

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

19^a edizione



Sommario

- Teoria: Fisica delle particelle elementari
 - Perché?
 - Come?
 - Dove siamo arrivati?
 - Cosa manca?
- Breve panoramica sul CERN
- Large Hadron Collider

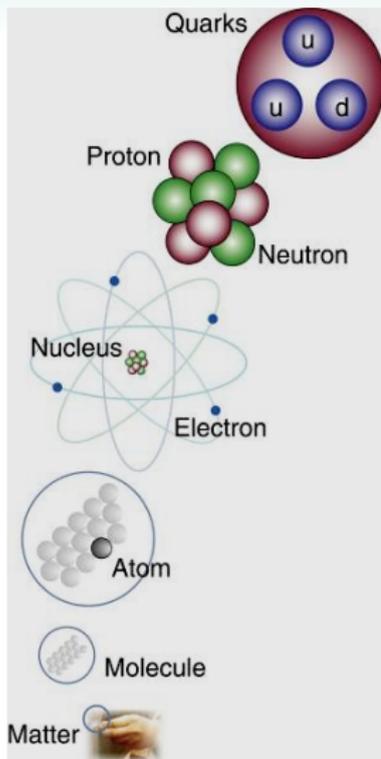


Cosa vogliamo capire studiando la fisica delle particelle elementari?

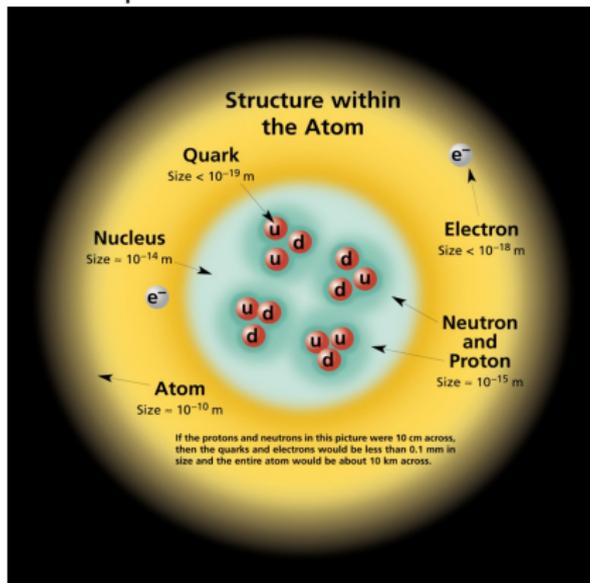
- Quali sono i costituenti elementari della materia che ci circonda?
- Quali forze agiscono fra questi costituenti elementari?
- Queste forze sono in grado di spiegare la moltitudine di fenomeni che osserviamo quotidianamente intorno a noi?
- Da dove sono saltati fuori i costituenti fondamentali della materia?
- Come ha avuto origine e come si è evoluto l'Universo?

domandine semplici semplici, insomma ...

Struttura della materia: i costituenti fondamentali (I)

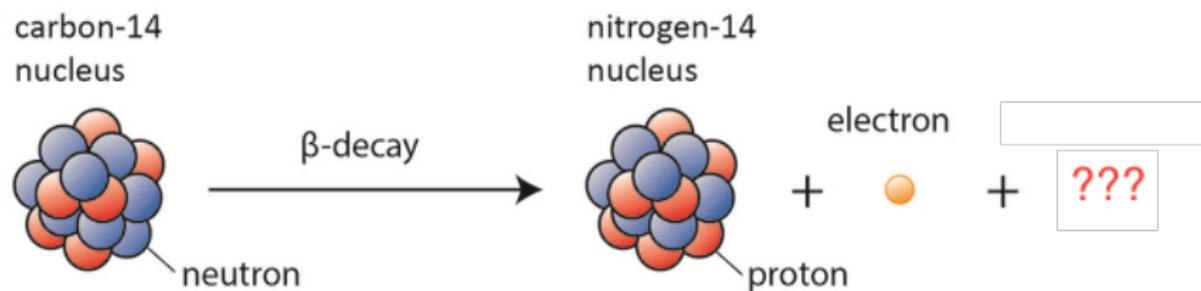


Studiando la materia che ci circonda a distanze sempre più piccole abbiamo capito che è fatta di atomi, che gli atomi sono fatti di elettroni con un nucleo fatto di protoni e neutroni, e che i protoni sono fatti di quark



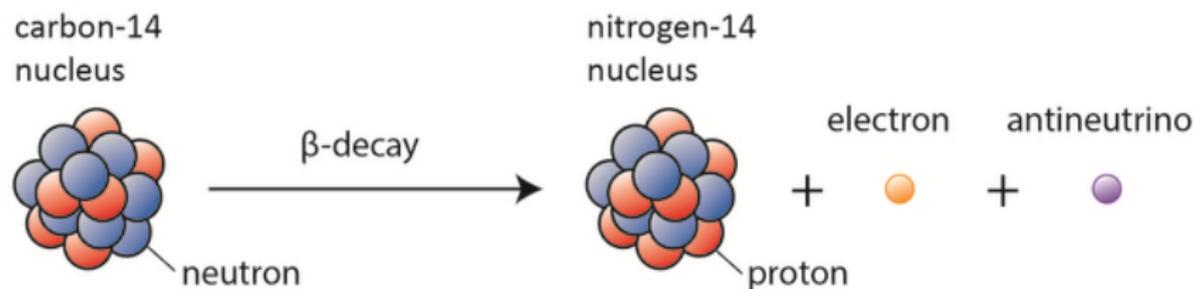
Struttura della materia: i costituenti fondamentali (II)

- Non ci sono solo i quark u e d che compongono i protoni e i neutroni e gli elettroni
- Esistono altri costituenti fondamentali... nei decadimenti radioattivi...



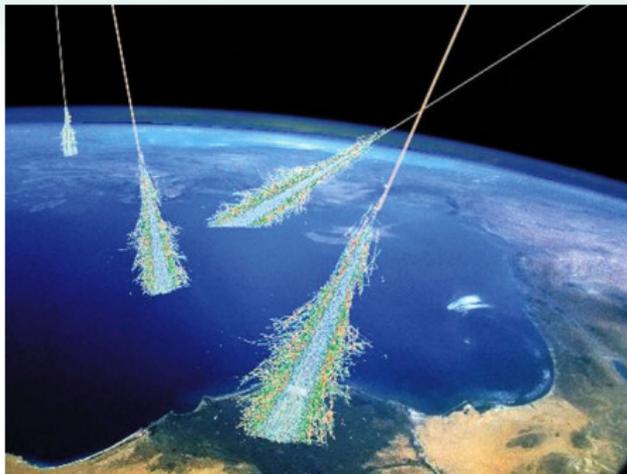
- Quello che si osserva sperimentalmente è che questa reazione non conserva l'energia...
- Manca qualcosa?

Struttura della materia: i costituenti fondamentali (II)

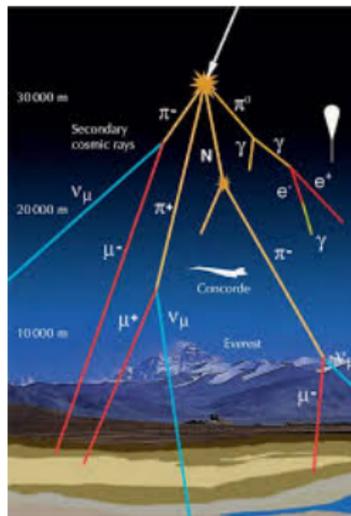


- Questo mistero fece “impazzire” un fisico di nome Wolfgang Pauli, il quale nel 1930 ipotizzò che insieme all’elettrone dovesse essere prodotta anche un’altra particella che chiamò NEUTRINO
- L’esistenza del neutrino fu verificata sperimentalmente nel 1956

Struttura della materia: i costituenti fondamentali (III)



- Altre particelle furono scoperte nei raggi cosmici con caratteristiche molto diverse le une dalle altre...
 - muone,
 - pione,
 - particelle "strane" (kaoni, ...)



- La situazione sul numero di particelle peggiora con l'uso dei primi acceleratori e la scoperta di dozzine di particelle...

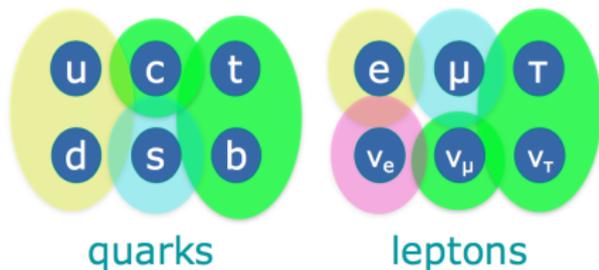
Lista delle particelle

3rd Rochester Conference 1952 32
December

Appendix VI: THE UNSTABLE "ELEMENTARY" PARTICLES OR MEGALOMORPHS

Particle	Products	Observed by	Lifetime (sec.)	Q	Mass	Statistics	Spin	Parity
? V_1^+	$\rightarrow p + \pi^-$	c. c.	$> 10^0$	~ 75 Mev	$2270m_e?$	F. D.	n/2?	-
$\rightarrow V_1^0$	$\rightarrow p + \pi^-$	c. c.	3.5×10^{-10}	37 Mev	$2190m_e$	F. D.	n/2?	-
? V_1^+	$\rightarrow p + (\pi^0)$	c. c.	?	?	?	?	?	?
π^0	$\rightarrow e^+ + e^- + \gamma$	Spectro-graph & counters	740	783 Kev	$1837m_e$	F. D.	1/2	-
V_3^+	$\rightarrow \Sigma^- + \pi^+$	c. c.	?	?	$M_p + m_{V_3^+} > m_n$?	?	?
K^+	$\left\{ \begin{array}{l} S^{\pm} \\ \chi^{\pm} \end{array} \right\} \rightarrow \pi^{\pm} + (\pi^0)$	c. c.	2×10^{-8}					
	$\left\{ \begin{array}{l} S^{\pm} \\ \chi^{\pm} \end{array} \right\} \rightarrow \mu^{\pm} + (\pi^0)$	c. c. & emul.	-2×10^{-9}	115 Mev	$1400m_e$	B. E.	0?	S?
	$\left\{ \begin{array}{l} S^{\pm} \\ \chi^{\pm} \end{array} \right\} \rightarrow \mu^{\pm} + 2\gamma$	emul.	?	?	$1100m_e$	F. D.?	1/2?	-
	$\left\{ \begin{array}{l} S^{\pm} \\ \chi^{\pm} \end{array} \right\}$	c. c.						
$\rightarrow \chi^{\pm}$	$\rightarrow \pi^{\pm} + \pi^+ + \pi^-$	emul. & c. c.	10^{-8} -10^{-9}	75 Mev	$975m_e$	B. E.	0?	PS?
$\rightarrow V_2^0$	$\rightarrow \pi^+ + \pi^-$	c. c.	$\sim 10^{-10}$	210 Mev	$850m_e$	B. E.	0?	S?
? S^{\pm}	$\rightarrow \pi^{\pm} + (\pi^0)$	emul.	10^{-11}	40 Kev	$552m_e$	B. E.	0?	S?
				$< Q <$ 6 Mev				
π^{\pm}	$\rightarrow \mu^{\pm} + \nu$	counters	2.3×10^{-8}	5.9 Mev	$276m_e$	B. E.	0	PS
π^0	$\rightarrow 2\gamma$ $\rightarrow e^+ + e^- + \gamma$	counters emul. & counters	$\leq 5 \times 10^{-15}$	135 Mev	$266m_e$	B. E.	0	PS
μ^{\pm}	$\rightarrow e^{\pm} + \nu$	counters	2.15×10^{-6}	105 Mev	$212m_e$	F. D.	1/2	-

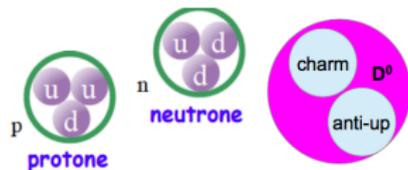
I costituenti fondamentali



- **Costituiscono la materia ordinaria**
- **Decadimenti radioattivi**
- **Osservati negli esperimenti con i raggi cosmici negli anni 30/40**
- **Osservati negli esperimenti agli acceleratori**

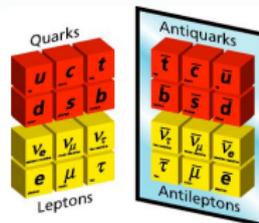
$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	quarks
$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	
$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $1/2$ τ tau	
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_e e neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_μ μ neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $1/2$ ν_τ τ neutrino	

- **Non si osservano quark isolati, ma aggregati (adroni) a coppie (mesone) o a terne (barione)!**



Materia e antimateria

- Ad ogni particella corrisponde una antiparticella
- Come si distinguono? Hanno stessa massa ma la carica dell'antiparticella è opposta a quella della particella
- Quando particella e antiparticella si incontrano si annichilano trasformandosi in energia
- Convenzionalmente chiamiamo materia ciò di cui siamo composti noi!
- L'antimateria non è un fenomeno da fantascienza, viene quotidianamente usata in ambito medico (PET)

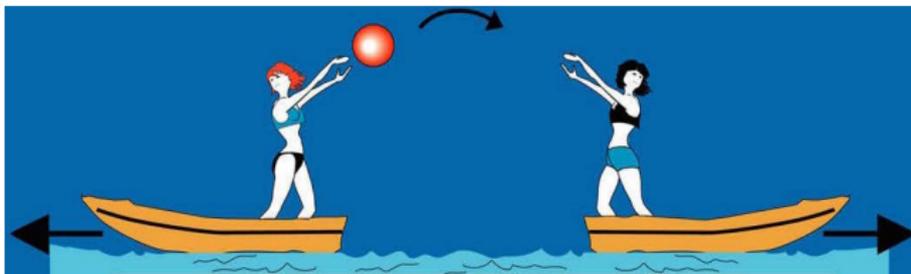


materia	anti-materia
$Q = -e$ e^- elettrone	e^+ $Q = e$ positrone
$Q = \frac{2}{3}e$ u up	\bar{u} $Q = -\frac{2}{3}e$ anti-up
$Q = -\frac{1}{3}e$ d down	\bar{d} $Q = \frac{1}{3}e$ anti-down
$Q = e$ $\begin{matrix} u & u \\ & d \end{matrix}$ protone	$\begin{matrix} \bar{u} & \bar{u} \\ & \bar{d} \end{matrix}$ $Q = -e$ anti-protone
$Q = 0$ $\begin{matrix} u & d \\ & d \end{matrix}$ neutrone	$\begin{matrix} \bar{u} & \bar{d} \\ & \bar{d} \end{matrix}$ $Q = 0$ anti-neutrone

Le interazioni fondamentali

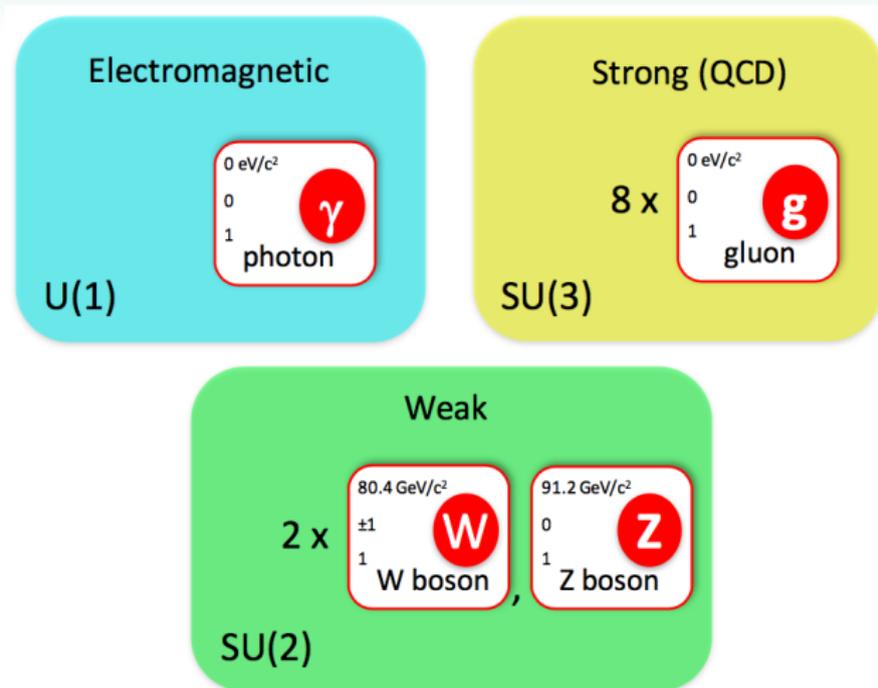
Forza	Raggio d'azione	Intensità relativa	'Carica'	
Gravitazionale	∞	10^{-38}	Massa	Caduta dei gravi, moti celesti
Elettromagnetica	∞	1/137	Carica elettrica (2 tipi)	Proprietà elettriche, magneti, chimica, ...
Forte	10^{-15} m	1	Colore (forte) (3 tipi)	Coesione nucleare, stabilità del protone
Debole	10^{-18} m	10^{-6}	Sapore (debole)	Radioattività, energia del sole e delle stelle

- I costituenti elementari interagiscono attraverso 4 forze



- E ci sono delle particelle “mediatrici delle forze”: interazioni viste come scambio di bosoni tra quarks e leptoni

Le interazioni fondamentali (II)

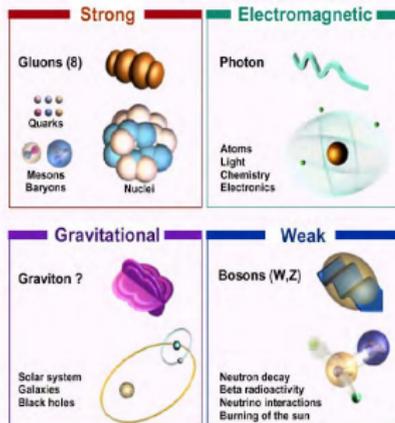
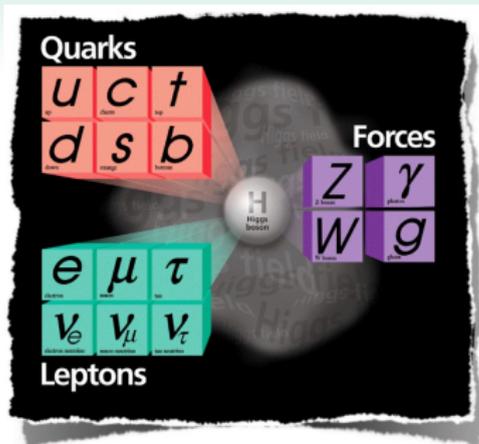


- Da notare: non c'è la gravità!

Modello Standard delle particelle elementari

Il Modello Standard spiega le (tante) particelle composte da quarks (e antiquarks), i decadimenti radioattivi, le reazioni nucleari nel Sole e molto altro... ma è un puzzle incompiuto!

- Uno dei tasselli mancanti recentemente scoperto: bosone di Higgs, altrimenti nessuna di queste particelle potrebbe avere massa!

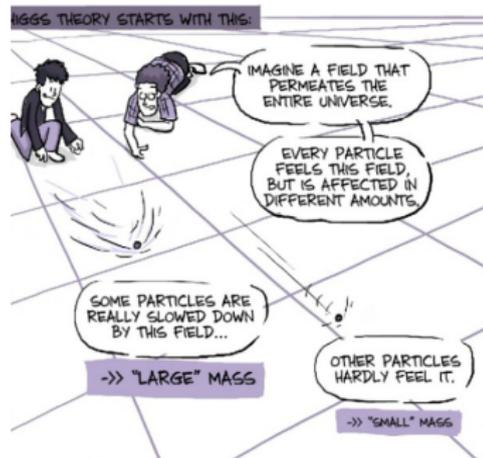
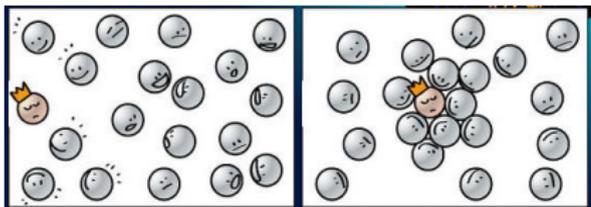


“il bosone di Higgs dà massa alle particelle”

Cosa significa per una particella avere massa?

- se la massa è zero viaggia alla velocità della luce
- se la massa è diversa da zero no

avere massa per una particella è un po' come essere "trattenuta" da una forza esercitata dal vuoto



È stato osservato nel 2012 dagli esperimenti ATLAS e CMS al CERN e i fisici Peter Higgs e Francois Englert hanno ricevuto nel 2013 il premio Nobel per la Fisica!

Problemi aperti nel Modello Standard...

- Ci sono tante particelle...
 - 6 quark
 - 6 leptoni
(e le loro antiparticelle!)
 - 4 mediatori delle forze
 - il bosone di Higgs

Troppe?

- perchè ci sono tre famiglie?
(3 è il numero minimo che consente piccole differenze fra materia e antimateria, ma potrebbero essere anche di più)
- perchè hanno masse così diverse?
- e la gravità come la includo nella teoria?



Materia oscura ed energia oscura

L'universo ha una massa molto maggiore di quella "visibile" dovuta alla materia "ordinaria"

Come ce ne siamo accorti?

Misurando la velocità di rotazione delle galassie

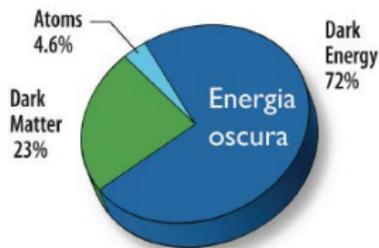
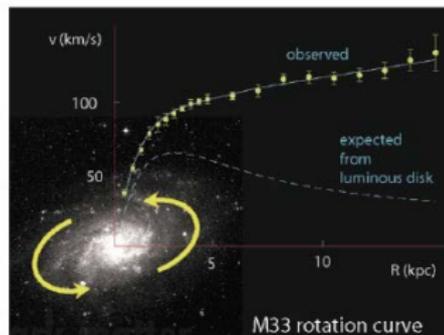
La velocità di rotazione dipende dalla massa all'interno dell'orbita

La massa è circa 20 volte più grande di quella visibile!

Materia oscura!

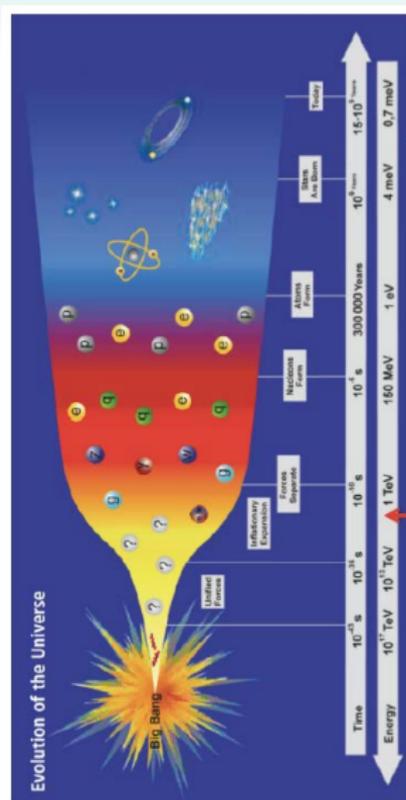
E non basta: la velocità di espansione dell'universo non è compatibile con la sua massa

Energia oscura?



La materia ordinaria è meno del 5%!!

Dove è finita l'antimateria?

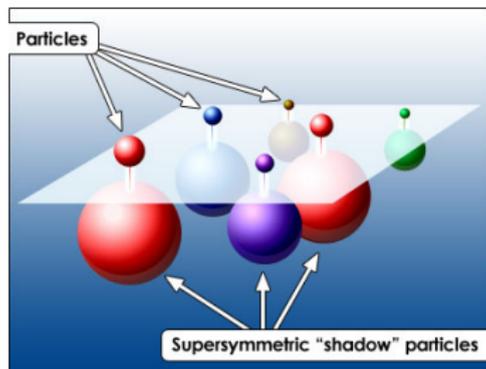


- Dal Big Bang e dalla conversione di energia in materia, particelle e antiparticelle sono state prodotte in egual misura
- però il nostro universo è formato solo da materia (almeno per quanto riusciamo ad osservare astronomicamente)
- Dove è finita l'antimateria?
- l'unico meccanismo che conosciamo sono le piccole differenze ("violazione di CP") fra particelle e antiparticelle
- L'esperimento LHCb studia particelle e anti-particelle prodotte nelle collisioni fra i protoni del Large Hadron Collider al CERN cercando possibili differenze tra di loro
- Basta a spiegare la sparizione dell'antimateria nell'universo?

Estensioni del Modello Standard?

Ci sono diverse idee su come sia possibile estendere il modello standard

- Alcuni modelli ipotizzano che ad ogni particella corrisponda una particella “supersimmetrica”
- La più leggera di queste particelle supersimmetriche sarebbe stabile, massiva e poco interagente: potrebbe essere un candidato di materia oscura
- Sono stati anche proposti modelli in cui ci sono anche altre dimensioni oltre alle 3 spaziali che conosciamo

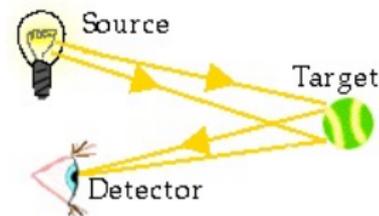


Come faccio a "vedere" di cosa è fatta la materia?

Guardandola da vicino...

La radiazione elettromagnetica è composta da fotoni

- una qualche sorgente (Sole, lampada, ...) emette fotoni
- i fotoni colpiscono il bersaglio e alcuni vengono riflessi
- l'occhio riceve una parte dei fotoni che hanno colpito il bersaglio e il nostro cervello ricostruisce l'immagine



Con un microscopio posso vedere oggetti di dimensioni confrontabili con la lunghezza d'onda della luce con cui li osservo

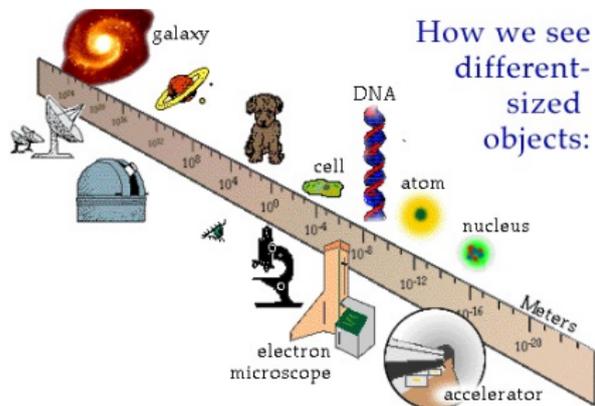
Con la luce visibile posso risolvere oggetti grandi circa un millesimo di millimetro (fino a circa $0.5 \mu\text{m}$)

Osservare l'infinitamente piccolo

Per osservare dimensioni al di sotto del μm devo usare lunghezze d'onda più piccole

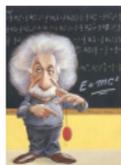
Posso usare come sonda fotoni di lunghezza d'onda più corta oppure posso usare come sonda delle particelle:

- $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$ lunghezza d'onda di De Broglie
lunghezza d'onda associata ad una particella di momento \vec{p}
(meccanica quantistica)
- per avere momento sufficientemente elevato devo accelerare le particelle
- tanto maggiore l'energia tanto minori le dimensioni che riesco a studiare

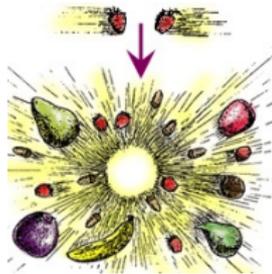
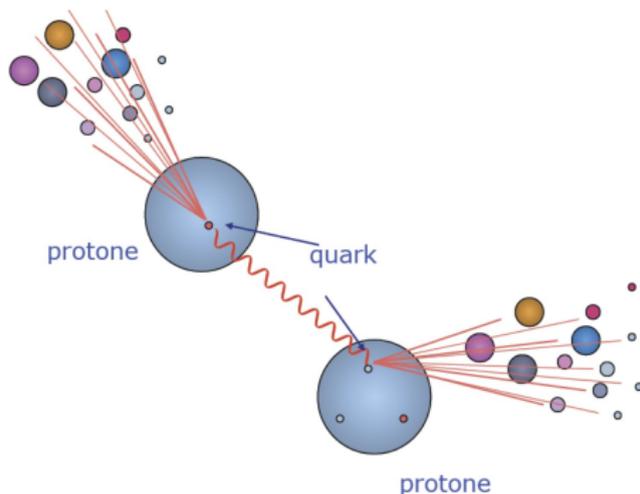


La massa si può trasformare in energia

Negli urti fra particelle di energia sufficientemente elevata possono prodursi altre particelle

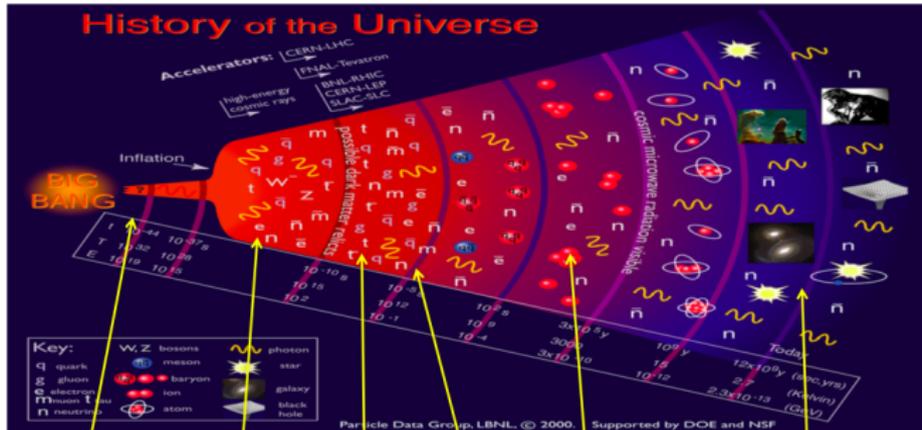


$$E = mc^2$$



Non solo si crea materia e antimateria, ma possono venire prodotte particelle elementari che non sono presenti nella materia che conosciamo!

Ricreiamo pochi istanti dopo il Big Bang...



Cosmology



Cosmic rays

LHC

Quark/gluon plasma

Nuclear physics



Astrophysics

- ... quando l'Universo era popolato da particelle libere che essendo instabili oggi non esistono più!

Unità di misura dell'energia

Nel SI l'energia si misura in joule

$$1 J = 1 N \times 1 m$$

per un'auto di 1000 kg che viaggia a 100 km/h

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = 3.9 \cdot 10^5 J = 2.4 \cdot 10^{24} eV$$

nel mondo microscopico si usa l'elettronvolt

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

protone ($m = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$) ad una velocità di $10^5 m/s$

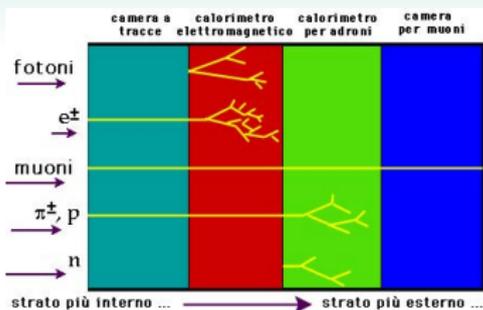
$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = 6.4 \cdot 10^{-19} J = 4 eV$$

- 1 keV = $10^3 eV$ (raggi X)
- 1 MeV = $10^6 eV$
- 1 GeV = $10^9 eV$ (particelle in un piccolo acceleratore)
- 1 TeV = $10^{12} eV$ (particelle nei grandi acceleratori)

- Spesso misuriamo massa e energia nelle stesse quantità ($E = mc^2$)



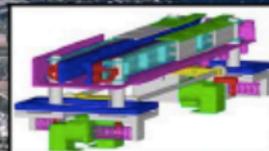
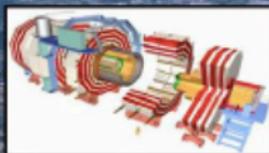
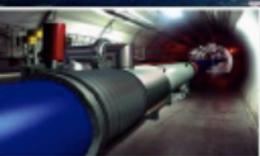
Una possibile strategia:



- un acceleratore in grado di produrre moltissime collisioni ad altissima energia (devono essere tante perchè le particelle che cerchiamo possono essere prodotte molto raramente)

- un insieme di rivelatori, che sfruttino nel modo migliore le diverse interazioni coi diversi tipi di particelle in modo da ricostruire quello che viene prodotto nelle collisioni
- poichè molte particelle hanno vita breve decadono in altre particelle: riveliamo i prodotti di decadimento

Il CERN, LHC e gli esperimenti



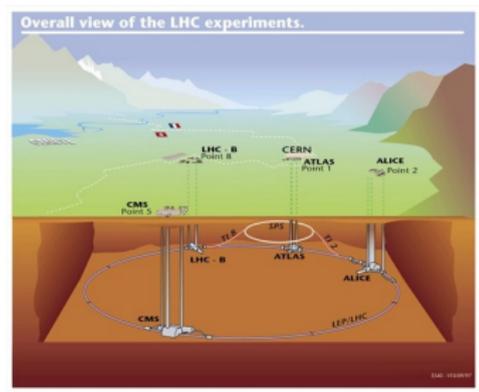
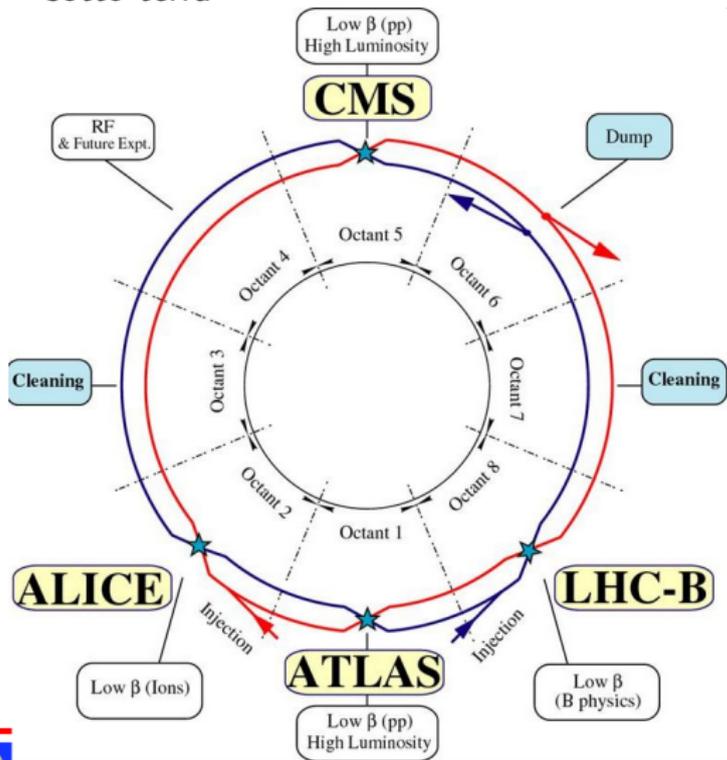
CERN: Centro Europeo di Ricerca Nucleare

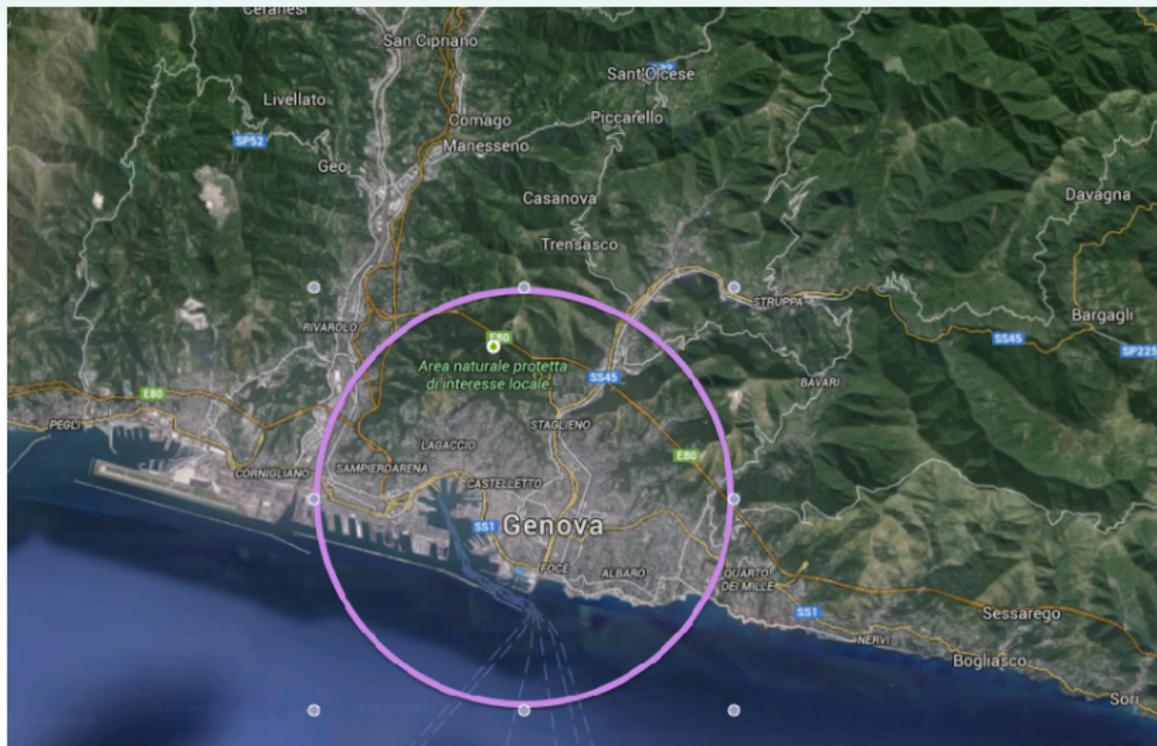
- 1949: prima proposta per un laboratorio europeo L. de Broglie
- 1950: proposta all'UNESCO
- 1952: scelta della sede di Ginevra
E. Amaldi nominato Segretario Generale del CERN
- 1954: ratifica della convenzione tra i 12 Stati Fondatori (Germania, Belgio, Danimarca, Francia, Grecia, Italia, Norvegia, Paesi Bassi, Regno Unito, Svezia, Svizzera, Jugoslavia)
- **OGGI:** 23 stati membri contribuiscono al finanziamento rappresentati nel Council responsabile di tutte le decisioni



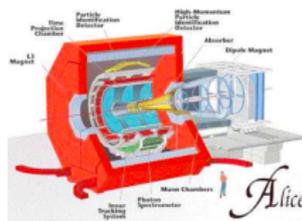
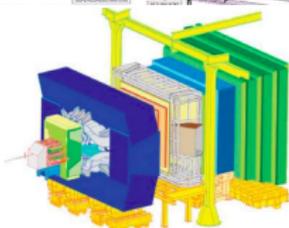
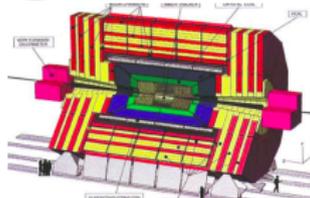
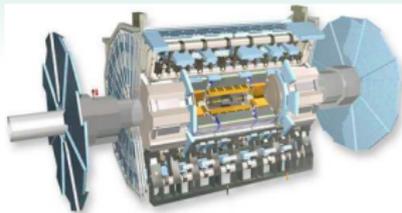
LHC

Due fasci di protoni accelerati fino a 7 TeV e portati a collidere frontalmente in un anello di 27 km che si trova mediamente 100 metri sotto terra





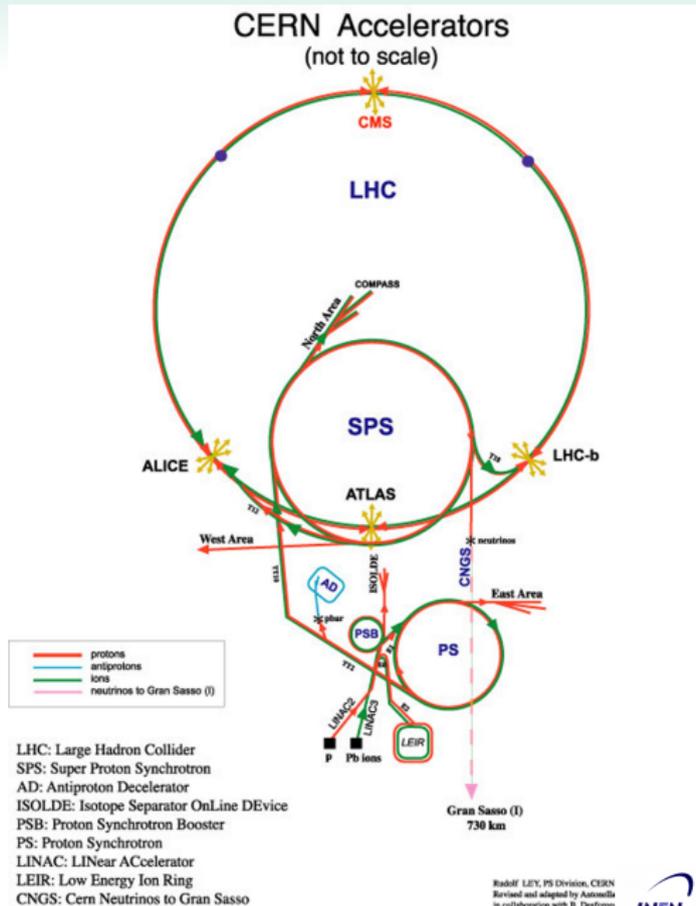
I 4 rivelatori principali



- ATLAS
700 tonnellate, 25m diametro, 46m lunghezza
2500 ricercatori e ingegneri
- CMS
14500 tonnellate, 15m diametro, 22m lunghezza
3000 ricercatori&ingegneri
- LHCb
5600 tonnellate, 13m larghezza, 21m lunghezza
700 scienziati e ingegneri
- ALICE
10000 tonnellate, 16m diametro, 26m lunghezza
1000 scienziati e ingegneri
- I ricercatori di Genova partecipano a tre dei quattro degli esperimenti: Atlas, CMS e LHCb e partecipano anche ad uno dei due esperimenti più piccoli installati nelle caverne dei grandi esperimenti: TOTEM

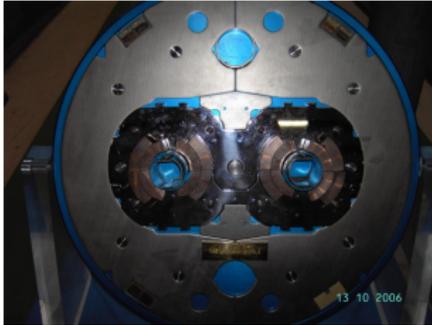
Accelerare le particelle fino a 7 TeV

- Portare i protoni a quelle energie richiede un sistema che li acceleri gradualmente
- possono essere anche utilizzati per altri tipi di esperimenti, utilizzando le tante "linee di estrazione" dei fasci
- Tantissime misure diverse, non solo LHC!

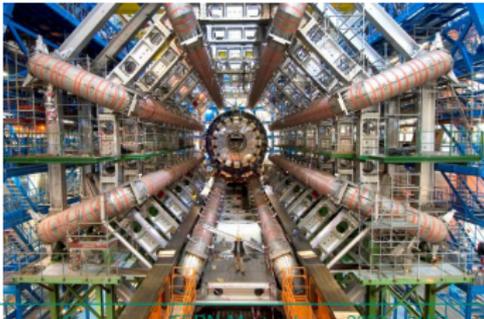


Una impresa tecnologica!

magneti superconduttori alla temperatura di 1.9 K (-271°C) in tutti e 27 i km del tunnel



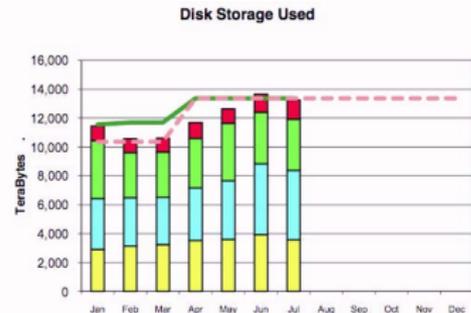
progettare costruire e installare rivelatori alti come un palazzo di 5 piani



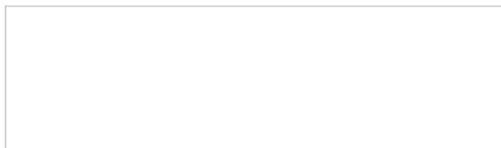
scavare e attrezzare caverne per alloggiare i rivelatori



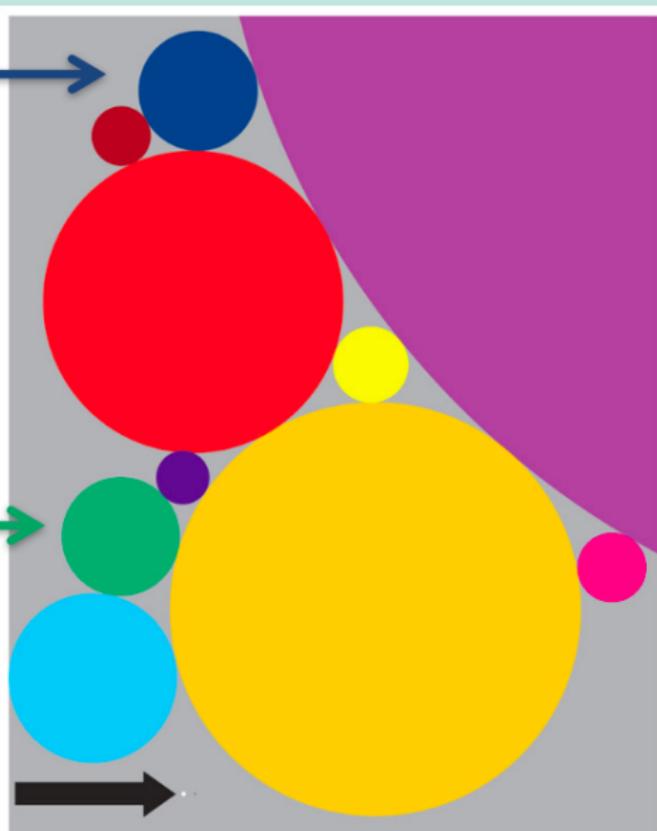
migliaia di Terabytes al mese da acquisire e analizzare



LHC
15 360 TB/yr



Video caricati su YouTube
15 000 TB/yr



► Size of data sets in terabytes

Business email sent per year	2,986,100	National Climatic Data Center database	6,144
Content uploaded to Facebook each year	182,500	Library of Congress' digital collection	5,120
Google's search index	97,856	US Census Bureau data	3,789
Kaiser Permanente's digital health records	30,720	Nasdaq stock market database	3,072
Large Hadron Collider's annual data output	15,360	Tweets sent in 2012	19
Videos uploaded to YouTube per year	15,000	Contents of every print issue of wikis	19

(<http://www.wired.com/2013/04/bigdata/>)



Quanto è costato?

Circa 20 anni di lavoro tra progettazione e costruzione, circa 10.000 fisici ed ingegneri di 85 paesi.

- 6 miliardi di euro tra LHC ed esperimenti
 - metà delle Olimpiadi di Londra
 - due anni di pubblicità della Coca Cola
 - due settimane di guerra in Iraq

- 80 milioni di euro all'anno per l'Italia
 - 1 euro/anno per ciascuno di noi
 - le commesse alle ditte italiane sono state molto maggiori dell'investimento italiano (Ansaldo ha costruito circa 1/3 dei magneti)



Non è solo questione di soldi

La conoscenza non ha prezzo... .. ma ha un valore!

Dalle ricerche in fisica delle particelle

- strumenti per la diagnostica medica
PET, risonanza magnetica,...
- cura dei tumori con adroterapia
tre centri in Italia
- radiofarmaci
- studio dei coni vulcanici con i raggi cosmici
- strumenti per la conservazione dei beni culturali
-
- schermi "touch screen"
inventati al CERN
- il WorldWideWeb è nato al CERN ed è stato messo gratuitamente a disposizione di tutti nel 1993
- GRID
- tanti piccoli e grandi contributi a telecomunicazioni, transistor e microchip, laser, cristalli liquidi, materiali innovativi
- ...