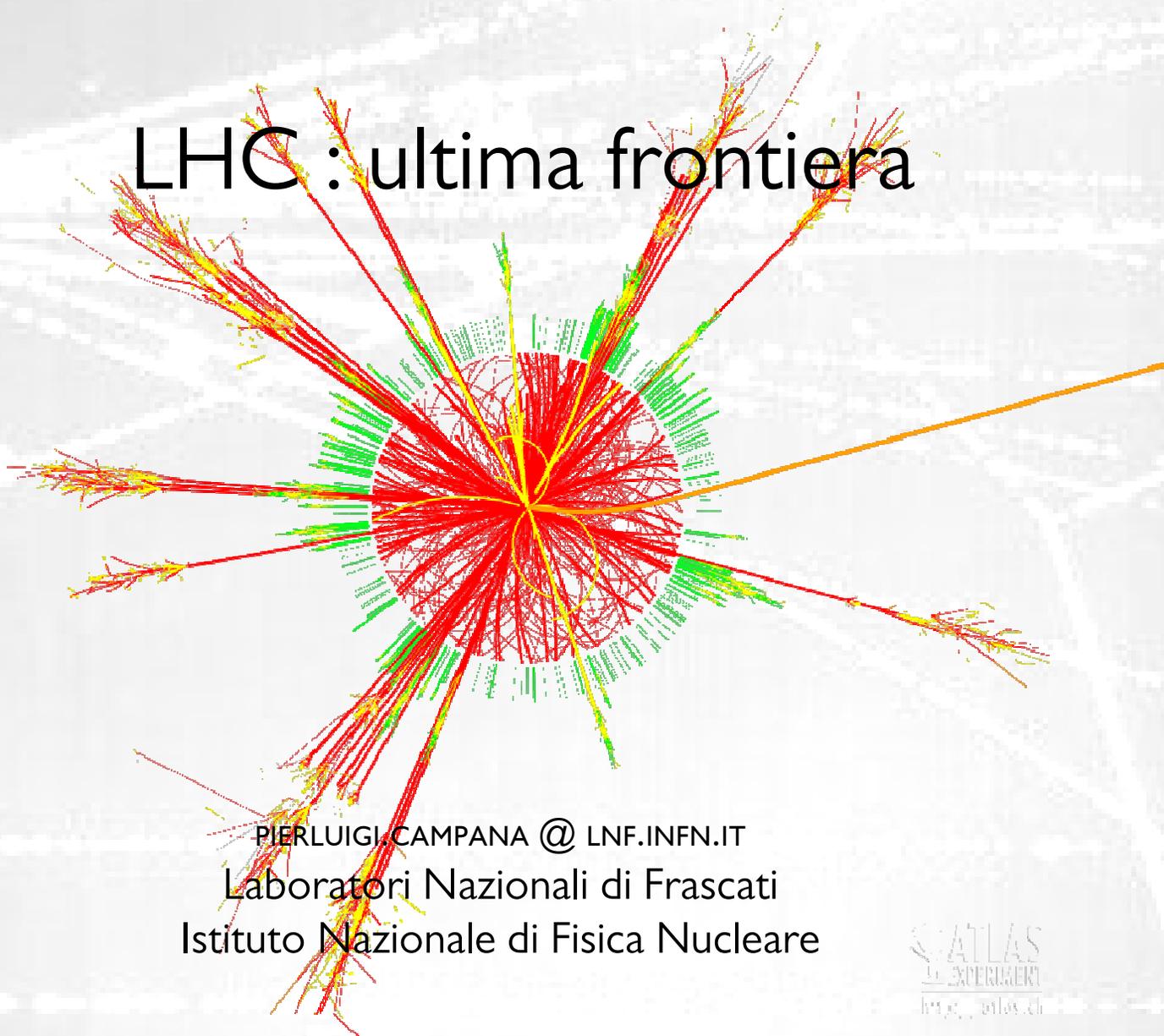


LHC : ultima frontiera



PIERLUIGI CAMPANA @ LNF.INFN.IT
Laboratori Nazionali di Frascati
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare



ARGOMENTI DEL SEMINARIO

- IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI
MASSE, FORZE
SIMMETRIE, ACCOPPIAMENTI
IL MECCANISMO DI HIGGS
- LE DIFFICOLTA' DEL MODELLO STANDARD E I LIMITI COSMOLOGICI
ASIMMETRIA MATERIA-ANTIMATERIA
LA MASSA OSCURA
- I MODELLI SUPERSIMMETRICI E LE PREVISIONI
- L'ACCELERATORE LHC
LA MACCHINA, GLI APPARATI
LE TRACCE SPERIMENTALI
- CONCLUSIONE E 2 EPILOGHI
- APPENDICE "CULTURALE"

La **RICERCA IN FISICA FONDAMENTALE** si prefigge di dare una risposta alle domande piu' elementari :

- come si e' formato l'Universo ?
- quando ?
- di cosa e' fatto ?
- quali sono le forze che agiscono sulla materia ?
- di cosa e' fatta la materia che ci circonda ?
- come determina le proprieta' dell'Universo ?

Il goal della Fisica delle Particelle, dell'Astrofisica e della Cosmologia e' di creare una teoria che possa spiegare i dati che osserviamo (agli acceleratori, ai telescopi, sui satelliti, nei laboratori sotterranei) : il **MODELLO STANDARD (SM)**

Negli ultimi 30 anni, e' stato messo a punto uno schema teorico della Fisica delle Particelle, che riproduce in maniera eccezionale i dati sperimentali, che permette di spiegare alcuni dei meccanismi di evoluzione dell'Universo dopo il Big Bang.

Lo SM e' stato in grado di spiegare ad es. i meccanismi di produzione delle abbondanze degli elementi nell'Universo, a partire dai modelli di evoluzione (nucleosintesi)

1/3 DEI PREMI NOBEL DEGLI ULTIMI 30 ANNI SONO ANDATI PER QUESTO LAVORO

2007 - Albert Fert, Peter Grünberg

2006 - John C. Mather, George F. Smoot

2005 - Roy J. Glauber, John L. Hall, Theodor W. Hänsch

2004 - David J. Gross, H. David Politzer, Frank Wilczek

2003 - Alexei A. Abrikosov, Vitaly L. Ginzburg, Anthony J. Leggett

2002 - Raymond Davis Jr., Masatoshi Koshihira, Riccardo Giacconi

2001 - Eric A. Cornell, Wolfgang Ketterle, Carl E. Wieman

2000 - Zhores I. Alferov, Herbert Kroemer, Jack S. Kilby

1999 - Gerardus 't Hooft, Martinus J.G. Veltman

1998 - Robert B. Laughlin, Horst L. Störmer, Daniel C. Tsui

1997 - Steven Chu, Claude Cohen-Tannoudji, William D. Phillips

1996 - David M. Lee, Douglas D. Osheroff, Robert C. Richardson

1995 - Martin L. Perl, Frederick Reines

1994 - Bertram N. Brockhouse, Clifford G. Shull

1993 - Russell A. Hulse, Joseph H. Taylor Jr.

1992 - Georges Charpak

1991 - Pierre-Gilles de Gennes

1990 - Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall, Richard E. Taylor

1989 - Norman F. Ramsey, Hans G. Dehmelt, Wolfgang Paul

1988 - Leon M. Lederman, Melvin Schwartz, Jack Steinberger

1987 - J. Georg Bednorz, K. Alex Müller

1986 - Ernst Ruska, Gerd Binnig, Heinrich Rohrer

1985 - Klaus von Klitzing

1984 - Carlo Rubbia, Simon van der Meer

1983 - Subramanyan Chandrasekhar, William A. Fowler

1982 - Kenneth G. Wilson

1981 - Nicolaas Bloembergen, Arthur L. Schawlow, Kai M. Siegbahn

1980 - James Cronin, Val Fitch

1979 - Sheldon Glashow, Abdus Salam, Steven Weinberg

1978 - Pyotr Kapitsa, Arno Penzias, Robert Woodrow Wilson

1977 - Philip W. Anderson, Sir Nevill F. Mott, John H. van Vleck

1976 - Burton Richter, Samuel C.C. Ting

I MATTONI FONDAMENTALI : I FERMIONI , SPIN 1/2

Tutta la materia e' riconducibile ad aggregati di particelle puntiformi (o almeno ritenute tali sino ad oggi), i quarks, che si combinano secondo precise regole ed organizzati insieme ai leptoni a formare "generazioni"

MATERIA ORDINARIA:
PROTONI, NEUTRONI
ELETTRONI



MATERIA
PRODOTTA NEI RAGGI
COSMICI, NEL SOLE,
AGLI ACCELERATORI

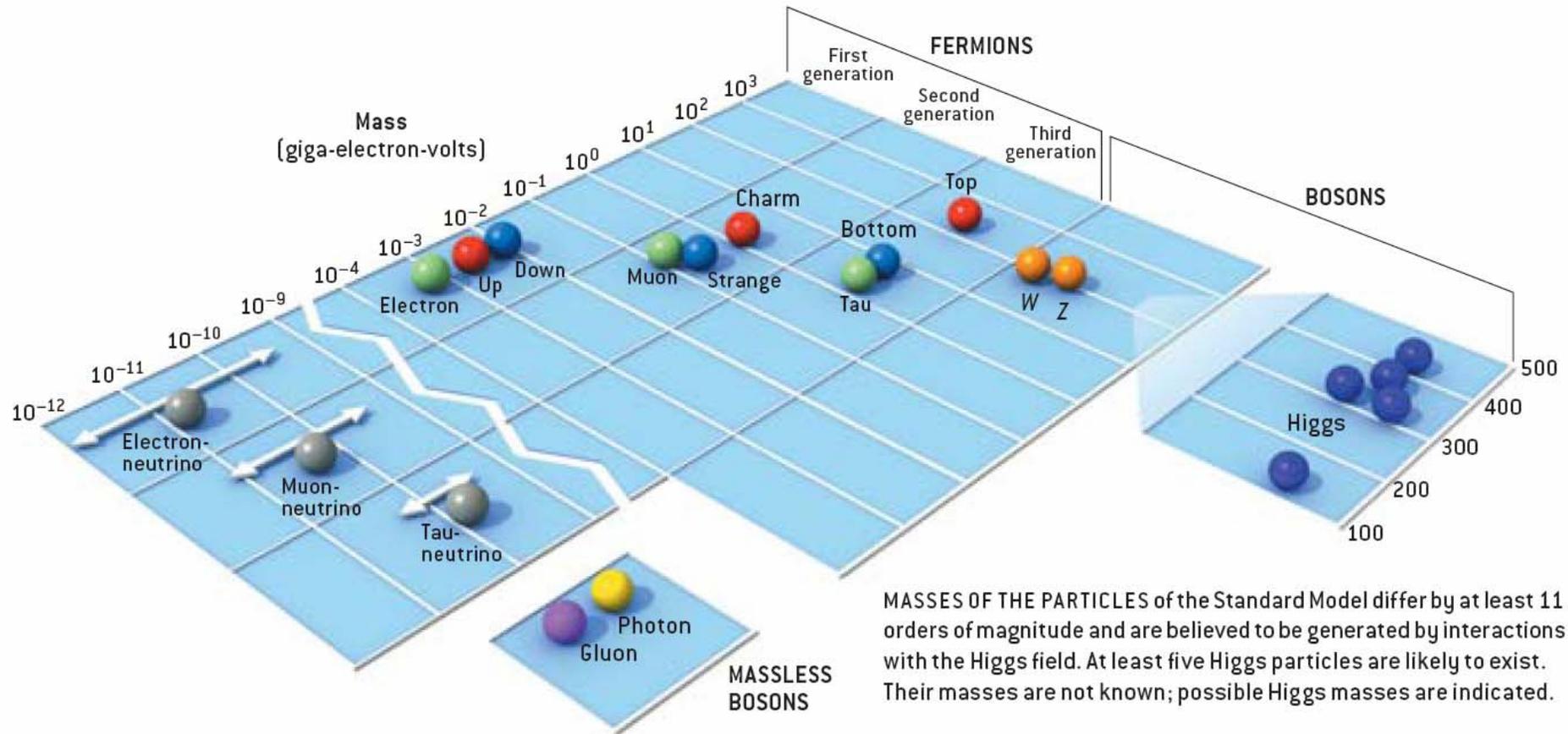


Quarks		Leptons		
$Q=2/3 e$	$Q=-1/3 e$	$Q=-e$	$Q=0$	
up (0.004)	down (0.006)	e (0.0005)	ν_e (very small*) meno di 10^{-9}	I
charm (1.5)	strange (0.5)	μ (0.1)	ν_μ (very small)	II
top (175)	bottom (4.5)	τ (1.8)	ν_τ (very small)	III

MASSE IN GEV (1 GEV ~ 1 m_{PROTONE})

ANCORA DA
SCOPRIRE

LA TAVOLA DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



Gli adroni (ossia quasi tutte le particelle a noi note) sono costituiti da miscele di 2 [mesoni] o di 3 quark [barioni] tenuti insieme dalla forza nucleare forte (quindi dallo scambio continuo di gluoni)

I quark hanno carica frazionaria ! (ma sono confinati e inosservabili...)

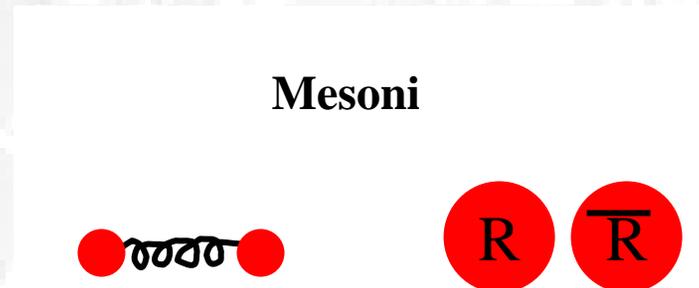
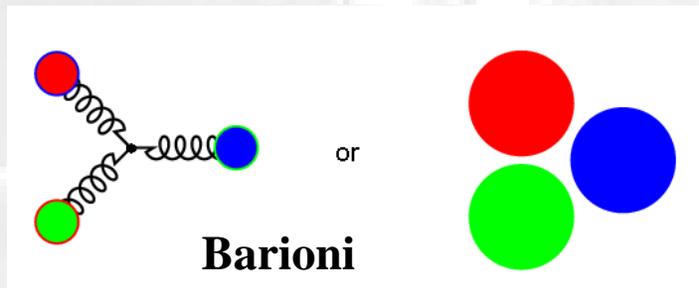
Quark e leptoni trasportano un numero quantico che gli permette di sottostare ai diversi tipi di interazione:

- carica debole (“sapore”) : tutti
- carica forte (“colore”) : i quark
- carica elettrica : tutti tranne i neutrini

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$						Mesons $q\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.						Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin	Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2	π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2	K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
n	neutron	udd	0	0.940	1/2	ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2	B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2	η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

Regole da seguire nella formazione degli adroni:

- cariche intere (... , -1, 0, +1, ...)
- “carica forte” neutra : ad es. rosso-*anti* rosso, rosso-blu-verde (l’attribuzione del numero quantico di “colore” deriva dai principi della Meccanica Quantistica)



- le interazioni forti conservano il colore,
- le interazioni deboli conservano il sapore,
- l’interazione elettromagnetica conserva la carica

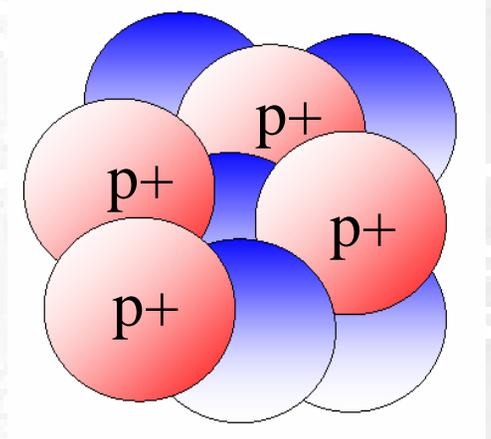
Non le motivazioni profonde del rispetto di queste simmetrie

FORZE E CAMPI

- Elettromagnetica – di cui abbiamo esperienza quotidiana e che si esercita su oggetti dotati di carica elettrica

- Nucleare *forte* – quella che mantiene stabili i nuclei e che innesca ad es i processi di Fissione atomica

- Nucleare *debole* – quella che governa i decadimenti radioattivi e che e' ad es. responsabile dei processi di combustione nelle stelle (ad es. la fusione nel Sole: $p+p \rightarrow {}^2\text{H}_1 + e^+ + \nu_e + 0.42 \text{ MeV}$)



- Gravitazionale – di cui abbiamo esperienza quotidiana e che si esercita su oggetti dotati di massa e che su grandi scale ad es. regola i moti dei corpi celesti

Ad oggi non si conoscono fenomeni che non siano riconducibili ad una di queste forze

Con il termine campo, ci riferisce a quella porzione di spazio, che, essendo occupata dalla particelle che risente (o esercita) la forza, risulta “perturbato” e quindi e' differente dallo stato di vuoto

L'INTENSITA' E IL CAMPO DI AZIONE DELLE FORZE

- Elettromagnetica: $F = \alpha_{em} Q^2/r^2$ (a lunghissimo raggio, si estende all'infinito, diminuisce con la distanza)

$$\text{Costante di accoppiamento : } \alpha_{em} = 1/137$$

- Nucleare forte: $F = -\alpha_s K r$ (a cortissimo raggio, 10^{-15} m, aumenta con la distanza ! analogo meccanico: la molla)

$$\text{Costante di accoppiamento : } \alpha_s \sim 0.4$$

- Nucleare debole – Interazione puntiforme (ha valore non nullo solo nell'intorno del punto dove e' applicata, 10^{-18} m)

$$\text{Costante di accoppiamento : } G_{\text{Fermi}} \sim 10^{-5}$$

- Gravitazionale $F = G_{\text{Newton}} M^2/r^2$ (a lunghissimo raggio, si estende all'infinito, diminuisce con la distanza). In tutte le interazioni tra particelle e' trascurabile. Conta solo in Cosmologia

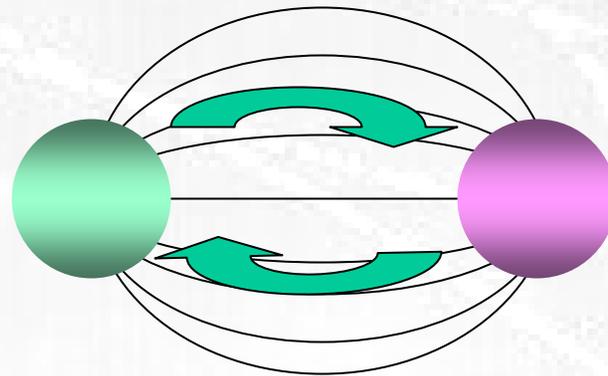
$$\text{Costante di accoppiamento : } G_{\text{Newton}} \sim 10^{-39}$$

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g gluon	0	0

Nella teoria dei campi, alcune particelle “mediatori” o bosoni, hanno la funzione di “comunicare” alle particelle che sono nel campo, la presenza di una forza .

L’interazione avviene con lo scambio di questi oggetti – tra le particelle si crea un “campo di forza”



Da molti anni, tra i teorici, c’è la convinzione che le forze che osserviamo non siano altro che la manifestazione “accidentale” di un’unica interazione, che ad un certo punto del raffreddamento dell’Universo, si è “dissociata” e manifestata sotto diverse entità’. Oggi c’è l’evidenza sperimentale che, ad energie di circa 100 GeV, forza debole ed elettromagnetica sono la stessa cosa.

L'INTENSITA' DELLE INTERAZIONI DEBOLI TRA QUARK

Gli accoppiamenti tra quarks sono regolati da una matrice che ne determina la loro intensita', e che fissa precise regole (che se fossero violate implicherebbero Nuova Fisica)

$Q=-1/3$ $Q=2/3$	u	c	t
d	0.97	-0.22	~ 0.001
s	0.22	0.97	~ 0.05
b	~ 0.001	~ 0.05	~ 1

(matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa)

La matrice si riflette sulla composizione delle 3 generazioni (u-d, c-s, b-t).

Nota: non sono ammesse transizioni neutre che cambiano il sapore, come ad es. $b \rightarrow s$
Esiste una matrice di accoppiamento simile anche per i neutrini

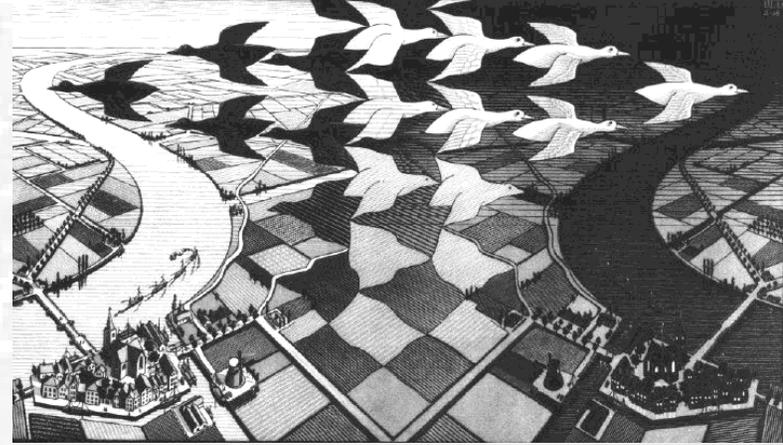
In questa scala, 1 significa 100%

Ad es. i quark di tipo t (top) decadono od interagiscono quasi esclusivamente con quark di tipo b (bottom).

Studiando le relazioni tra gli elementi della matrice, si verifica sperimentalmente il Modello Standard.

LE SIMMETRIE – LA VIOLAZIONE DI CP

In Fisica, le simmetrie rivestono un ruolo fondamentale, poiché determinano l'evoluzione dei sistemi. Tutte le volte che si osserva una violazione di una simmetria, la nostra conoscenza aumenta.



In particolare, negli anni '60 si scoprì che le interazioni deboli violavano (in misura minima $\sim 1/1000$) la SIMMETRIA DI CP, che deriva dall'applicazione di 2 trasformazioni:

- Parità [P] - Trasformazione che ribalta gli assi $(x,y,z) \rightarrow (-x,-y,-z)$ (ad es. osservata ad uno specchio, con rotazione di 180°)
- Coniugazione di carica [C] - Trasformazione che inverte la carica $(q_1,q_2) \rightarrow (-q_1,-q_2)$ (trasforma una particella nella sua antiparticella)

La forza debole è in grado di distinguere tra materia e antimateria (\rightarrow effetti cosmologici) Si pensa che la violazione di CP abbia determinato il corso dell'evoluzione dell'Universo [asimmetria materia-antimateria] poiché il Big-Bang ha prodotto inizialmente un eguale quantità di materia e antimateria.

Il presente Universo è dominato dalla materia.

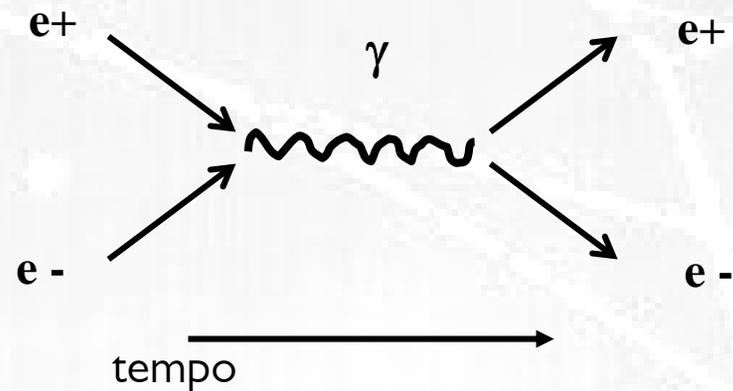
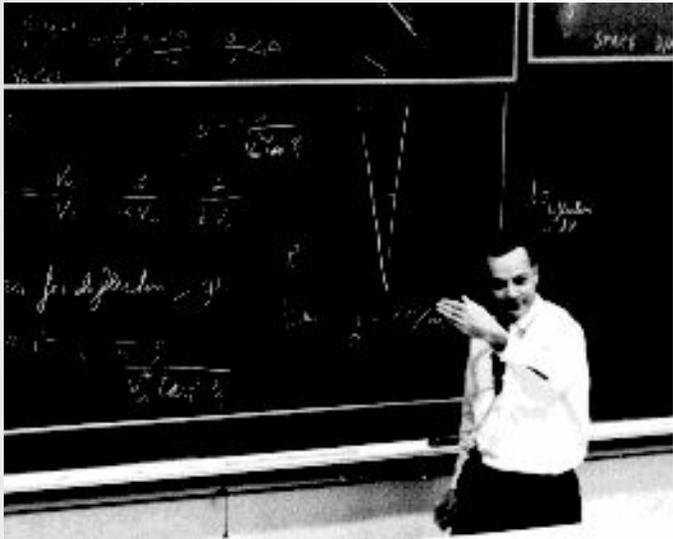
Il problema (irrisolto) è che la violazione di CP misurata sperimentalmente è troppo piccola da giustificare l'asimmetria osservata

LA RAPPRESENTAZIONE GRAFICA DELLE PARTICELLE E DELLE LORO INTERAZIONI

I DIAGRAMMI DI FEYNMAN

Un quark o un leptone è descritto da segmenti entranti o uscenti da vertici nei quali si svolge l'interazione

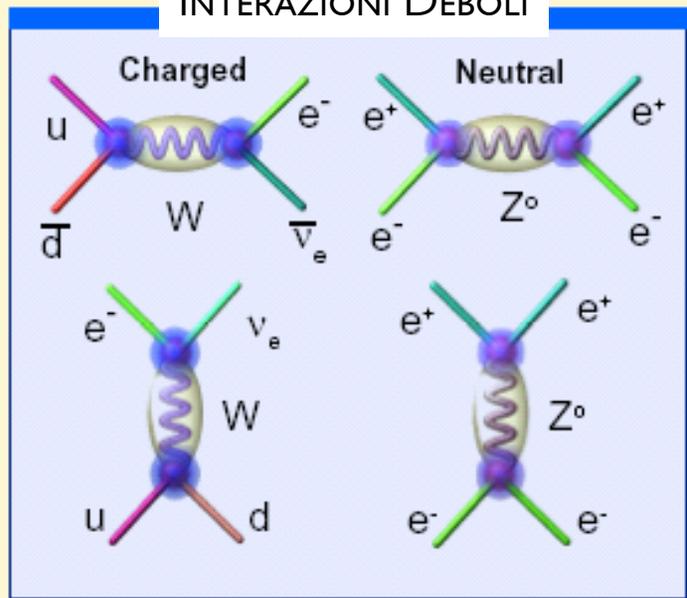
I bosoni vettori delle forze sono descritti da linee a zig-zag



Tutte le interazioni tra le particelle possono essere descritte con questo semplice schema, che permette anche, applicando una serie di regole della fisica teorica, di calcolarne l'intensità (*sezione d'urto del processo*)

La rappresentazione interazioni elettromagnetiche, deboli e forti dei leptoni e dei quark al livello piu' semplice (2 vertici)

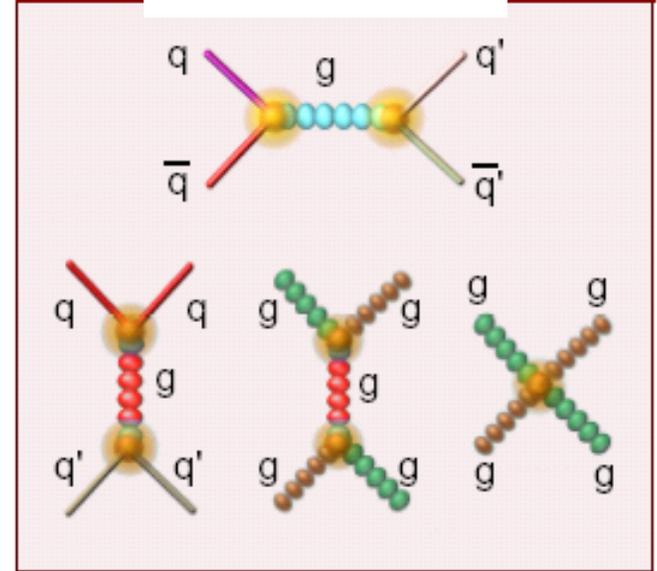
INTERAZIONI DEBOLI



Range $\sim 10^{-18}$ m, relative strength 10^{-14}

MEDIATORI : I BOSONI W E Z

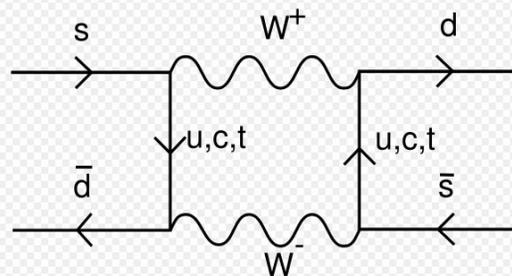
INTERAZIONI FORTI



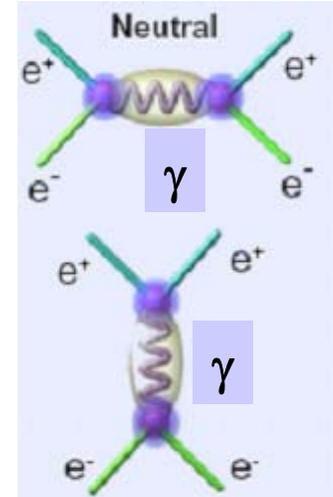
Range $\sim 10^{-15}$ m, relative strength = 1

MEDIATORI : I GLUONI

...ma vanno tenuti in conto anche gli ordini superiori (4 vertici)...



ELETTROMAGNETISMO



MEDIATORE : IL FOTONE

IL MECCANISMO DI HIGGS

Esiste però ancora un elemento da verificare nello SM, prima di poterlo “buttare via” e sostituirlo con qualcosa di nuovo: la scoperta della *particella di Higgs*

Il meccanismo di Higgs è un elemento cruciale dello SM. Ha la funzione di:

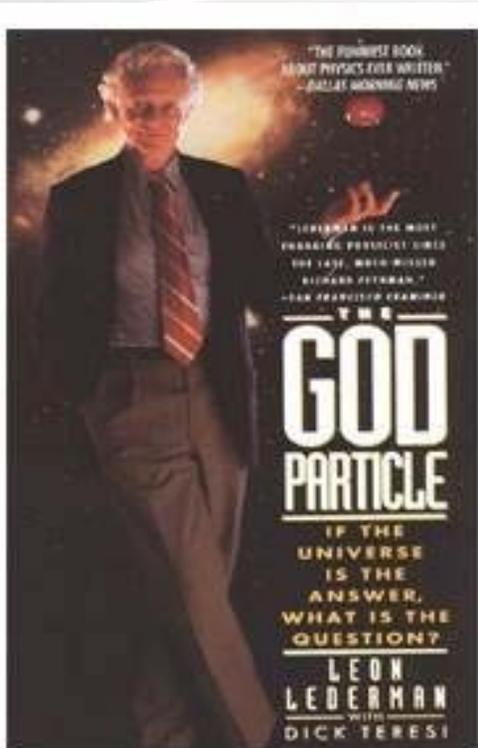
- rompere la simmetria (quella che unifica le interazioni fondamentali)
- dare massa alle particelle

La teoria prevede l'esistenza di una particella molto pesante, di spin 0 (“scalare”)

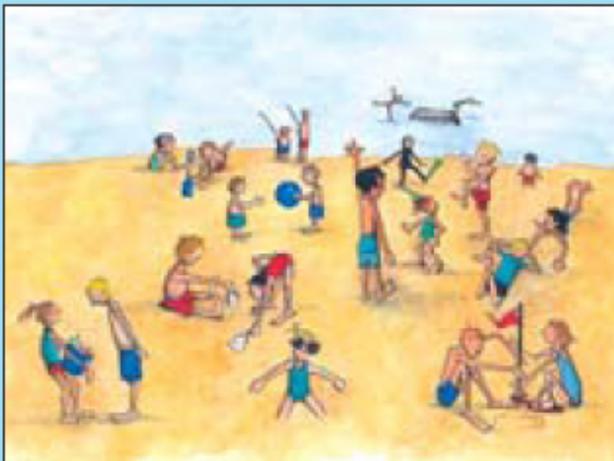
Si è osservato sperimentalmente che il meccanismo funziona, ma il bosone di Higgs) non è stato ancora trovato, ed uno degli scopi per cui è stato costruito LHC è trovare questa particella.

Le attuali misure (indirette) prevedono che questa particella abbia una massa compresa tra 120 e 200 GeV, comunque inferiore, per motivi teorici, ad 1 TeV

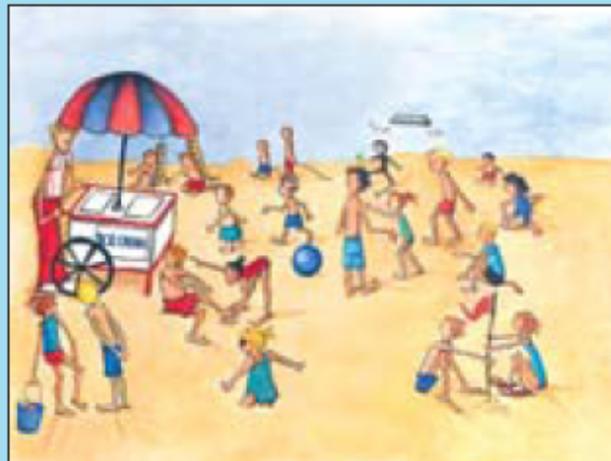
Se così fosse, LHC sarebbe certamente in grado di scoprirla nei prossimi 2-3 anni



Come il campo di Higgs genera le masse



“Empty” space, which is filled with the Higgs field, is like a beach full of children.

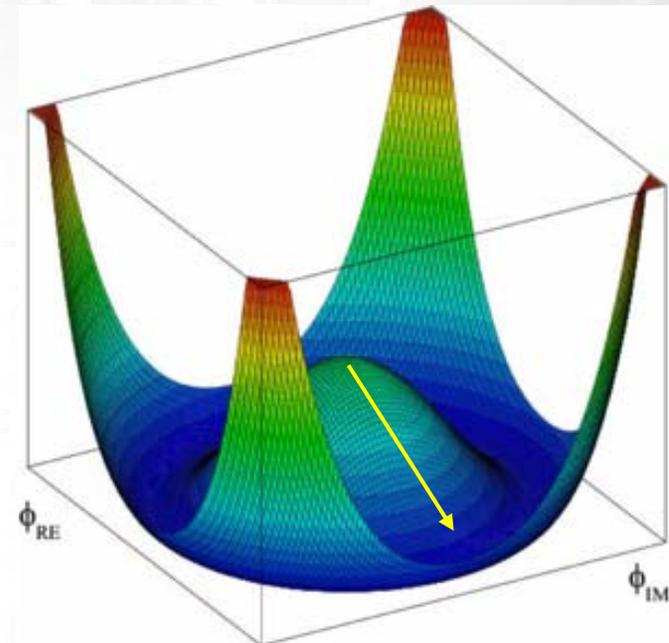


A particle crossing that region of space is like an ice cream vendor arriving ...



... and interacting with kids who slow him down—as if he acquires “mass.”

Il Meccanismo di Higgs ha una profonda analogia anche in Meccanica Classica: quella della Rottura Spontanea della Simmetria, che accade tutte le volte nelle quali i sistemi hanno una condizione di equilibrio instabile



Da molti anni pero' si intuisce che lo SM non puo' essere la Teoria Finale (cosi' come il sistema concepito da Maxwell non lo fu per l'elettromagnetismo).

Lo SM presenta alcune difficolta' teoriche e delle lacune:

Lo SM non spiega (osservazioni sperimentali):

- La materia oscura che c'e' nell'Universo (per non dire dell'energia oscura)
- L'asimmetria barionica (non esiste antimateria nell'Universo – ma c'era al Big Bang)
- La massa dei neutrini (va messa “a mano”)

Lo SM non spiega (speculazioni teoriche):

- La scala di massa delle particelle
- La diversita' di comportamento delle famiglie
- L'enorme diversita' di intensita' tra le forze
- L'incapacita' di unificare la Relativita' Generale con la Meccanica Quantistica

Inoltre nello SM ci sono 19 parametri “messi a mano”.

Va sottolineato che non c'e', sino ad oggi, *nessuna misura sperimentale* che ci faccia pensare che lo SM non funzioni.

Tuttavia dagli anni '70, numerosi teorici hanno iniziato a prefigurare diversi scenari per il superamento dello SM: le teorie supersimmetriche, di stringa, le extra-dimensioni.

LE TEORIE SUPERSIMMETRICHE (SUSY)

Sono uno delle possibili ampliamenti del Modello Standard. Accanto alle particelle note esiste un Supermondo di particelle che hanno spin intero (o semintero): *s-particelle*

Quarks ($s=1/2$) \rightarrow sQuarks ($s=1$) Fotone ($s=1$) \rightarrow sFotone ($s=1/2$)
 Leptoni ($s=1/2$) \rightarrow sLeptoni ($s=1$) Bosoni ($s=1$) \rightarrow Gaugini ($s=1/2$)

Le particelle Supersimmetriche hanno uno spettro di massa ad energie alte (forse qualche centinaio di GeV): questo e' il motivo per il quale non sono visibili alle energie attuali.

Questa separazione implica anche che oggi noi osserviamo una simmetria rotta, quando l'Universo si e' andato raffreddando

Le Susy permettono di risolvere alcuni problemi concettuali e tecnici dello SM, di proporre una soluzione per il mistero della Materia Oscura e, *insieme alla Teoria delle Superstringhe*, di unificare Gravita' e Meccanica Quantistica

Table 3: The Standard Model and supersymmetric particles.

Standard Model	Supersymmetry
γ, Z^0, h^0, H^0	$\tilde{\chi}_1^0, \tilde{\chi}_2^0, \tilde{\chi}_3^0, \tilde{\chi}_4^0$
W^+, H^+	$\tilde{\chi}_1^+, \tilde{\chi}_2^+$
$e^-, \nu_e, \mu^-, \nu_\mu, \nu_\tau$	$\tilde{e}_R, \tilde{e}_L, \tilde{\nu}_e, \tilde{\mu}_R, \tilde{\mu}_L, \tilde{\nu}_\mu, \tilde{\nu}_\tau$
τ^-	$\tilde{\tau}_1, \tilde{\tau}_2$
u, d, s, c	$\tilde{u}_R, \tilde{u}_L, \tilde{d}_R, \tilde{d}_L, \tilde{s}_R, \tilde{s}_L, \tilde{c}_R, \tilde{c}_L$
b	\tilde{b}_1, \tilde{b}_2
t	\tilde{t}_1, \tilde{t}_2

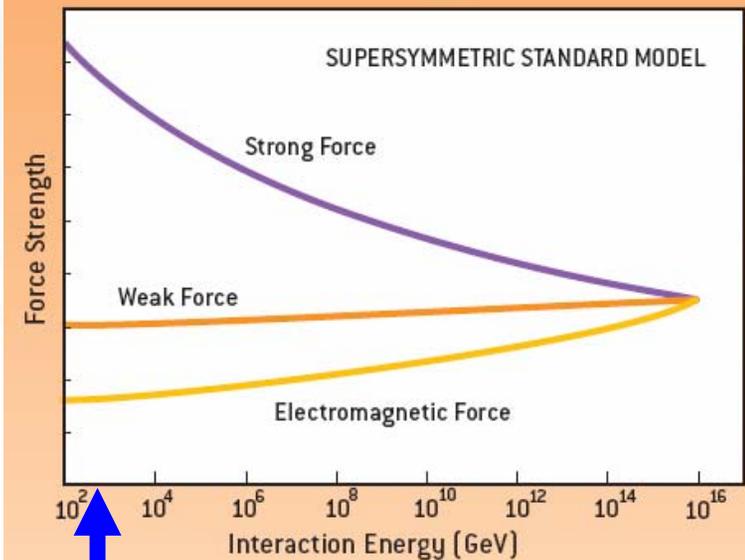
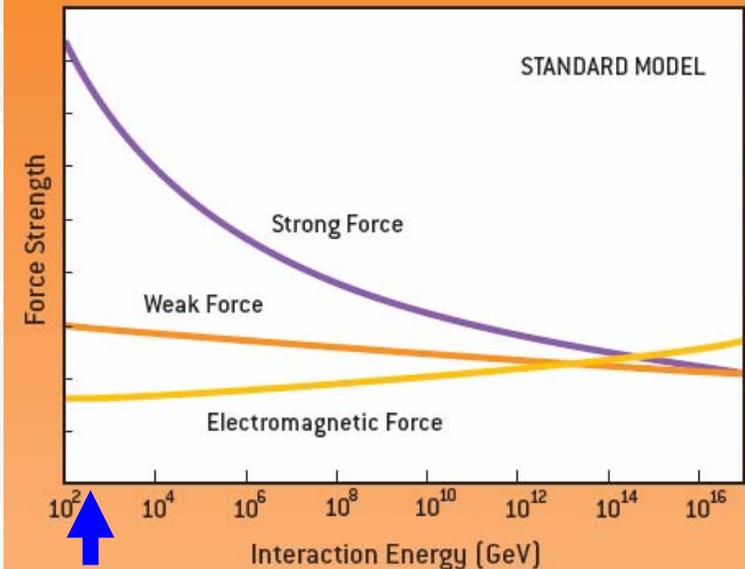
Una evidenza indiretta che le Susy siano un modello probabile per andare oltre lo SM e' dato dallo studio dell'andamento, in funzione dell'energia, delle costanti di accoppiamento delle interazioni.

Uno dei successi dello SM e' la predizione di questo andamento, verificato ora sino ad energie di circa 200 GeV. Estrapolando sino ad energie piu' alte (10^{15} GeV) si nota che le curve si avvicinano (pur non unendosi).

Invece, utilizzando la Susy, le curve tendono a raggrupparsi in un punto ben preciso, detto di Grande Unificazione, attorno a 10^{16} GeV. Questo e' indubbiamente un grande successo.

Putroppo le Susy hanno la caratteristica di non essere molto predittive, avendo bisogno, in generale, di un grande numero di parametri da fissare. La Susy piu' semplice (quella "Minimale") necessita di un numero piccolo di parametri.

Evidence for Supersymmetry



IL PROBLEMA DELLA MATERIA OSCURA

I cosmologi, che a partire dagli anni '60 hanno tentato di calcolare il contenuto di massa dell'Universo, si sono trovati davanti il seguente problema:

dalle misure della velocità delle stelle periferiche delle Galassie a Spirale, si può determinare – attraverso la meccanica classica – la massa.

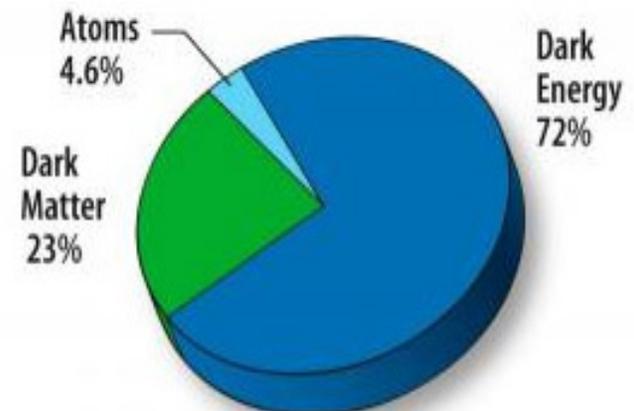
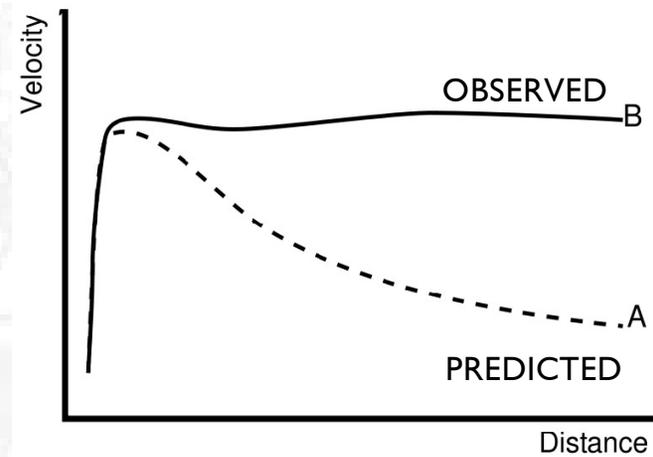
Le osservazioni sperimentali ci dicono che c'è molta più materia nell'Universo di quanta se ne osservi (Galassie, gas intergalattico, raggi cosmici).

Lo spazio è permeato di MATERIA OSCURA (almeno 5 volte quella visibile).

Da cosa è fatta questa materia oscura?

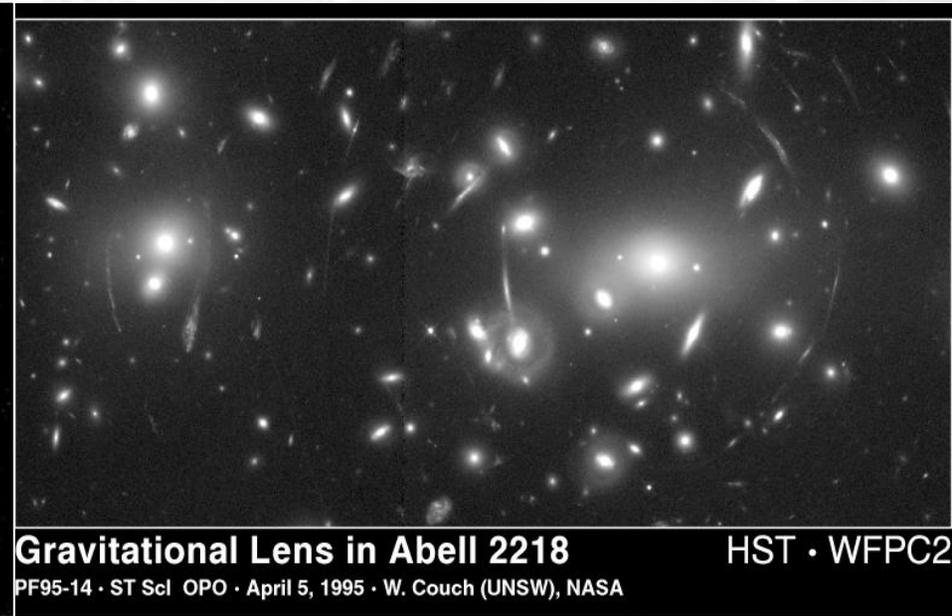
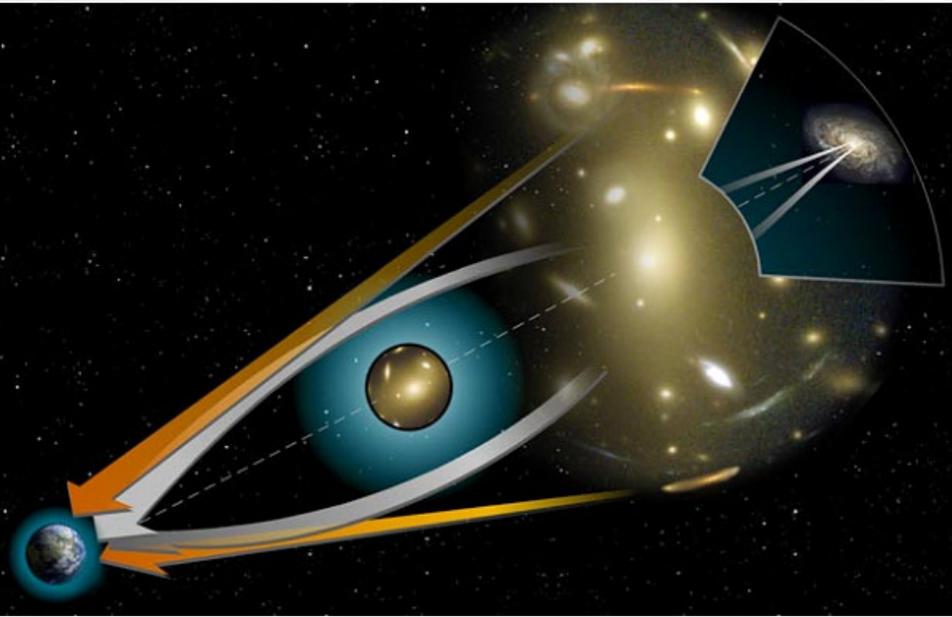
Per molti anni si è pensato che fosse dovuta ad una massa – piccola – dei neutrini. Le misure sperimentali però rendono non percorribile questa ipotesi.

In realtà la questione è più complessa perché circa 10 anni fa, si è scoperto che nell'Universo c'è anche una grande quantità di ENERGIA OSCURA....



UNA SPETTACOLARE INDICAZIONE SPERIMENTALE DELLA MATERIA OSCURA

La teoria della Gravitazione di Einstein prevede che il campo di un oggetto molto massivo possa deviare significativamente la luce (Lenti Gravitazionali).



Ci sono ormai molte osservazioni di oggetti celesti dei quali si osservano immagini speculari ed anelli di luce dovuti a questi effetti e causati da materia oscura che si frappone tra noi e l'oggetto osservato.

Il merito di molti dei progressi in Cosmologia va all'Hubble Space Telescope

UN CANDIDATO PER LA MATERIA OSCURA

La teorie Susy individuano nella Particella Susy piu' Leggera (LSP) il responsabile della materia oscura (il neutralino o il gravitino, a seconda dei modelli)

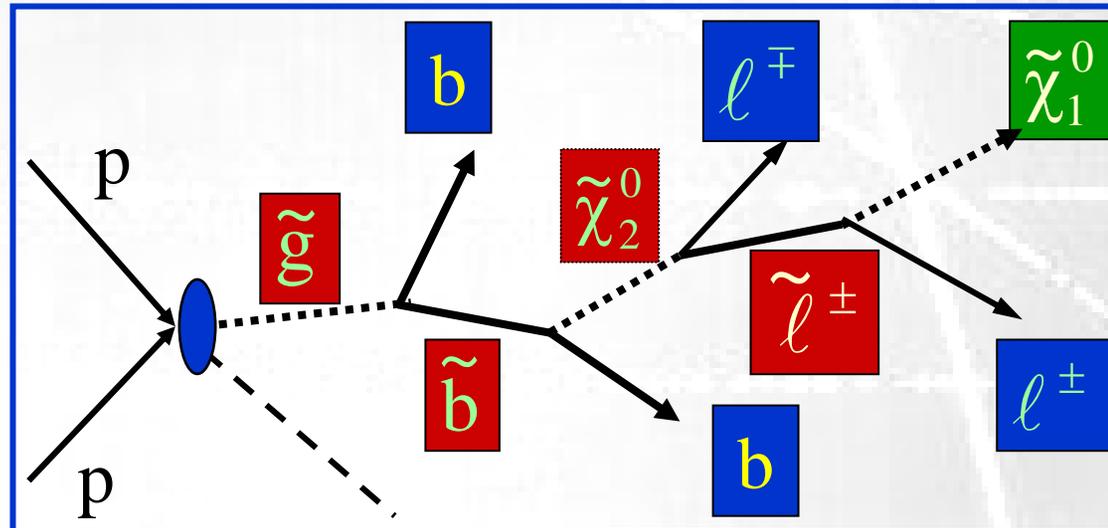
Nella catena di decadimenti delle s-particelle, deve sempre essere conservata almeno una particella di tipo-s.

Nel caso della LSP, essendo la piu' leggera, non puo' decadere e quindi rimane stabile. Si pensa che la LSP sia stata prodotta durante il Big Bang (quando c'era sufficiente energia per creare particelle Susy) e che da allora riempia lo spazio ("reliquia cosmica").

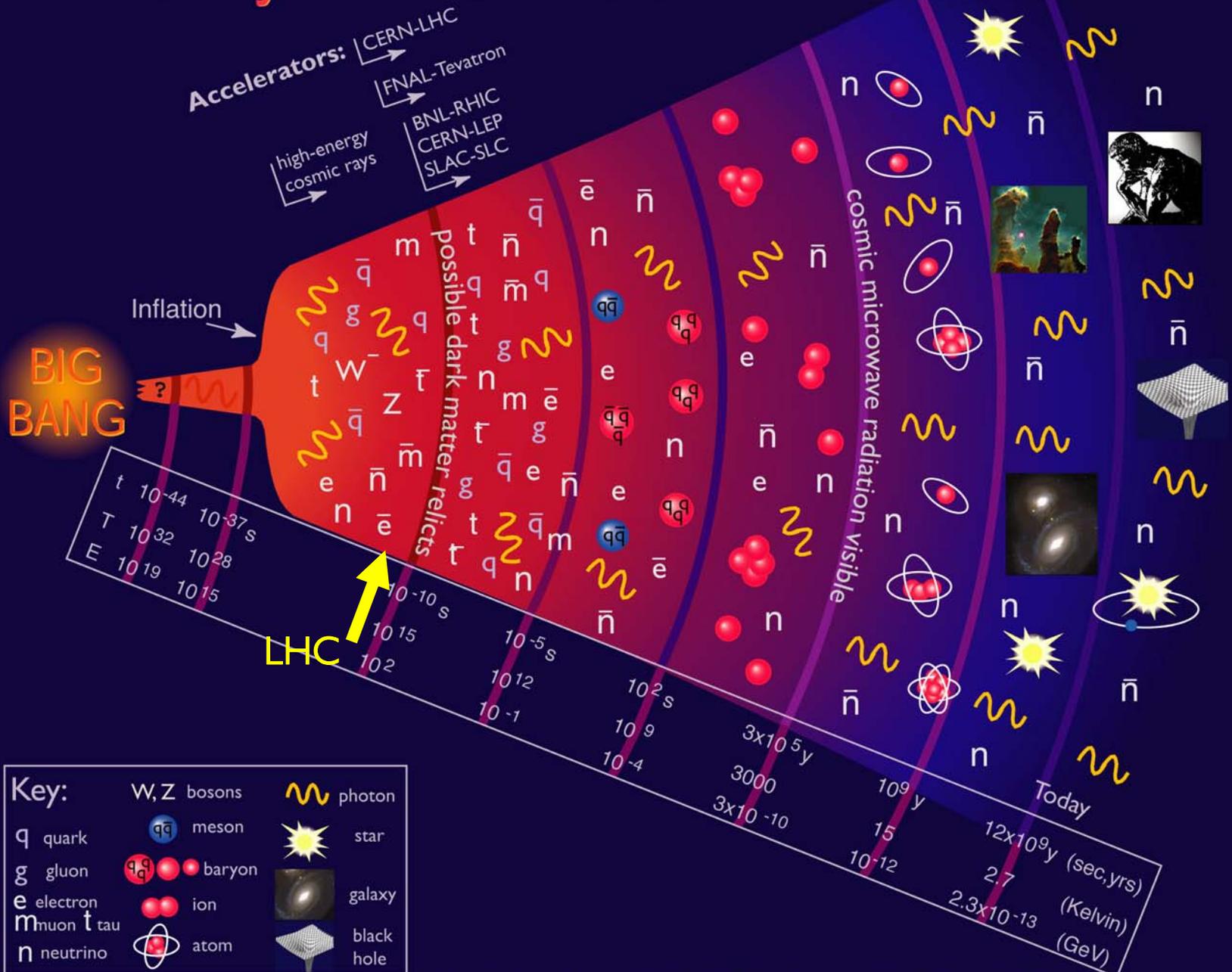
La LSP e' una particella neutra, ha interazioni molto deboli con la materia e, anche a LHC, e' possibile osservarla solo indirettamente.

LHC ha la possibilita' di scoprirla attraverso le collisioni tra protoni che produrranno particelle Susy, che con una catena di decadimenti, porteranno alla sua creazione

Vedremo in seguito quale sia la sua traccia sperimentale nei rivelatori



History of the Universe



A quale scala la gravita' e la meccanica quantistica entrano in contrasto ?

Scala quantistica tipica (DAL PRINCIPIO DI INDETERMINAZIONE DI HEISENBERG, la minima dimensione della quale ha senso parlare)

$$\lambda = \hbar / m c$$

LUNGHEZZA DI COMPTON

Scala gravitazionale (RAGGIO DI SCHWARZSCHILD DI UN BUCO NERO, il raggio di una stella compatta dalla quale non puo' uscire la luce)

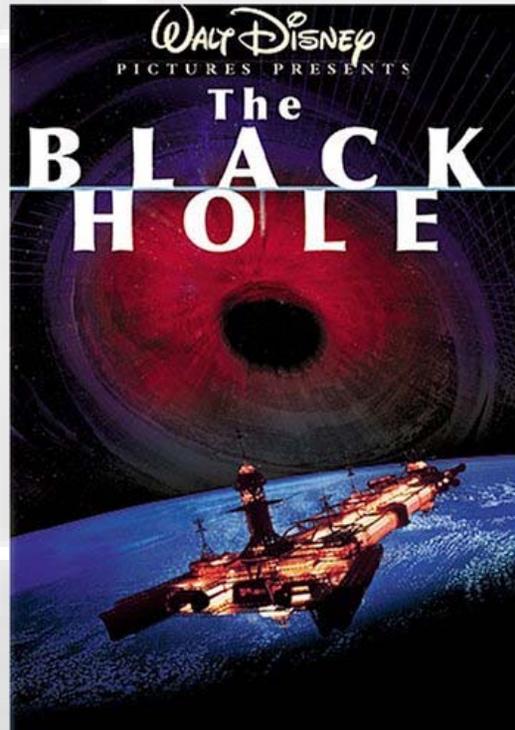


$$r = 2 G m / c^2$$

Ipotizziamo una particella quantistica cosi' densa dalla quale non esca la luce (LUNGHEZZA DI COMPTON=RAGGIO DI SCHWARZSCHILD)

$$M^2 = \hbar / 2 G c \quad \rightarrow \quad M_{\text{Planck}} \sim 10^{19} \text{ GEV} \sim 20 \mu\text{g} \quad \rightarrow \quad L \sim 10^{-35} \text{ M}$$

A masse (lunghezze) superiori (inferiori) non si puo' dare una descrizione dello stato fisico ne' in termini di meccanica quantistica che di gravita' \rightarrow trasportare la MQ a queste energie e' ancora un problema irrisolto



GLI SCOPI SCIENTIFICI DI LHC

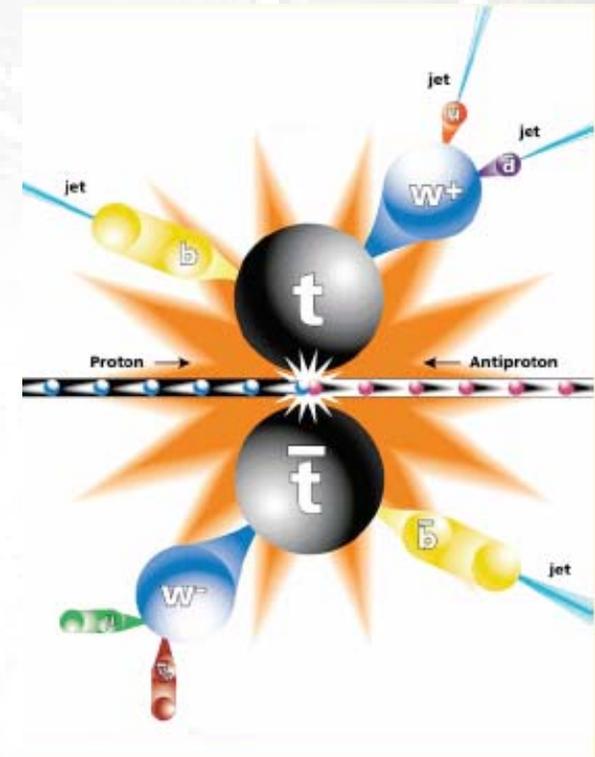
- Scoprire il bosone di Higgs
- Cercare nuove particelle o nuove interazioni fondamentali
- Scoprire la possibile elementarieta' di quarks e leptoni
- Trovare evidenza diretta di una particella responsabile della materia oscura

Dare indicazione su quali sono, tra le molte possibilita', i modelli teorici che meglio potrebbero permettere di superare lo SM e risolvere i problemi prima elencati

Questo aspetto, seppure importante, potrebbe essere pero' di non banale risoluzione

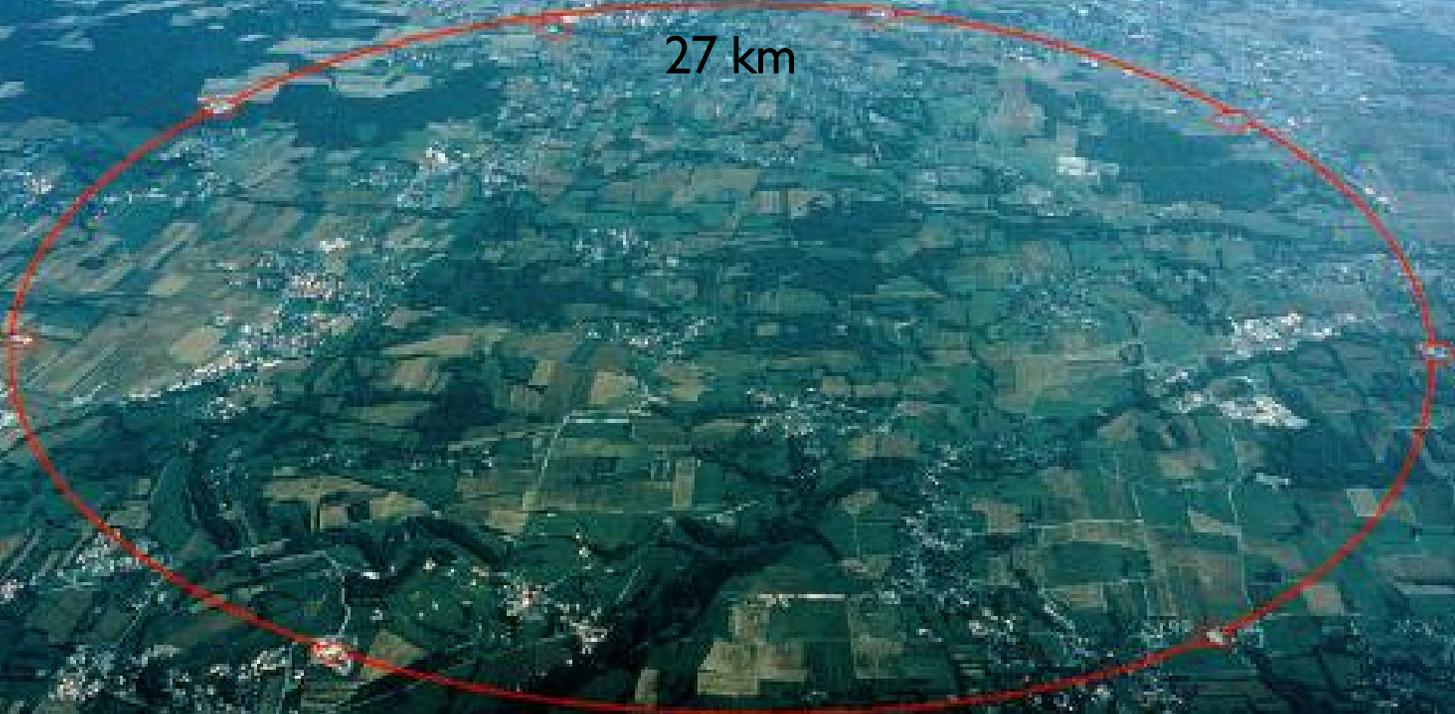
LHC potrebbe essere una macchina nella quale "si scoprono nuovi fenomeni", ma poi per dare loro una sistemazione teorica completa, potrebbe essere necessaria la costruzione di una successiva nuova macchina acceleratrice (di cui per altro gia' si sta lavorando: l' International Linear Collider – nel 2020 ?)

Per capire come LHC e i suoi apparati possano chiarire questi aspetti, diamo un'occhiata alla macchina, ai suoi rivelatori e a come avvengono le collisioni protone-protone



L' LHC al CERN di Ginevra (inizio delle operazioni nell'estate del 2008)

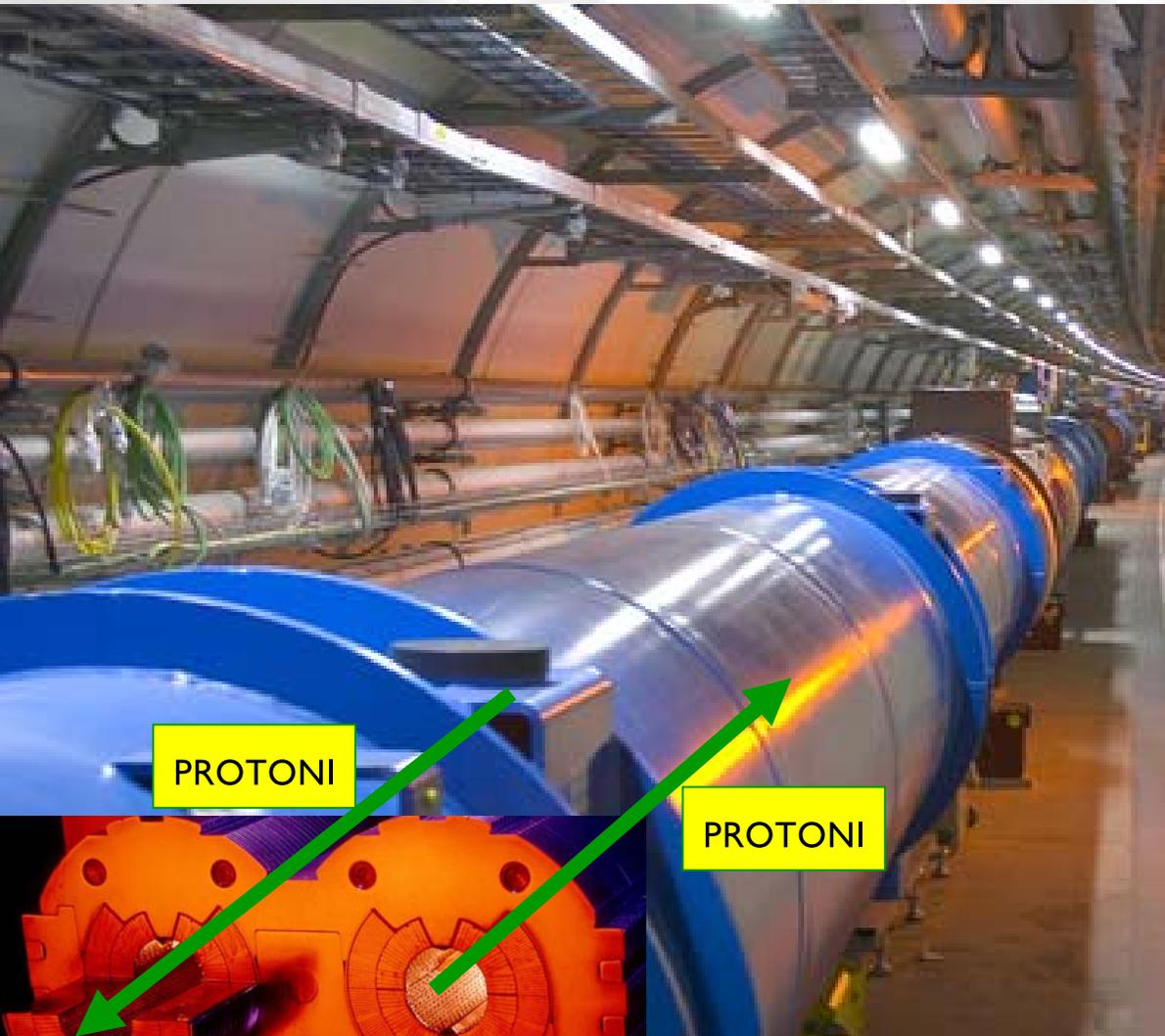
Collisioni tra protoni alla massima energia disponibile oggi (14 TeV)



27 km

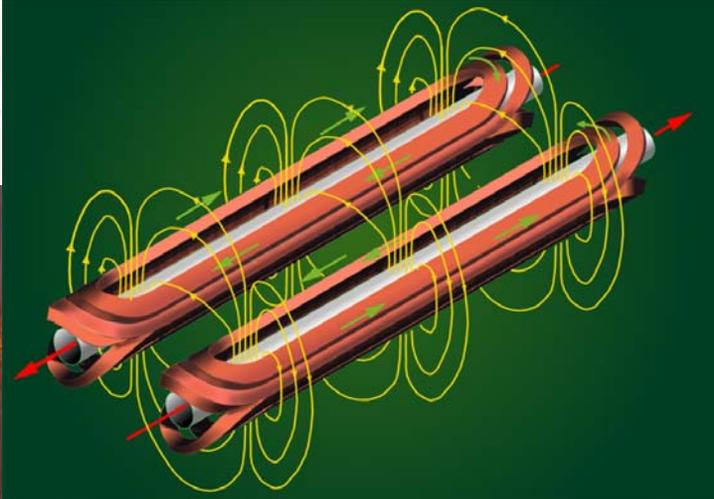
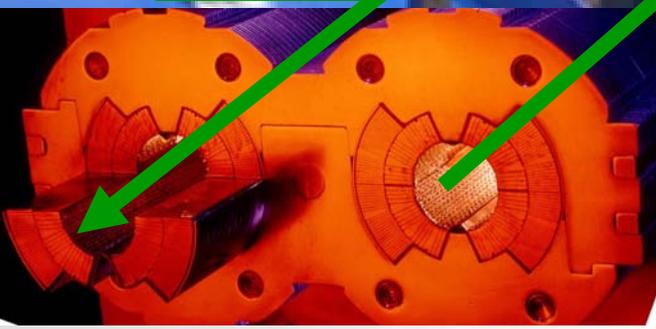
An aerial photograph of the Geneva region in Switzerland, showing a vast landscape of green fields and small towns. A large red oval is drawn over the landscape, representing the circular path of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel. The text '27 km' is placed inside the oval, indicating the total length of the tunnel. The background shows rolling hills and a clear blue sky.

IL TUNNEL DI LHC



PROTONI

PROTONI

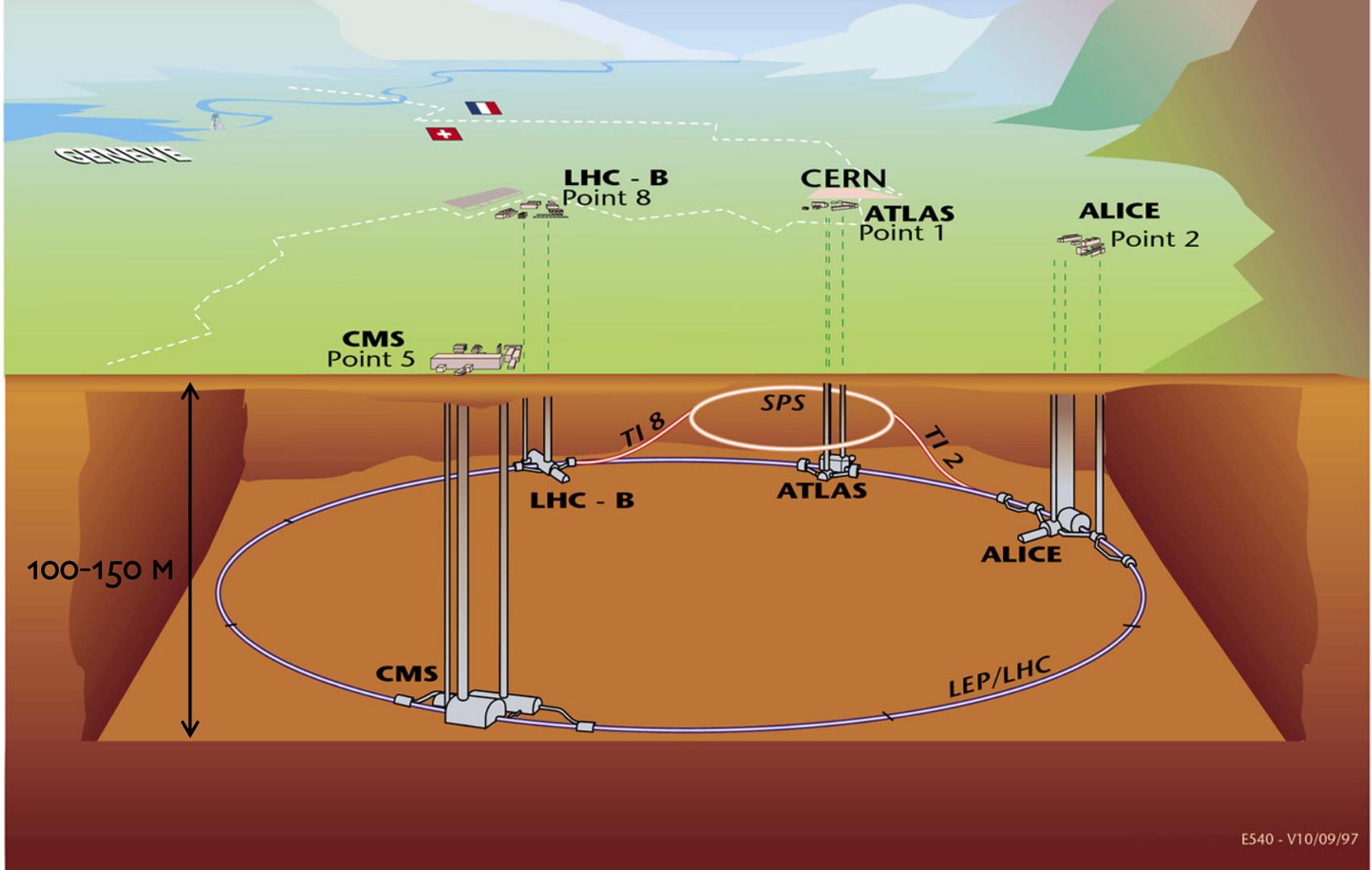


Overall view of the LHC experiments.

ATLAS E CMS, di grandi dimensioni (generale purpose)

LHCb, per la ricerca della violazione di CP

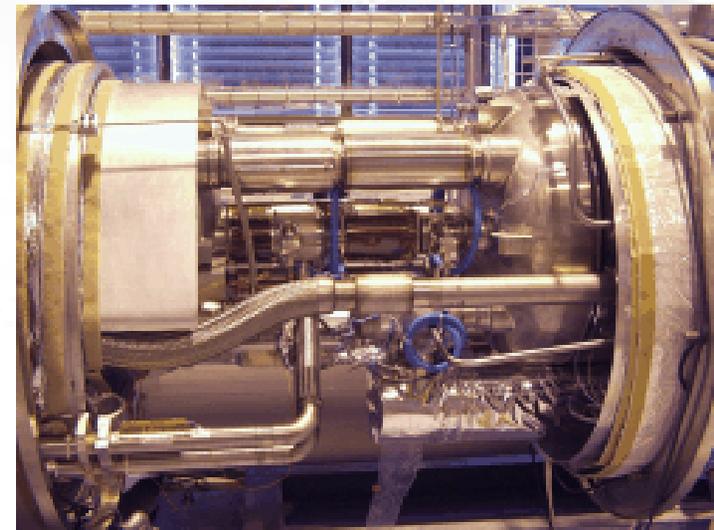
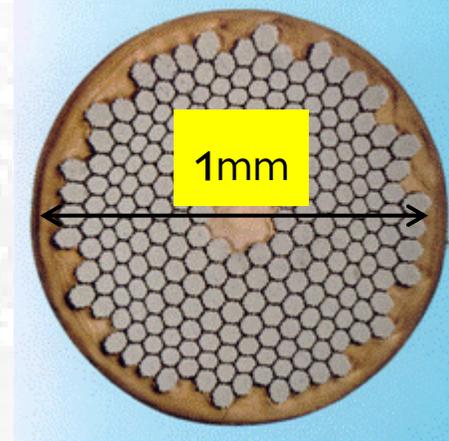
ALICE, per lo studio del quark-gluon plasma (primi istanti Big Bang)



LA MACCHINA LHC - (2 x 7 TeV di protoni)

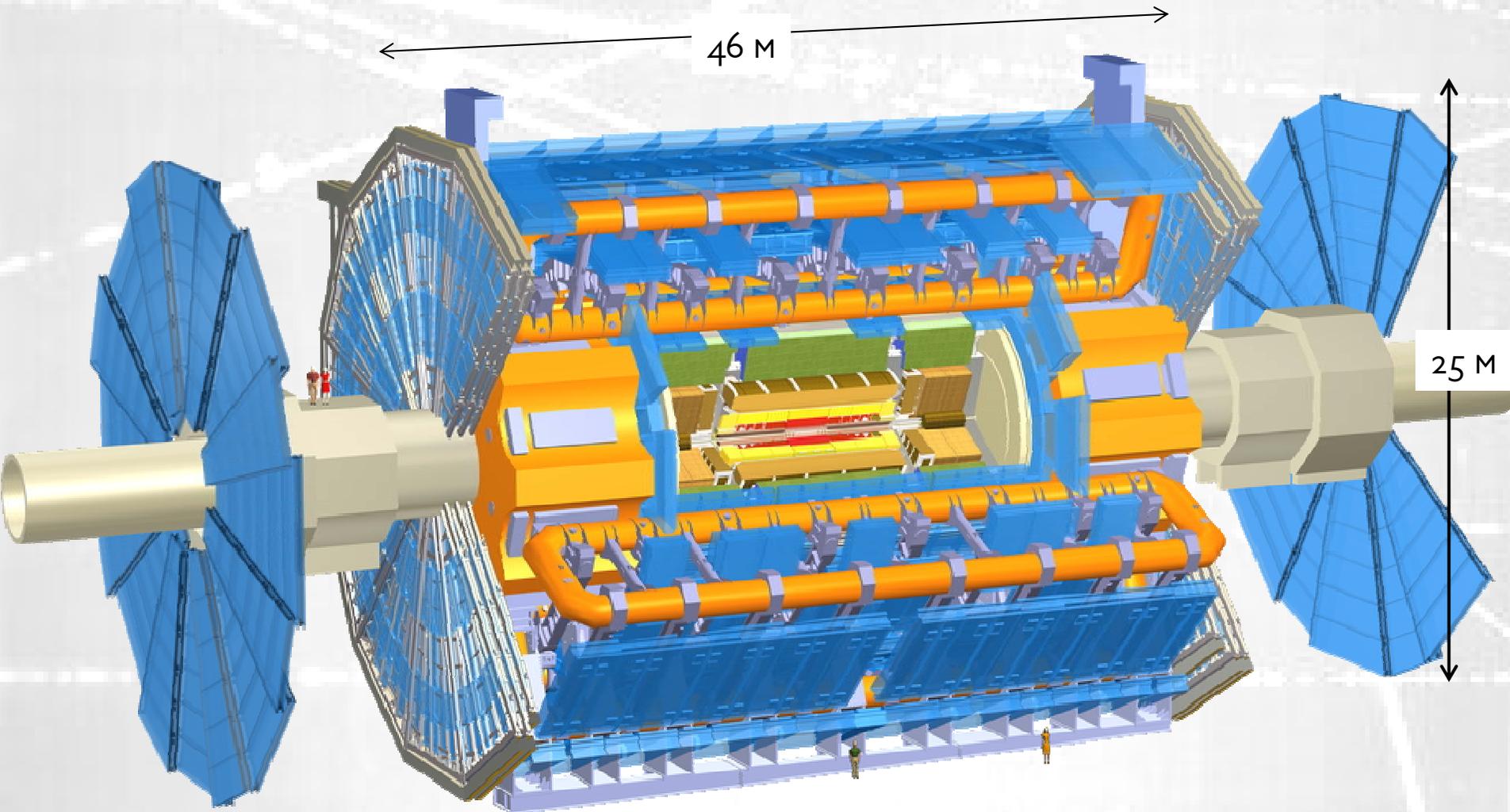
Innanzitutto un'impresa al limite delle tecnologie attuali (→ ricadute)

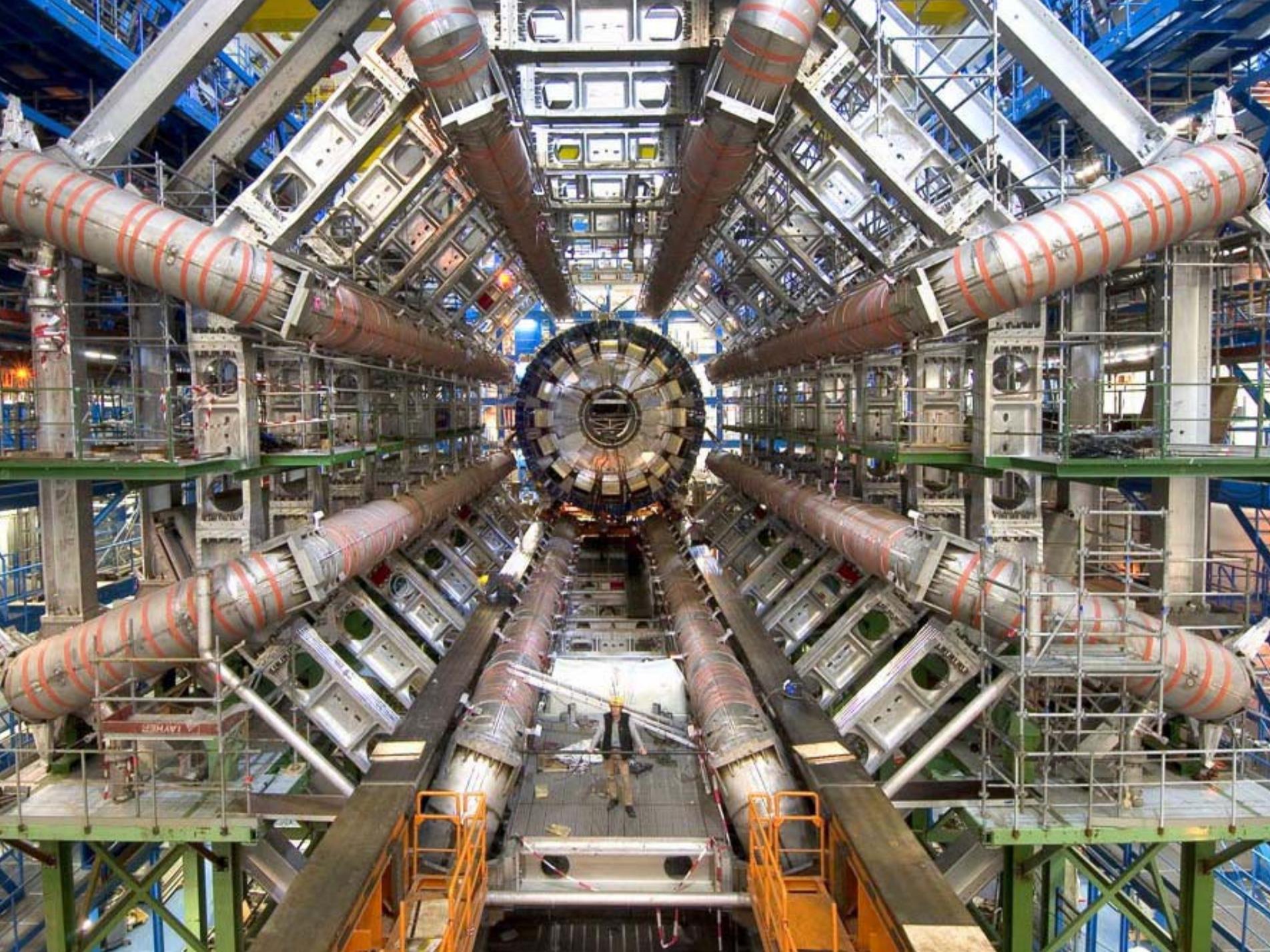
- 1200 dipoli magnetici superconduttori (tenuti a $T=1.5$ K)
~ 2800 pacchetti circolanti, ciascuno con $\sim 10^{11}$ protoni ~ 370 MJ
(→ UN ETR LANCIATO A 150 KM/H, OPPURE → L'ENERGIA NECESSARIA A FONDERE 1 T DI RAME)
- Il sistema criogenico e' ad Elio Superfluido (scelto per le sue caratteristiche di trasportabilita' su grandi distanze) - Consumo di elettricit a' ~ 120 MW
- Il fascio circolera' in una ciambella dove e' stato fatto un vuoto ultraspinato per evitare le collisioni con il gas residuo: 10^{-10} Torr (760 Torr=1 atm) ($< 3 \cdot 10^6$ molecole/cm³): la stessa pressione che incontriamo a 1000 km di altezza
Il volume di pompaggio e' di 9000 m³
- I protoni si urtano ad una frequenza di 40 MHz
Sulle fibre ottiche che portano gli eventi ai calcolatori, c'e' un evento "in fila" ogni 4-5 m !
- I 4 esperimenti producono una quantita' di dati pari ad 1 DVD ogni 10 sec. ($> 100,000$ l'anno)



ATLAS → atlas.ch

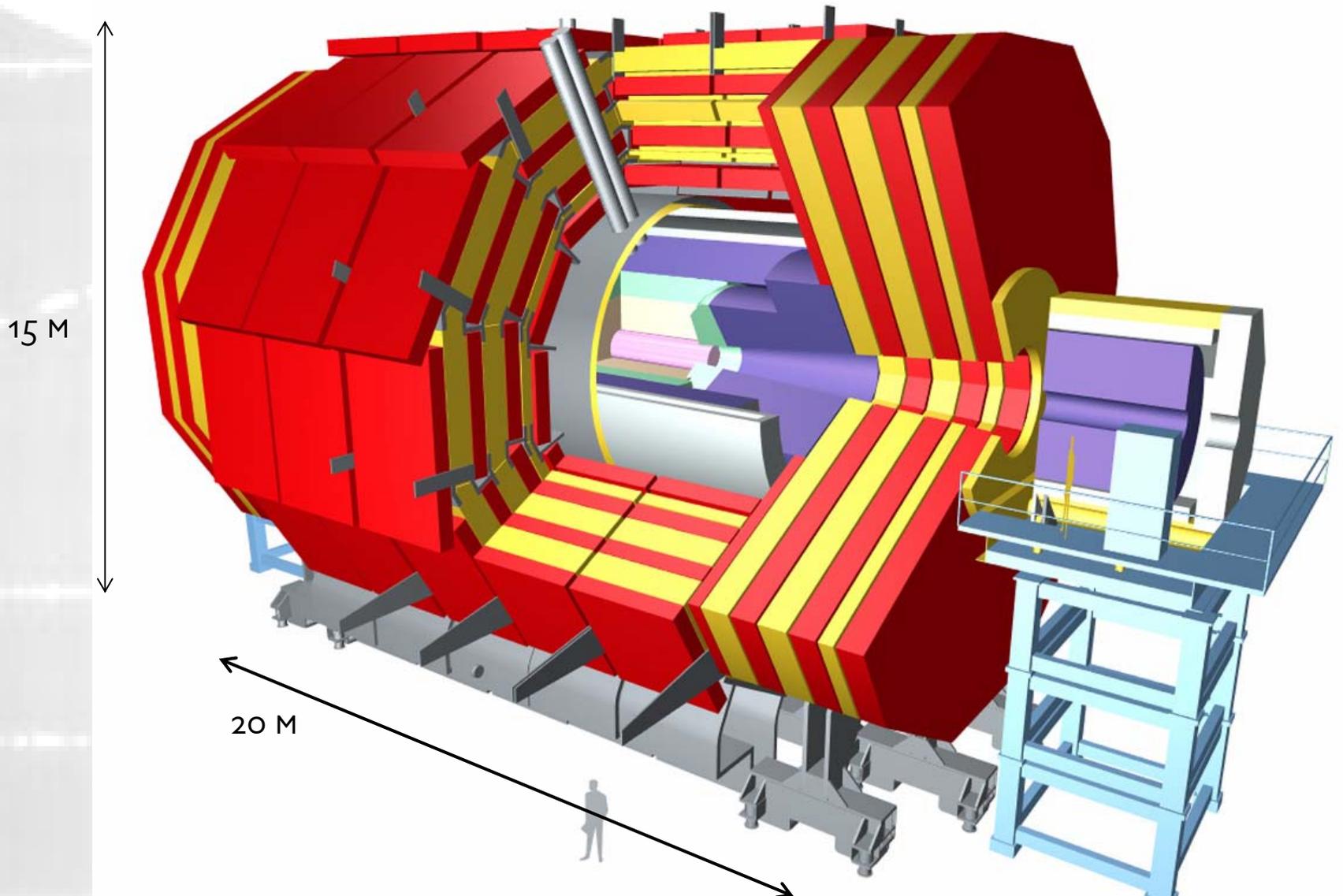
7000 t – 100,000,000 canali di elettronica - 2100 scienziati 37 nazioni 167 istituti
Costo 400 M€

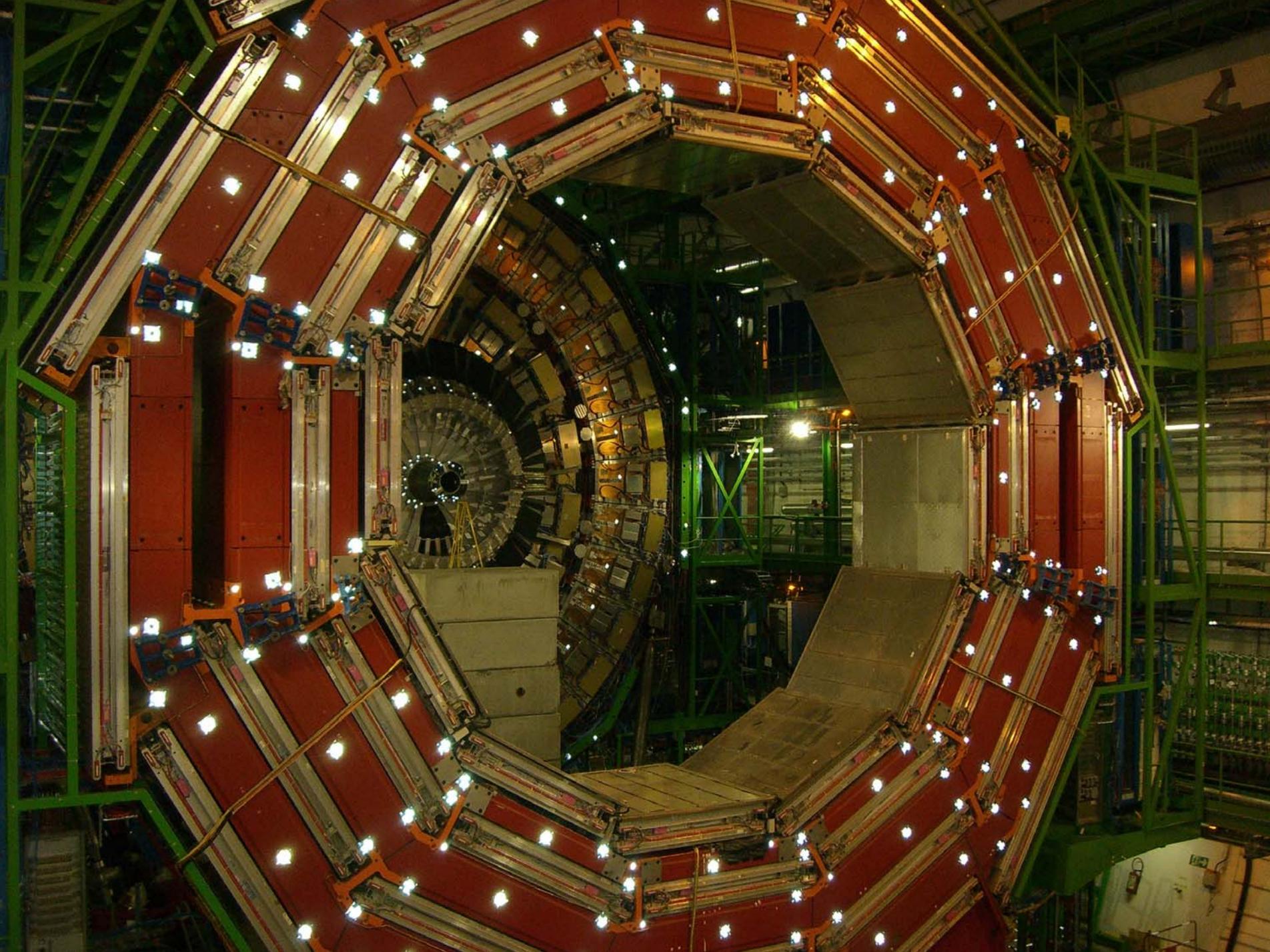




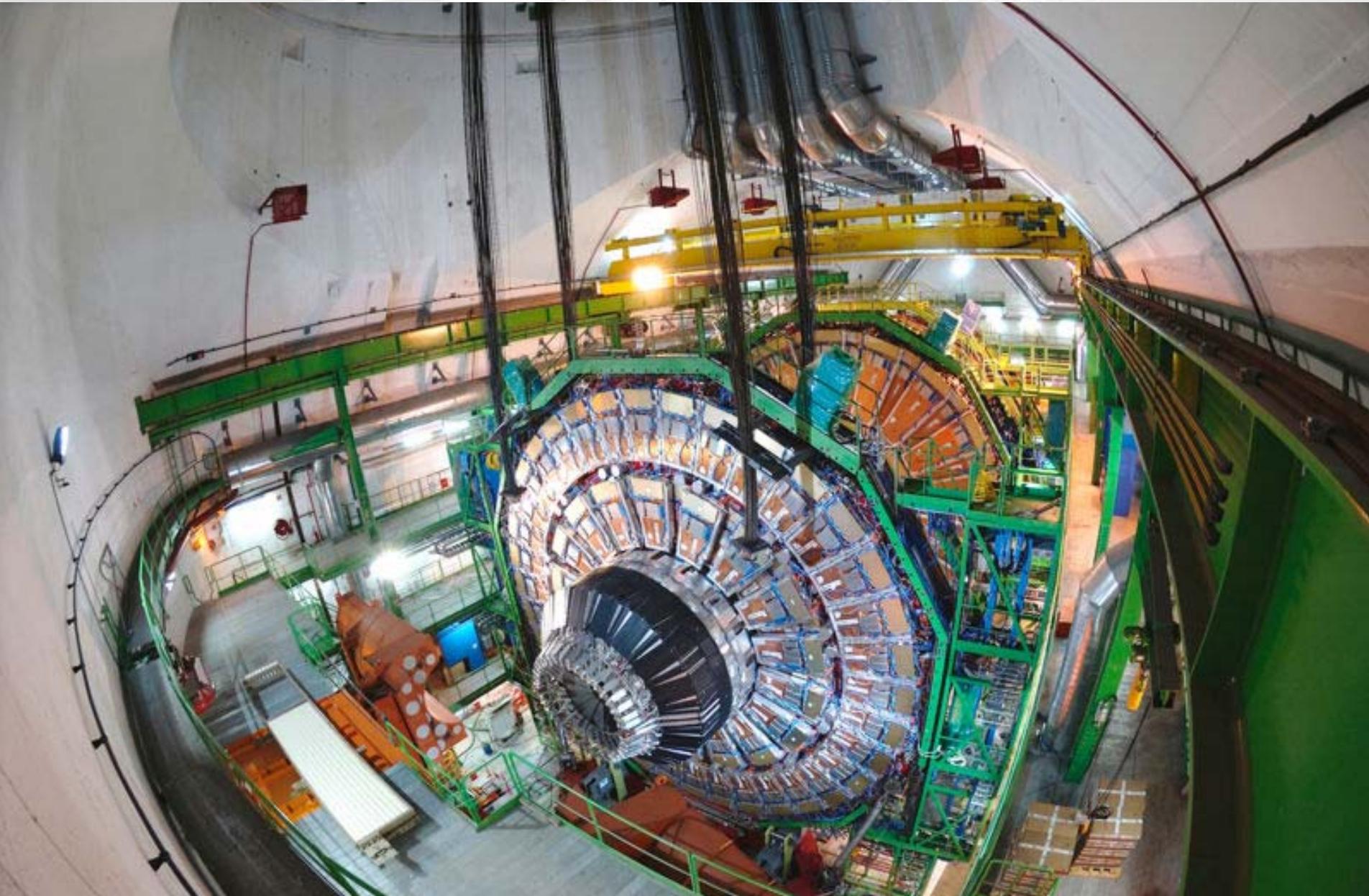
CMS → cms.cern.ch

12,500 t - 2800 scienziati | 80 istituti - Costo 400 M€





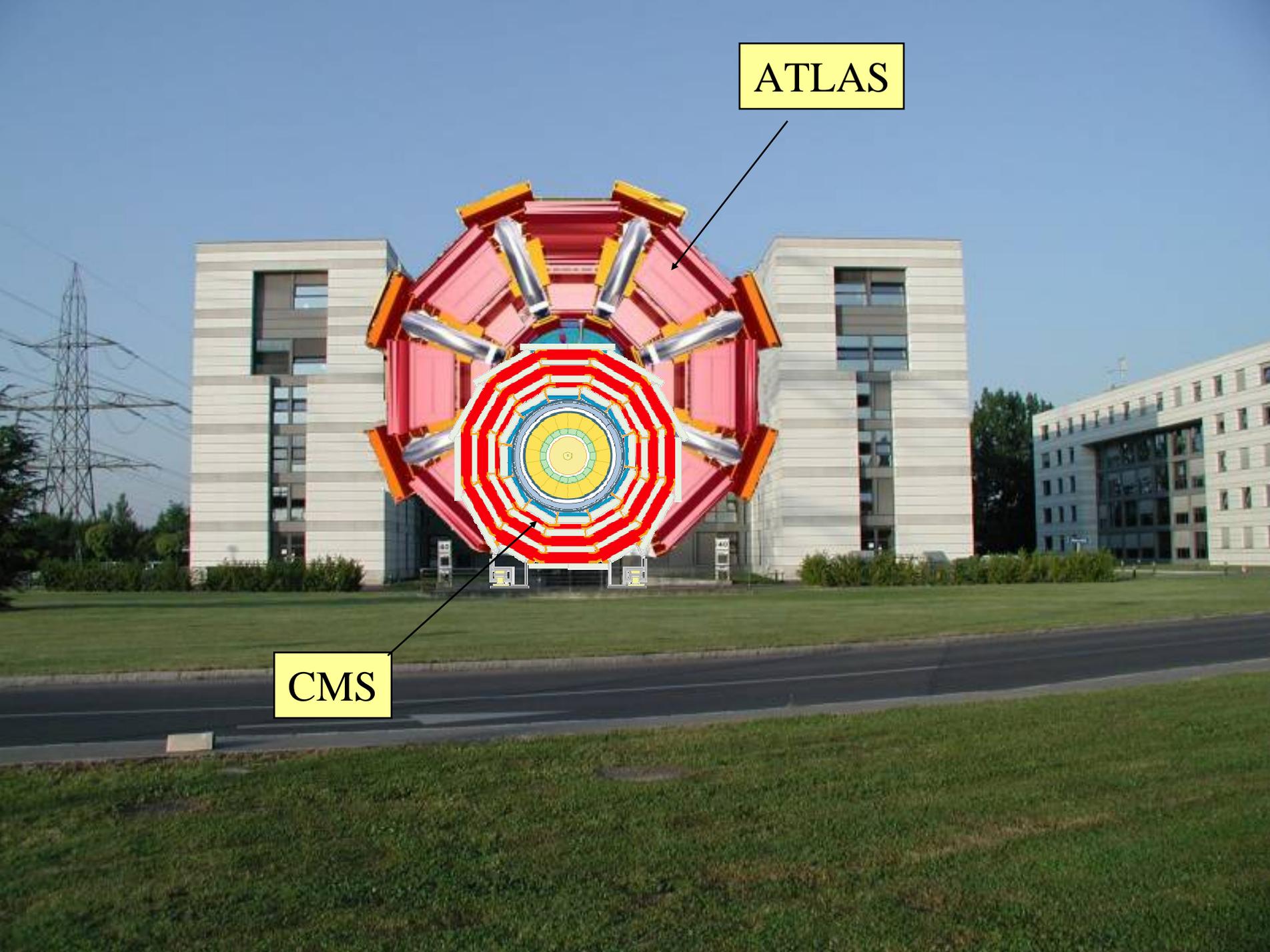
La discesa nel pozzo di Cms di un pezzo del rivelatore da 1270 t



ATLAS

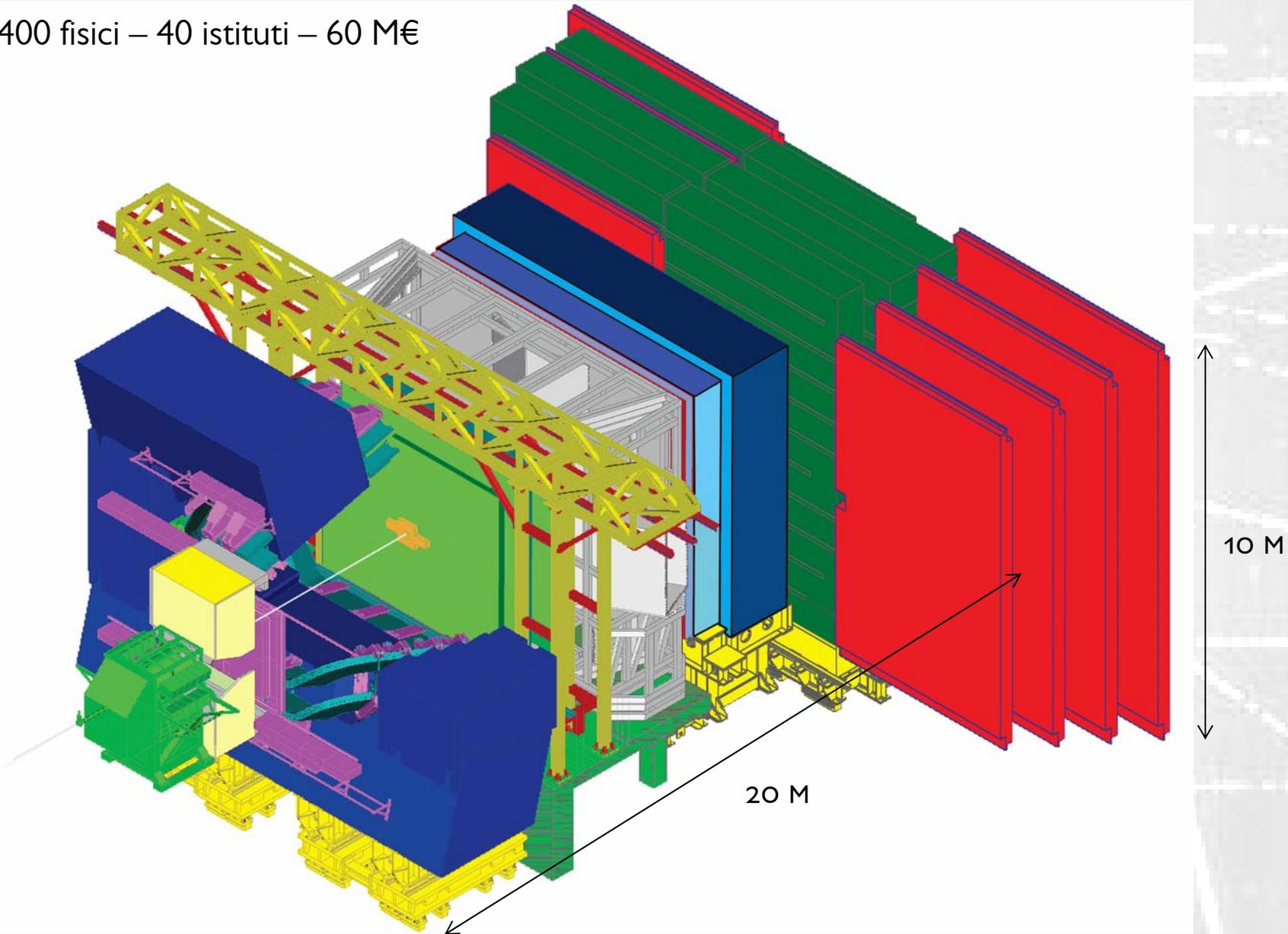


CMS

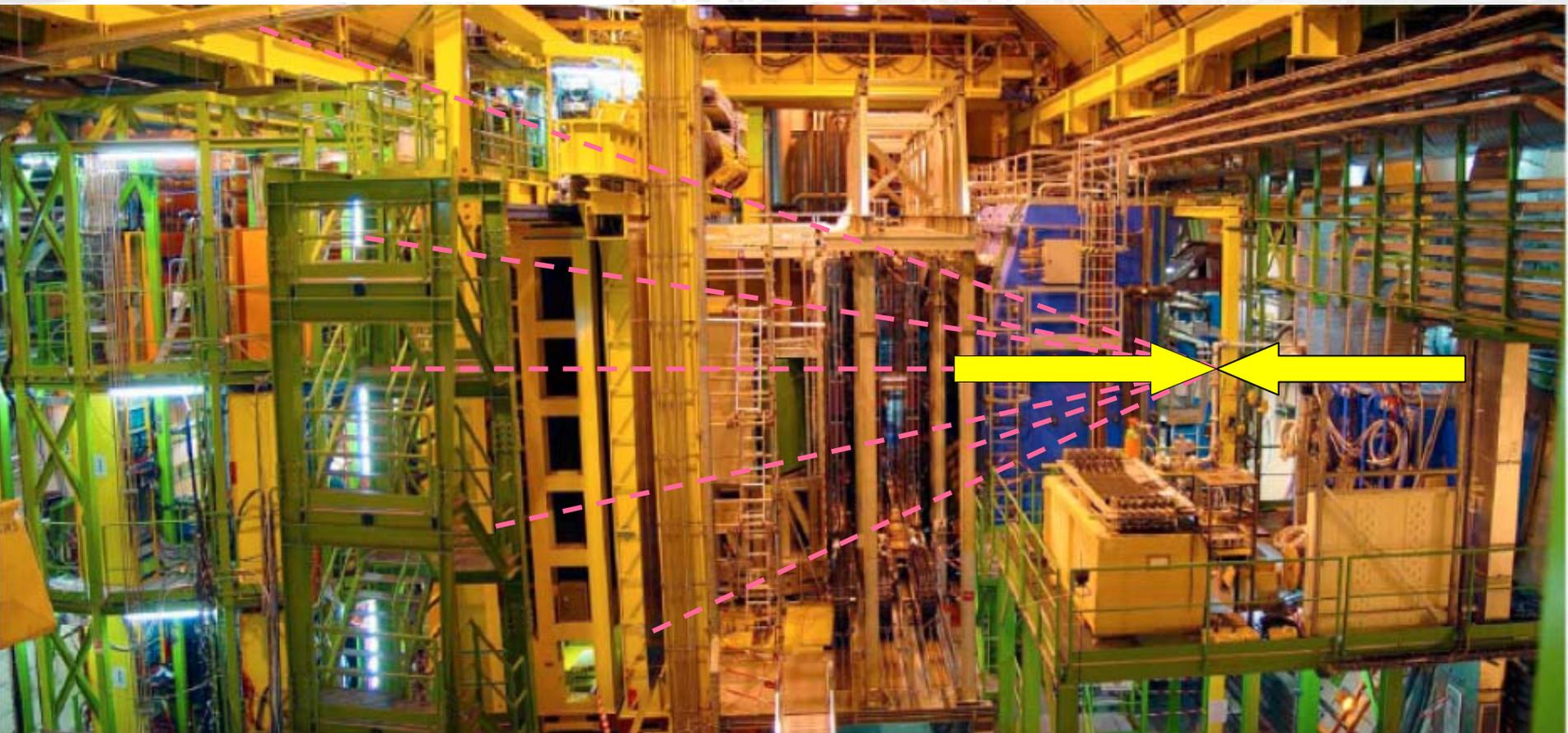


LHCB – lhcb.web.cern.ch

400 fisici – 40 istituti – 60 M€



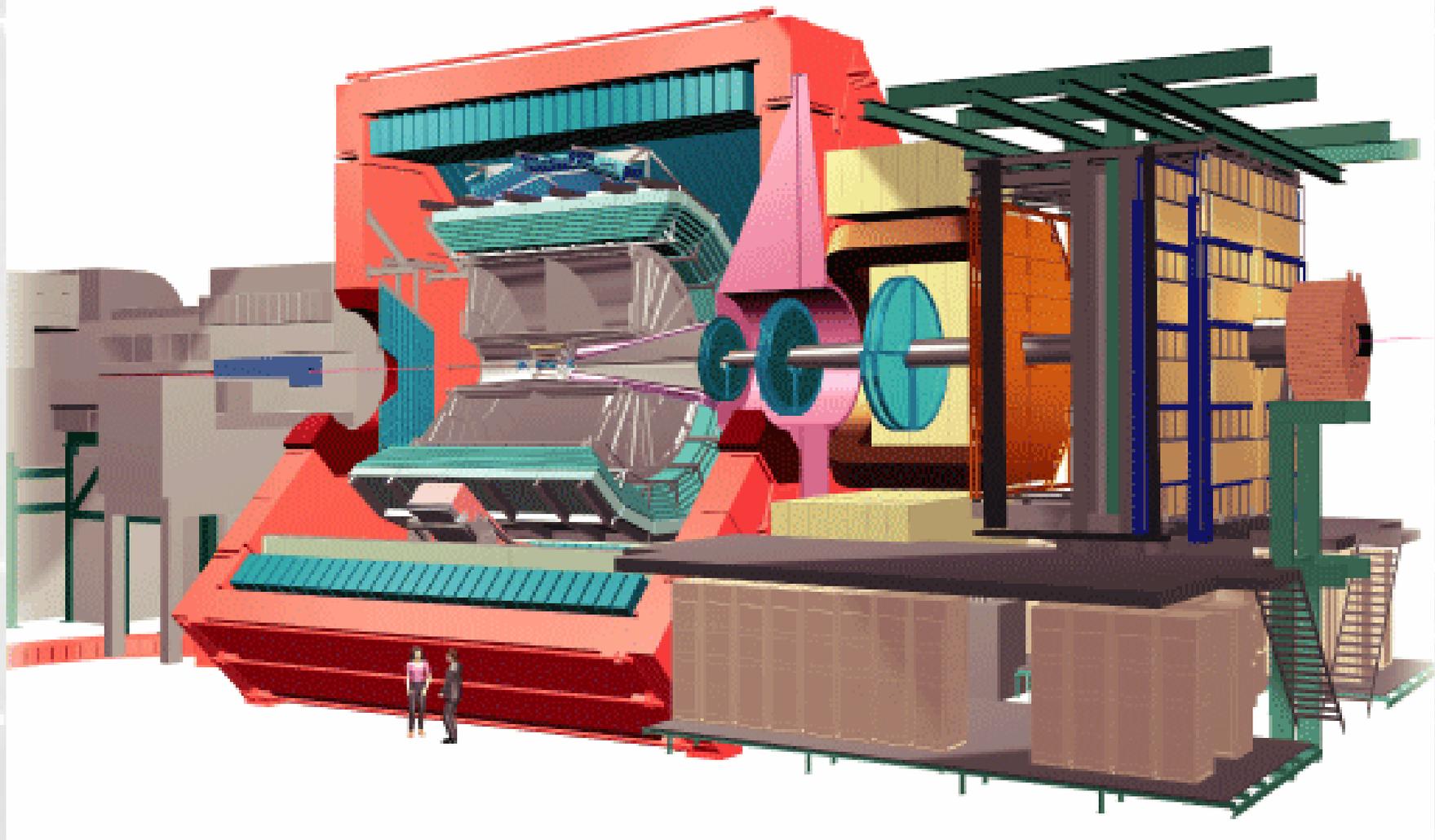
Un esperimento dedicato allo studio della violazione di CP nel sistema del quark b, ma anche dedicato alla ricerca di fenomeni inaspettati, possibilmente dovuti a Nuova Fisica, nei decadimenti molto rari. Un approccio alternativo a ATLAS / CMS



E' un apparato che ha la caratteristica di rivelare solo le particelle che vanno in avanti rispetto ad una direzione dei protoni, al contrario degli altri che accettano particelle in tutte le direzioni

ALICE – aliceinfo.cern.ch

1000 fisici – 105 istituti - 30 nazioni – Costo 150 M€





E' un esperimento che intende studiare nelle collisioni Pb-Pb in LHC a 5 TeV per nucleone. In questo tipo di collisioni si crea una materia nucleare ad una temperatura tale che i quark e i gluoni sono liberi (plasma di quark e gluoni). Tali studi servono a capire la fisica delle particelle in condizioni di alta temperatura, ossia quelle che si sono verificate nei primi istanti (circa 0.1 msec) dal Big Bang e sono importanti per le missioni su satellite che studieranno l'universo (WMAP).

COME E' CONCEPTO UN GRANDE APPARATO ALLA ATLAS / CMS

Nucleo esterno schermato di ferro, dal quale emergono solo le particelle piu' penetranti (muoni)

Nucleo intermedio dedicato all'assorbimento di particelle e alla misura della loro energia tramite metodo calorimetrico, sia per le cariche, che per le neutre (in particolare i fotoni)

Nucleo centrale dedicato alla tracciatura delle particelle cariche in campo magnetico solenoidale con rivelatori al silicio, di grande risoluzione spaziale (< 0.1 mm)

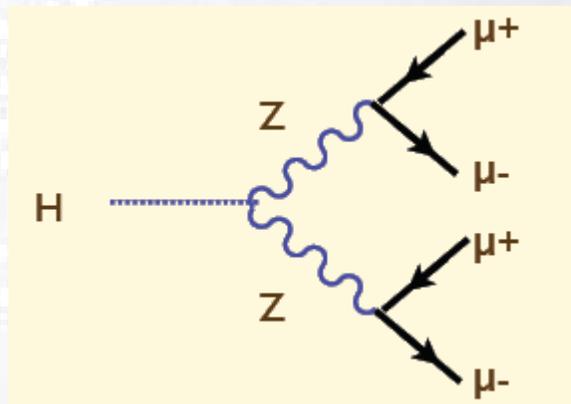
Un breve video sulle caratteristiche generali di rivelazione delle particelle nei grandi apparati quali ATLAS / CMS

[VIDEO](#)

QUALI SONO LE CARATTERISTICHE DI UN EVENTO CON UN BOSONE DI HIGGS IN ATLAS / CMS ?

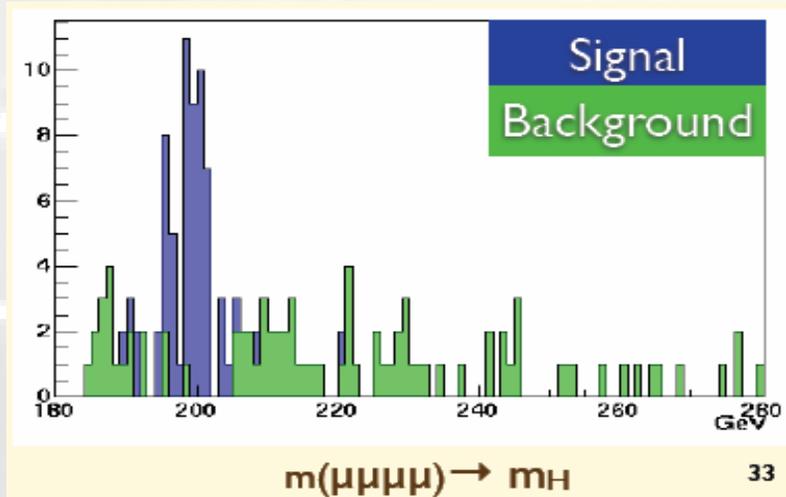
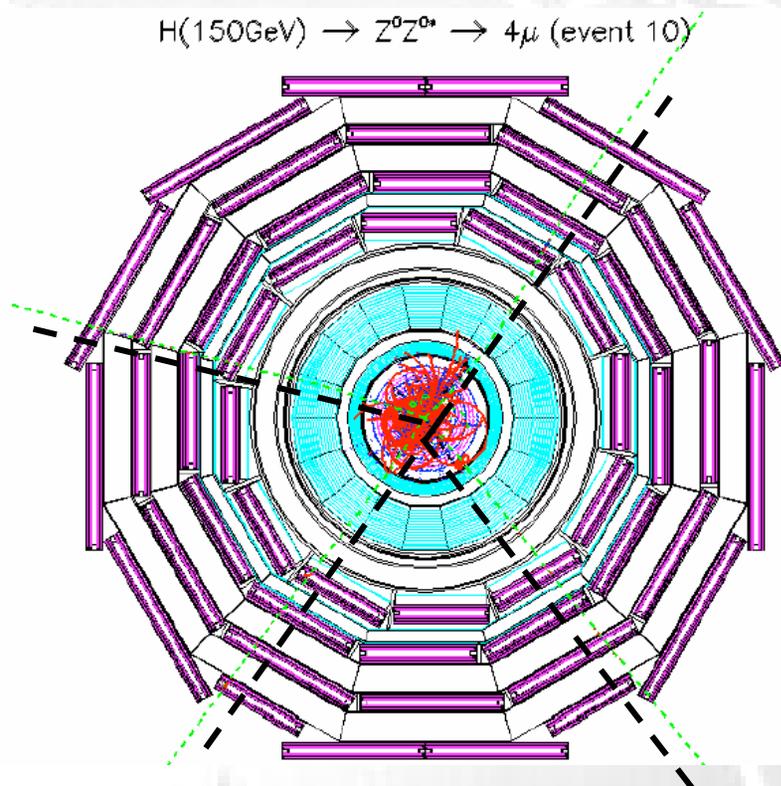
Il modo piu' immediato (e semplice) e' quello di cercare 4 muoni, i cui parametri cinematici determinano:

- a coppie (con cariche opposte) la massa dello Z da cui si originano;
- tutti e 4 insieme permettono di determinare la massa del bosone di Higgs

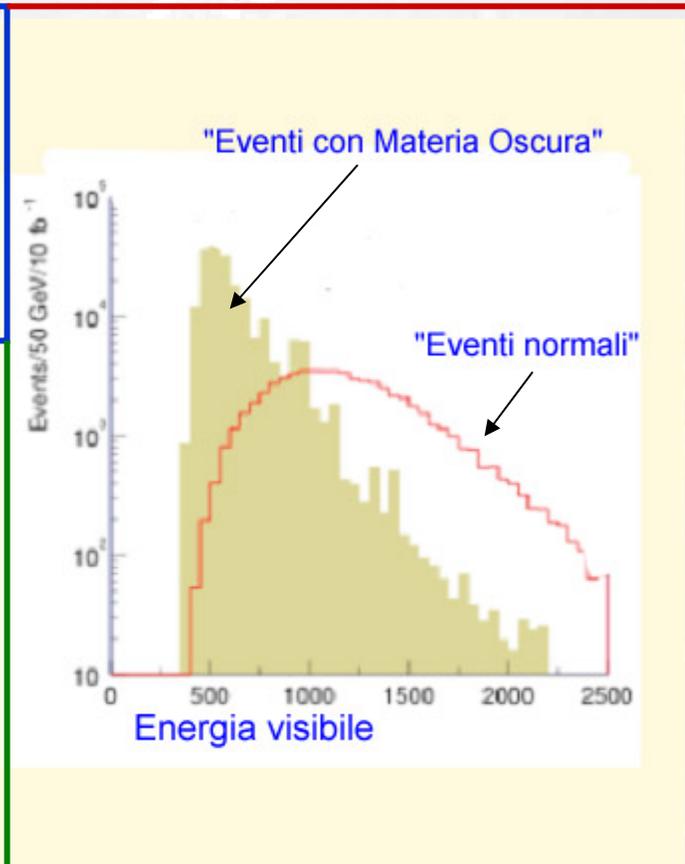
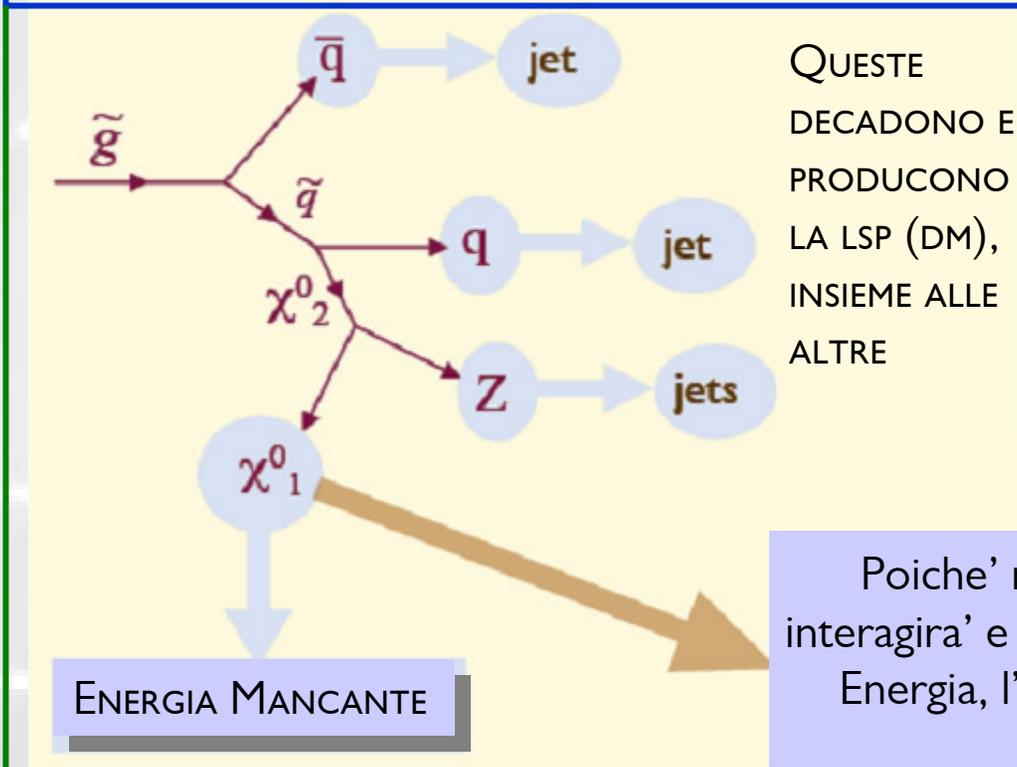
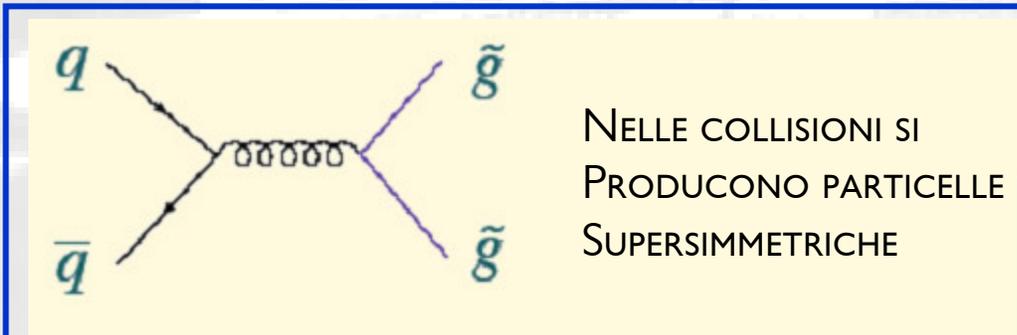


Questo e' pero' un evento molto raro, che deve essere identificato in un fondo altissimo di altre particelle che si sovrappongono (solo 1 evento ogni 10^8 e' tra quelli interessanti)

$H(150\text{GeV}) \rightarrow Z^0 Z^0 \rightarrow 4\mu$ (event 10)



QUALI SONO LE CARATTERISTICHE DI UN EVENTO CON MATERIA OSCURA IN ATLAS / CMS ?



Poiche' nel rivelatore la particella LSP non interagira' e si portera' via una consistente fetta di Energia, l'evento sara' visto proprio per uno sbilanciamento di energia

CONCLUSIONI

LHC inizierà a produrre collisioni nell'autunno del 2008, dopo circa 15 anni di preparazione

È un grande risultato tecnologico per tutta la comunità internazionale (soprattutto per quella Europea che lo ha voluto tenacemente, mentre i politici americani hanno cancellato negli anni '90 un progetto simile previsto negli USA): una volta tanto siamo i primi.

Gli italiani (e l'INFN) hanno un ruolo di primo piano in questa avventura

Non sappiamo cosa succederà – quante nuove particelle verranno scoperte – e forse è la prima volta che da un salto in energia così grande ($\times 7$ in energia e $\times 100$ in intensità rispetto a quanto disponibile sino ad ora) ci si aspetta una vera rivoluzione

È sicuramente uno dei momenti più appassionanti per la Fisica delle Particelle !

Se non si trovasse nulla LHC potrebbe essere l'**ULTIMA FRONTIERA** di una ricerca che ha rappresentato dagli albori della **MECCANICA QUANTISTICA** e della **RELATIVITÀ GENERALE**, alla scoperta della **FISSIONE NUCLEARE** per usi bellici e pacifici, l'immagine della **SCIENZA DEL XX SECOLO**.

Nei prossimi anni qualcuno di voi potrebbe essere uno degli interpreti di questo film...

...STAY TUNED....

EPILOGO (1) – QUANTO COSTA QUESTO TIPO DI RICERCA FONDAMENTALE ?

Posto che la Fisica delle Particelle e' a partire da Fermi, il fiore all'occhiello della Ricerca Italiana, in particolare per il livello di considerazione che ha all'estero, e che le ricerche sono condotte con uno sforzo internazionale (caso unico), vanno ricordate alcune cifre:

L'INFN ha un bilancio annuo di 250 M€ (=5 € a testa), 2000 dipendenti (e altrettanti Universitari) che vi lavorano, con un bilancio per la Ricerca di circa 100 M€

Il CERN ha un bilancio annuo di circa 500 M€ (l'Italia contribuisce per il 12% : 60 M€)

LHC e i suoi 4 esperimenti sono costati circa 5 G€ (solo materiali, esclusa la manodopera) → funzioneranno per almeno 20 anni

L'HUBBLE SPACE TELESCOPE e' costato 6 G\$ (ha funzionato per 20 anni)

LA STAZIONE SPAZIALE INTERNAZIONALE 156 G\$

ITER (progetto globale per la fusione) costera' 10 G€ (e durera' 30 anni)

COSTO DI UNA CENTRALE NUCLEARE 4 G€

ALTA VELOCITA' in Italia 66 G€ (in costruzione da 15 anni)

GUERRA IN IRAQ (ad oggi) 507 G\$

...a voi la scelta di quale sia il modo piu' proficuo per spendere il denaro pubblico...

EPILOGO (2) – LA RICERCA FONDAMENTALE: OVVERO COME VIVERE MEGLIO DOMANI

Spesso ci si chiede: a cosa serve la Ricerca Fondamentale ? I costi sono giustificati dai benefici ?

Rispondere alle domande “primarie” dell’uomo e’ gia’ un obiettivo di grande significato (forse di questi tempi “l’opinione pubblica” se ne dimentica spesso)

Ma la Ricerca Fondamentale ha anche un altro risvolto : quello delle ricadute “tecnologiche” .

Quelle che entrano nella vita di tutti i giorni e la migliorano a distanza di decenni dalla prima scoperta : il radar, le applicazioni pacifiche dell’energia nucleare, il transistor, i raggi X, la medicina nucleare, la risonanza magnetica, il laser, la superconduttività, la criogenia, le telecomunicazioni, il WEB, ecc..., solo per considerare quelle guidate dalla RICERCA IN FISICA

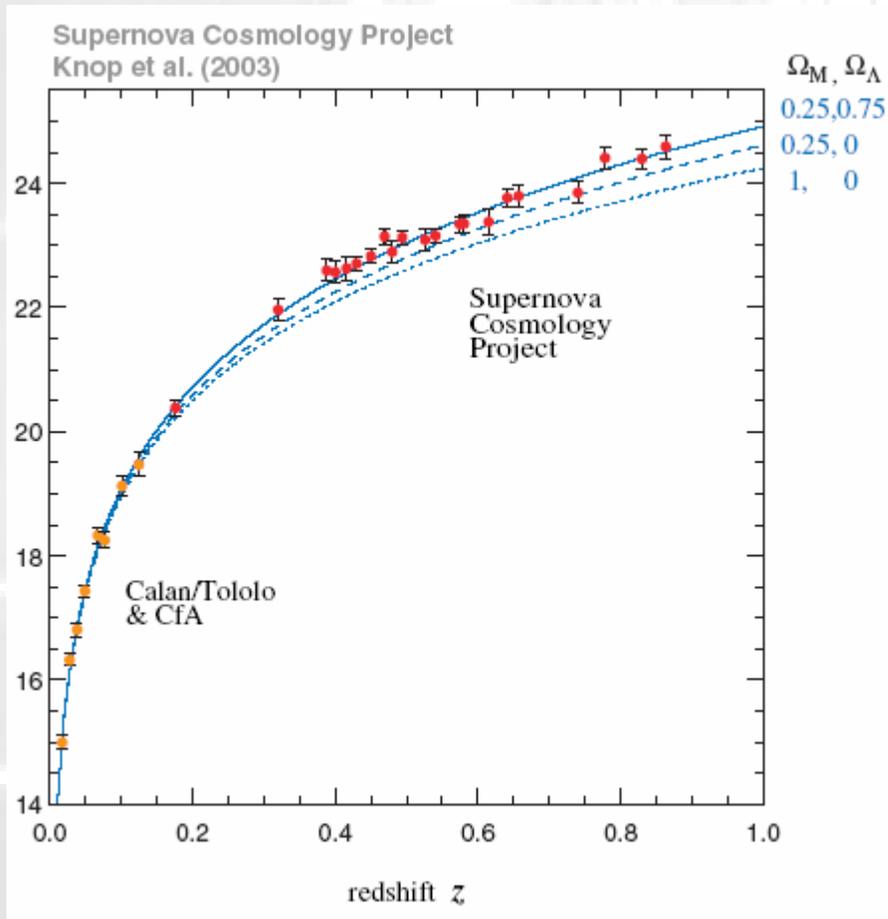
A volte, cercando di risolvere un problema, si scopre, involontariamente, qualcosa d’altro...

Di una cosa sono certo: che il nostro paese se vorrà continuare a fregiarsi del titolo di “sviluppato” (ed ho qualche dubbio in merito), avrà bisogno di

TANTI, TANTI, BRAVI GIOVANI RICERCATORI (E NON SOLO IN FISICA) → QUINDI DATEVI DA FARE !

APPENDICE - L'ENERGIA OSCURA

Nel 1998 un gruppo di ricercatori americani, studiando le Supernovae distanti si è accorto che – contrariamente a quanto si pensava dalla teoria di Einstein in poi – l'Universo è in espansione e sta accelerando, sotto la spinta di una forza repulsiva ingente e sconosciuta.



Dalle misure si deduce che:

- la materia oscura rappresenta circa il 20% della materia esistente
- l'energia oscura rappresenta oltre il 70% della materia dell'Universo

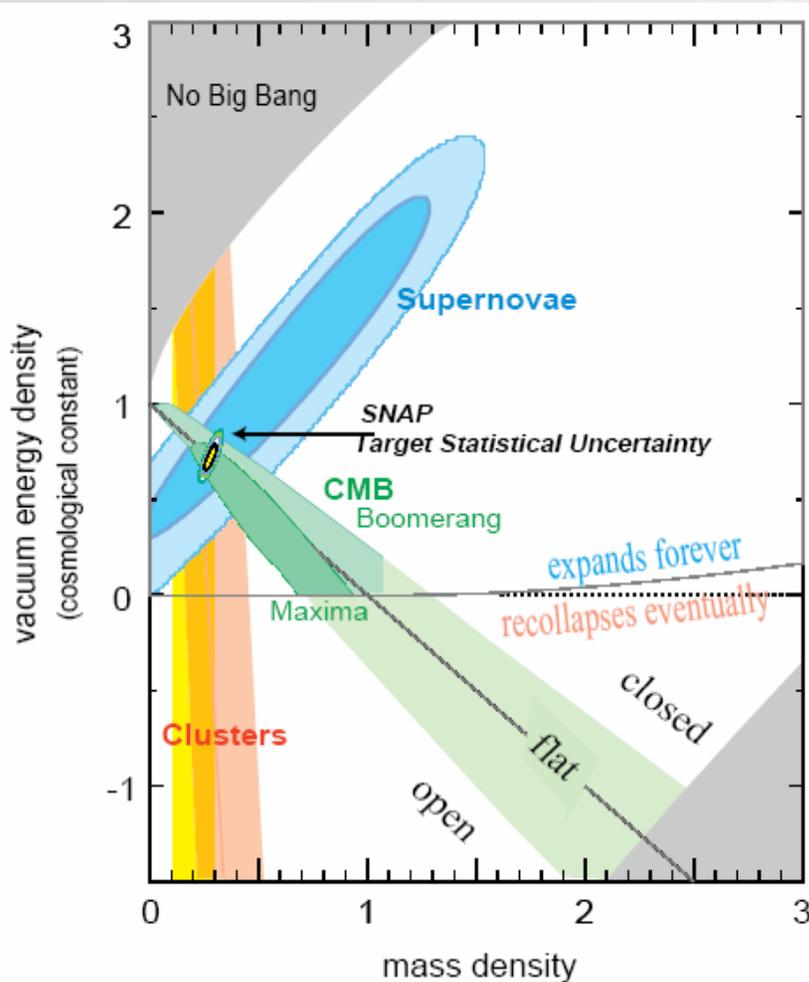
Sino ad oggi non si sa quale siano l'origine e le caratteristiche di questa forza misteriosa che si oppone alla gravitazione e allontana tra loro le Galassie

LA COSTANTE COSMOLOGICA Λ

Anche altre misure, quali quelle sulla distribuzione della radiazione di fondo a 2.7 K e lo studio dei Cluster a grande scala, confermano che il nostro Universo sta accelerando nella sua espansione

Nel 1917, Einstein aveva predetto che, ipotizzando un Universo statico, era necessario introdurre “ad hoc” una forza repulsiva (COSTANTE COSMOLOGICA) che controbilanciasse l’attrazione gravitazionale

Nel 1929 Hubble scoprì che le Galassie si stanno allontanando (metodo del red shift) e quindi Einstein abbandonò l’ipotesi della costante cosmologica, definendola come “una delle sue peggiori sciocchezze” !



Oggi non si sa dare una spiegazione coerente. Vi sono molte ipotesi.

Una suggestiva è quella per la quale Λ potrebbe essere causata dalle fluttuazioni del vuoto (un fenomeno tipicamente quantistico) che potrebbero “generare” un’energia non nulla nello spazio. Il problema è che la stima differisce per 120 ordini di grandezza....