

INTERNATIONAL MASTERCLASSES HANDS ON PARTICLE PHYSICS

19^a edizione



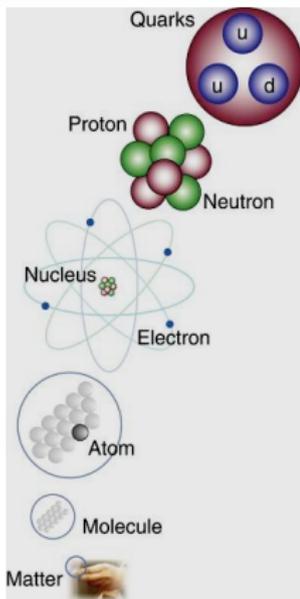
Sommario

- Teoria: Fisica delle particelle elementari (elementari che? dipende dall'epoca....)
 - Perché?
 - Come?
 - Dove siamo arrivati?
 - Cosa manca?
- Breve panoramica sul CERN: **Centro Europeo per la Fisica delle Particelle**
- Il CERN oggi: il Large Hadron Collider (LHC).

Cosa vogliamo capire?

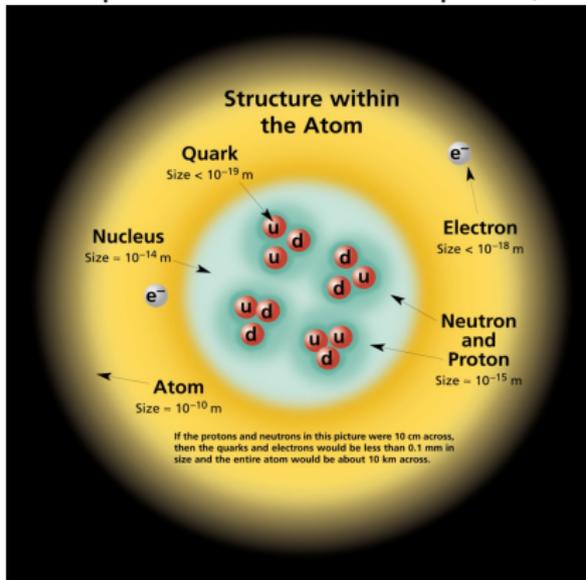
- Quali sono i costituenti elementari della materia che ci circonda?
- Quali forze agiscono fra questi costituenti elementari?
- Queste forze sono in grado di descrivere la moltitudine di fenomeni che osserviamo quotidianamente intorno a noi?
O nell'infinitamente piccolo/ grande?
- Da dove originano i costituenti fondamentali della materia?
- Come ha avuto origine e come si è evoluto l'Universo?

La materia: i suoi costituenti fondamentali



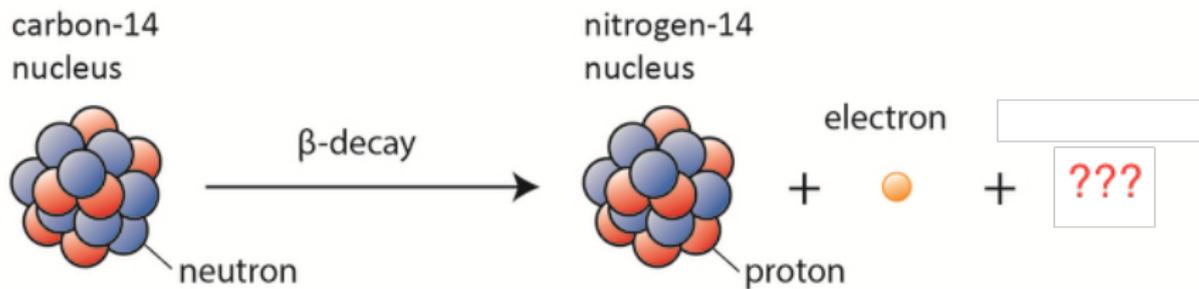
Il concetto di "elementare" si evolve e cambia nel tempo. ...

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



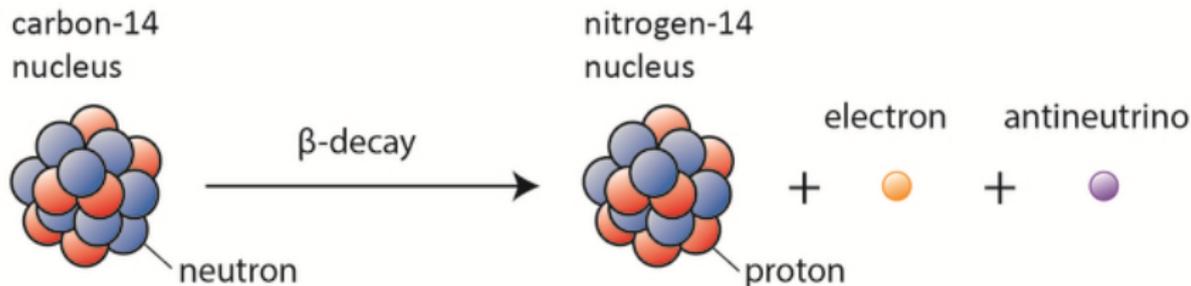
La materia: i suoi costituenti fondamentali 2

- Non ci sono solo i quark u e d che compongono i protoni e i neutroni: esistono altri costituenti fondamentali... per esempio:



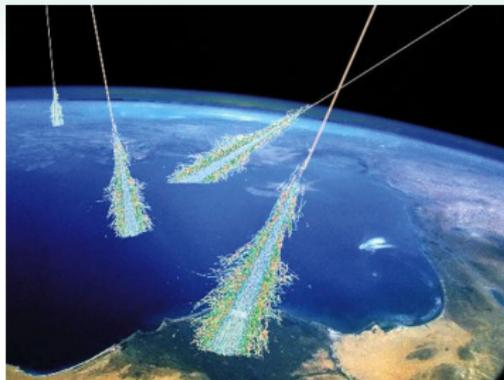
- Quello che si è osservato sperimentalmente è che questa reazione non conserva l'energia (ma anche il momento angolare)...
- Manca qualcosa !/?

La materia: i suoi costituenti fondamentali 3



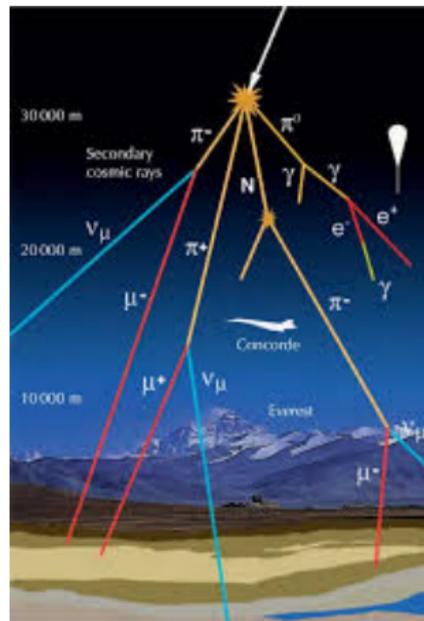
- Questo mistero portò a ipotizzare che insieme all'elettrone dovesse essere prodotta anche un'altra particella: (anti-)neutrino, poi scoperto effettivamente.

La materia: i suoi costituenti fondamentali 4



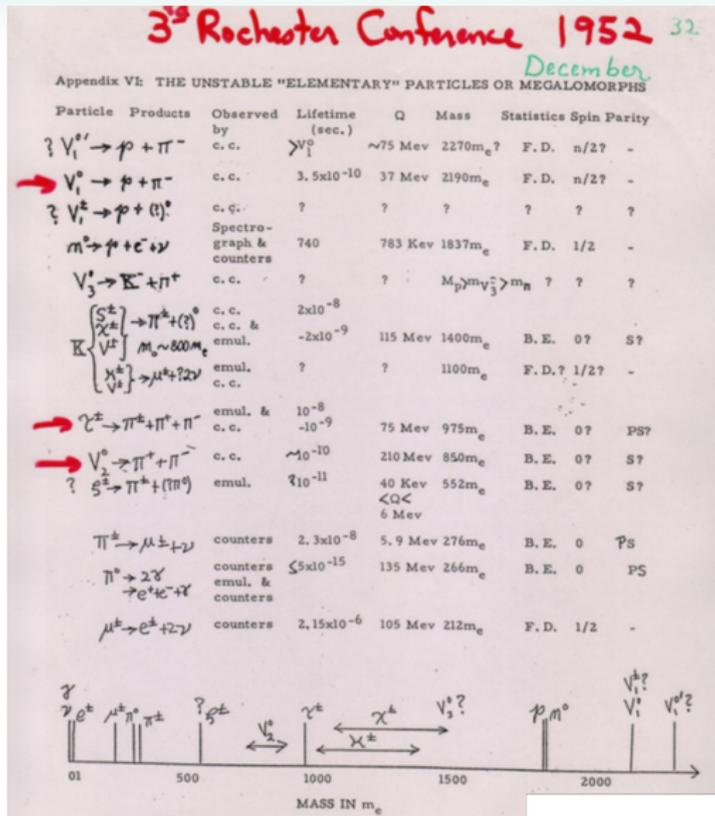
- Altre particelle furono scoperte nei raggi cosmici con caratteristiche molto diverse le une dalle altre...

- muone,
- positrone (primo esempio di *anti-materia*),
- pioni,
- particelle *strane* (kaoni, iperoni, ...).

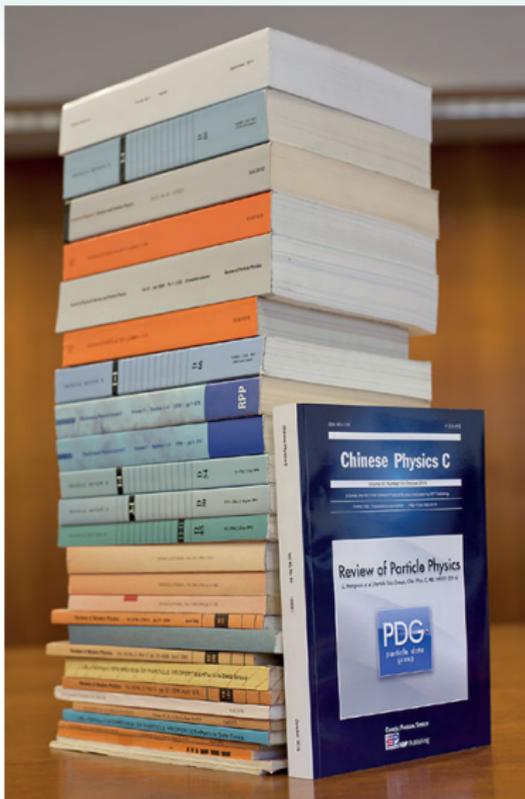


- Il numero di particelle aumenta a dismisura con l'uso dei primi acceleratori di particelle (tecnologia...) e la scoperta di dozzine di particelle...

La materia: i suoi costituenti fondamentali 5

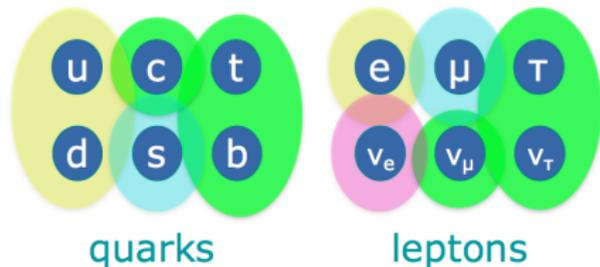


La materia: i suoi costituenti fondamentali 6



Un centinaio di anni di storia della fisica (e della tecnologia). ...

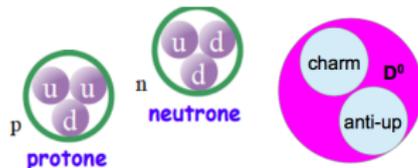
I costituenti fondamentali - oggi



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

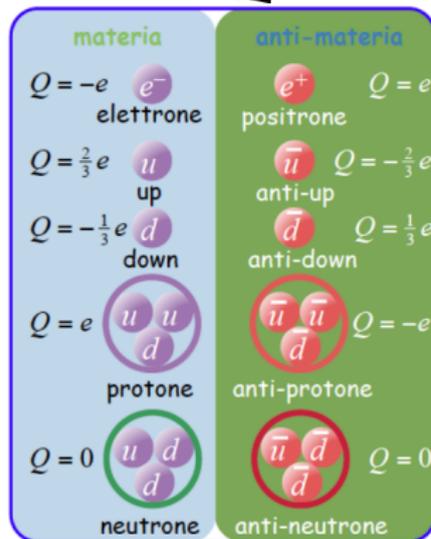
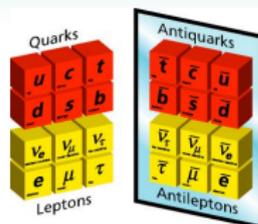
$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $2/3$ $1/2$ t top	quarks
$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-1/3$ $1/2$ b bottom	
$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $1/2$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -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

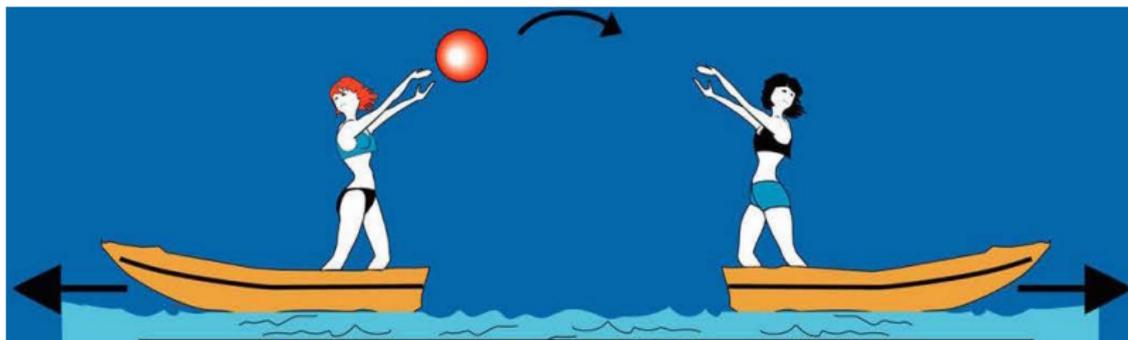
- Ad ogni particella corrisponde una antiparticella
- Come si distinguono? Hanno stessa massa ma la carica dell'antiparticella è opposta a quella della particella
- Convenzionalmente chiamiamo materia ciò di cui siamo composti noi!
- L'antimateria non è un fenomeno da fantascienza, viene quotidianamente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



Le interazioni fondamentali

I costituenti elementari interagiscono attraverso 4 forze

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



Le interazioni fondamentali 2

Le interazioni fondamentali 3

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

Electromagnetic

U(1)

$0 \text{ eV}/c^2$
0
1

γ
photon

Strong (QCD)

SU(3)

8 x

$0 \text{ eV}/c^2$
0
1

g
gluon

Weak

SU(2)

2 x

$80.4 \text{ GeV}/c^2$
 ± 1
1

W
W boson

$91.2 \text{ GeV}/c^2$
0
1

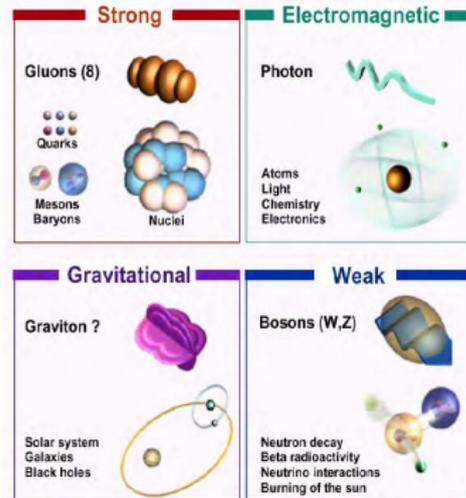
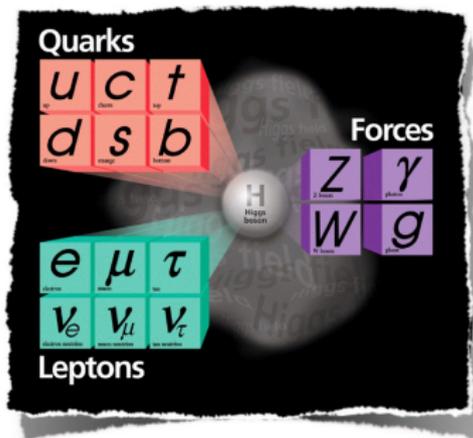
Z
Z boson

Le interazioni fondamentali 4

- Non c'è la gravità: non ci capiamo nulla....anche perché debole.

Il Modello Standard delle particelle elementari

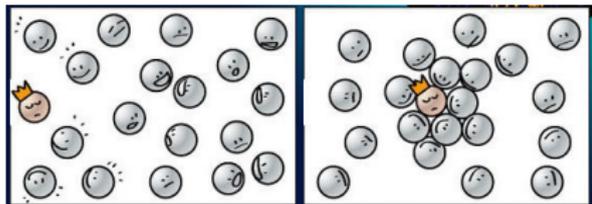
- Il Modello Standard spiega particelle e interazioni, i decadimenti radioattivi, le reazioni nucleari nel Sole e molto altro... ma è un puzzle incompiuto!
- Uno dei tasselli mancanti recentemente scoperto: bosone di Higgs.



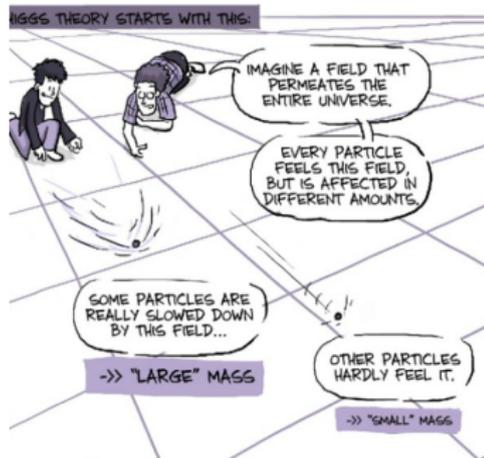
Il bosone di Higgs???

Cosa significa per una particella avere massa?

- se la massa è zero viaggia alla velocità della luce
- se la massa è diversa da zero viaggia a velocità inferiore a quella della luce
- per una particella è un po' come essere *trattenuta* da una forza che ne rallenta il moto



Higgs 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
 - le loro antiparticelle
 - 4 mediatori delle forze
 - il bosone di Higgs

Troppe?

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

e la gravità

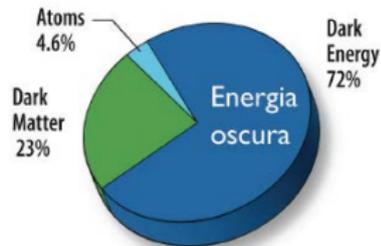
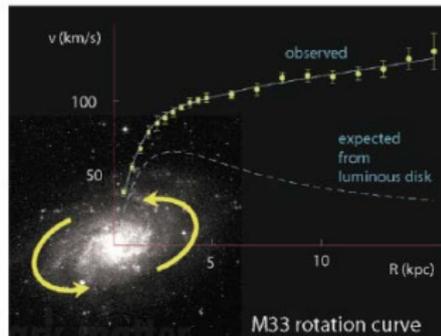
- e la gravità come la includo nella teoria?

Materia oscura ed energia oscura

L'universo ha una massa/energia molto maggiore di quella *visibile* dovuta alla materia *ordinaria*

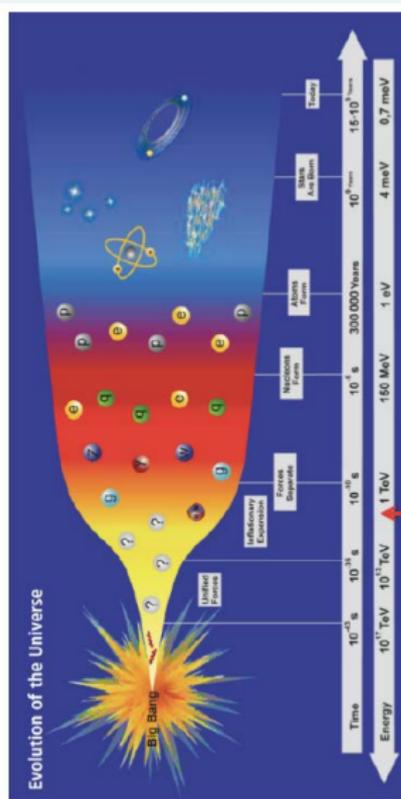
Come ce ne siamo accorti?

- 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?

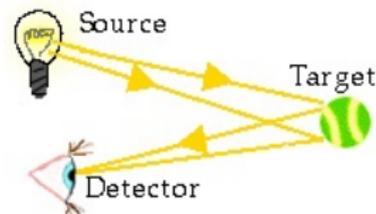
Estensioni del Modello Standard?

- Ci sono diverse idee su come sia possibile estendere il modello standard.
- In realtà ... ce ne sono troppe di idee
- Ma il solo metro di valutazione di una teoria/modello fisico è il confronto con la realtà, ossia con gli esperimenti.
- ... Vale un po' per tutto la necessità di scontrarsi con la realtà. ... anche in fisica... spesso la realtà è più (troppo) dura.....

Come faccio a vedere ?

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 $0.5\mu\text{m}$)



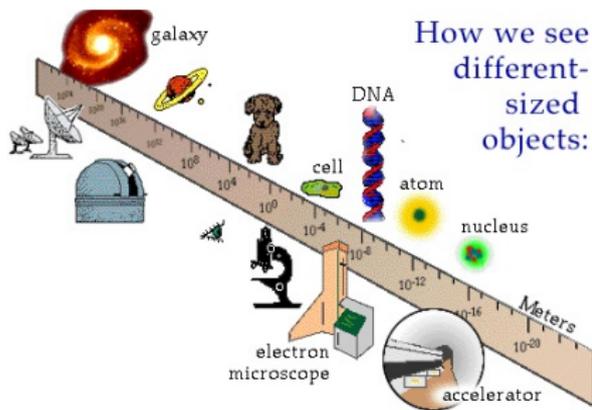
Osservare

Tanti modi di "osservare".

Osservare l'infinitamente piccolo

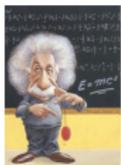
- Per osservare dimensioni al di sotto del μm devo usare lunghezze d'onda più piccole Posso usare come sonda fotoni di lunghezza d'onda più corta oppure posso usare come sonda delle particelle:

- $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$ 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

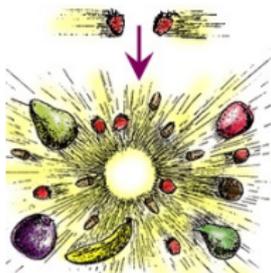
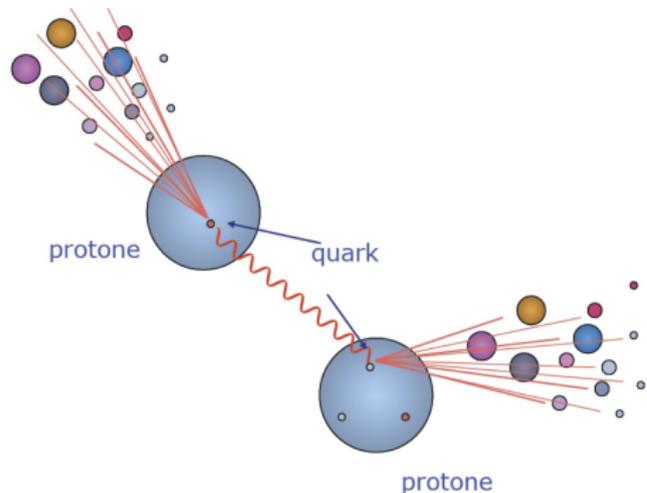


La massa si può trasformare in energia

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



$$E = mc^2$$

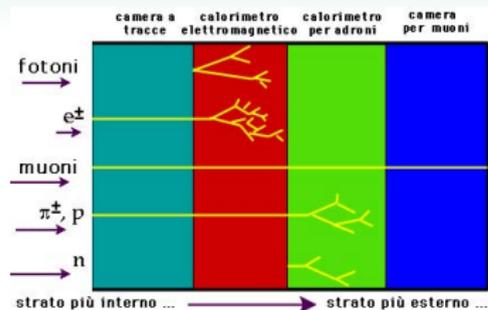


Non solo si crea materia e antimateria, ma possono venire prodotte particelle elementari che non sono presenti nella materia che conosciamo e che hanno tempi di vita brevissimo.

Una possibile strategia:



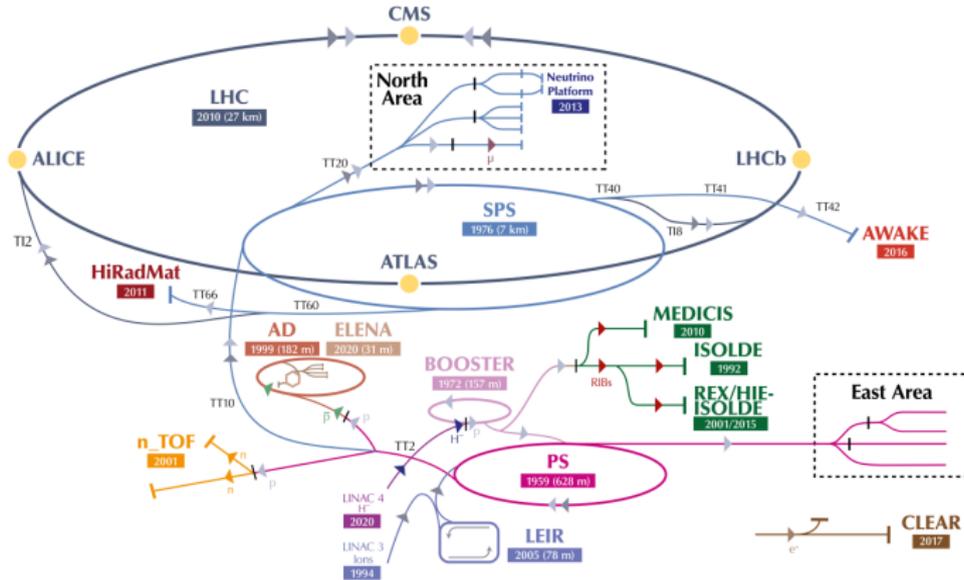
- un acceleratore in grado di produrre moltissime collisioni ad altissima energia (devono essere tante perché le particelle che cerchiamo possono essere prodotte molto raramente)



- 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
- poiché molte particelle hanno vita breve decadono in altre particelle: riveliamo i prodotti di decadimento

The CERN accelerator complex

Complexe des accélérateurs du CERN



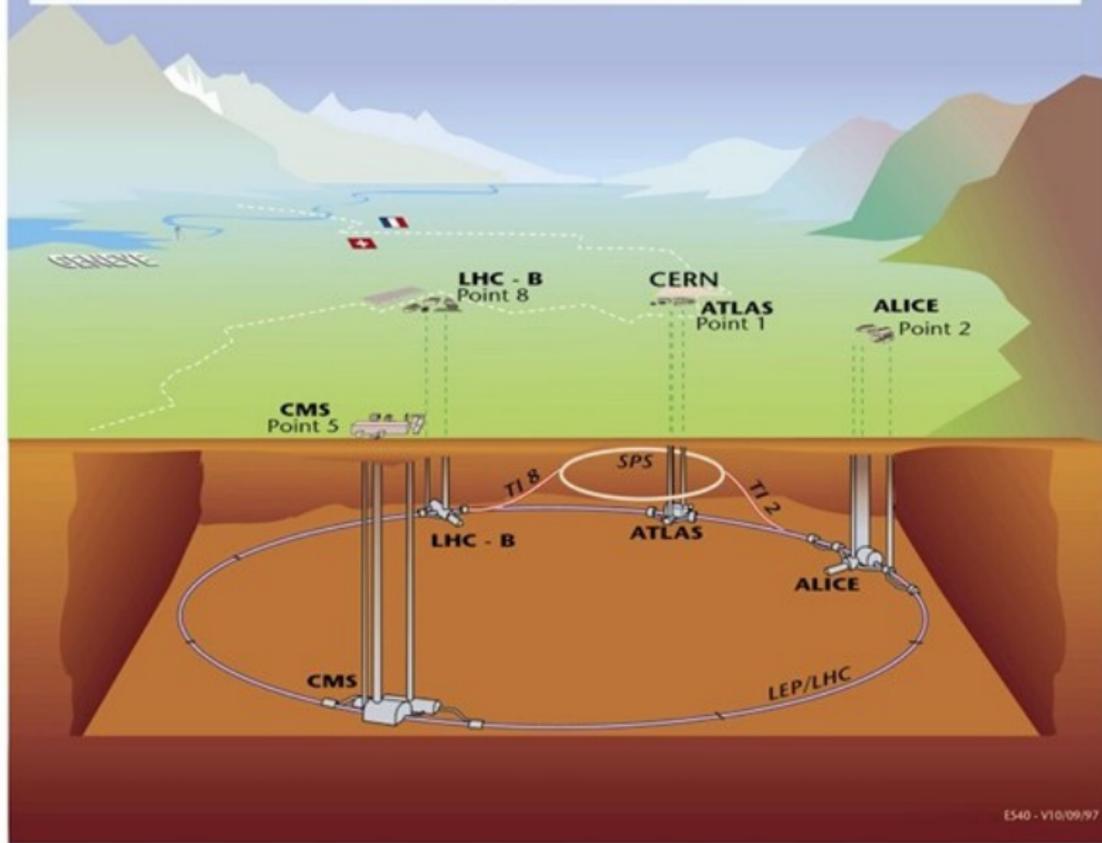
▶ H^- (hydrogen anions) ▶ p (protons) ▶ ions ▶ RIBs (Radioactive Ion Beams) ▶ n (neutrons) ▶ \bar{p} (antiprotons) ▶ e^- (electrons) ▶ μ (muons)

LHC - Large Hadron Collider // SPS - Super Proton Synchrotron // PS - Proton Synchrotron // AD - Antiproton Decelerator // CLEAR - CERN Linear Electron Accelerator for Research // AWAKE - Advanced WAKEfield Experiment // ISOLDE - Isotope Separator OnLine // REX/HIE-ISOLDE - Radioactive Experiment/High Intensity and Energy ISOLDE // MEDICIS // LEIR - Low Energy Ion Ring // LINAC - LINear ACcelerator // n_TOF - Neutrons Time Of Flight // HiRadMat - High-Radiation to Materials // Neutrino Platform



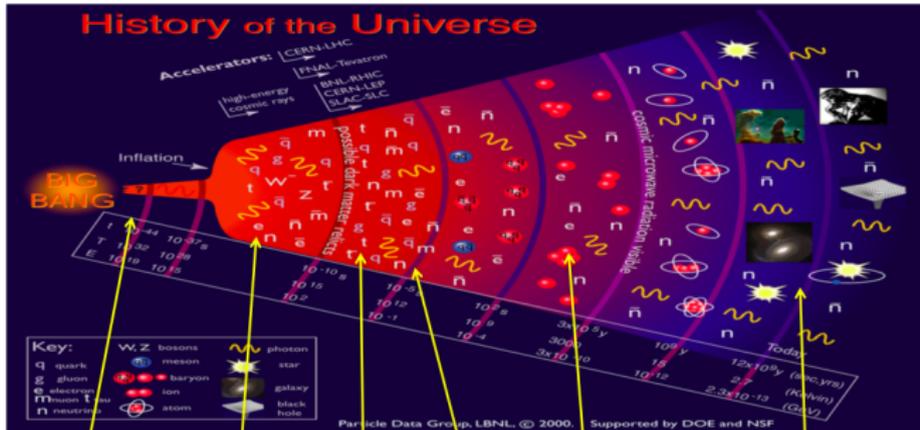


Overall view of the LHC experiments.



ES40 - V10/09/97

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

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

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

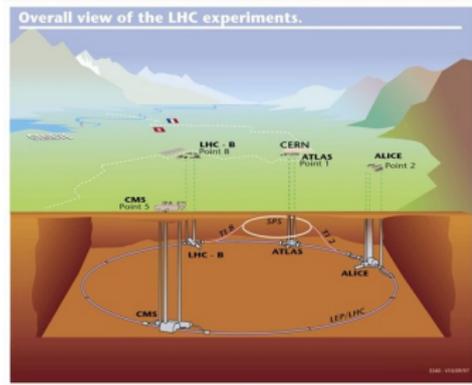
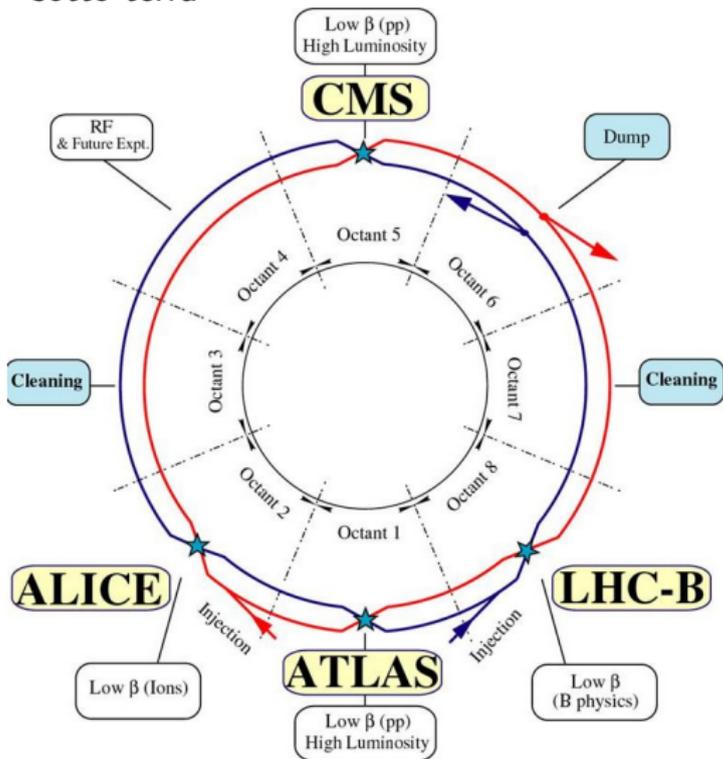
1eV = $1.6 \cdot 10^{-19} J$
protone ($m = 1.67 \cdot 10^{-27} kg$) ad una velocità di $10^5 m/s$

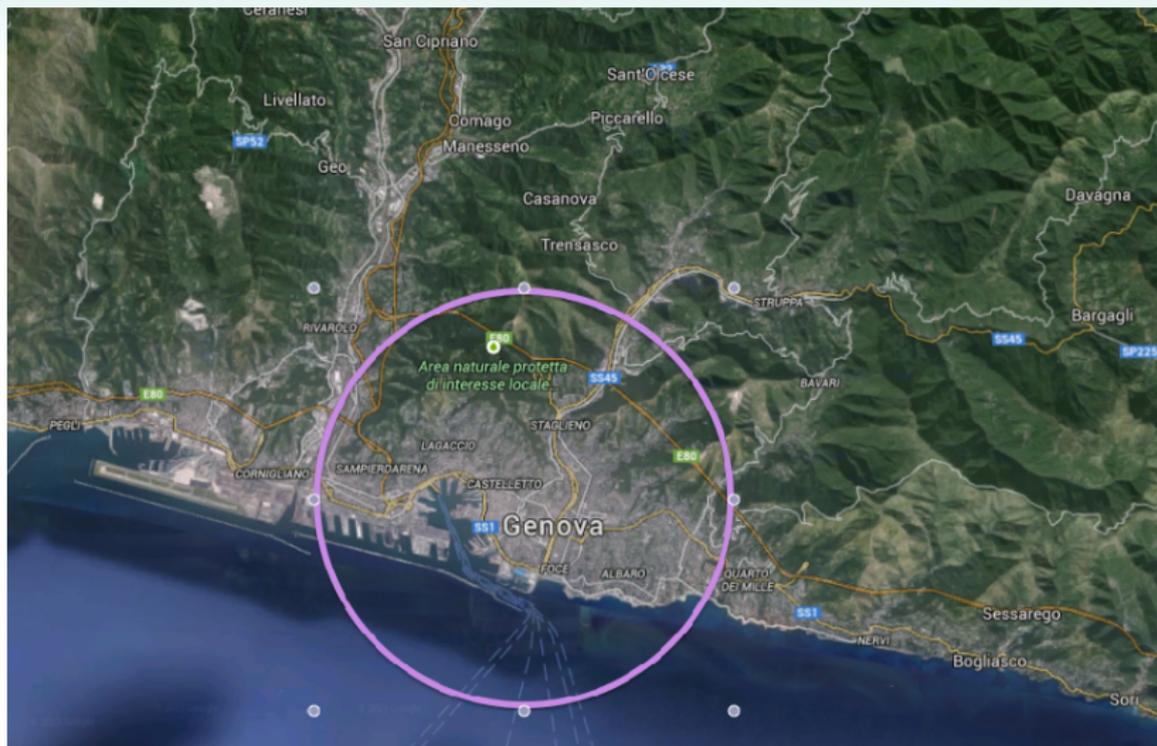
$$E_{cin} = \frac{1}{2}mv^2 = 6.4 \cdot 10^{-19} J = 4eV$$

- 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 ($E = mc^2$)

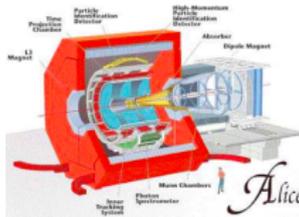
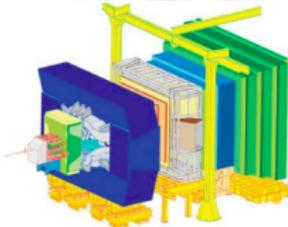
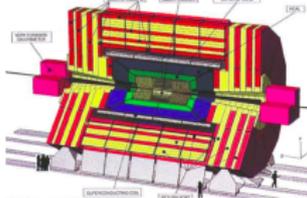
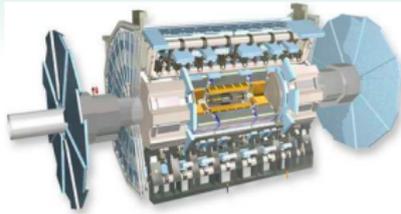
LHC

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 giganti



- ATLAS 7000 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

Il CERN LHC e gli esperimenti

CERN: Centro Europeo per la Fisica delle Particelle

- 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; molti stati associati

CERN: Centro Europeo per la Fisica delle Particelle 2



CERN: Centro Europeo per la Fisica delle Particelle 3

Prima di tutto il CERN e' una straordinaria istituzione, sovra-nazionale, di collaborazione, condivisione, confronto ma anche competizione!

CERN: founded in 1954: 12 European States

“Science for Peace”

Today: 21 Member States

Member States: Austria, Belgium, Bulgaria, Czech Republic, Denmark, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Israel, Italy, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovak Republic, Spain, Sweden, Switzerland and United Kingdom

Associate Member States: Pakistan, Turkey

States in accession to Membership: Cyprus, Romania, Serbia

Applications for Membership or Associate Membership: Brazil, Croatia, India, Lithuania, Russia, Slovenia, Ukraine

Observers to Council: India, Japan, Russia, United States of America; European Union, JINR and UNESCO



Member States of CERN

Member States (date of accession)

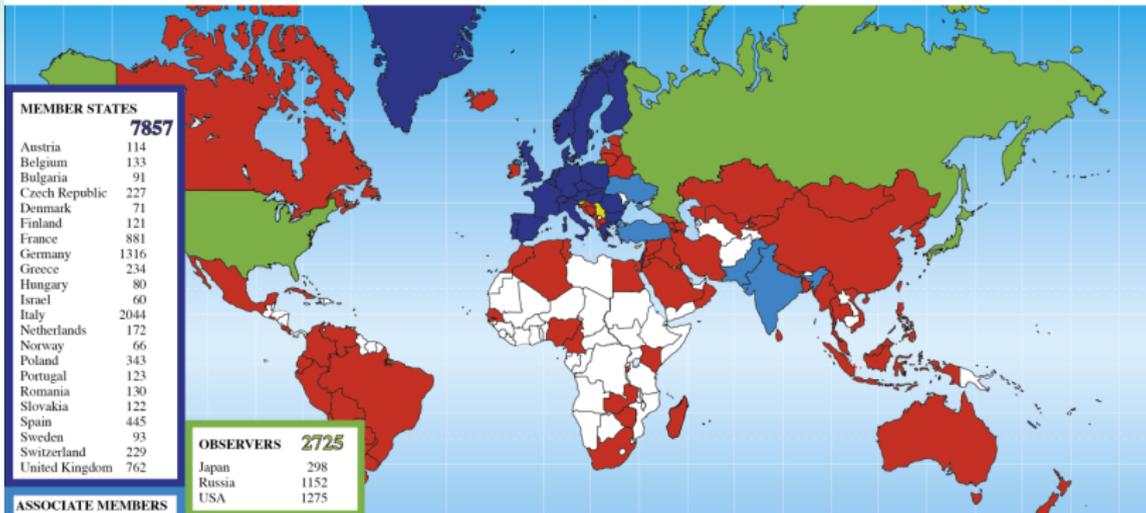
- | | |
|--|---|
|  Austria (1959) |  Switzerland (1953) |
|  Belgium (1953) |  United Kingdom (1953) |
|  Bulgaria (1999) | |
|  Czech Republic (1993) | |
|  Denmark (1953) | |
|  Finland (1991) | |
|  France (1953) | |
|  Germany (1953) | |
|  Greece (1953) | |
|  Hungary (1992) | |
|  Israel (2014) | |
|  Italy (1953) | |
|  Netherlands (1953) | |
|  Norway (1953) | |
|  Poland (1991) | |
|  Portugal (1986) | |
|  Romania (2016) | |
|  Slovakia (1993) | |
|  Spain (1961-1968, 1983-) | |
|  Sweden (1953) | |

States in accession to Membership and Associate Members

- | |
|--|
|  Cyprus (2016) |
|  India (2017) |
|  Lithuania (2018) |
|  Pakistan (2015) |
|  Serbia (2012) |
|  Slovenia (2017) |
|  Turkey (2015) |
|  Ukraine (2016) |



Distribution of All CERN Users by Nationality on 5 July 2017



MEMBER STATES

7857

Austria	114
Belgium	133
Bulgaria	91
Czech Republic	227
Denmark	71
Finland	121
France	881
Germany	1316
Greece	234
Hungary	80
Israel	60
Italy	2044
Netherlands	172
Norway	66
Poland	343
Portugal	123
Romania	130
Slovakia	122
Spain	445
Sweden	93
Switzerland	229
United Kingdom	762

OBSERVERS

2725

Japan	298
Russia	1152
USA	1275

ASSOCIATE MEMBERS

710

India	360
Pakistan	61
Turkey	179
Ukraine	110

ASSOCIATE MEMBERS IN THE PRE-STAGE TO MEMBERSHIP

104

Cyprus	26
Serbia	47
Slovenia	31

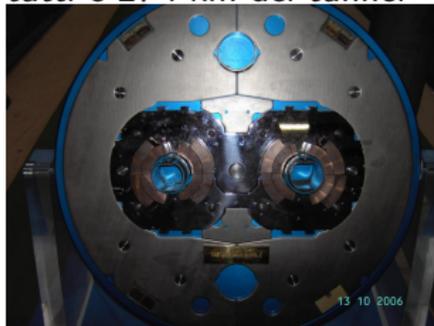
OTHERS

1865

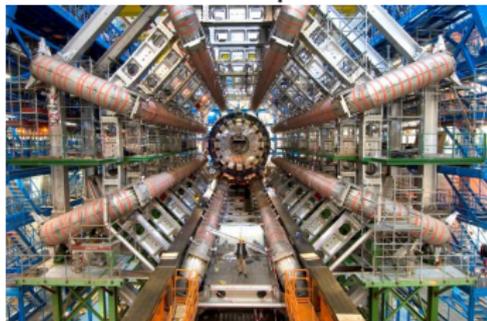
Bosnia & Herzegovina	1	Egypt	33	Kenya	3	Mongolia	2	Philippines	4	Thailand	24
Brazil	131	El Salvador	1	Korea Rep.	175	Montenegro	7	Saint Kitts and Nevis	1	T.F.Y.R.O.M.	2
Burundi	1	Estonia	17	Kyrgyzstan	1	Morocco	18	Tunisia	1	Tunisia	5
Albania	3	Cameroon	1	Georgia	45	Latvia	2	Myanmar	1	San Marino	1
Algeria	14	Canada	161	Hong Kong	1	Lebanon	19	Nepal	10	Saudi Arabia	2
Argentina	24	Chile	22	Iceland	5	Lithuania	40	New Zealand	6	Senegal	2
Armenia	25	China	482	Indonesia	11	Luxembourg	2	Nigeria	3	Singapore	6
Australia	30	Colombia	45	Iran	52	Madagascar	3	North Korea	1	Saint Maarten	1
Azerbaijan	9	Costa Rica	1	Iraq	1	Malaysia	12	Oman	9	South Africa	39
Bangladesh	12	Croatia	41	Ireland	17	Malta	7	Palestine (O.T.)	7	Sri Lanka	4
Belarus	47	Cuba	15	Jordan	2	Mauritius	1	Paraguay	2	Syria	2
Bolivia	3	Ecuador	4	Kazakhstan	4	Mexico	92	Peru	6	Taiwan	53

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

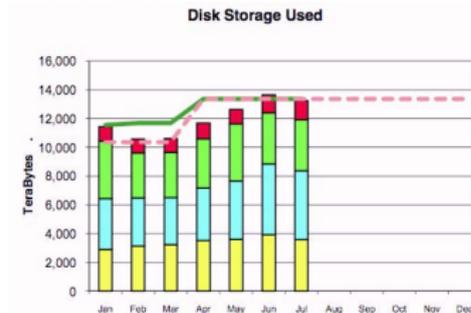


piani

scavare e attrezzare caverne per alloggiare i rivelatori



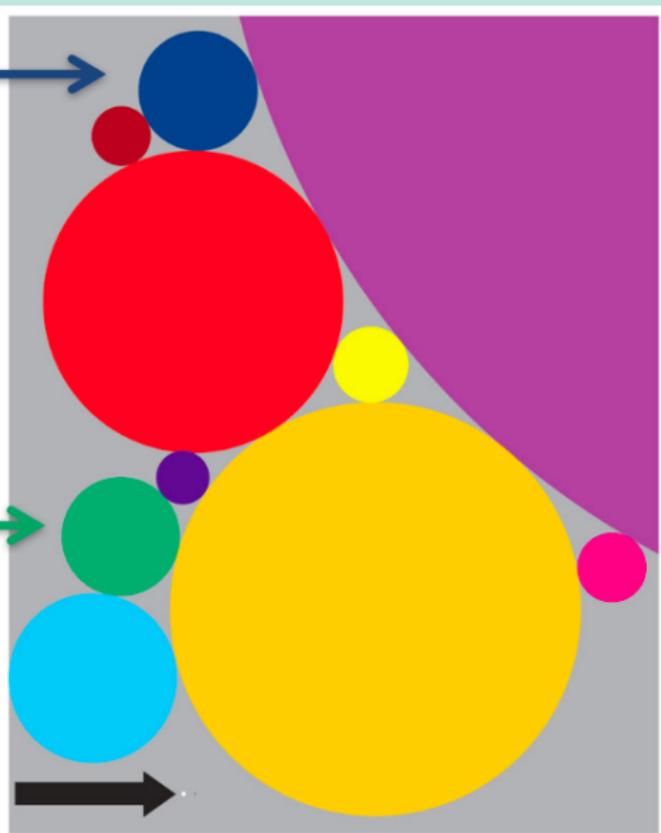
migliaia di TB al mese da acquisire e analizzare



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	6,120
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 <i>wired</i>	1.26

(<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 delle ditte italiane sono state molto maggiori dell'investimento italiano (Ansaldo ha costruito circa 1/3 dei magneti)



Non è solo un costo ma un investimento per la società

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 World Wide Web 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
- ...

Vi aspettiamo!