottenuti vengono sottoposti allo scrutinio della comunità scientifica internazionale: sono documentati dettagliatamente e pubblicati, affinché possano essere ripetuti e verificati.

anni 60

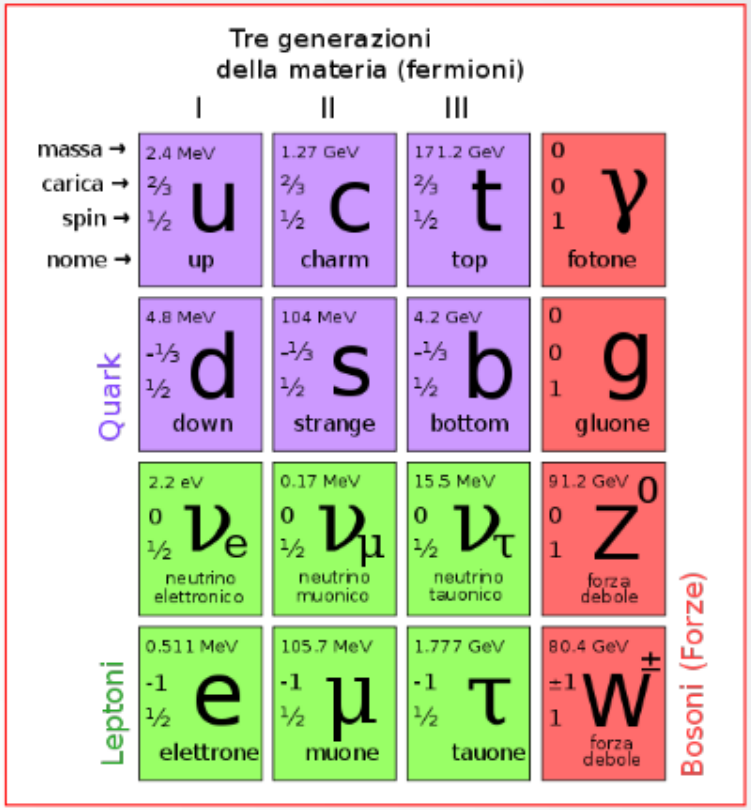
formulazione del modello a quark

barioni qqq

mesoni $q\bar{q}$

	Q/e	B
u	+2/3	1/3
d	-1/3	1/3
s	-1/3	1/3

50 anni dopo



+ antiparticelle

+ BOSONE DI HIGGS

e molti problemi aperti

masse ?

3 famiglie ?

QCD

THE STANDARD MODEL OF
FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model is a quantum theory that summarizes our current knowledge of the physics of fundamental particles and fundamental interactions (interactions are manifested by forces and by decay rates of unstable particles).

FERMIONS

matter constituents
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

Leptons spin =1/2

Flavor	Mass GeV/c^2	Electric charge
ν_L lightest neutrino*	$(0-2)\times10^{-9}$	0
e electron	0.000511	–1
ν_M middle neutrino*	$(0.009-2)\times10^{-9}$	0
μ muon	0.106	–1
ν_H heaviest neutrino*	$(0.05-2)\times10^{-9}$	0
τ tau	1.777	–1

Quarks spin =1/2

Flavor	Approx. Mass GeV/c^2	Electric charge
u up	0.002	2/3
d down	0.005	–1/3
c charm	1.3	2/3
s strange	0.1	–1/3
t top	173	2/3
b bottom	4.2	–1/3

*See the neutrino paragraph below.

Spin is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of ħ, which is the quantum unit of angular momentum where $\hbar = h/2\pi = 6.58\times10^{-25}$ GeV s $=1.05\times10^{-34}$ J s.

Electric charges are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is 1.60×10^{-19} coulombs.

The energy unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in GeV/c^2 (remember $E = mc^2$) where 1 GeV = 10^9 eV $=1.60\times10^{-10}$ joule. The mass of the proton is 0.938 GeV/c^2 = 1.67×10^{-27} kg.

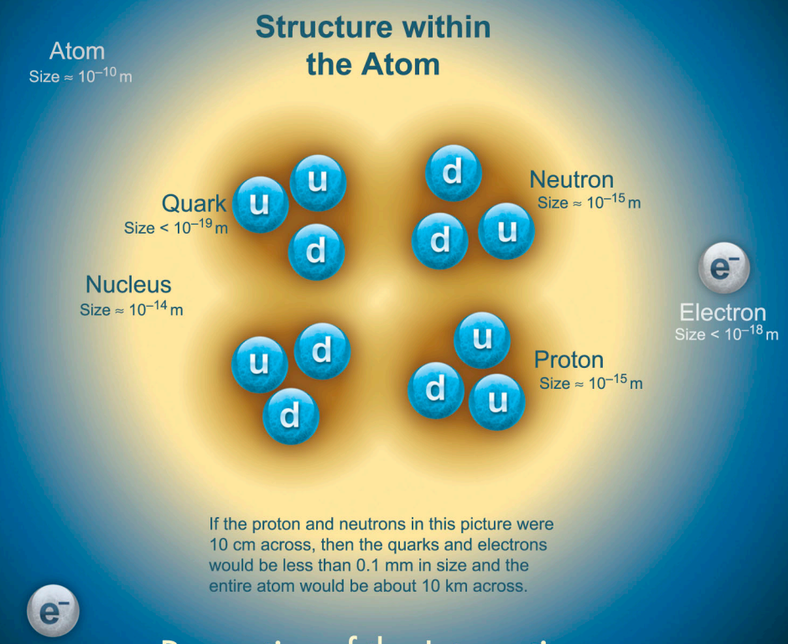
Neutrinos

Neutrinos are produced in the sun, supernovae, reactors, accelerator collisions, and many other processes. Any produced neutrino can be described as one of three neutrino flavor states ν_e, ν_μ, or ν_τ, labelled by the type of charged lepton associated with its production. Each is a defined quantum mixture of the three definite-mass neutrinos ν_L, ν_M, and ν_H for which currently allowed mass ranges are shown in the table. Further exploration of the properties of neutrinos may yield powerful clues to puzzles about matter and antimatter and the evolution of stars and galaxy structures.

Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or – charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g., Z^0, γ, and $\eta_c = c\bar{c}$ but not $K^0 = d\bar{s}$) are their own antiparticles.

Structure within the Atom



If the proton and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

BOSONS

force carriers
spin = 0, 1, 2, ...

Unified Electroweak spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.39	–1
W^+ W bosons	80.39	+1
Z^0 Z boson	91.188	0

Strong (color) spin = 1

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
g gluon	0	0

Higgs Boson spin = 0

Name	Mass GeV/c^2	Electric charge
H Higgs	126	0

Higgs Boson

The Higgs boson is a critical component of the Standard Model. Its discovery helps confirm the mechanism by which fundamental particles get mass.

Color Charge

Only quarks and gluons carry "strong charge" (also called "color charge") and can have strong interactions. Each quark carries three types of color charge. These charges have nothing to do with the colors of visible light. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions, color-charged particles interact by exchanging gluons.

Quarks Confined in Mesons and Baryons

Quarks and gluons cannot be isolated – they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs. The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge.

Two types of hadrons have been observed in nature **mesons** $q\bar{q}$ and **baryons** qqq. Among the many types of baryons observed are the proton (uud), antiproton ($\bar{u}\bar{u}\bar{d}$), and neutron (udd). Quark charges add in such a way as to make the proton have charge 1 and the neutron charge 0. Among the many types of mesons are the pion π^+ ($u\bar{d}$), kaon K^- ($s\bar{u}$), and B^0 ($d\bar{b}$).

Learn more at **ParticleAdventure.org**

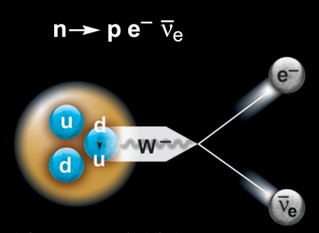
Properties of the Interactions

The strengths of the interactions (forces) are shown relative to the strength of the electromagnetic force for two u quarks separated by the specified distances.

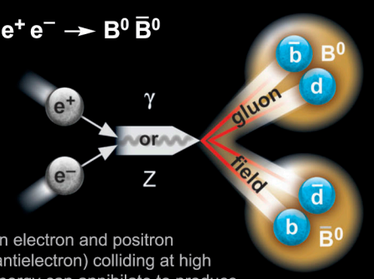
Property	Gravitational Interaction	Weak Interaction (Electroweak)	Electromagnetic Interaction	Strong Interaction
Acts on:	Mass – Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically Charged	Quarks, Gluons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	W^+ W^- Z^0	γ	Gluons
Strength at 10^{-18} m	10^{-41}	0.8	1	25
Strength at 3×10^{-17} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60

Particle Processes

These diagrams are an artist's conception. Orange shaded areas represent the cloud of gluons.



A free neutron (udd) decays to a proton (uud), an electron, and an antineutrino via a virtual (mediating) W boson. This is neutron β (beta) decay.

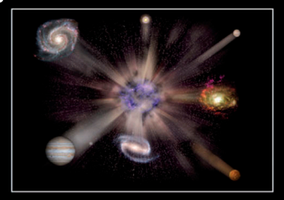


An electron and positron (antielectron) colliding at high energy can annihilate to produce $\bar{B}^0$ and B^0 mesons via a virtual Z boson or a virtual photon.

Unsolved Mysteries

Driven by new puzzles in our understanding of the physical world, particle physicists are following paths to new wonders and startling discoveries. Experiments may even find extra dimensions of space, microscopic black holes, and/or evidence of string theory.

Why is the Universe Accelerating?

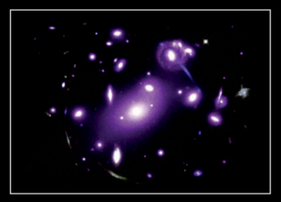


The expansion of the universe appears to be accelerating. Is this due to Einstein's Cosmological Constant? If not, will experiments reveal a new force of nature or even extra (hidden) dimensions of space?

Why No Antimatter?

Matter and antimatter were created in the Big Bang. Why do we now see only matter except for the tiny amounts of antimatter that we make in the lab and observe in cosmic rays?

What is Dark Matter?



Invisible forms of matter make up much of the mass observed in galaxies and clusters of galaxies. Does this dark matter consist of new types of particles that interact very weakly with ordinary matter?

Are there Extra Dimensions?

An indication for extra dimensions may be the extreme weakness of gravity compared with the other three fundamental forces (gravity is so weak that a small magnet can pick up a paper clip overwhelming Earth's gravity).

©2014 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Learn more about CPEP products and websites at **CPEPphysics.org**.
Made possible by the generous support of:
U.S. Department of Energy, U.S. National Science Foundation, & Lawrence Berkeley National Laboratory.