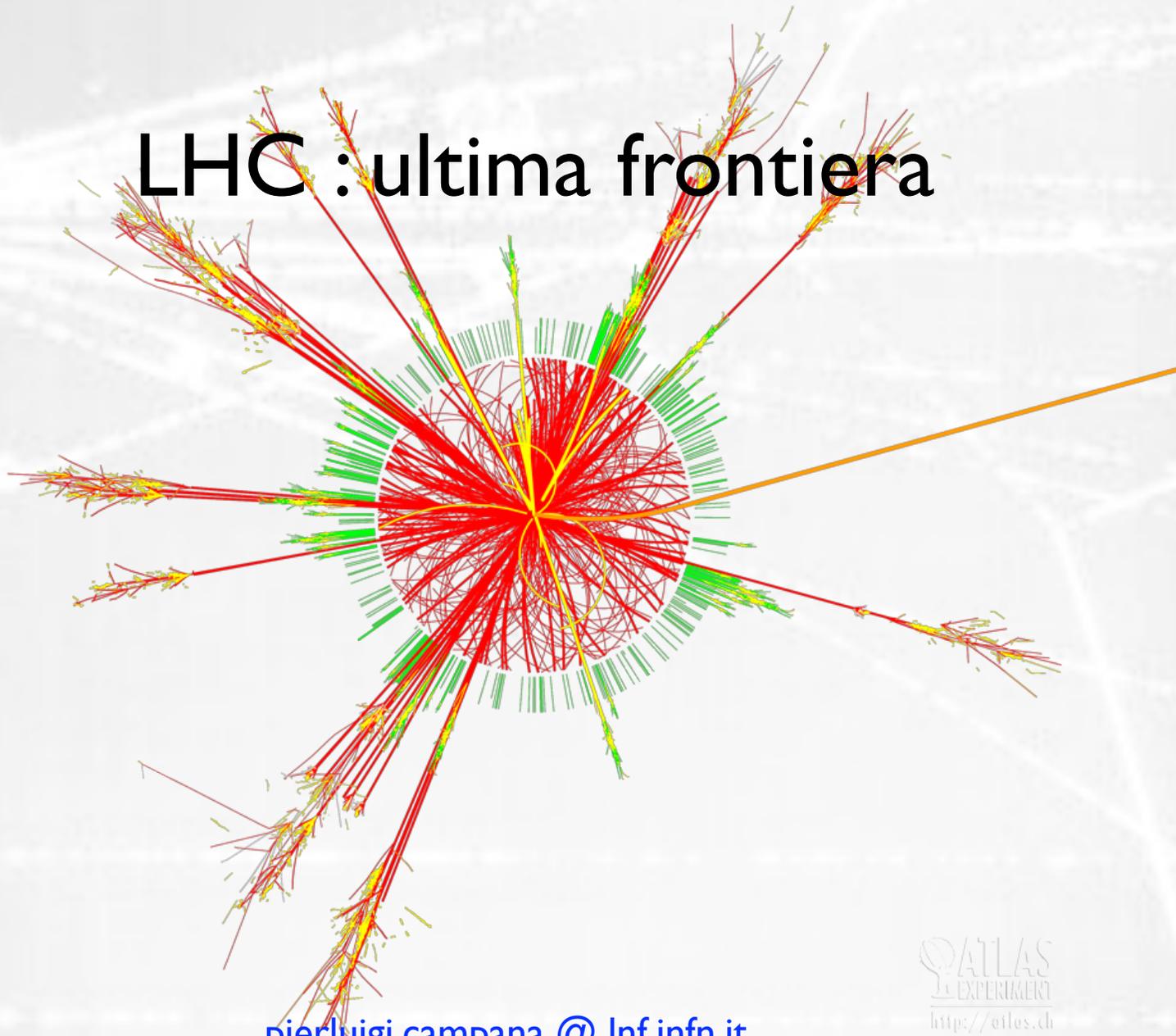


# LHC : ultima frontiera



pierluigi.campana @ Inf.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 difficoltà' 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
- Conclusioni e due 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

### **2008 – Kobayashi, Maskawa, Nambu**

**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

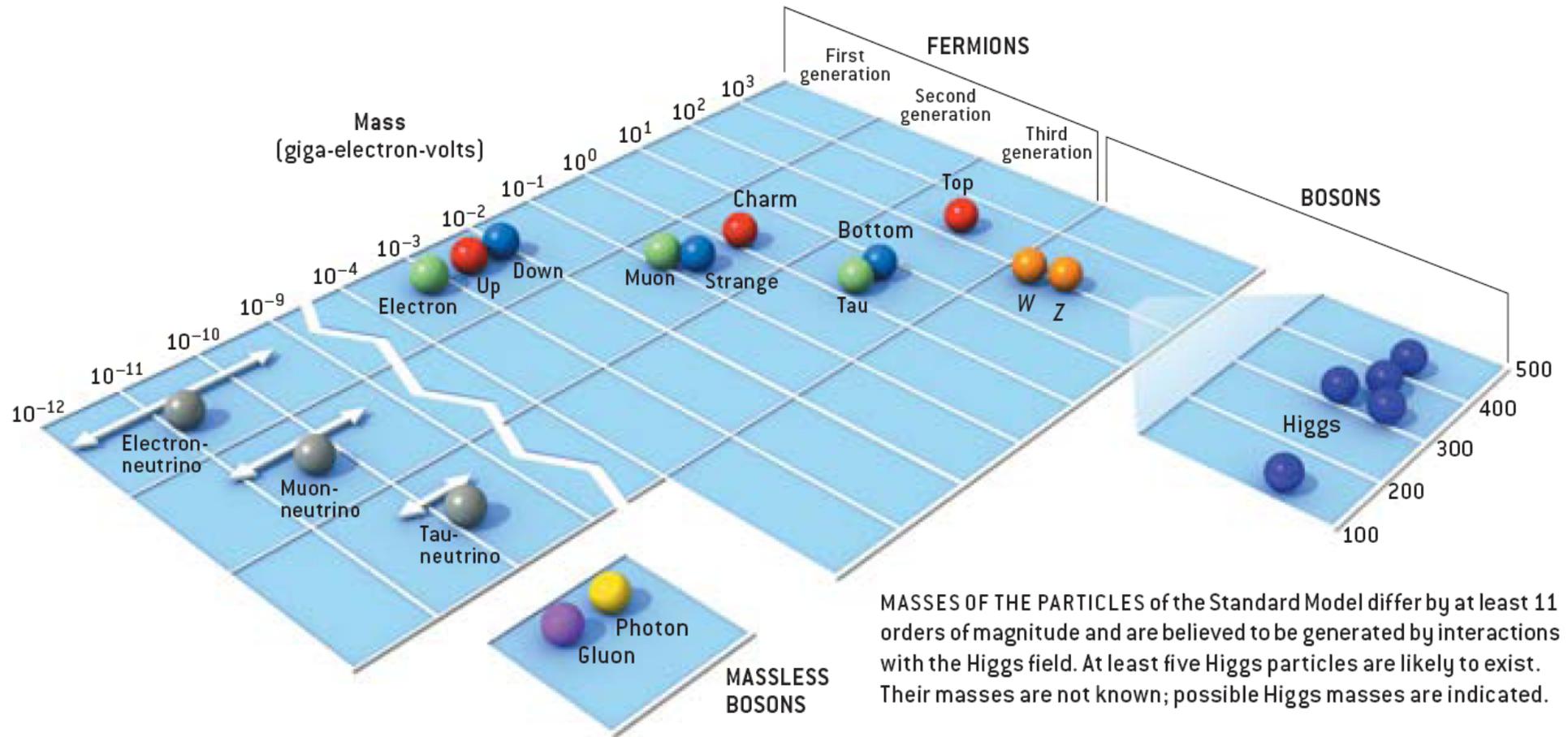
## I mattoni Fondamentali : i fermioni , spin 1/2

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"

		Quarks		Leptons		
		$Q=2/3 e$	$Q=-1/3 e$	$Q=-e$	$Q=0$	
Materia ordinaria: Protoni, Neutroni Elettroni 		<b>up</b> (0.004)	<b>down</b> (0.006)	<b>e</b> (0.0005)	$\nu_e$ (very small*) meno di $10^{-9}$	I
		<b>charm</b> (1.5)	<b>strange</b> (0.5)	$\mu$ (0.1)	$\nu_\mu$ (very small)	II
	Materia prodotta nei raggi cosmici, nel sole, agli acceleratori 		<b>top</b> (175)	<b>bottom</b> (4.5)	$\tau$ (1.8)	$\nu_\tau$ (very small) <b>ancora da scoprire</b>

Masse in GeV (1 GeV ~ 1 m<sub>protone</sub>)

# La tavola delle Particelle Elementari



MASSSES OF THE PARTICLES of the Standard Model differ by at least 11 orders of magnitude and are believed to be generated by interactions with the Higgs field. At least five Higgs particles are likely to exist. Their masses are not known; possible Higgs masses are indicated.

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...)

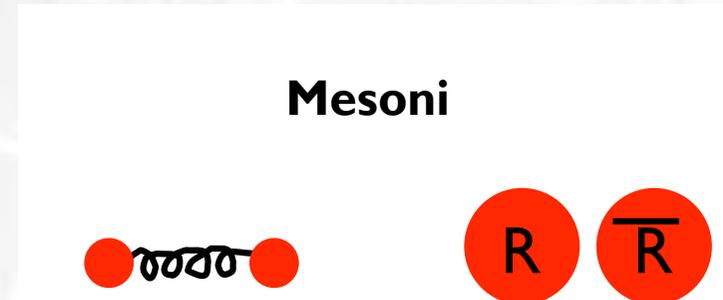
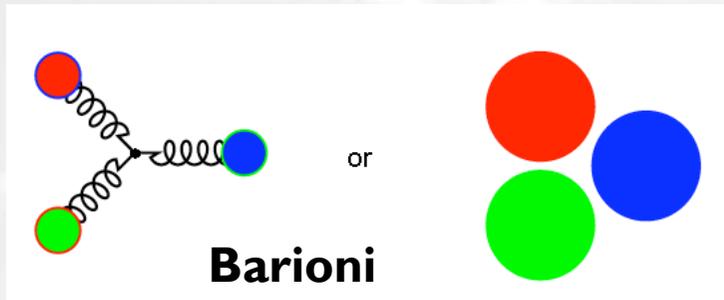
Quark e leptoni trasportano un numero quantico che gli permette di sottostare ai diversi tipi di interazione:

- 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 $\text{GeV}/c^2$	Spin	Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass $\text{GeV}/c^2$	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2	<b><math>\pi^+</math></b>	pion	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
<b><math>\bar{p}</math></b>	anti-proton	<b><math>\bar{u}\bar{u}\bar{d}</math></b>	-1	0.938	1/2	<b><math>K^-</math></b>	kaon	<b><math>s\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2	<b><math>\rho^+</math></b>	rho	<b><math>u\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
<b><math>\Lambda</math></b>	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2	<b><math>B^0</math></b>	B-zero	<b><math>d\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
<b><math>\Omega^-</math></b>	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2	<b><math>\eta_c</math></b>	eta-c	<b><math>c\bar{c}</math></b>	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

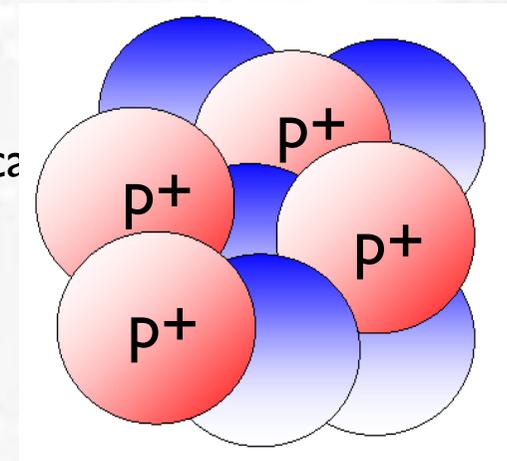
Non si conoscono le motivazioni profonde del rispetto di queste simmetrie

## 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:  $p+p \rightarrow {}^2\text{H}_1 + e^+ + n_e + 0.42 \text{ MeV}$ )



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

Costante di accoppiamento :  $a_{em} = 1/137$

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

Costante di accoppiamento :  $a_s \sim 0.4$

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

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

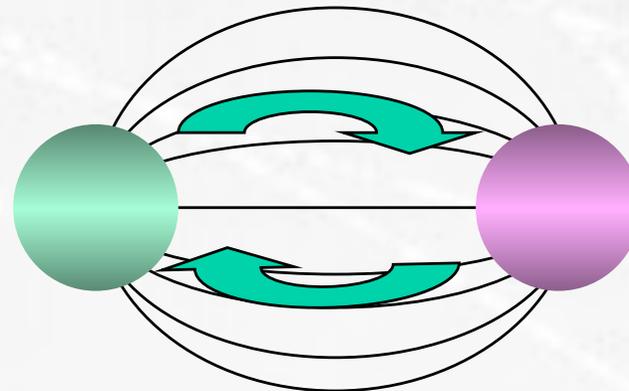
- Gravitazionale  $\mathbf{F} = G_{Newton} \mathbf{M}^2/r^2$  (a lunghissimo raggio, si estende all'infinito, diminuisce con la distanza). In tutte le interazioni tra particelle e' trascurabile. Conta solo in Cosmologia

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

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0
Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	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	$\sim 0.001$
s	0.22	0.97	$\sim 0.05$
b	$\sim 0.001$	$\sim 0.05$	$\sim 1$

Matrice di Cabibbo-Kobayashi-Maskawa

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).

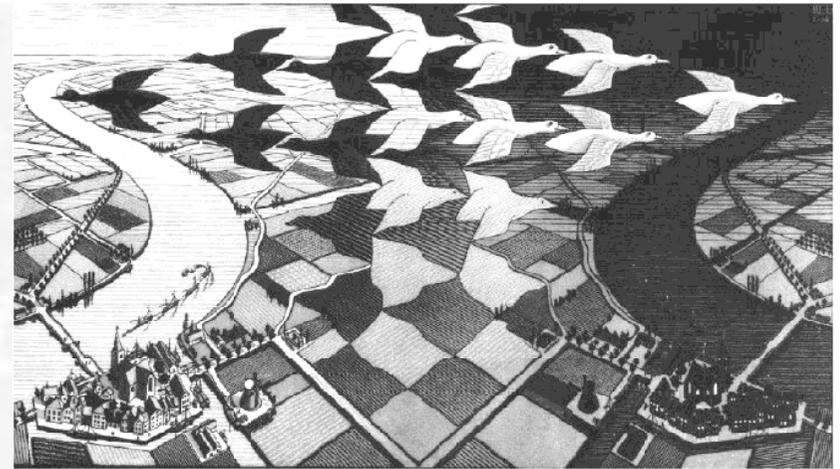
Studiando le relazioni tra gli elementi della matrice, si verifica sperimentalmente il Modello Standard.

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

## 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  $180^\circ$ )
- 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.

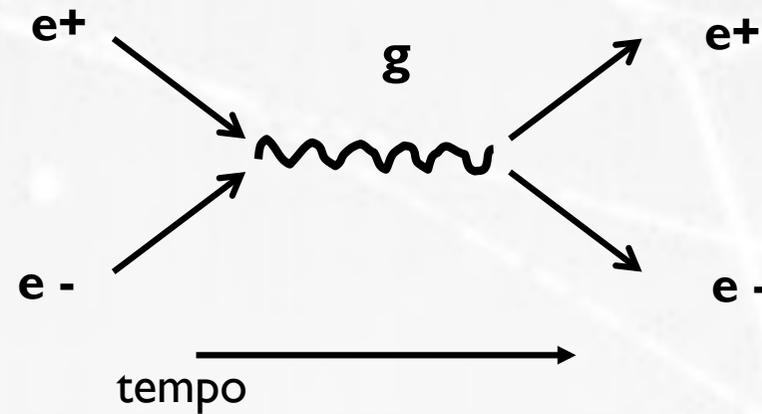
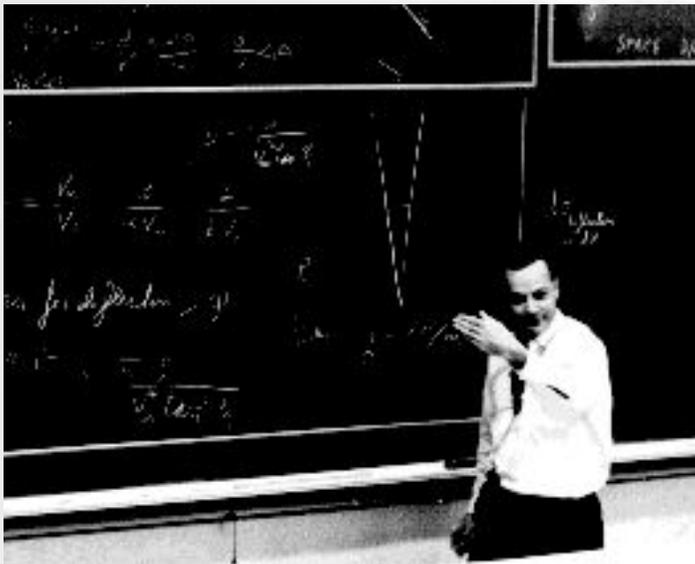
Il presente Universo è dominato dalla materia.

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 e' descritto da segmenti entranti o uscenti da vertici nei quali si svolge l'interazione

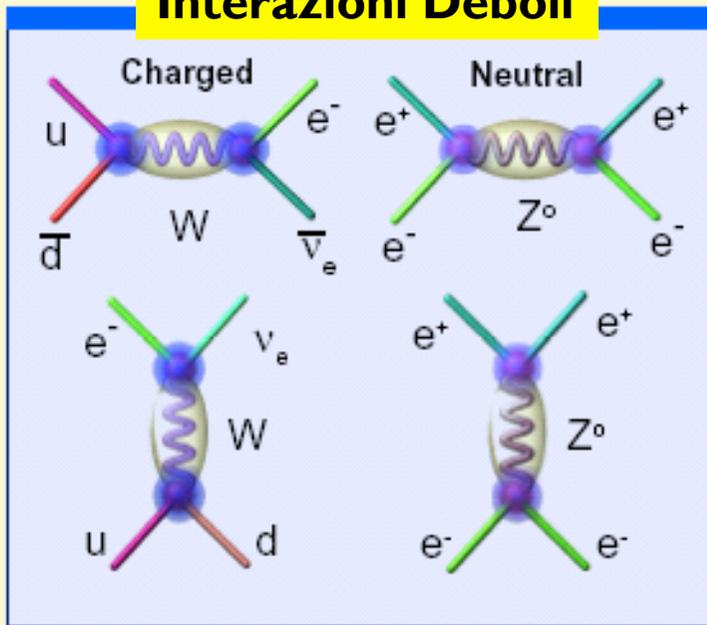
I bosoni vettori delle forze sono descritti da linee a zig-zag



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'intensita' (*sezione d'urto del processo*)

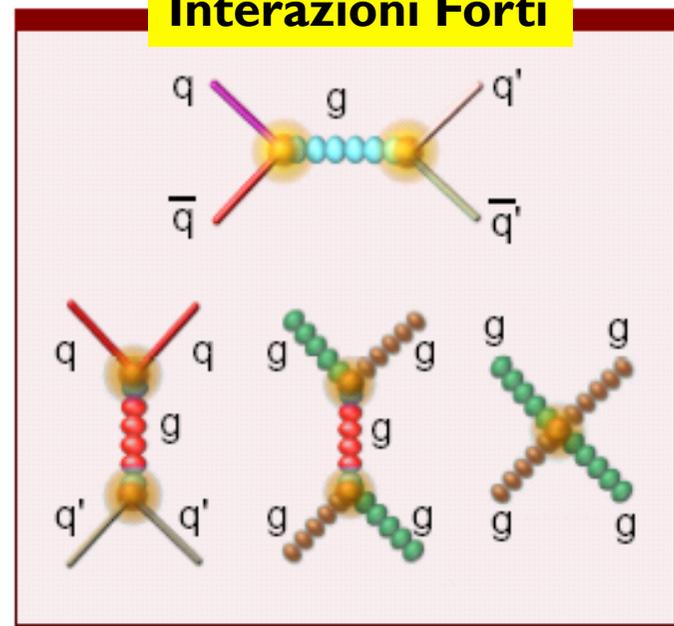
La rappresentazione delle interazioni elettromagnetiche, deboli e forti dei leptoni e dei quark al livello piu' semplice (2 vertici)

### Interazioni Deboli



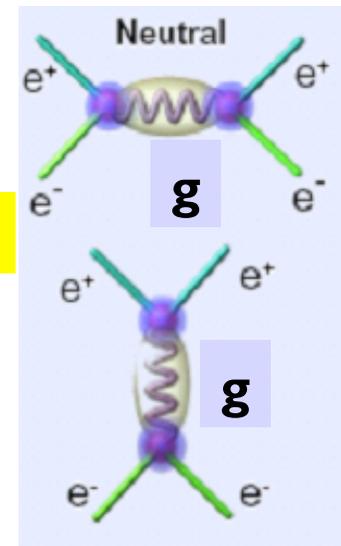
Mediatori : i bosoni W e Z

### Interazioni Forti



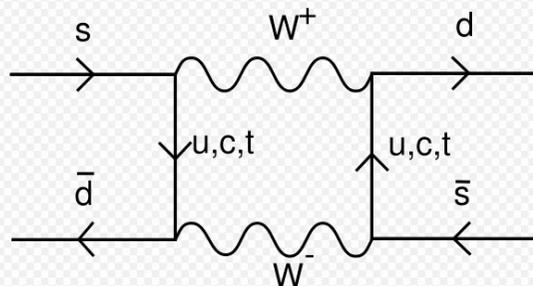
Mediatori : i gluoni

### Elettromagnetismo



Mediatore : il fotone

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

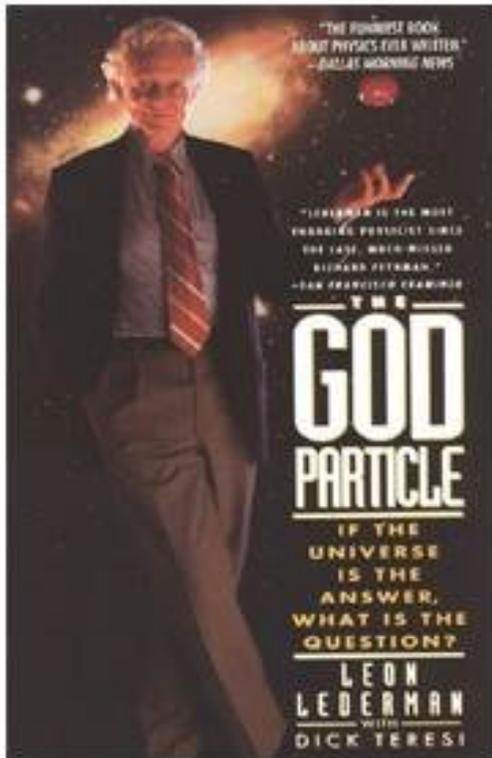


## Il Meccanismo di Higgs

Esiste però ancora un elemento da verificare nel Modello Standard: la scoperta della **particella di Higgs**

Il meccanismo di Higgs è un elemento cruciale della teoria. Ha la funzione di:

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



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 scoprire questa particella.

Nel 1993 il Ministro inglese della Scienza, Weldgrave, mise in palio una bottiglia di champagne per il fisico che fosse stato capace di spiegargli su un solo foglio di carta, come funzionasse il meccanismo di Higgs (e a cosa servisse scoprirlo...)

Il prof. David Miller vinse con il seguente esempio...

...un gruppo di politici alla buvette del Parlamento...



...improvvisamente arriva il Primo Ministro...



...tutti si affollano intorno a lui...  
(questo spiega come le particelle acquistano la massa)



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

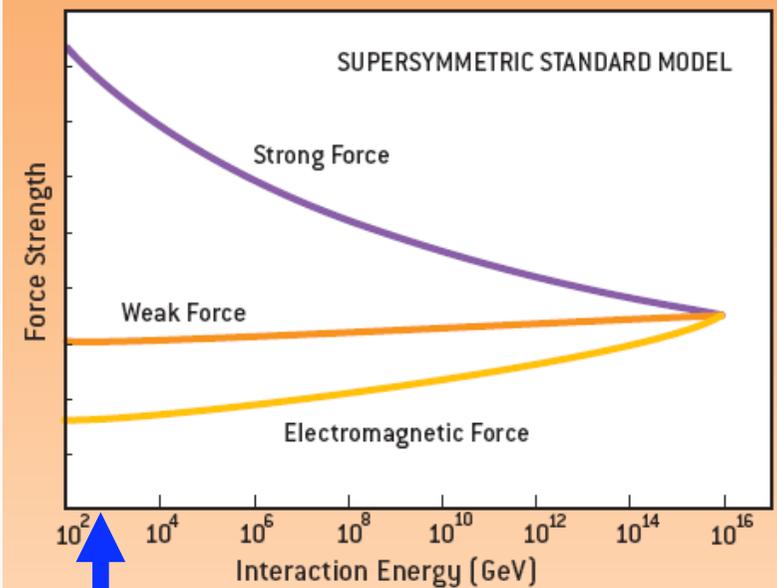
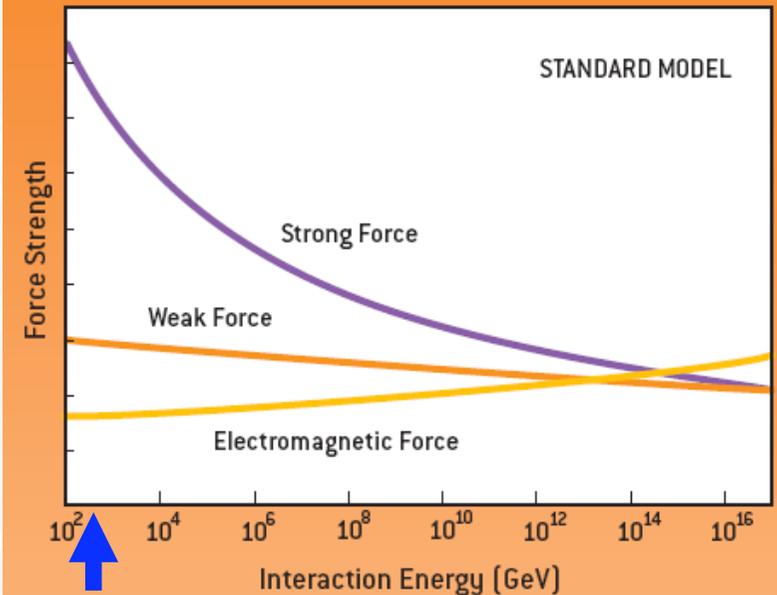
Una evidenza indiretta che le Susy siano un modello probabile per andare oltre lo SM e' dato dallo studio dell'andamento, in funzione dell'energia, delle costanti di accoppiamento delle interazioni.

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 determinarne – attraverso la meccanica classica – la massa.

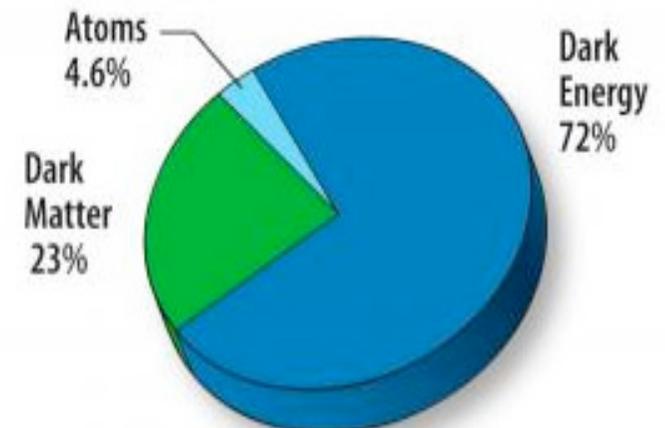
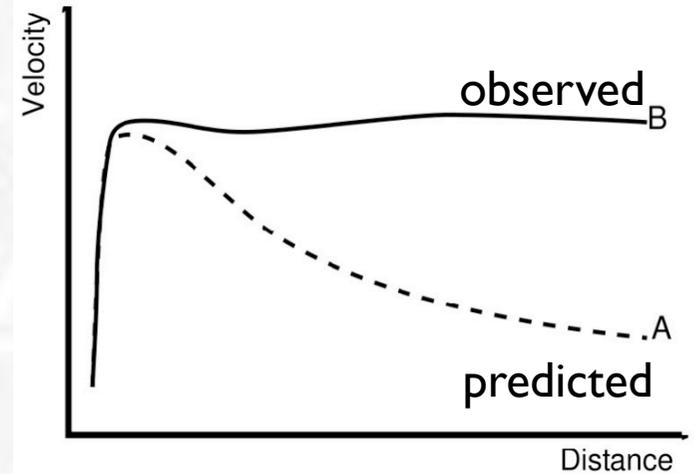
Le osservazioni sperimentali ci dicono che c'è molta più materia nell'Universo di quanta se ne osservi (Galassie, gas intergalattico, raggi cosmici).

Lo spazio è permeato di Materia Oscura (almeno 5 volte quella visibile).

*Da cosa è fatta questa materia oscura ?*

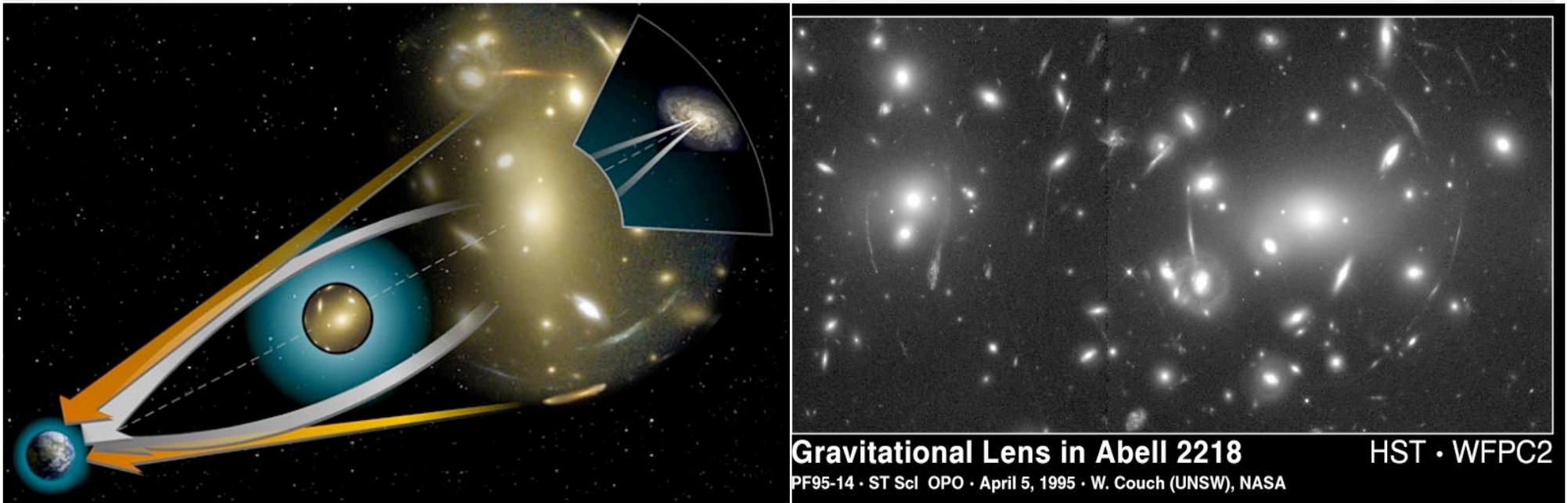
Per molti anni si è pensato che fosse dovuta ad una massa – piccola – dei neutrini. Le misure sperimentali però rendono non percorribile questa ipotesi.

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)

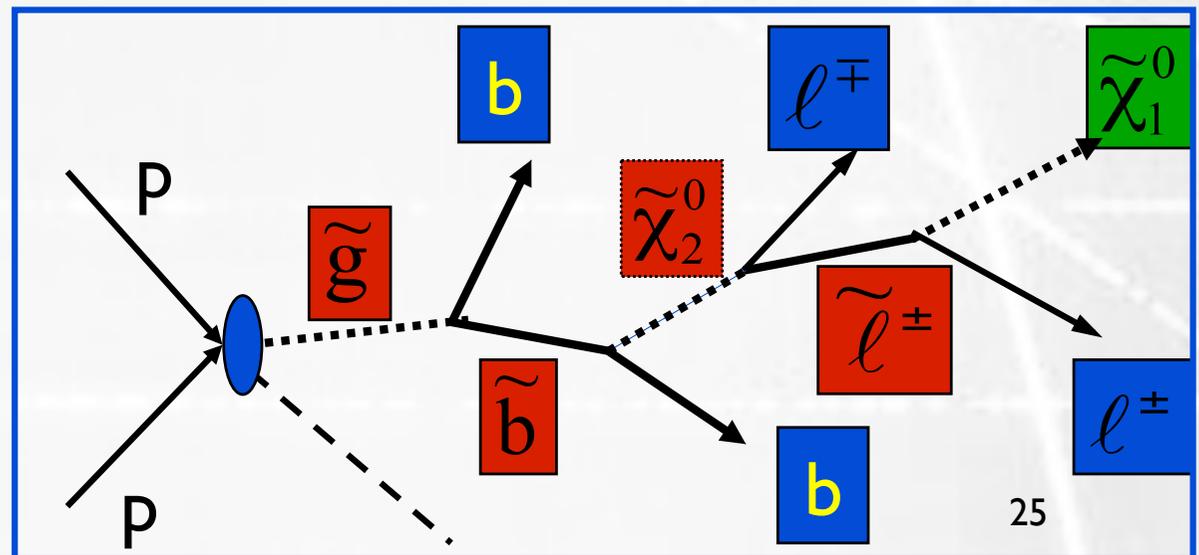
Nella catena di decadimenti delle s-particelle, deve sempre essere conservata almeno una particella di tipo-s.

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.

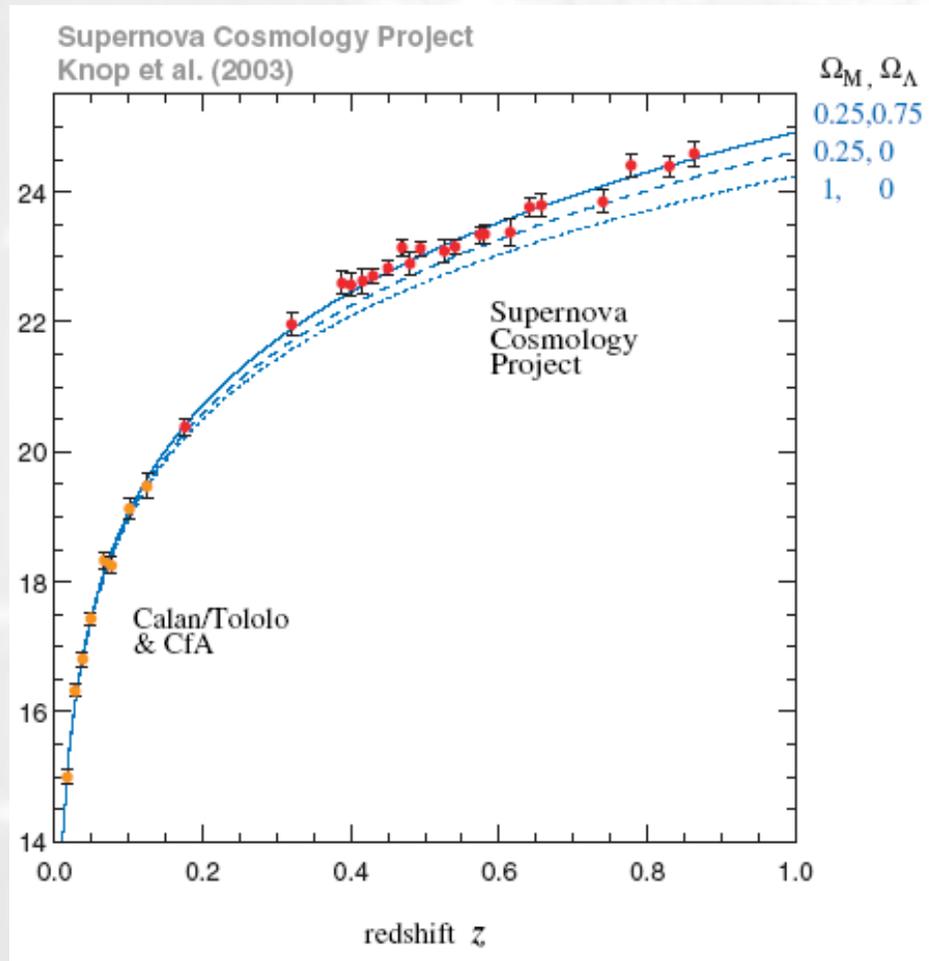
LHC ha la possibilita' di scoprirla attraverso le collisioni tra protoni che produrranno particelle Susy, che con una catena di decadimenti, porteranno alla sua creazione

Vedremo in seguito quale sia la sua traccia sperimentale nei rivelatori



## Una questione piu “oscura” della Materia Oscura: l’Energia Oscura

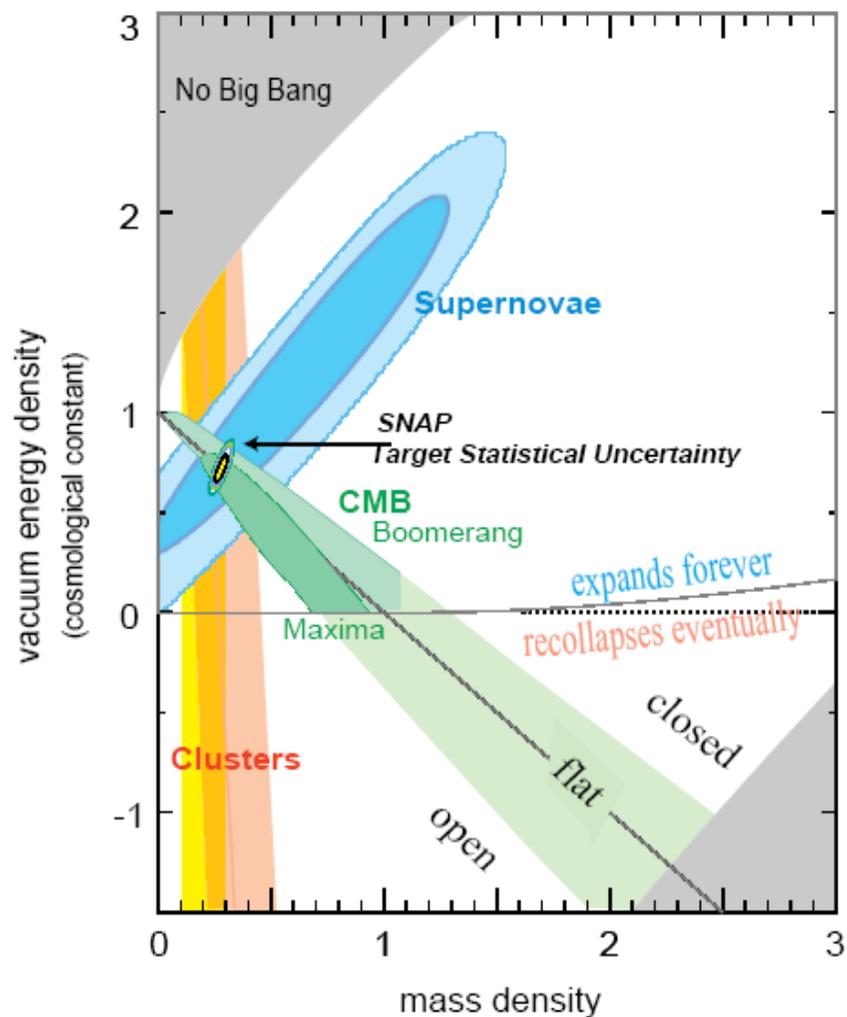
Nel 1998 un gruppo di ricercatori americani, studiando le Supernovae distanti si e’ accorto che – contrariamente a quanto si pensava dalla teoria di Einstein in poi – l’Universo e’ in espansione e sta accelerando, sotto la spinta di una forza repulsiva ingente e sconosciuta.



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 $\Lambda$

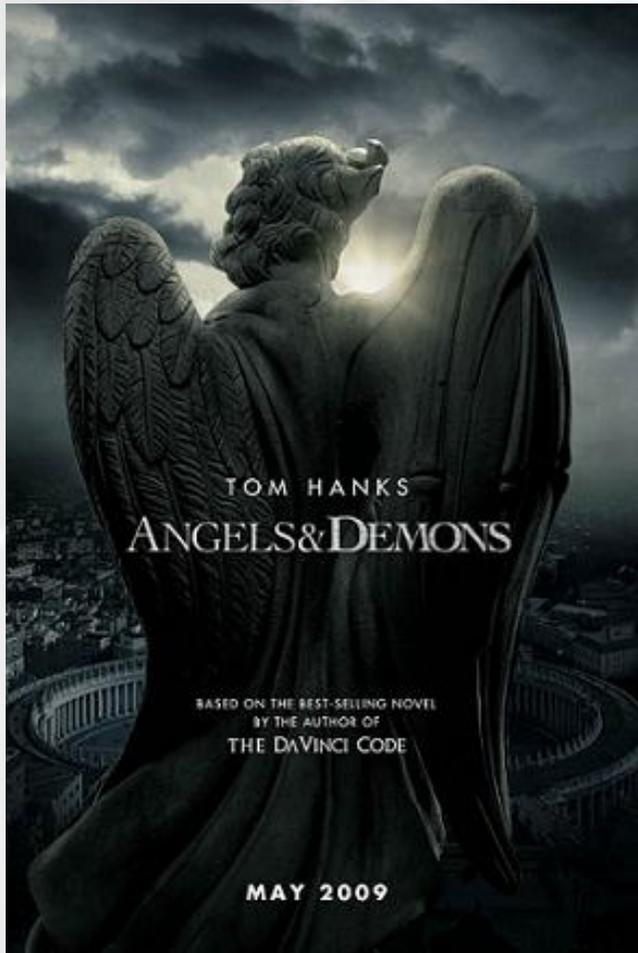
Anche altre misure, quali quelle sulla distribuzione della radiazione di fondo a 2.7 K e lo studio dei Cluster a grande scala, confermano che il nostro Universo sta accelerando nella sua espansione

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.

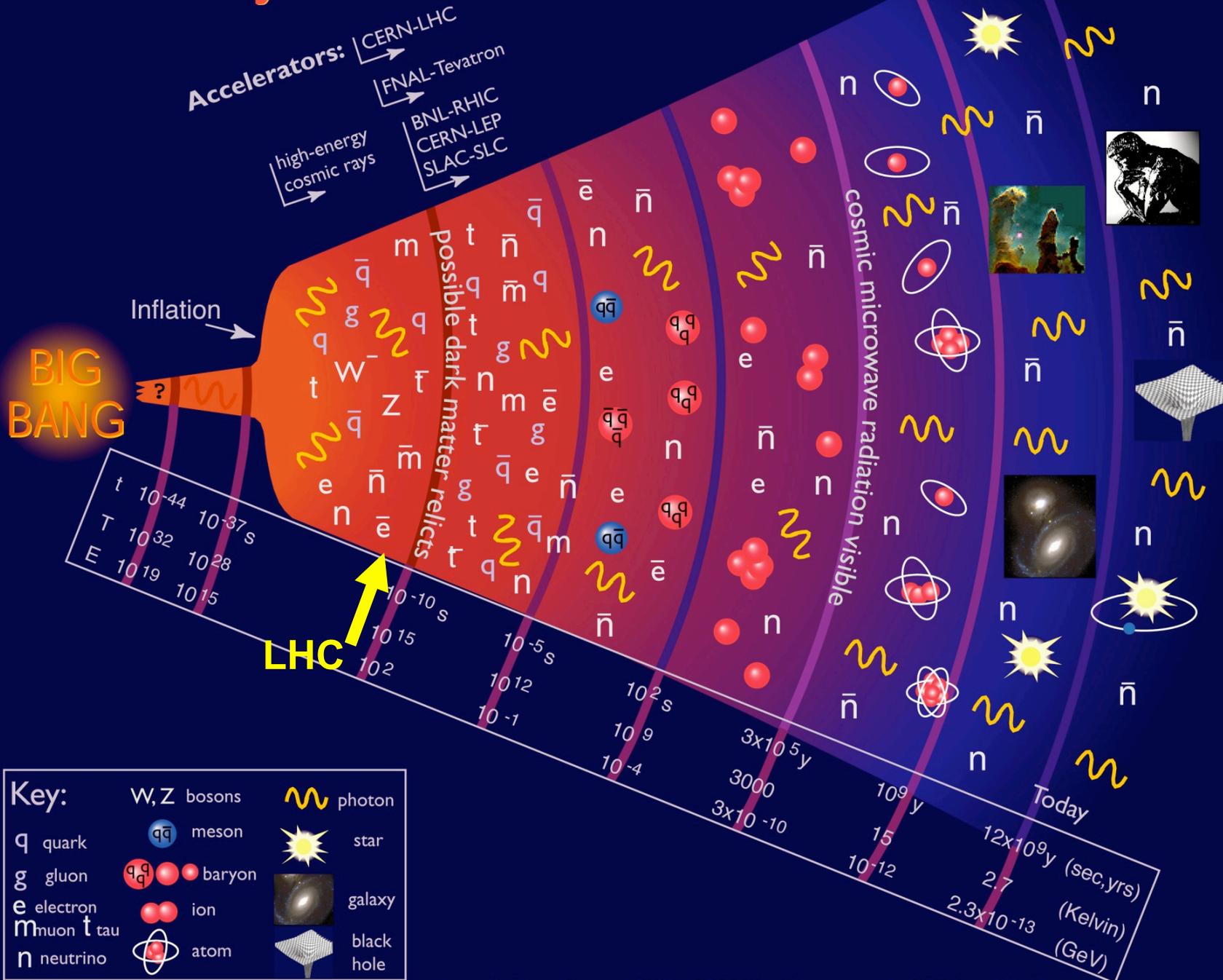
Una suggestiva è quella per la quale  $\Lambda$  potrebbe essere causata dalle fluttuazioni del vuoto (un fenomeno tipicamente quantistico) che potrebbero “generare” un’energia non nulla nello spazio. Il problema è che la stima differisce per 120 ordini di grandezza...27



Il **Large Hadron Collider** del CERN  
(ossia studiare la materia per capire l'Universo)



# History of the Universe



## Gli scopi scientifici di LHC

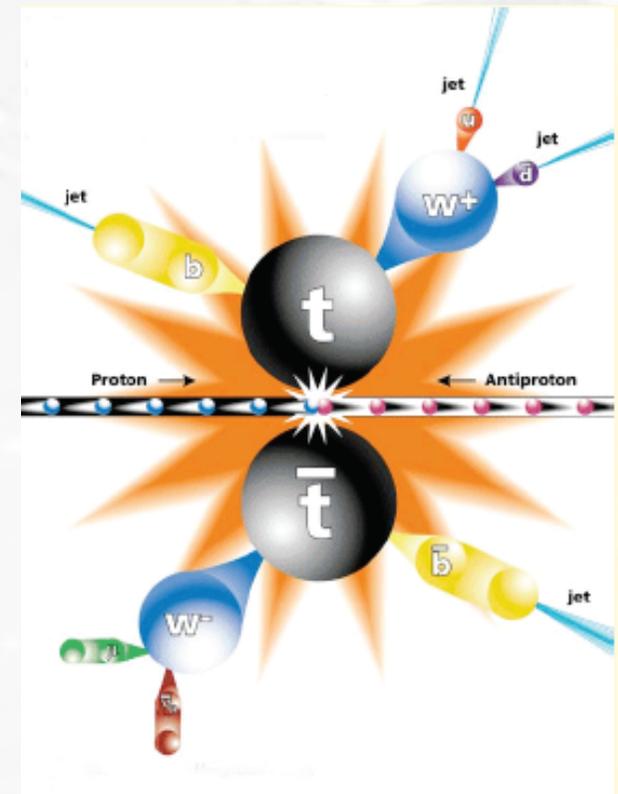
LHC e' una macchina lunga **27 km** nella quale protoni si scontrano contro altri protoni per rilasciare energia utile a creare nuovi stati della materia, mai visti dall'uomo, ma forse creati nei primi istanti del Big Bang.

- 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 risolvere i problemi prima elencati*

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

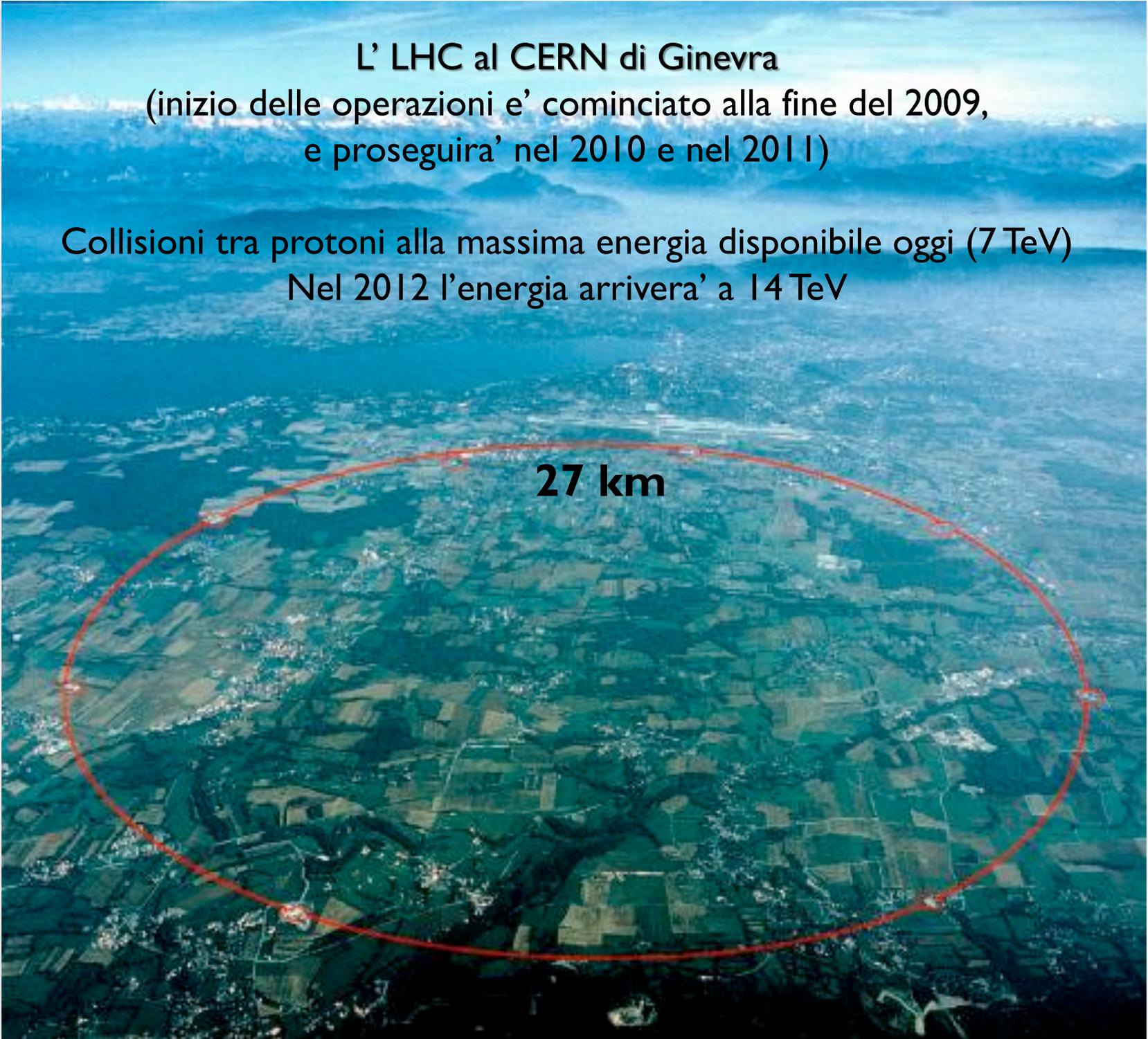
Entriamo in LHC e nei suoi apparati per capire in che modo si possano chiarire questi aspetti....



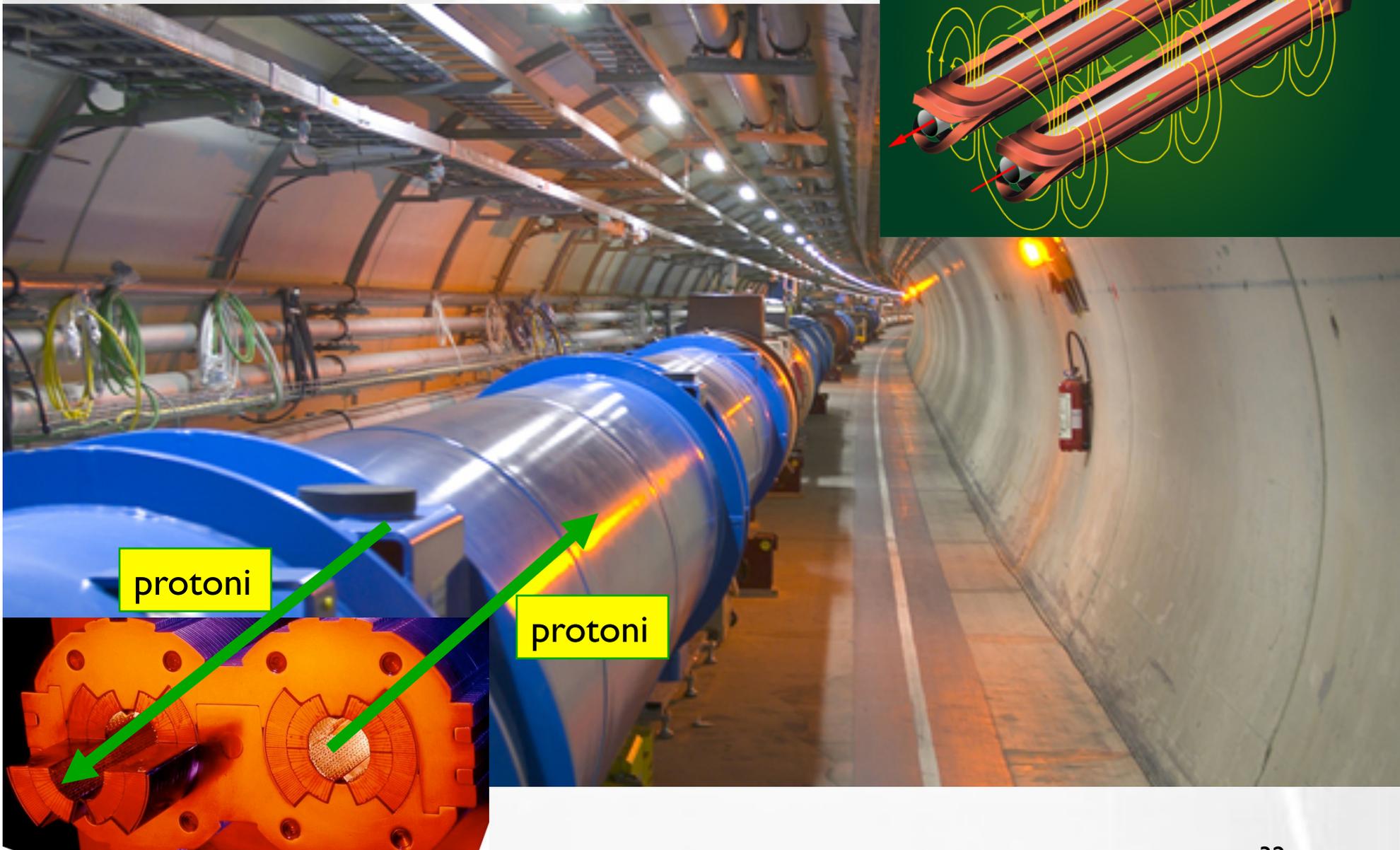
L' LHC al CERN di Ginevra  
(inizio delle operazioni e' cominciato alla fine del 2009,  
e proseguira' nel 2010 e nel 2011)

Collisioni tra protoni alla massima energia disponibile oggi (7 TeV)  
Nel 2012 l'energia arrivera' a 14 TeV

27 km

An aerial photograph of the Geneva region in Switzerland, showing a patchwork of green fields and small towns. A large red circle is drawn over the landscape, representing the circular path of the Large Hadron Collider (LHC) tunnel. The text '27 km' is centered within the circle, indicating the total length of the tunnel.

# Il Tunnel di LHC

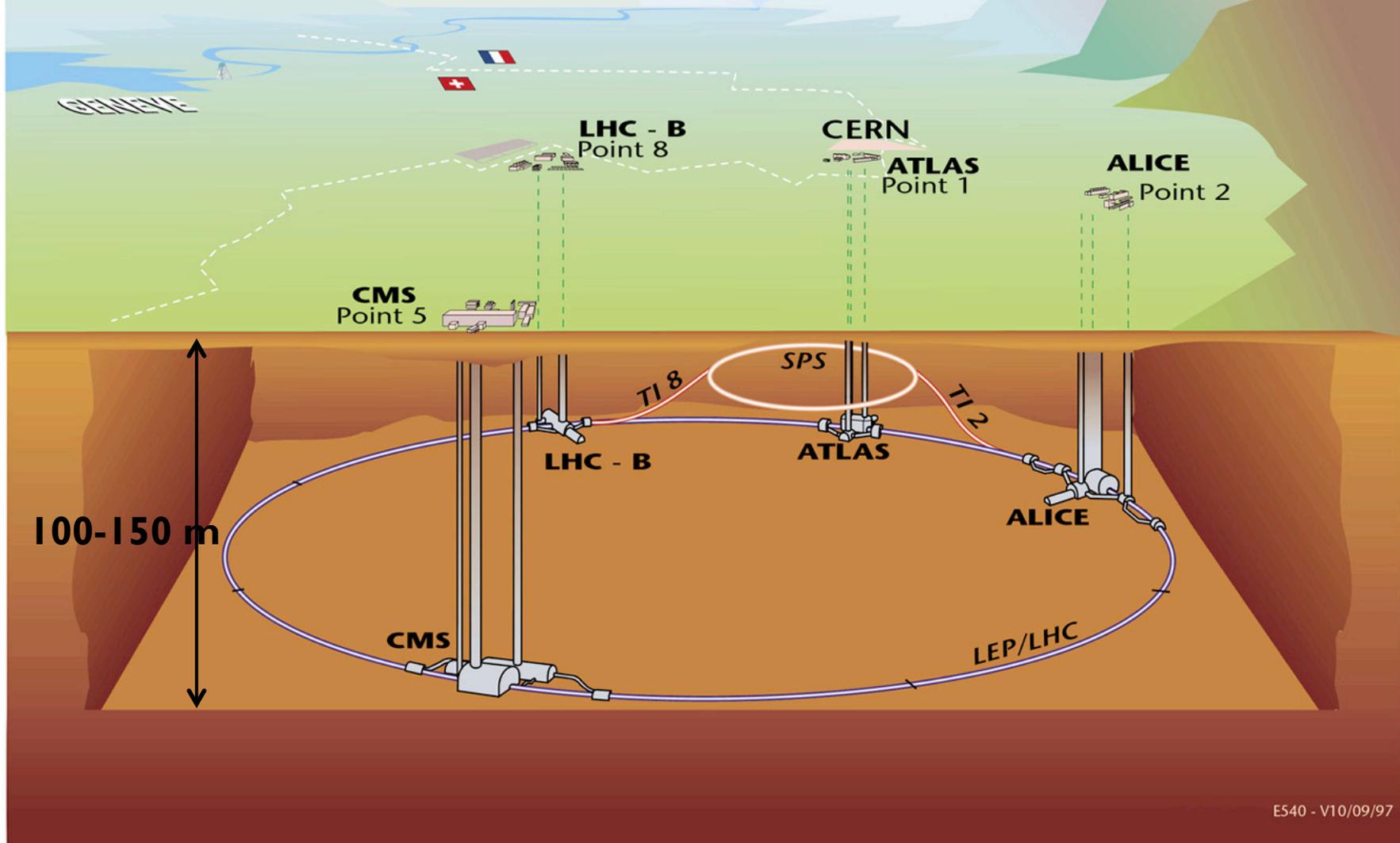


# Overall view of the LHC experiments.

**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

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  $\sim 370$  MJ

→ l'energia di un treno lanciato a 150 km/h

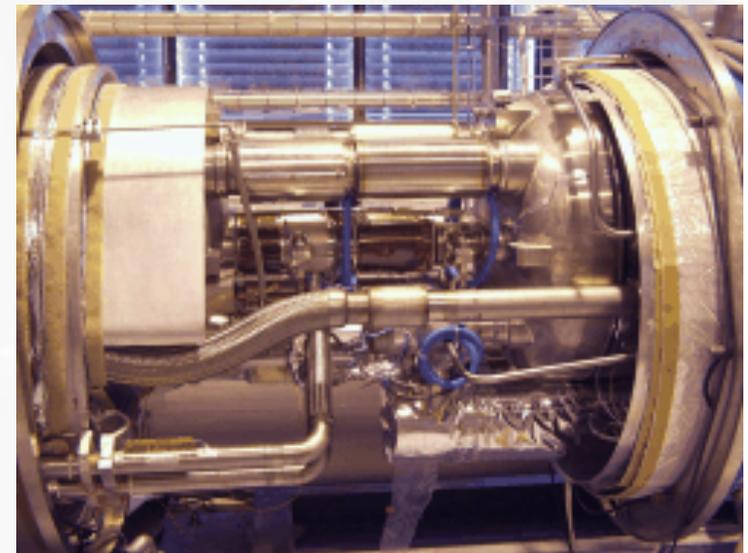
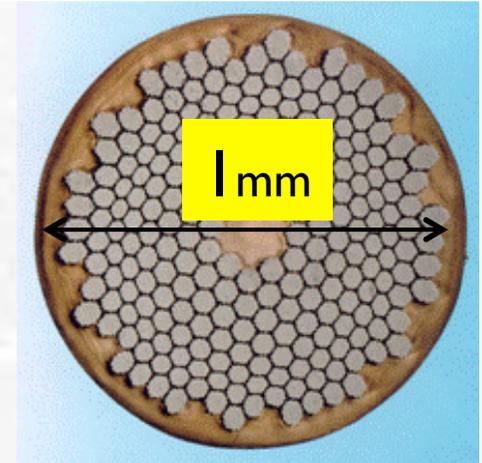
→ l'energia necessaria a fondere 1 T di rame

- Il sistema criogenico è ad Elio Superfluido (scelto per le sue caratteristiche di trasportabilità su grandi distanze) - Consumo di elettricità  $\sim 120$  MW

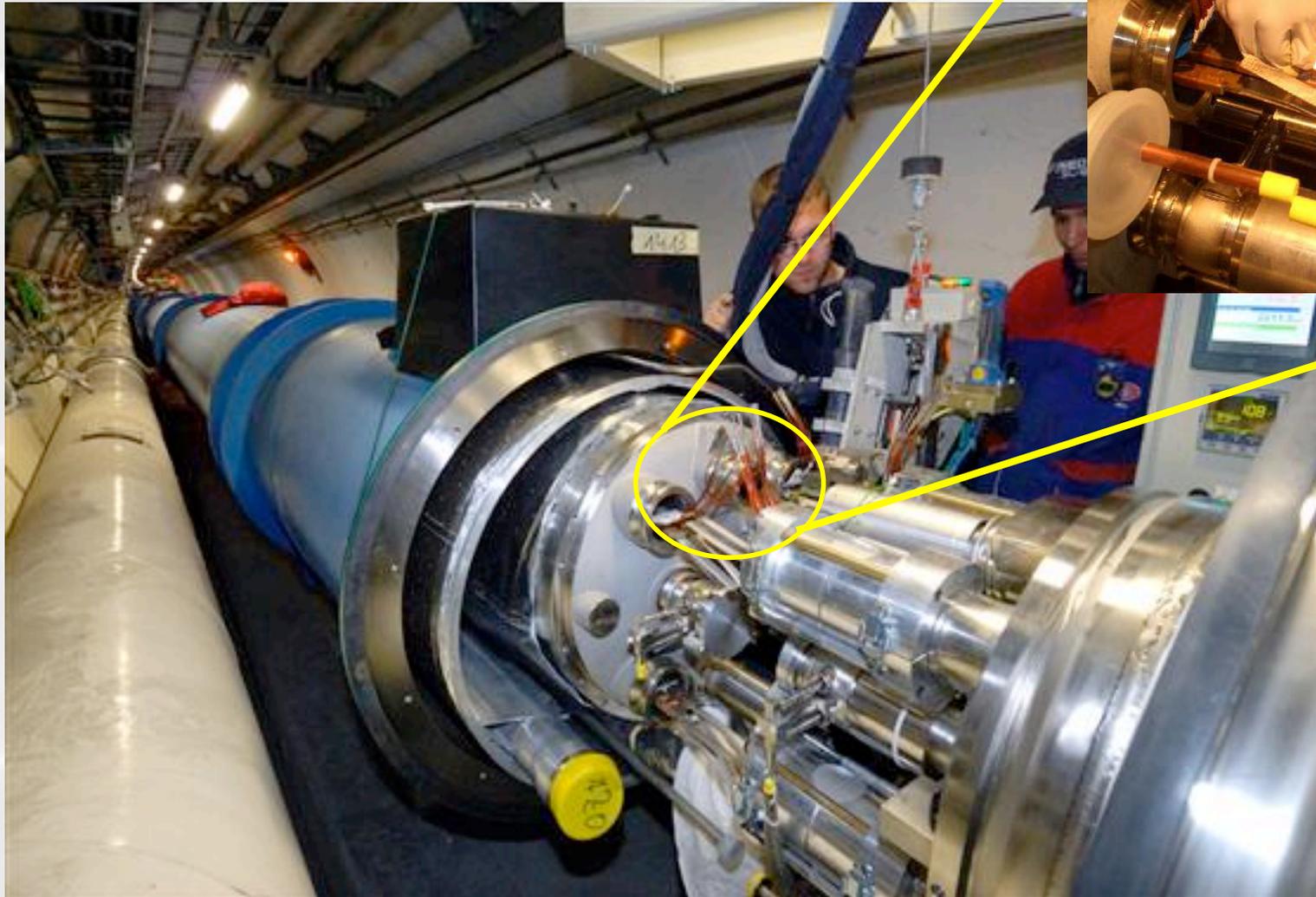
- Il fascio circolerà in una ciambella dove è stato fatto un vuoto ultraspinato per evitare le collisioni con il gas residuo:  $10^{-10}$  Torr ( $760$  Torr = 1 atm) ( $< 3 \cdot 10^6$  molecole/cm<sup>3</sup>): la stessa pressione che incontriamo a 1000 km di altezza

- I protoni si urtano ad una frequenza di 40 MHz  
Sulle fibre ottiche che portano gli eventi ai calcolatori, c'è un evento "in fila" ogni 4-5 m !

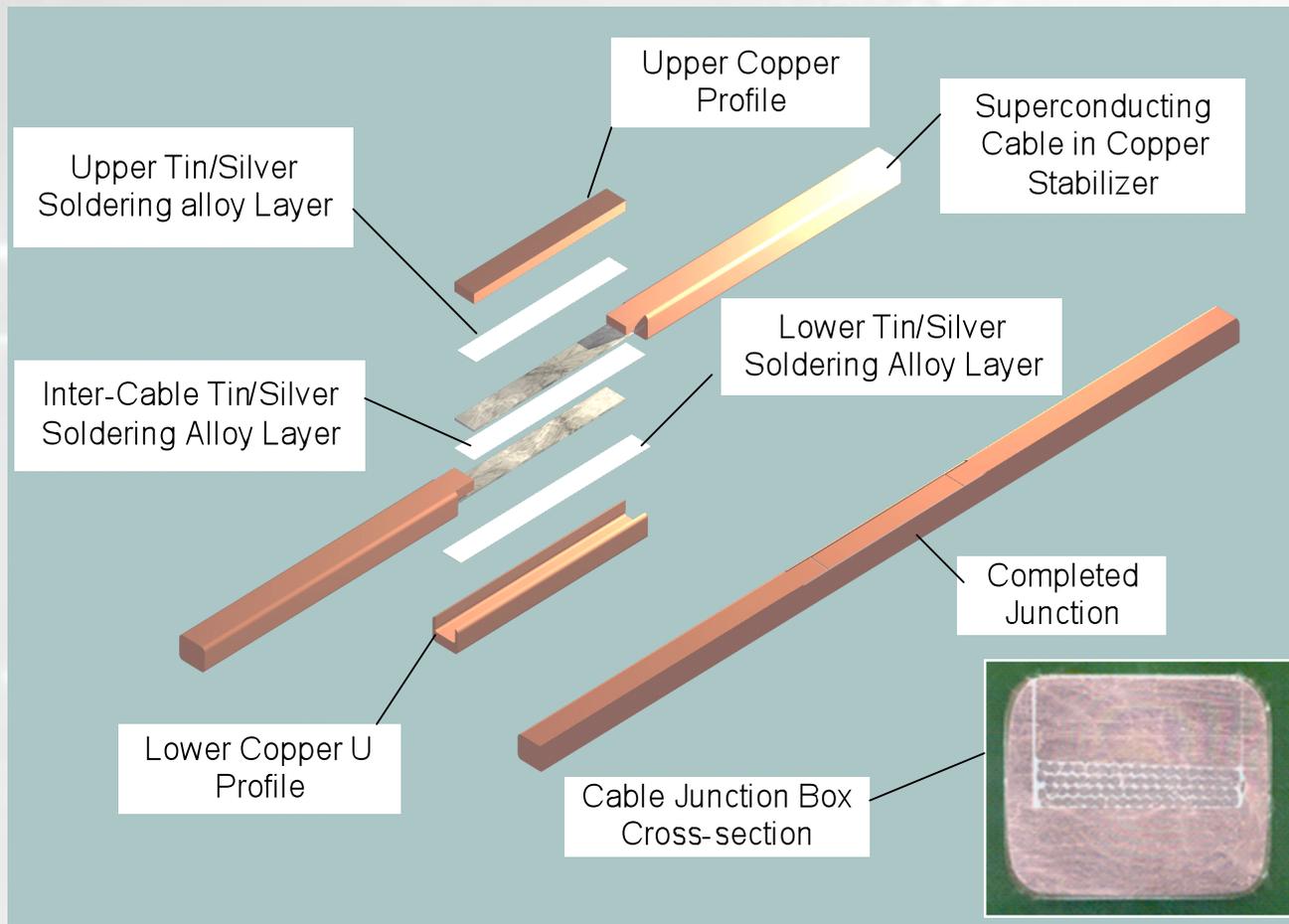
- I 4 esperimenti producono una quantità di dati pari ad 1 DVD ogni 10 sec. ( $> 100,000$  l'anno)



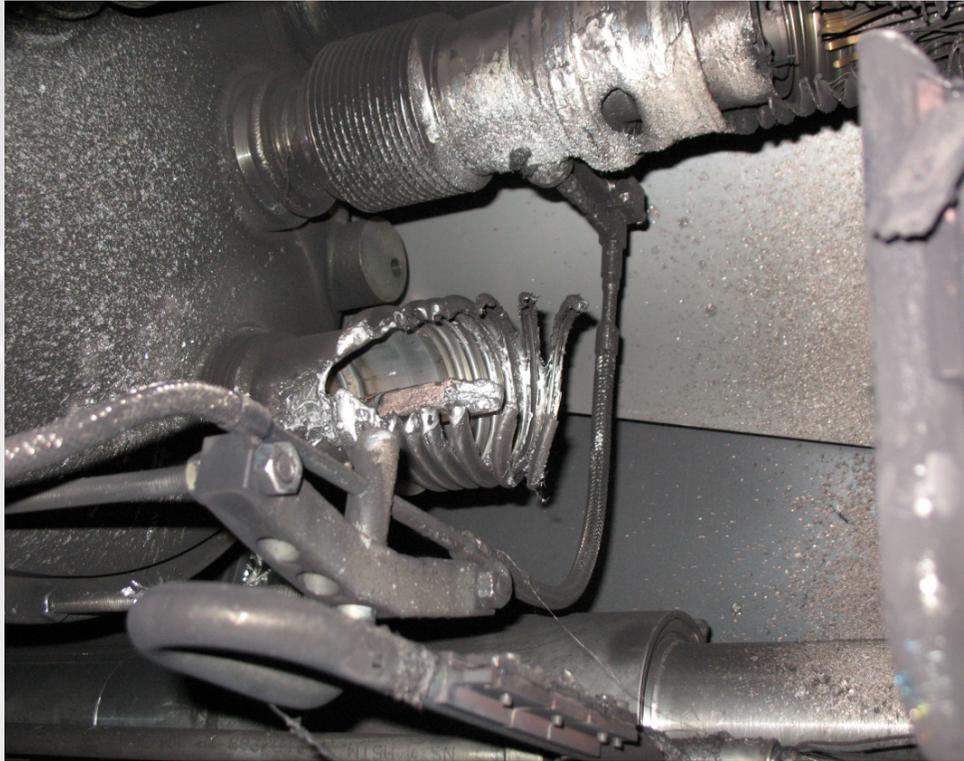
**Perche' nel settembre del 2008 LHC si e' rotto ?**



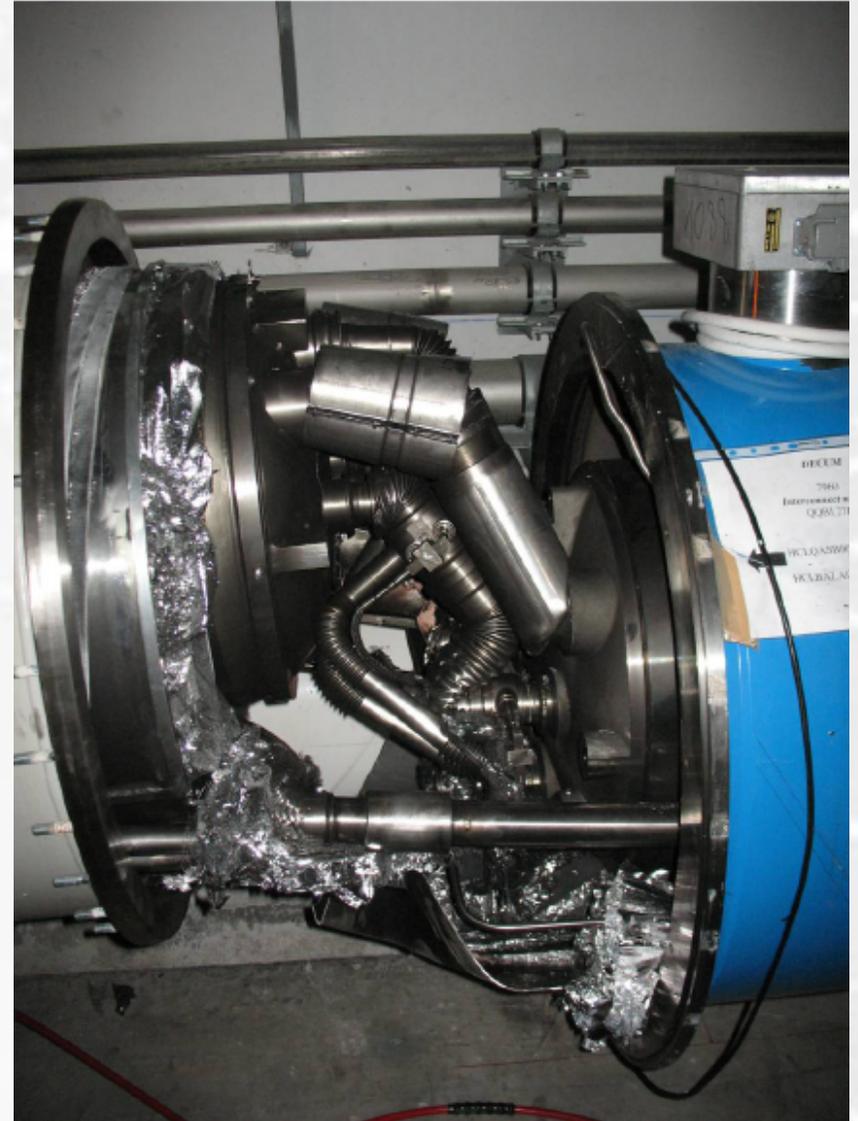
I magneti superconduttori di LHC sono interconnessi elettricamente da giunzioni in rame, saldate tra di loro (ce ne sono 30,000)



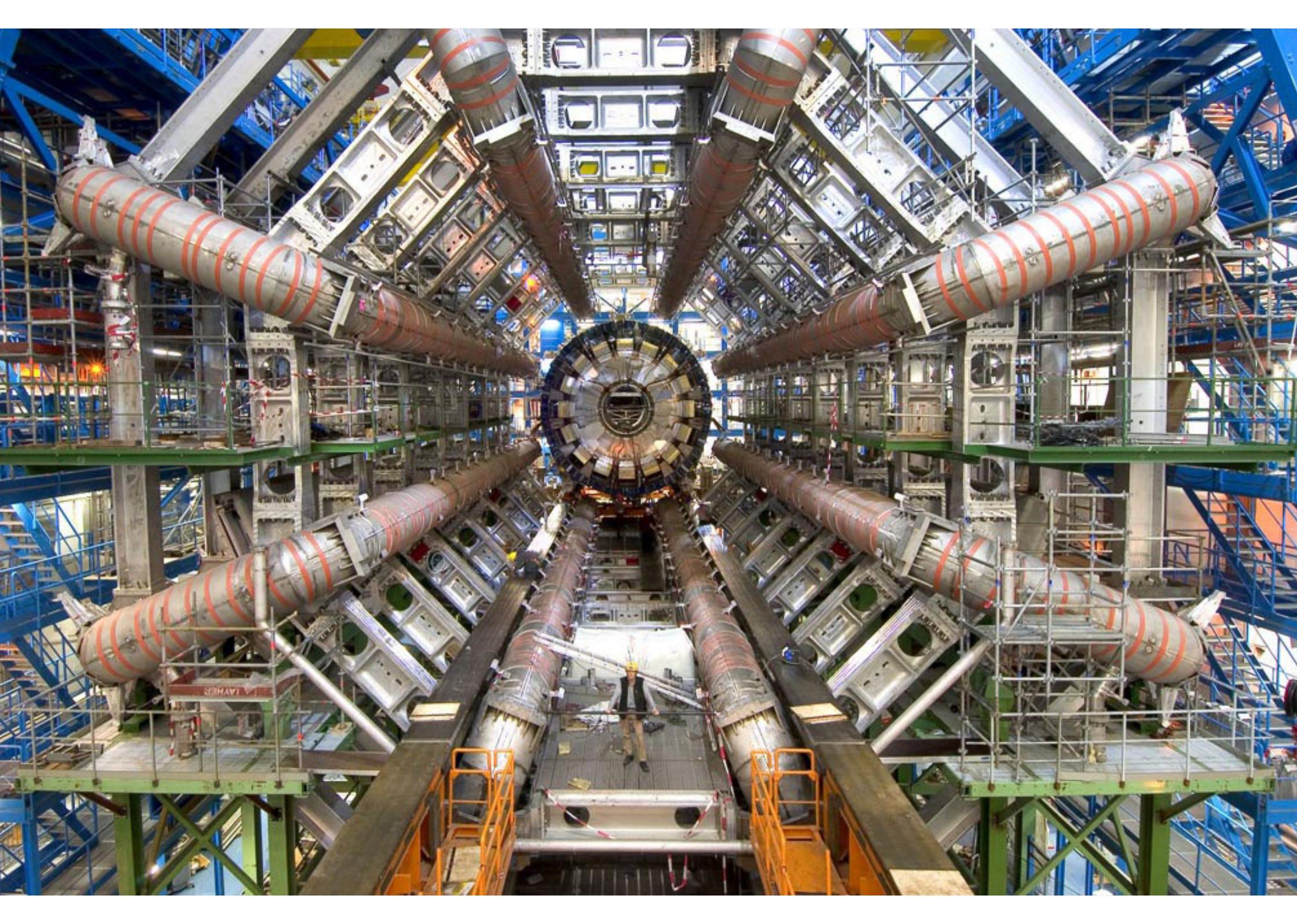
Questi giunti presentano una resistenza piccolissima in presenza di Superconduttività. Se però accidentalmente la Superconduttività sparisce (succede un “quench”), una corrente notevole (9000 A) può passare in queste connessioni. In tale momento anche un *resistenza piccola* ( $100 \text{ n}\Omega = 10^{-7} \Omega$ ), può creare un forte Effetto Joule ( $E=I^2 R$ ) e “fondere” la giunzione, con gravi effetti...



Una di queste giunzioni, fondendosi, ha perforato la camicia che conteneva l'Elio superfluido, che e' entrato in contatto con la temperatura ambiente, ha vaporizzato istantaneamente, provocando un'onda d'urto che ha spostato dalla loro sede una serie di magneti ciascuno del peso di decine di tonnellate. Dal novembre del 2009, dopo un anno di riparazioni, LHC e' di nuovo in funzione

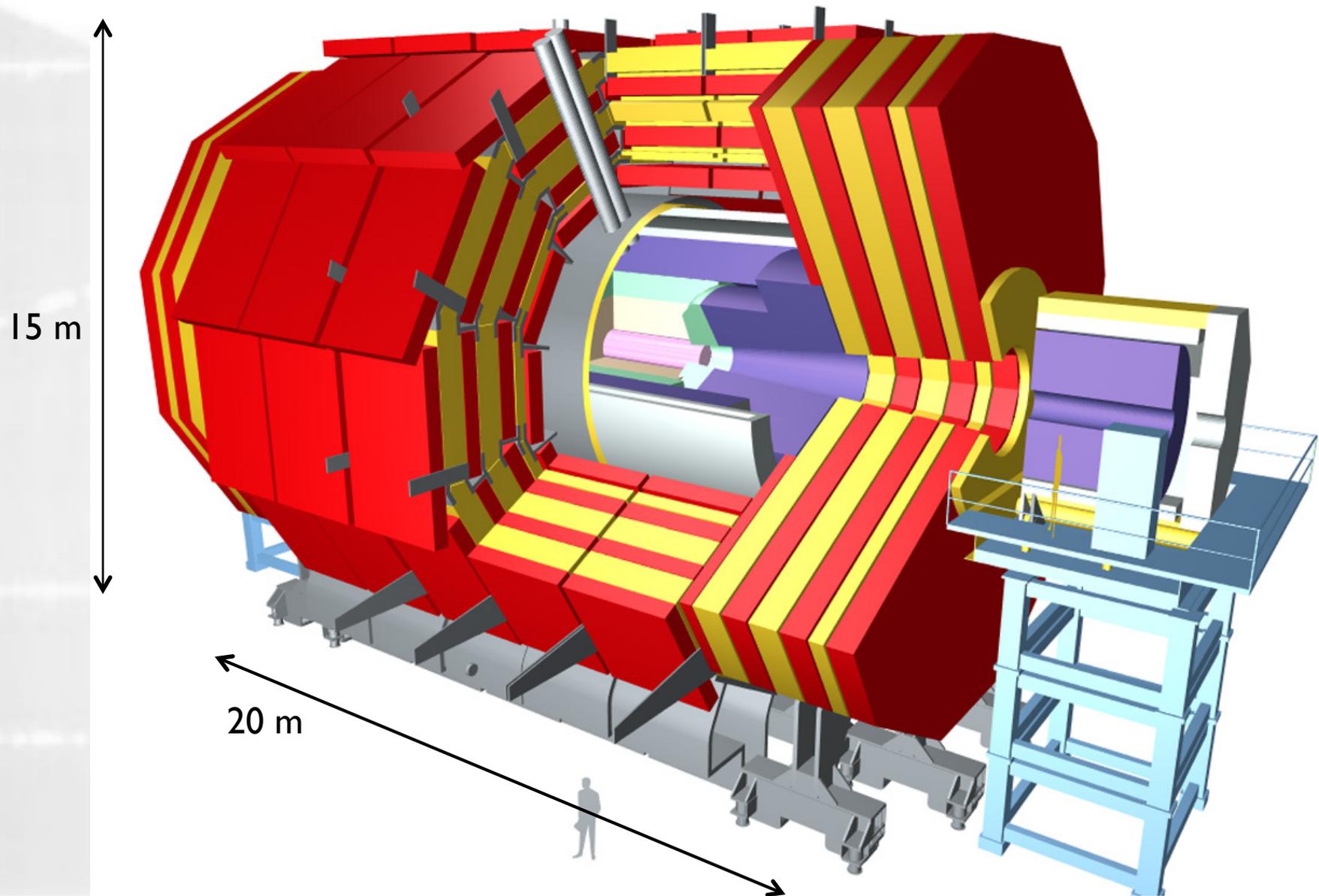


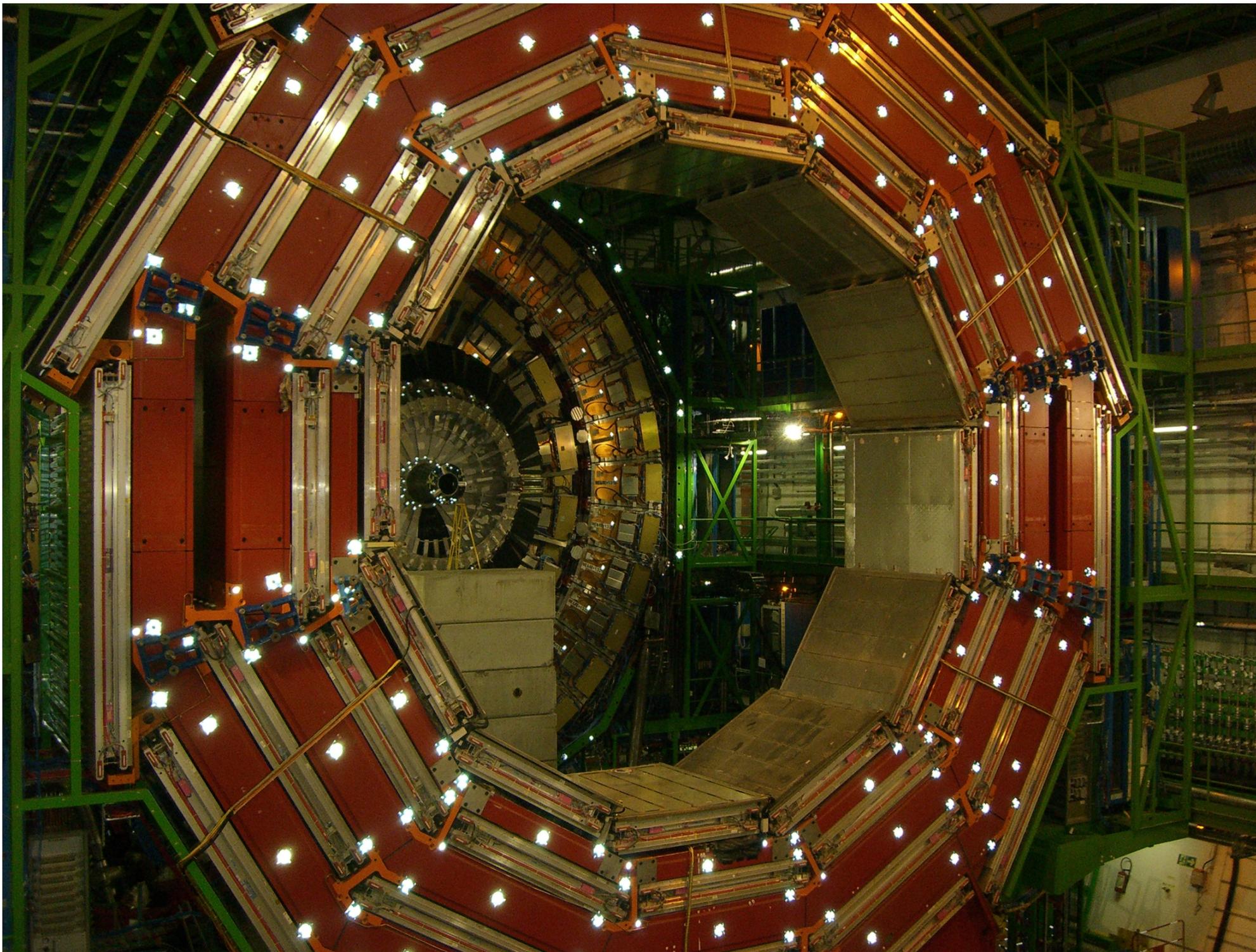




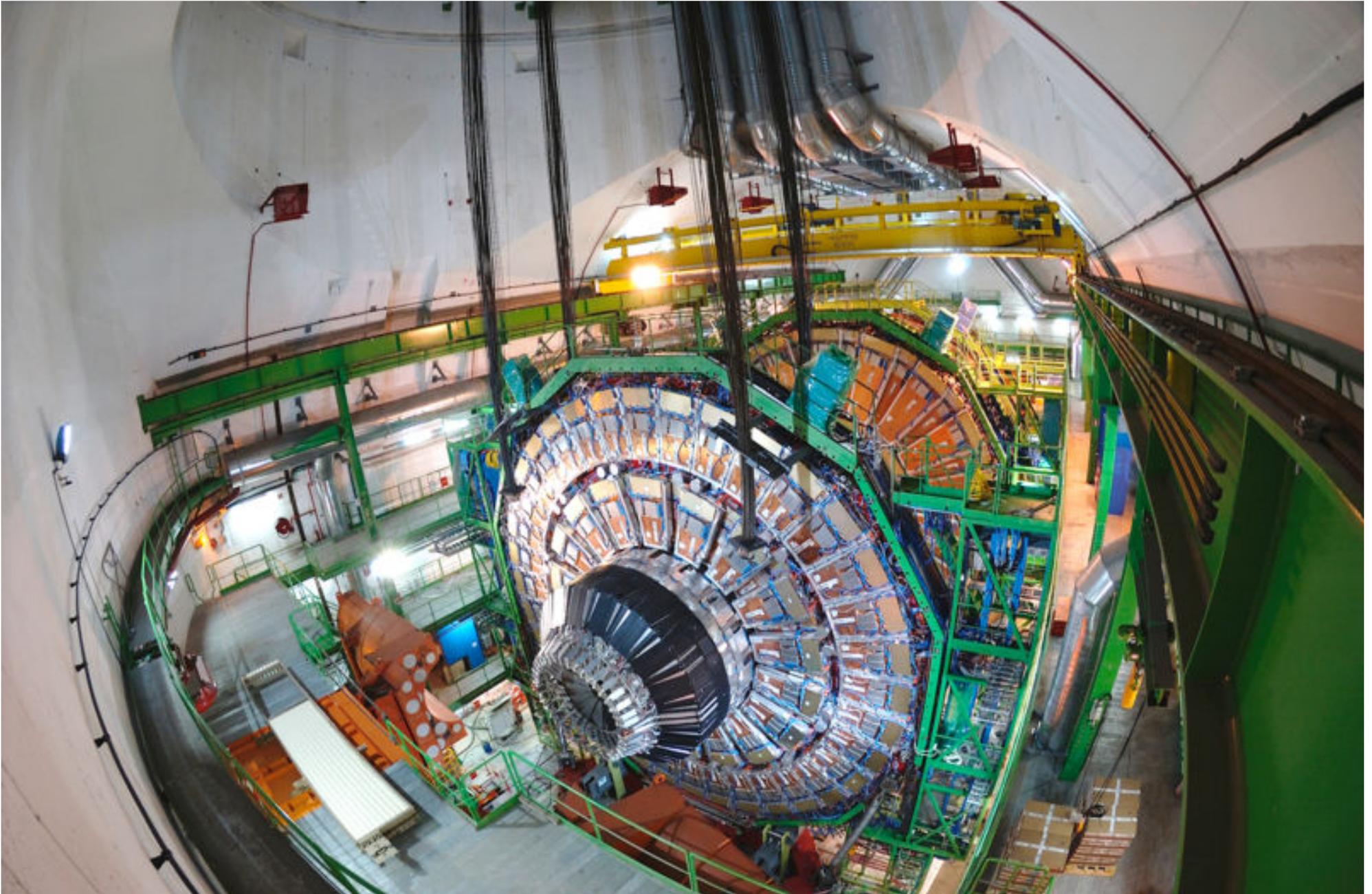
Cms → [cms.cern.ch](https://cms.cern.ch)

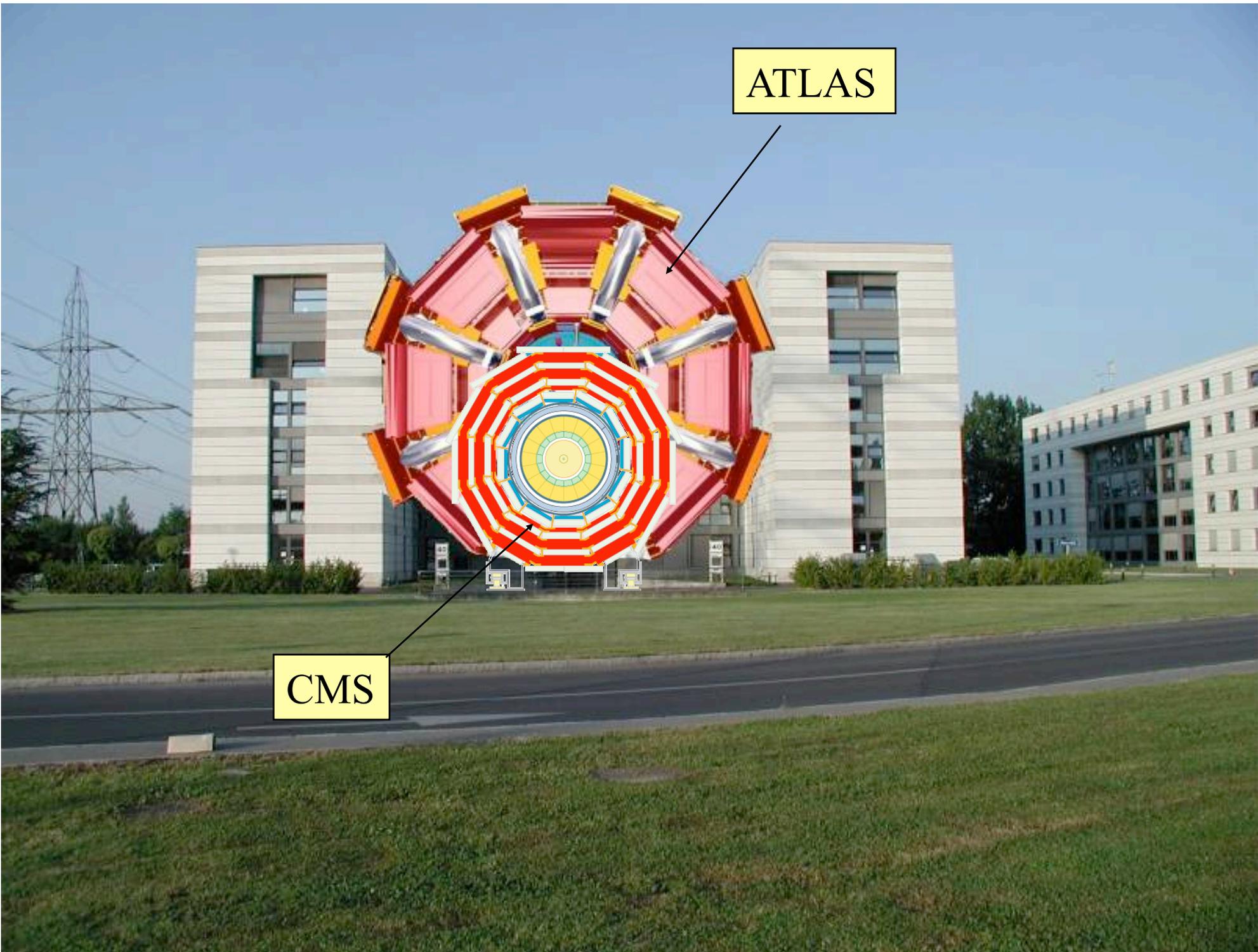
12,500 t - 2800 scienziati 180 istituti - Costo 400 M€





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



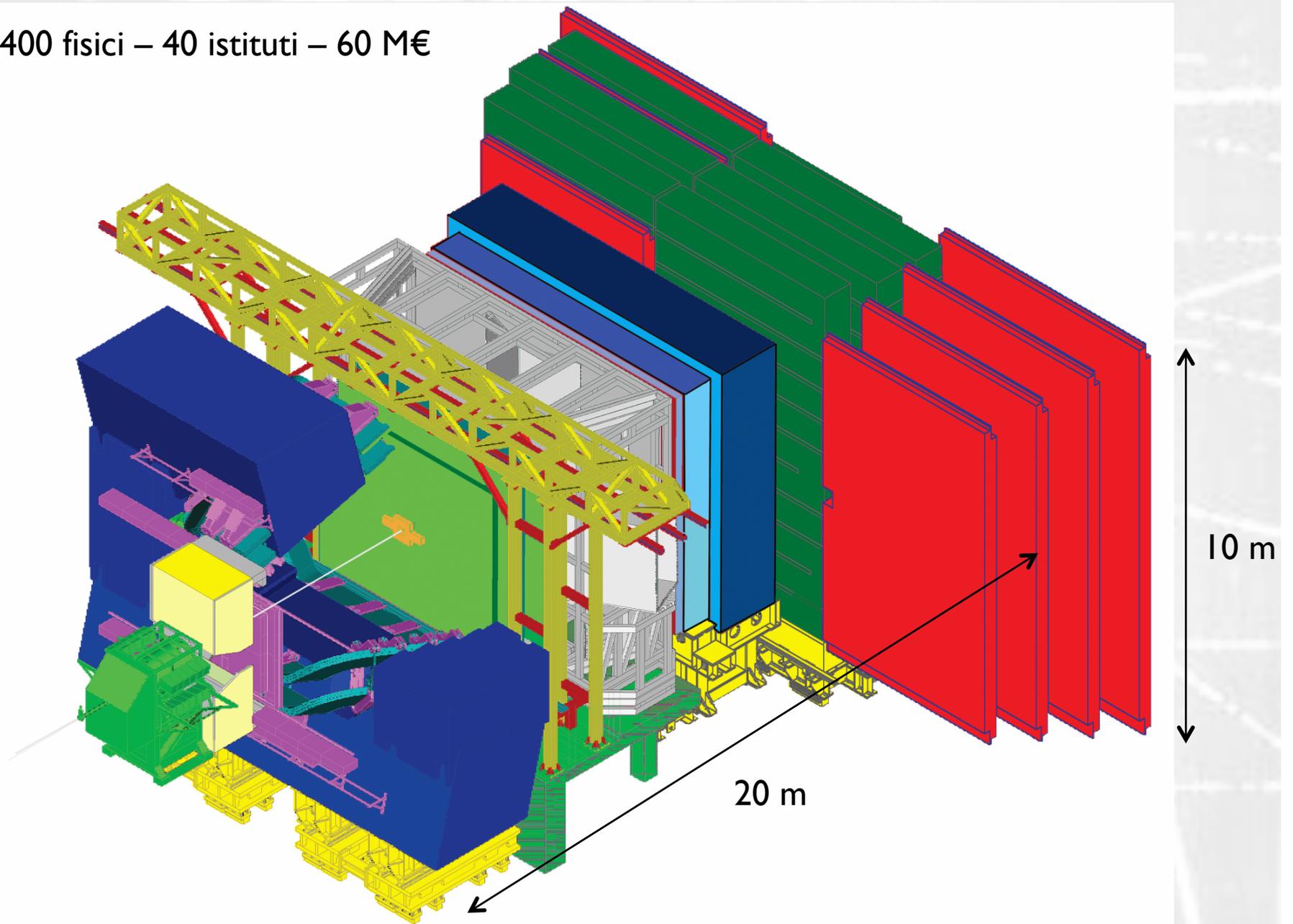


ATLAS

CMS

# Lhcb – lhcb.web.cern.ch

400 fisici – 40 istituti – 60 M€



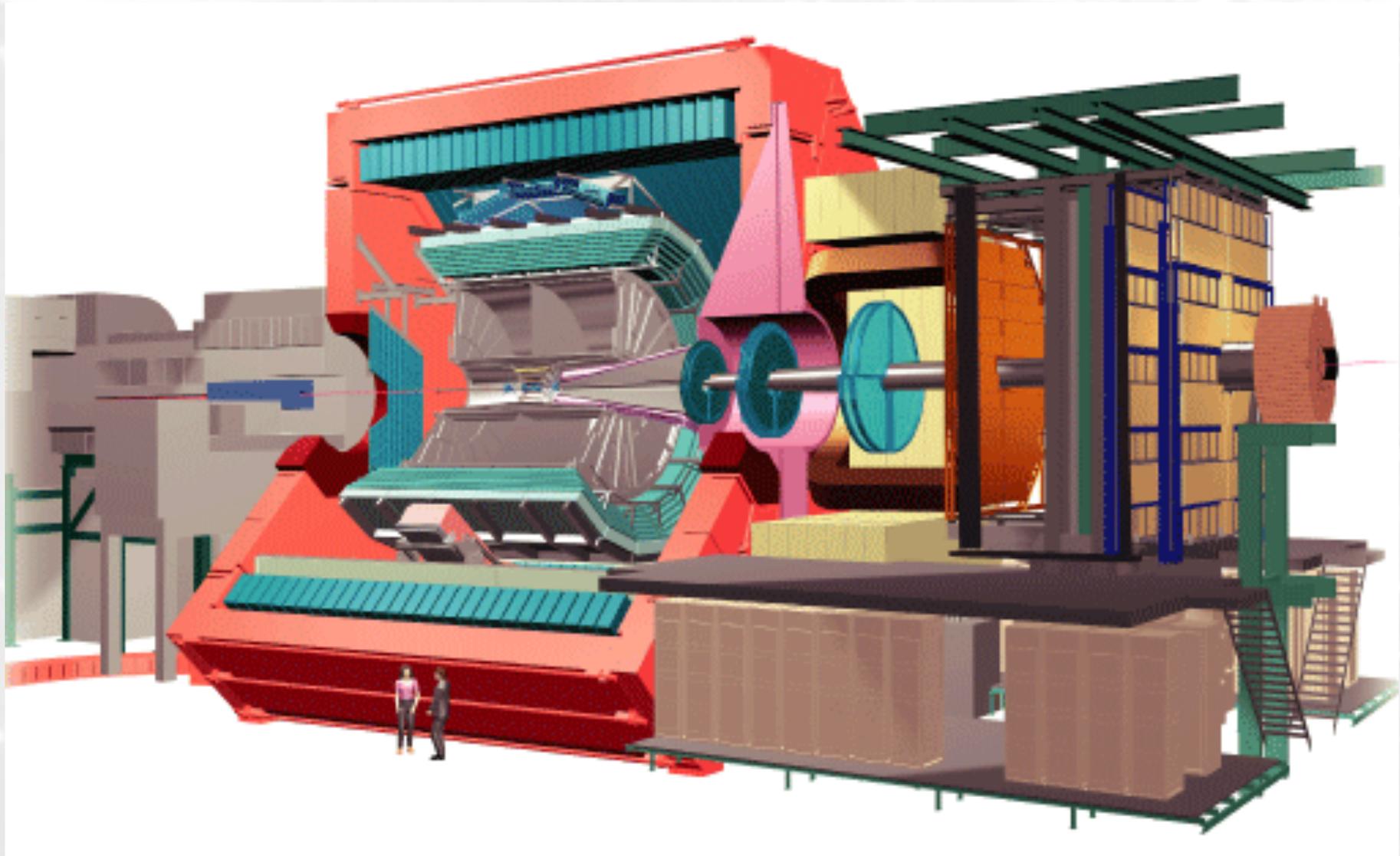
Un esperimento dedicato allo studio della violazione di CP nel sistema del quark b, ma anche dedicato alla ricerca di fenomeni inaspettati, possibilmente dovuti a Nuova Fisica, nei decadimenti molto rari. Un approccio alternativo a Atlas / Cms

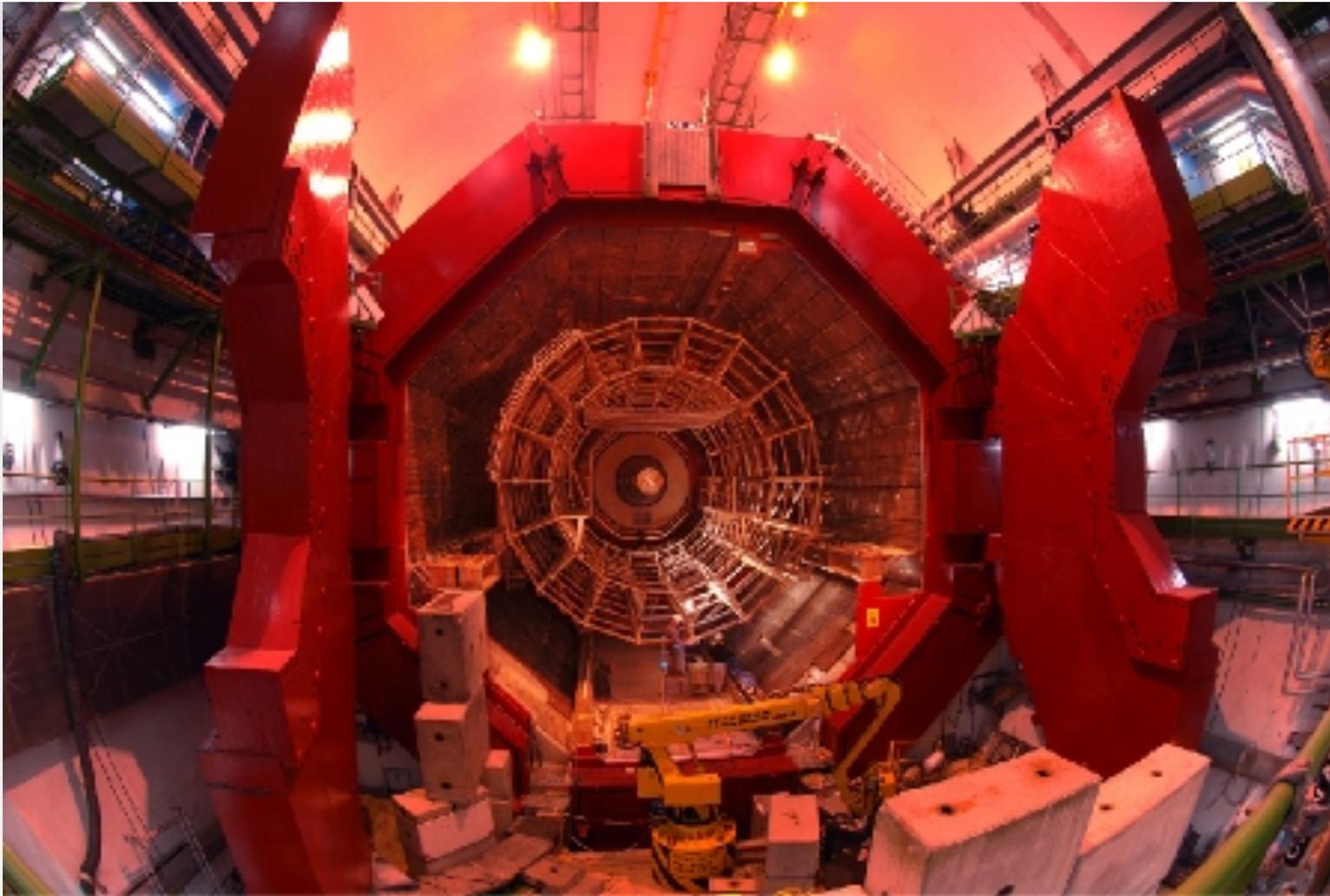


E' un apparato che ha la caratteristica di rivelare solo le particelle che vanno in avanti rispetto ad una direzione dei protoni, al contrario degli altri che accettano particelle in tutte le direzioni

# Alice – [aliceinfo.cern.ch](http://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).

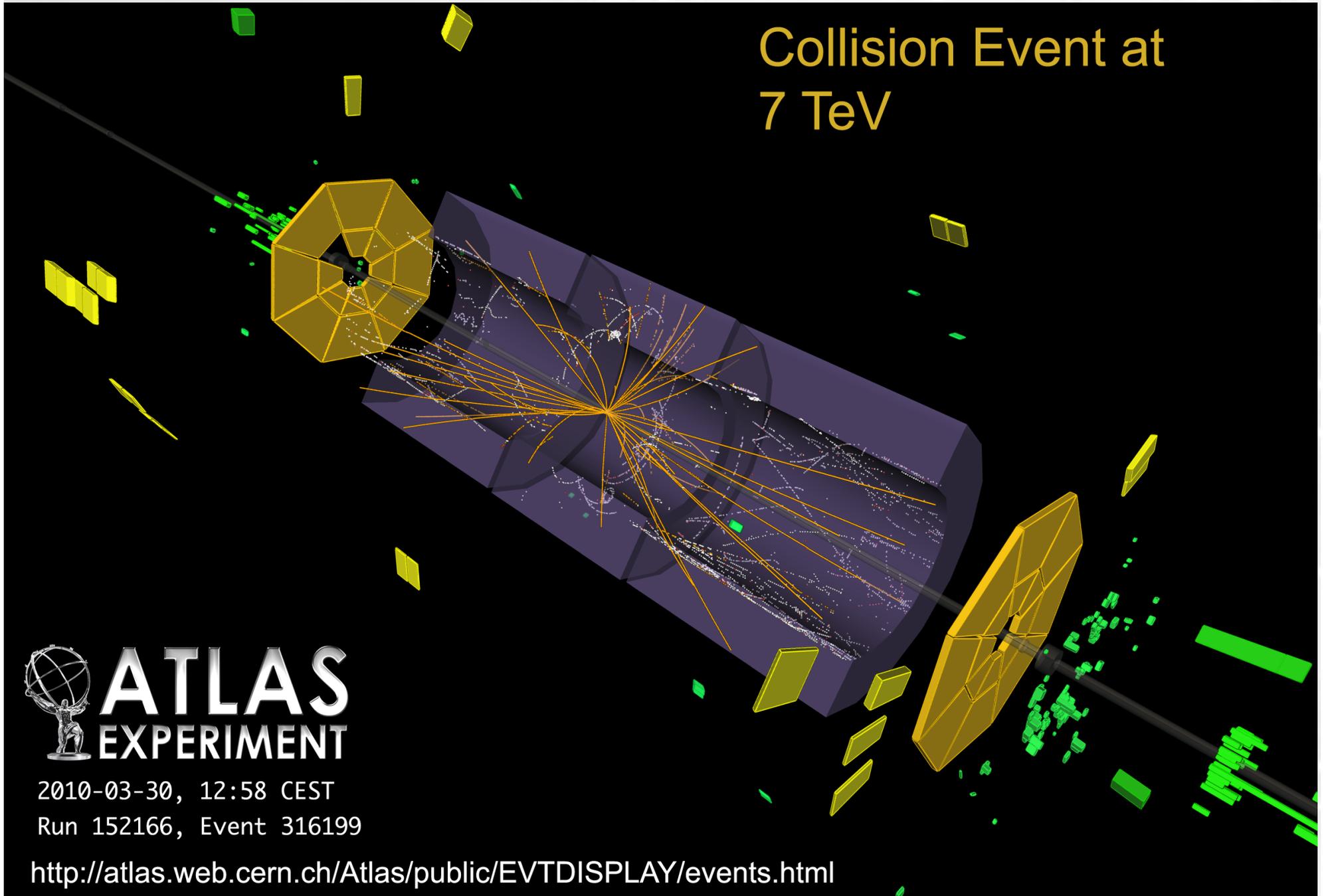
# Collision Event at 7 TeV



2010-03-30, 12:58 CEST

Run 152166, Event 316199

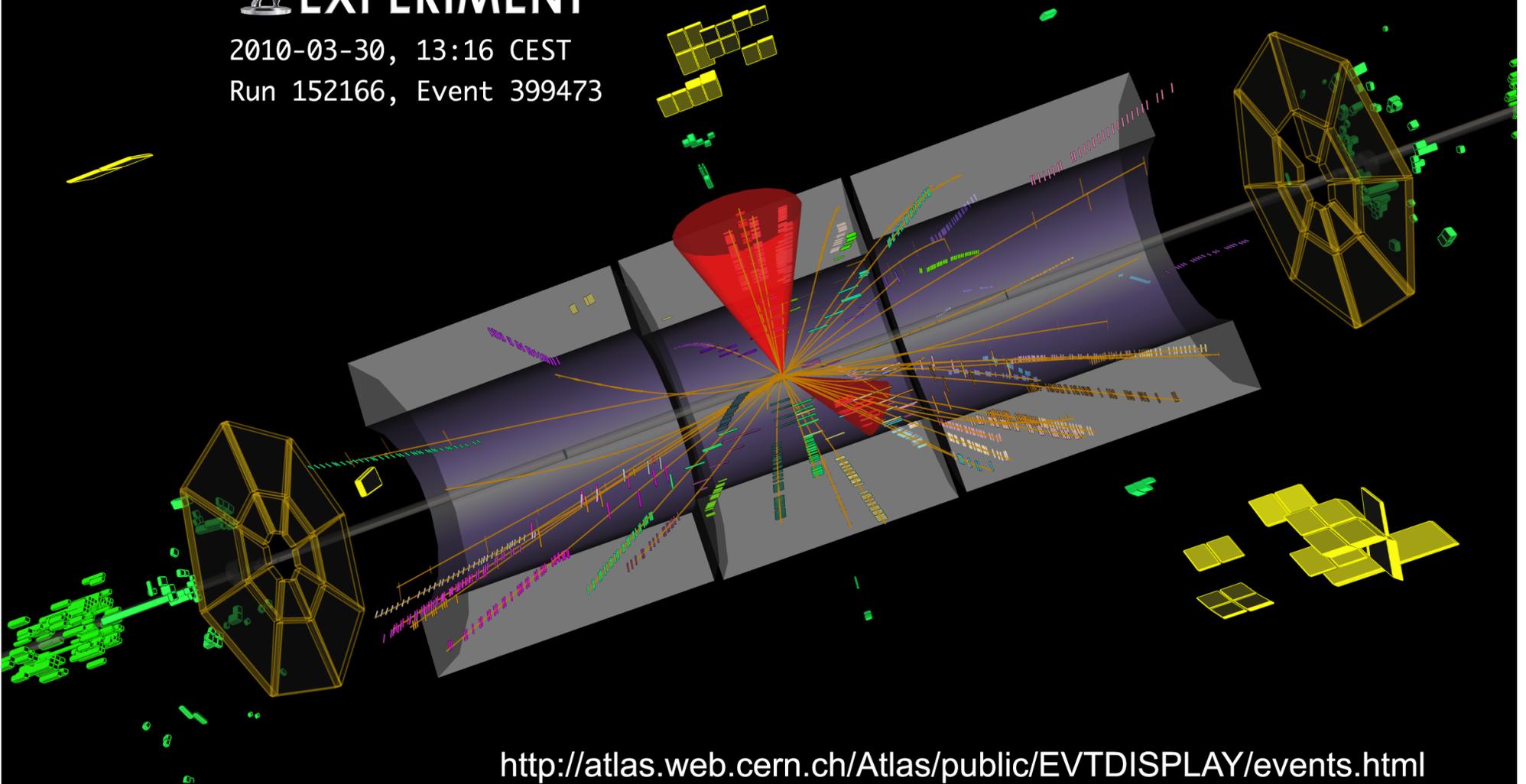
<http://atlas.web.cern.ch/Atlas/public/EVTDISPLAY/events.html>





2010-03-30, 13:16 CEST  
Run 152166, Event 399473

## 2-Jet Collision Event at 7 TeV





# CMS Experiment at the LHC, CERN

Data recorded: 2010-Mar-30 11:04:37.067645 GMT(13:04:37 CEST)  
 Run: 132440  
 Event: 3111007  
 Lumi section: 139  
 Orbit: 36243167  
 Crossing: 1

### HLT triggers

- HLT\_Achty\_FastClusm
- HLT\_Achty\_EcalREM
- HLT\_L1bkg
- HLT\_L1SingleF0jet
- HLT\_L1SingleF0jet\_nobPTX
- HLT\_L1SingleTauE
- HLT\_L1SingleTauE\_nobPTX
- HLT\_MbHadBSC
- HLT\_MbHadBSC\_nobPTX
- HLT\_MbHadBSC\_OR
- HLT\_MbHadPrl
- HLT\_2ndHadPrl\_SingleTrack
- HLT\_MbHadPrl\_SingleTrack
- HLT\_MbHadPrl\_DoubleTrack
- HLT\_SpWbBSC
- HLT\_L1\_BsdMbbuOR\_BptPlusORHnuS
- HLT\_L1\_BsdMbbuOR\_BptPlusORHnuS\_nobPTX
- HLT\_L1\_ePtech
- HLT\_L1Tech\_HCAL\_HP\_candabara\_PM
- HLT\_HIThreshOR10

### Drawing cuts & scales

name	min/max/center	range scale output
EBW216_V2	0.750	1.000
EBW216_V2	0.500	1.000
CR1416_V2	0.000	10.000
HR1416_V2	0.000	10.000
HR1416_V2	0.750	0.000
HR1416_V2	0.000	0.000
HR1416_V2	1.000	0.000

LHC e' ancora nella fase di crescita della intensita' con la quale i protoni collidono: la sua **Luminosita'** e' ancora circa 10,000 volte minore di quella prevista e la sua **Energia** e' la meta'

Questo per ragioni di sicurezza, perche' si vuole evitare che il grave incidente del 2008 si ripeta. E' previsto che LHC possa raggiungere le condizioni nominali di funzionamento nel 2013

Questo significa che gli esperimenti stanno verificando ancora il funzionamento degli apparati, controllando che le prestazioni (misura dell'energia, dei tempi, etc...) siano in linea con le attese, in modo tale che quando LHC sara' in grado di erogare tutta l'intensita' prevista, gli apparati siano pronti

Nell'attesa di scoprire l'Higgs o le particelle supersimmetriche, vengono "riscoperti" tutti gli aspetti del Modello Standard

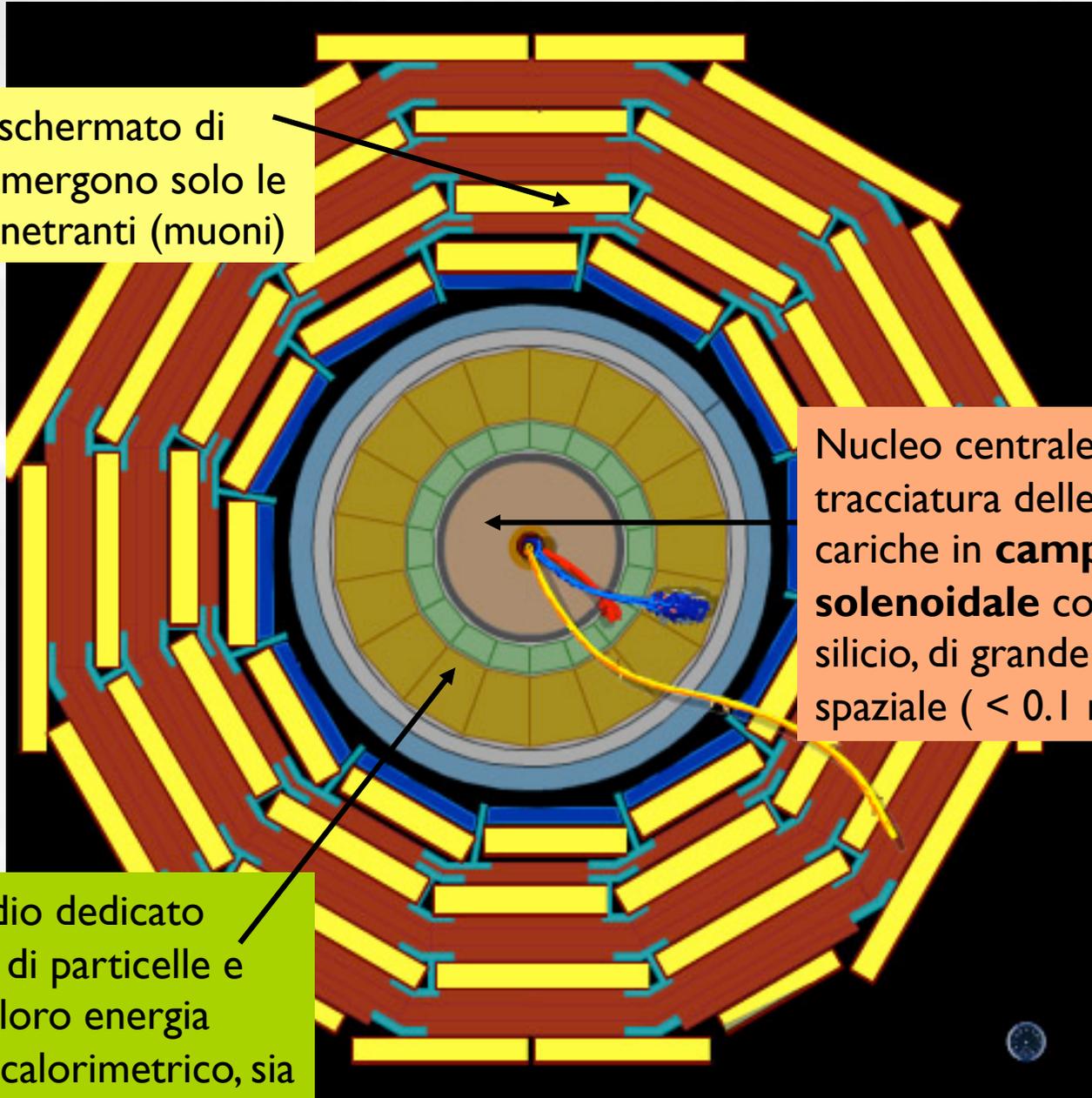
E' ovvio pero' che ci potrebbe essere qualche sorpresa anche a bassa intensita' e quindi tutti i fisici sono allerta....

Come e' concepito un grande apparato alla Atlas / Cms

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

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

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)

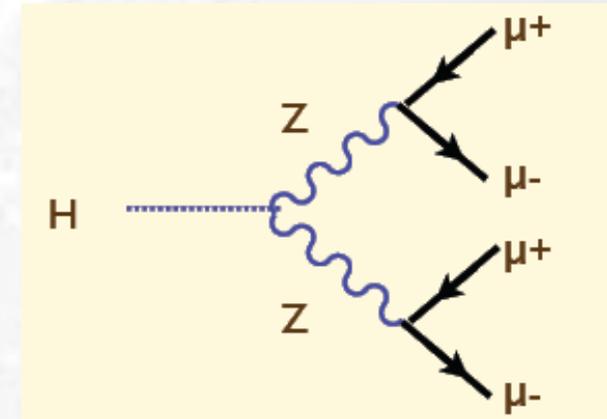


## Quali sono le caratteristiche di un evento con un Bosone di Higgs in Atlas / Cms ?

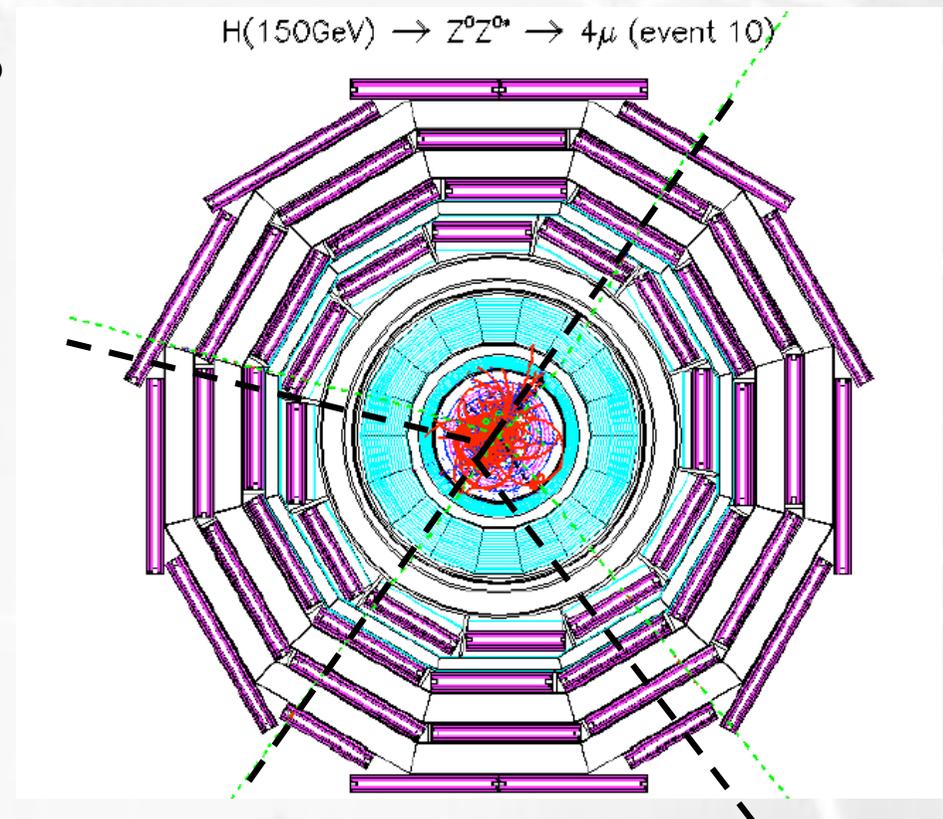
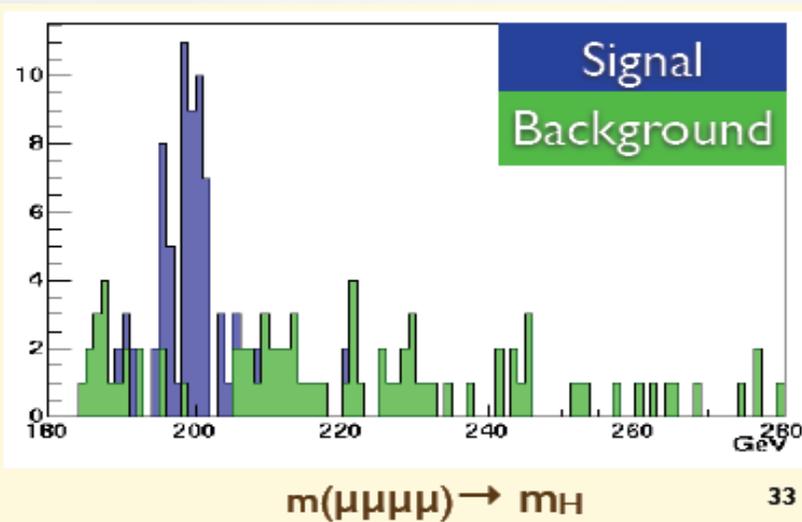
Il modo piu' semplice e' quello di cercare

4 muoni, i cui parametri cinematici determinano:

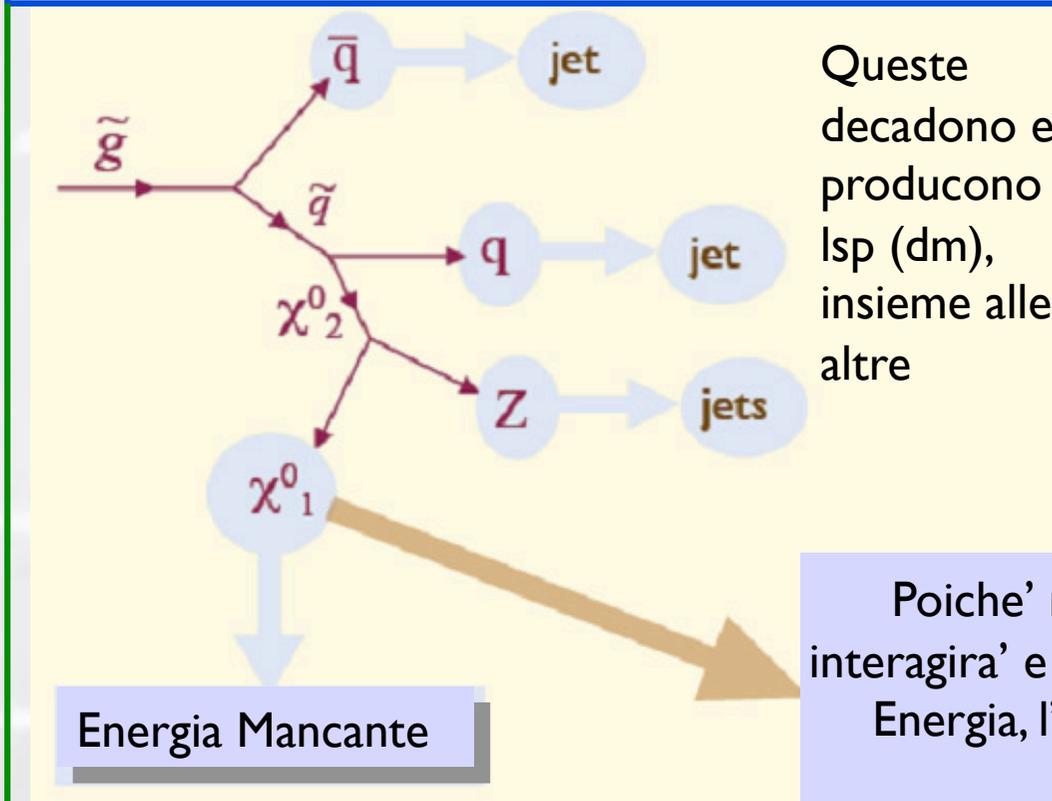
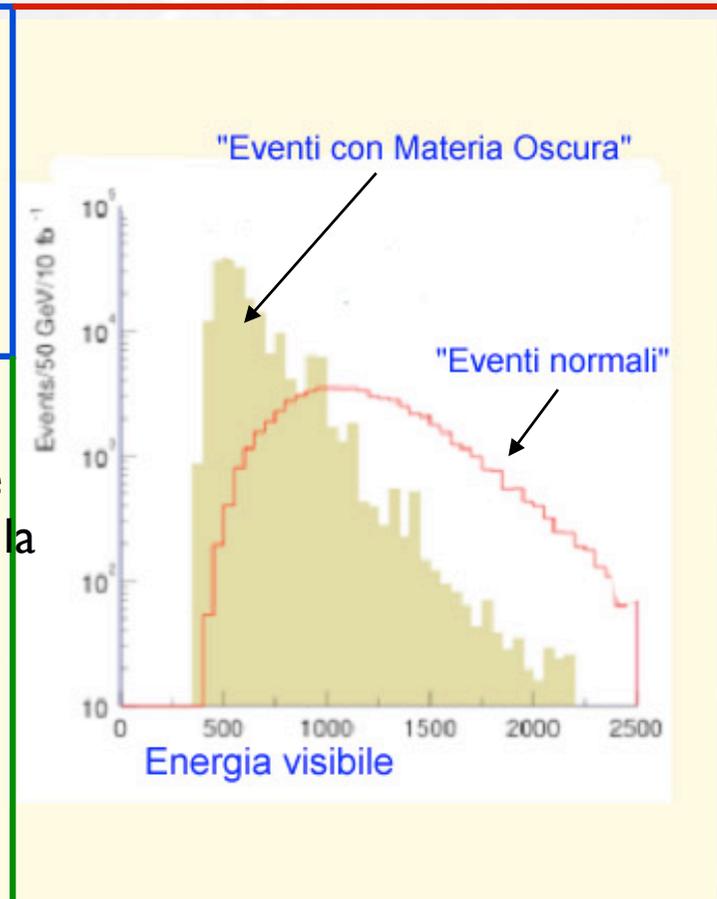
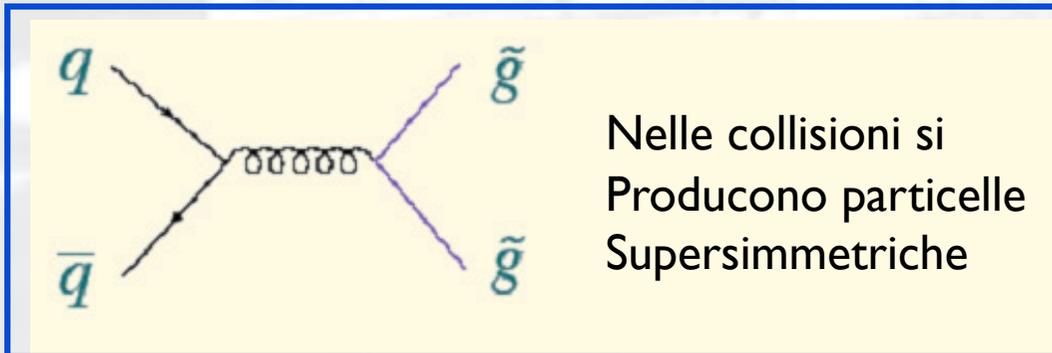
- a coppie (con cariche opposte) la massa dello Z da cui si originano;
- tutti e 4 insieme permettono di determinare la massa del bosone di Higgs



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)



# 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 ha iniziato a produrre collisioni alla fine del 2009, dopo circa 15 anni di preparazione

E' un grande risultato tecnologico per tutta la comunita' 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)

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

Non sappiamo cosa succedera' – quante nuove particelle verranno scoperte – e forse e' la prima volta che da un salto in energia cosi' grande ( **x 7** in energia e **x 100** in intensita' rispetto a quanto disponibile sino ad ora) ci si aspetta una vera rivoluzione

E' sicuramente uno dei momenti piu' appassionanti per la Fisica delle Particelle !

Se non si trovasse nulla, LHC potrebbe essere **l'ultima frontiera** di una ricerca che ha rappresentato con la Meccanica Quantistica, la Relativita' Generale, la 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...

## Epilogo (I) – Quanto costa questo tipo di Ricerca Fondamentale ?

La Fisica delle Particelle e' a partire dalla scuola di Fermi, il fiore all'occhiello della Ricerca Italiana, in particolare per il livello di considerazione che ha all'estero; le ricerche sono condotte con uno sforzo internazionale. L'INFN e' l'ente che promuove tali ricerche

L'INFN ha un bilancio annuo di 280 M€ (=5 € per ogni italiano), 2000 dipendenti (e altrettanti Universitari) che vi lavorano, con un bilancio per la Ricerca di circa 140 M€  
Il totale delle risorse pubbliche per la ricerca in Italia e' 1,7 G€ per anno

Il CERN ha un bilancio annuo di circa 700 M€ (l'Italia contribuisce per il 12% : 80 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\$ (e' in funzione da 20 anni)
- La Stazione Spaziale Internazionale 150 G\$
- ITER (progetto globale per la fusione) costera' 10 G€ (e durera' 30 anni)
- Il costo di una Centrale Nucleare e' 4 G€
- La spesa in nuovi armamenti del Ministero della Difesa e' di 4 M€ annui
- Alta Velocita' in Italia 66 G€ (ed e' in costruzione da 15 anni)
- La guerra in Iraq oltre 1000 G\$ (<http://costofwar.com/>)

...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’ già 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” .

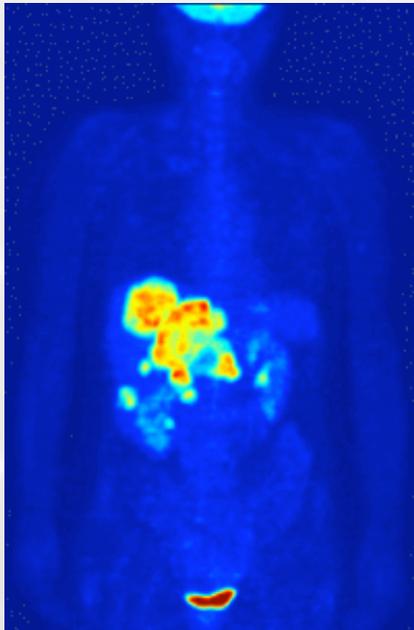
Quelle che entrano nella vita di tutti i giorni e la migliorano a distanza di decenni dalla prima scoperta:

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...

Esempio no. 1  
PET: Tomografia ad emissione di positroni  
per la diagnostica tempestiva dei tumori

Qui ci sono cristalli usati nella  
Fisica delle Particelle

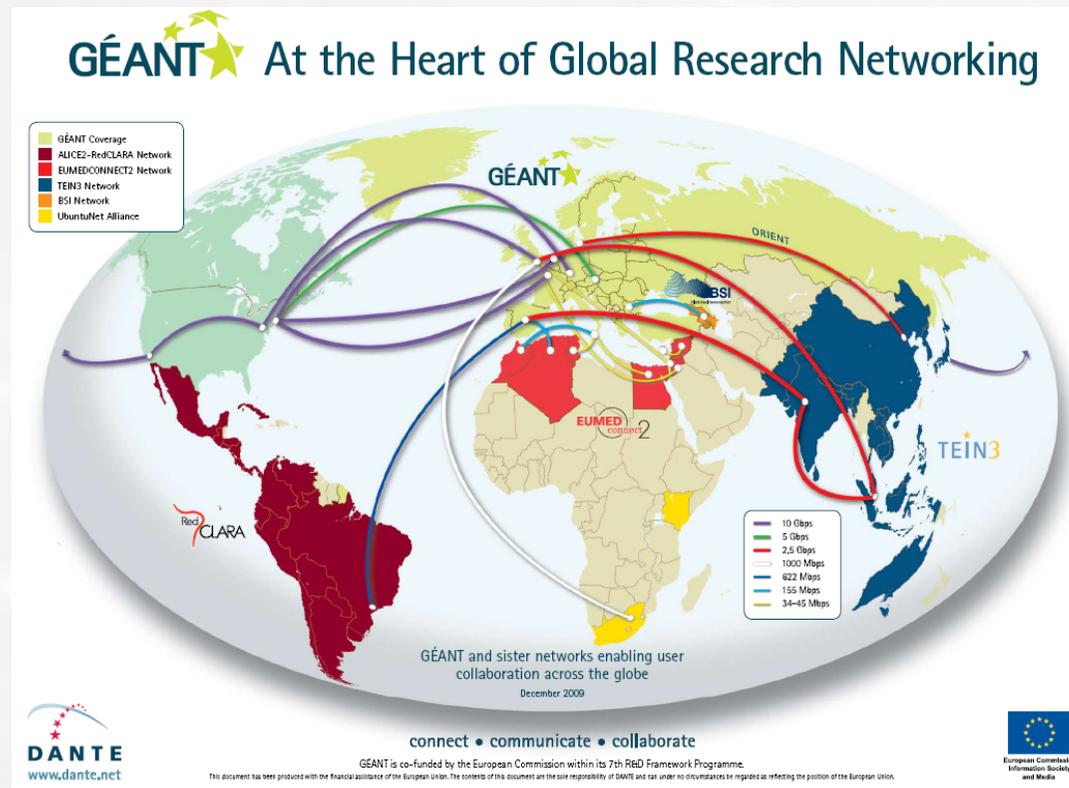


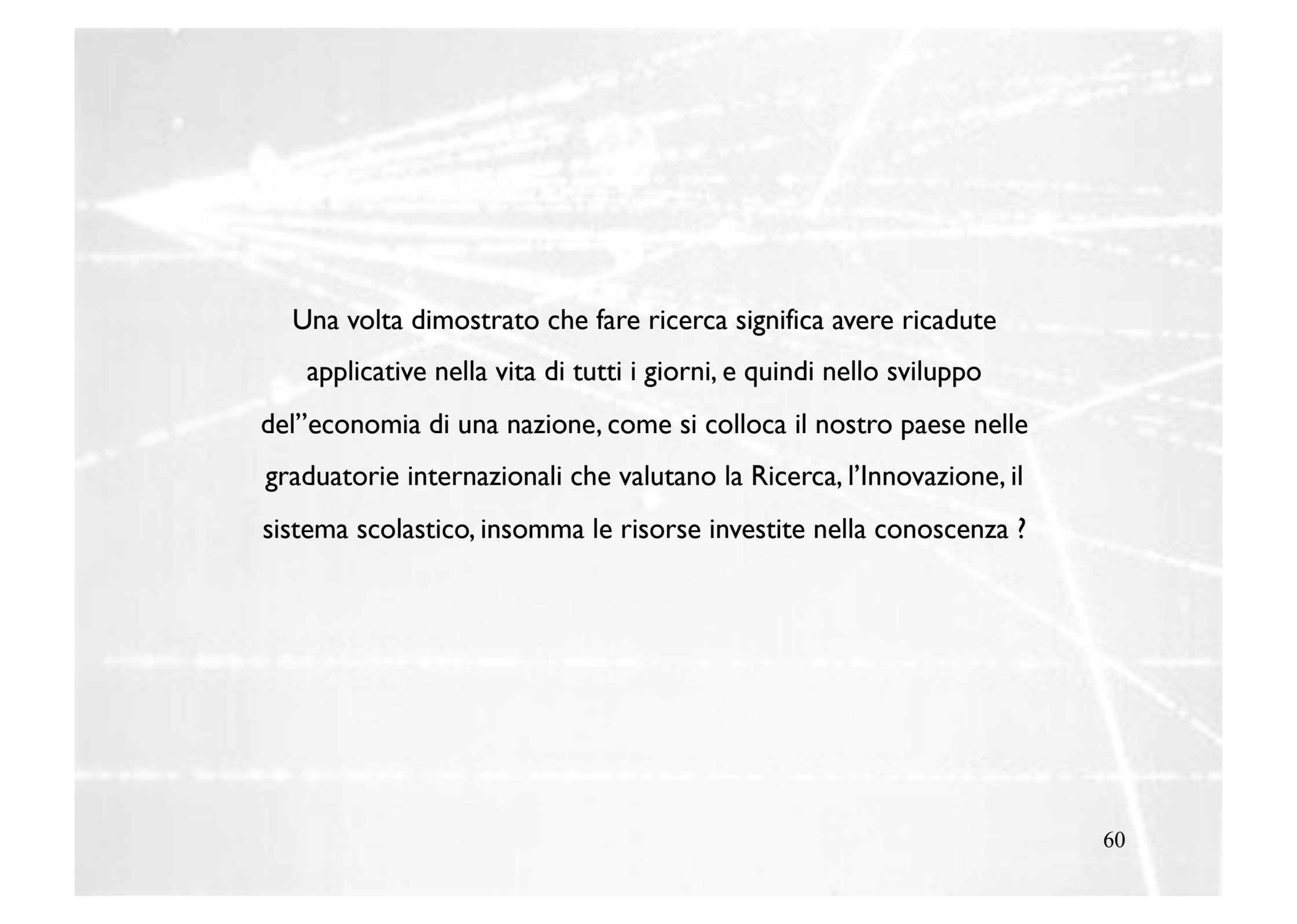
I Fisici delle Particelle continuano a sviluppare sistemi  
per PET sempre piu' sofisticati

## Esempio no. 2 Il World Wide Web

La nascita del Web risale al 6 agosto 1991 quando Tim Berners-Lee mise online la prima pagina Web al CERN. Inizialmente usato solo dai fisici delle particelle, il 30 aprile 1993 il CERN decide di rendere pubblica la tecnologia permettendo a chiunque di usarla e svilupparla **gratuitamente**. Il resto e' noto a tutti.

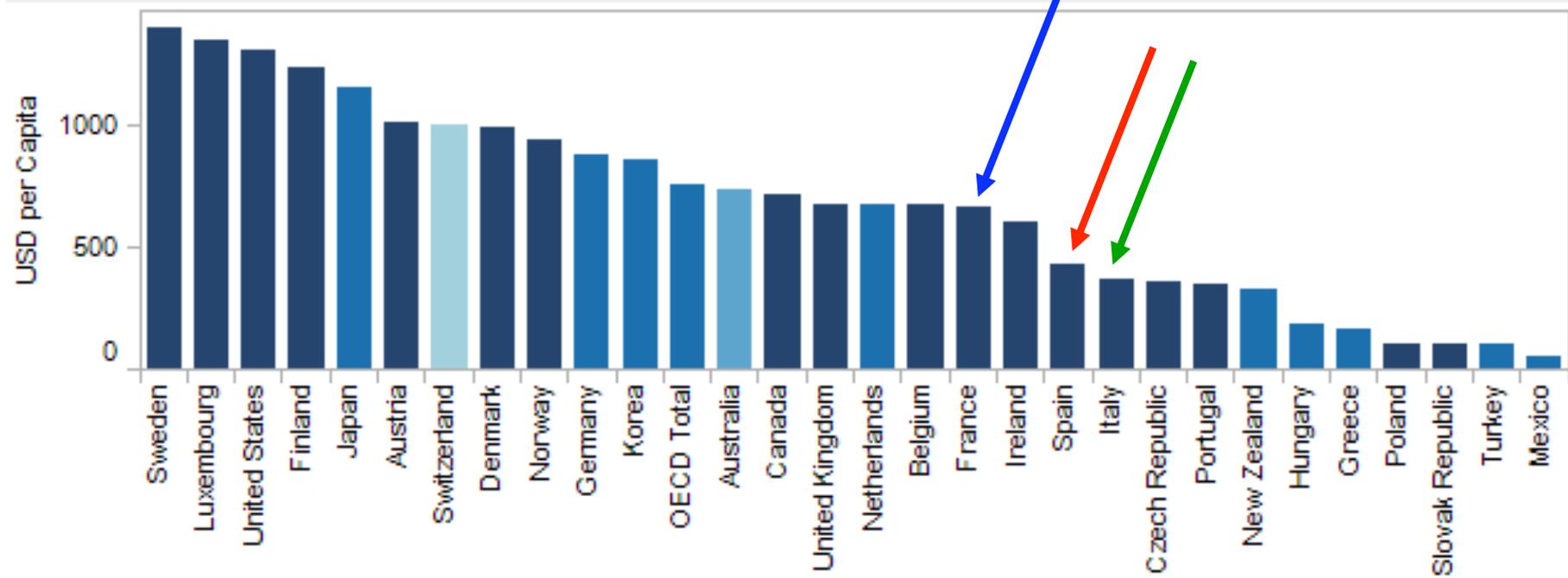
Il WEB oggi ha 120 milioni di siti attivi con 50 miliardi di pagine conosciute da Google





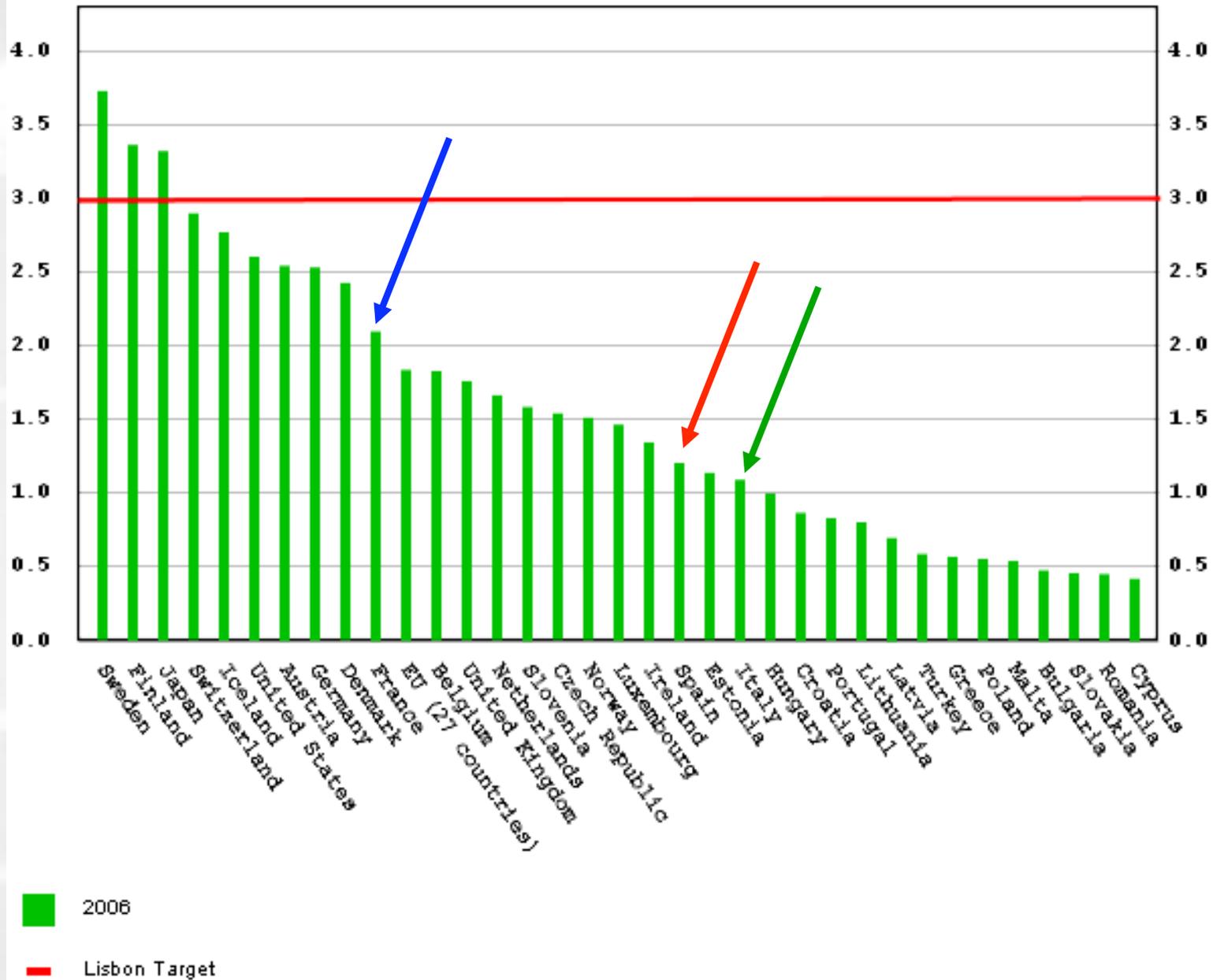
Una volta dimostrato che fare ricerca significa avere ricadute applicative nella vita di tutti i giorni, e quindi nello sviluppo dell'economia di una nazione, come si colloca il nostro paese nelle graduatorie internazionali che valutano la Ricerca, l'Innovazione, il sistema scolastico, insomma le risorse investite nella conoscenza ?

Gross expenditure on R&D per capita, 2008 or latest available year



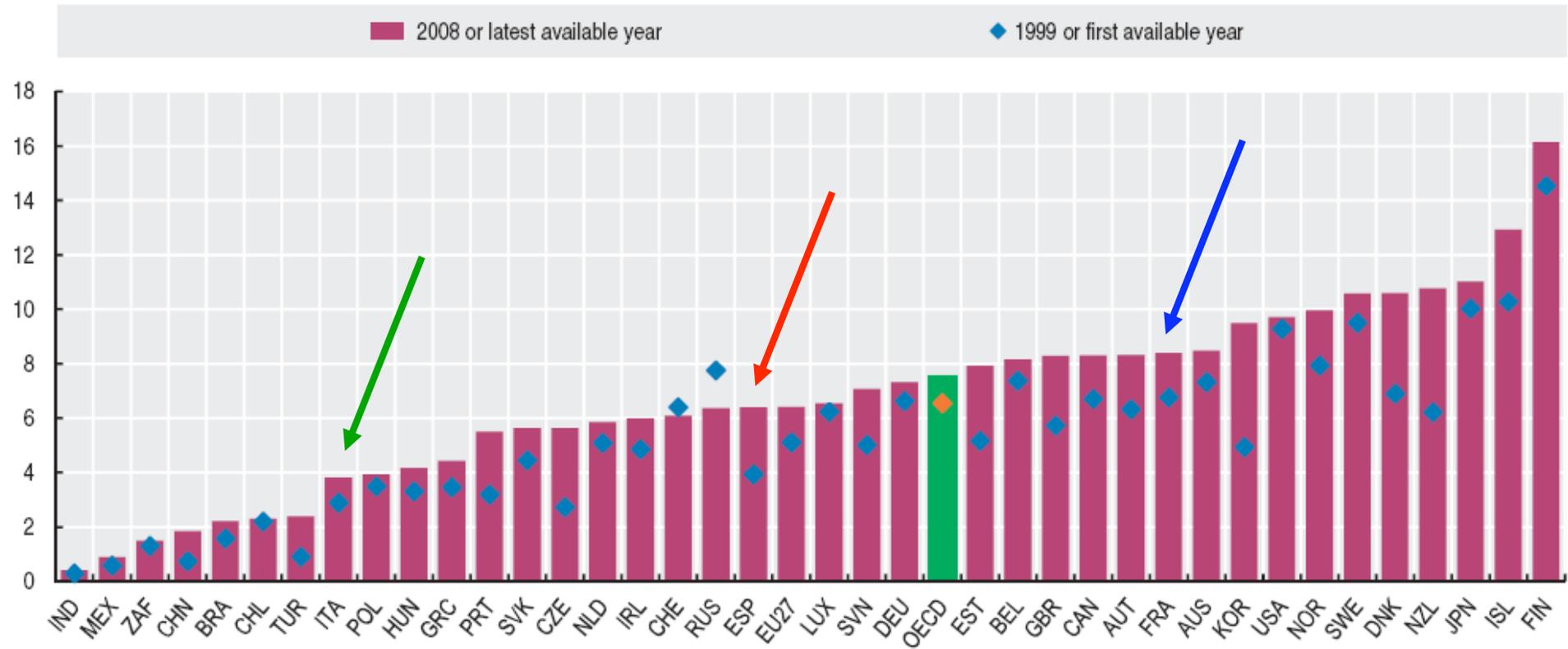
## Gross domestic expenditure on R&D (GERD)

Percentage of GDP



## Researchers

Per thousand employed, full-time equivalent



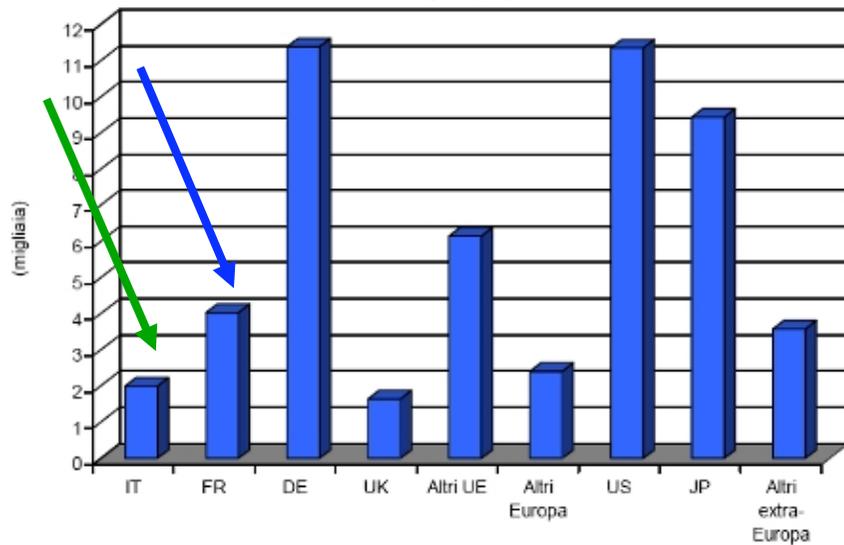


Quanti brevetti vengono creati ...



... e il loro rendimento economico ...

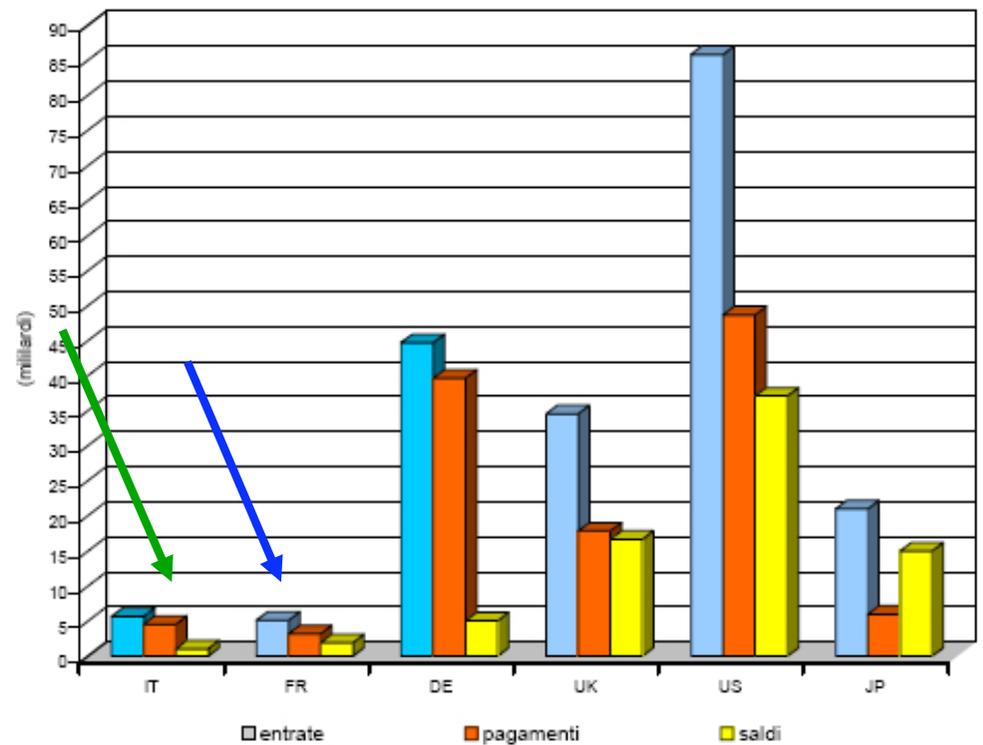
**Fig. 7.2**  
**Brevetti, concessioni dell'Ufficio Europeo dei Brevetti (UEB),**  
**per Paese e gruppi di Paesi - 2009**  
 (numero)



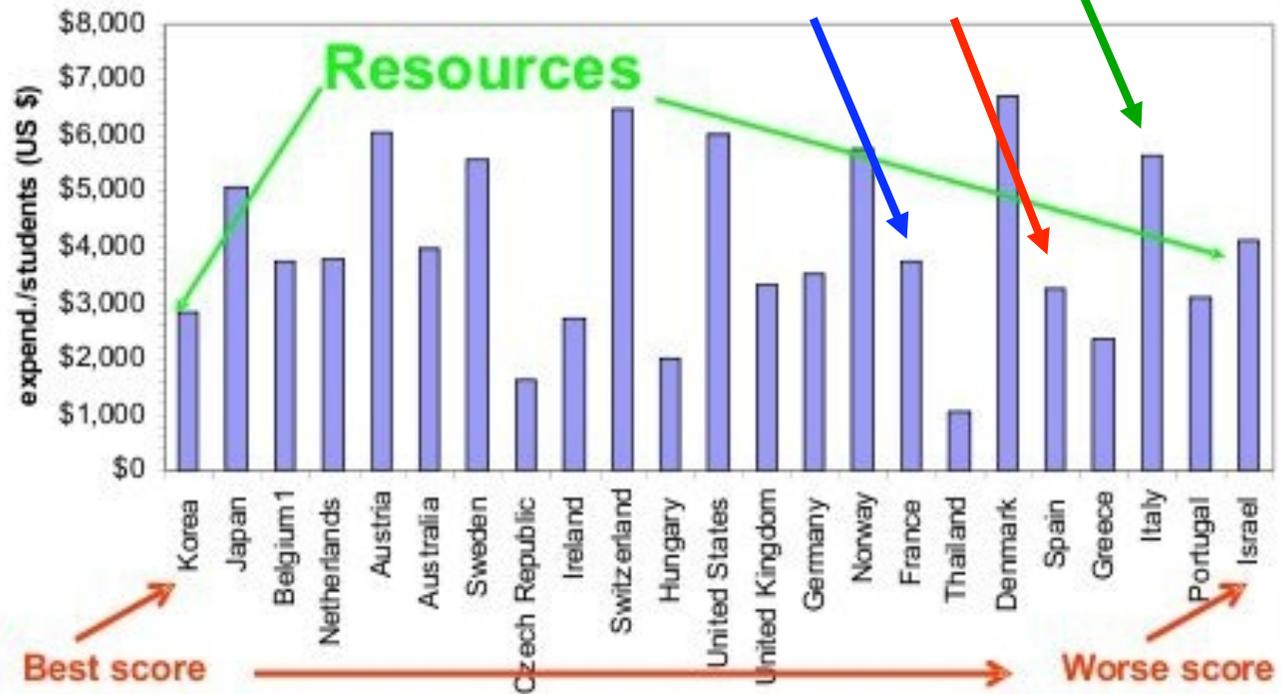
Fonti: UEB

ultimo aggiornamento: maggio 2010

**Fig. 9.4a**  
**Bilancia tecnologica dei pagamenti, per principali Paesi**  
**industrializzati - 2007 (\*)**  
 (miliardi di dollari USA)



## TIMSS performance and expenditure (countries ordered by TIMSS score)



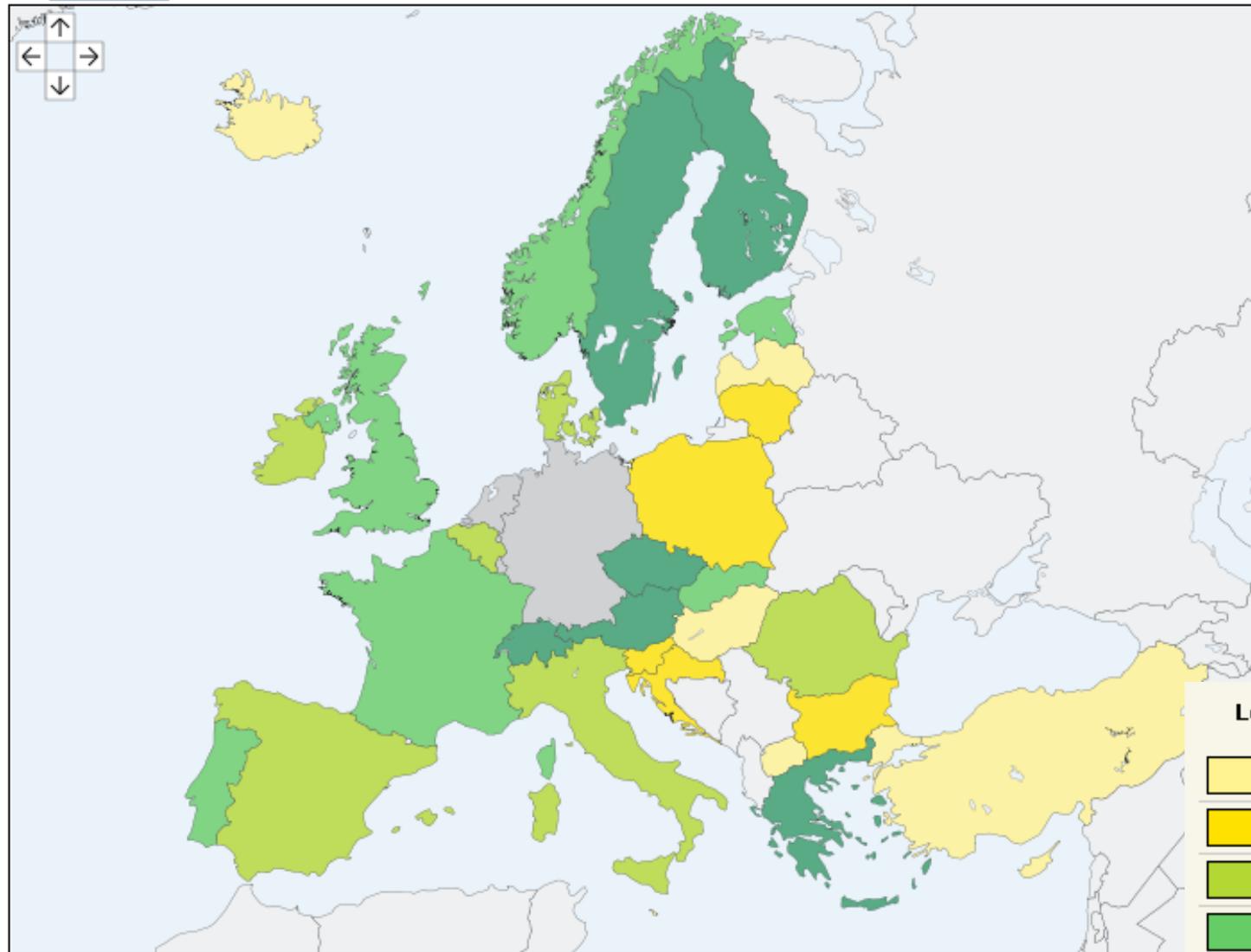
14

## Doctorate students in science and technology fields - Total - [tsc00028]; Total

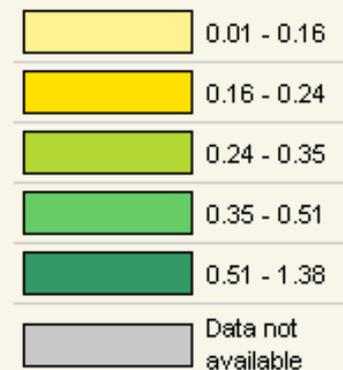
(% of the population aged 20-29)

Students participating in second stage of tertiary education in science and technology ... [more](#)

sex



### Legend



Click on map to:



Recenter



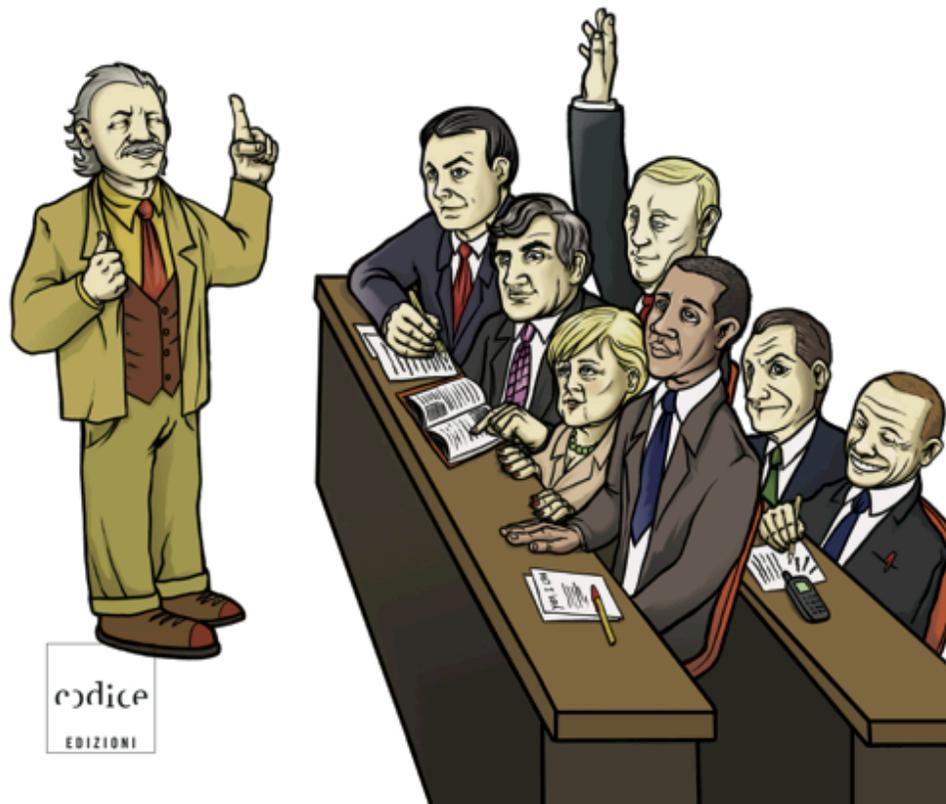
Zoom In/Recenter



Zoom Out/Recenter

RICHARD MULLER

Fisica per i presidenti del futuro



codice  
EDIZIONI