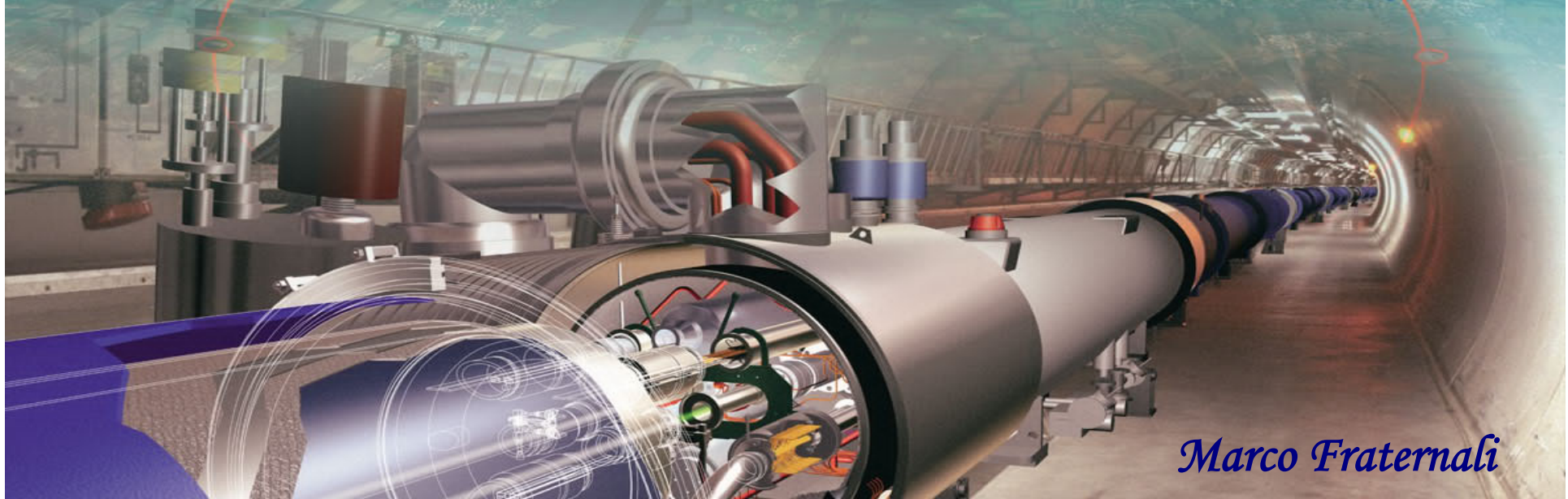
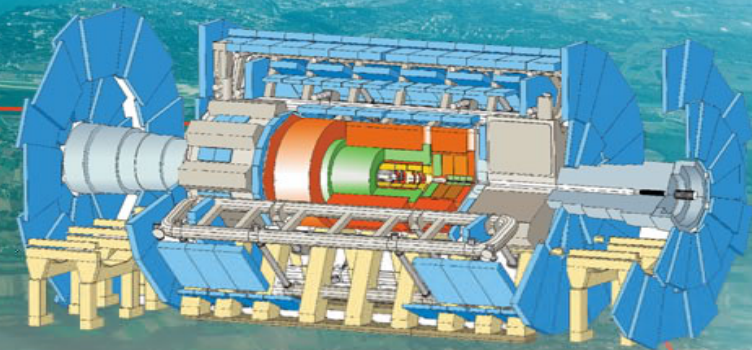
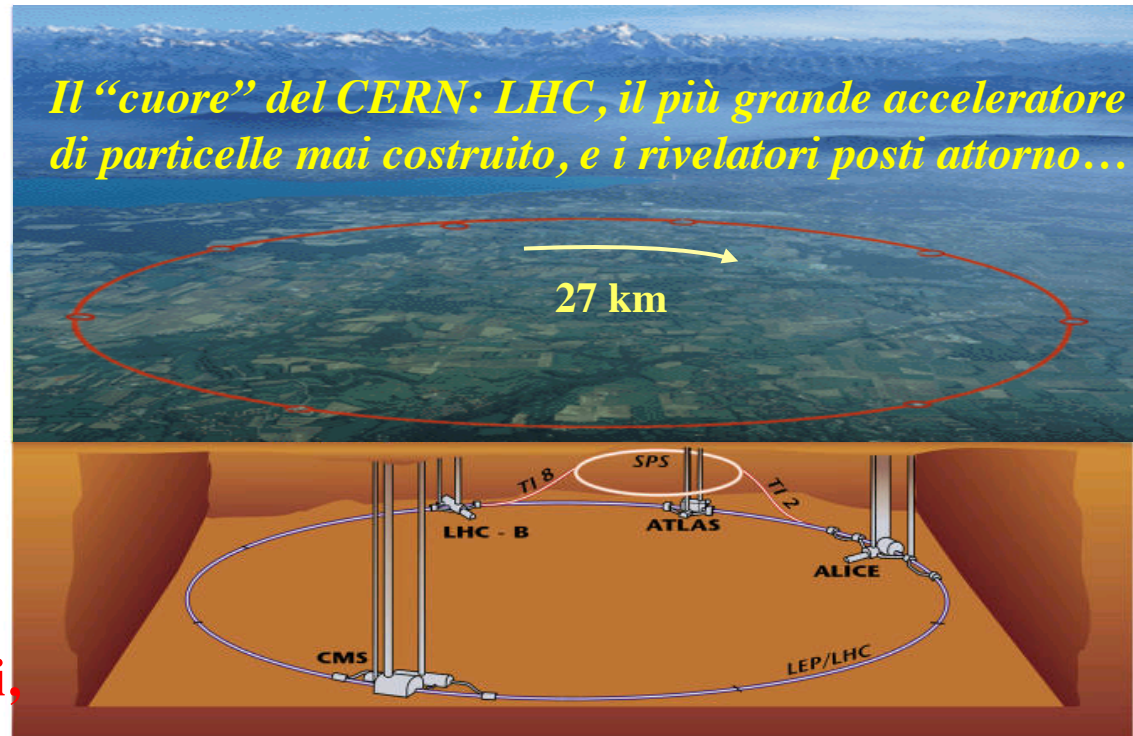


# La fisica sperimentale al CERN

Il Laboratorio europeo per lo studio delle particelle subatomiche



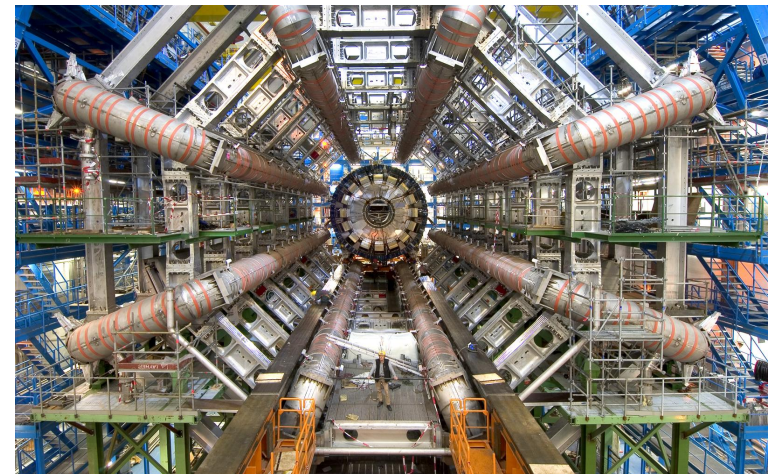
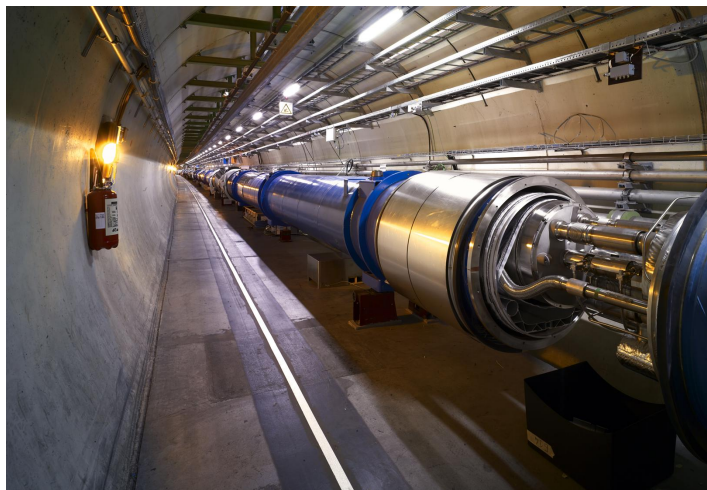
*Marco Fraternali*



Il CERN, vicino a Ginevra: il più grande Laboratorio del mondo per la fisica delle particelle.

**20 stati membri, 2500 dipendenti,  
10000 scienziati coinvolti  
provenienti da 80 nazioni**

*... le moderne meraviglie del mondo*



**... per studiare i segreti della materia**

# Vogliamo vedere come è costituito il mondo (la materia)

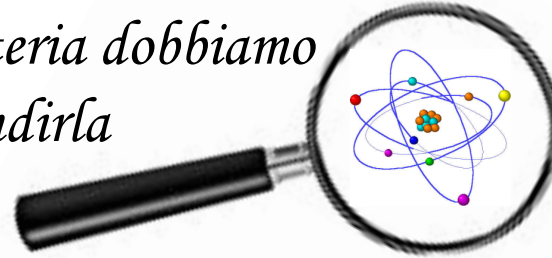
Cosa significa  
"vedere?"

*sorgente*



*luce*

Per guardare "dentro"  
la materia dobbiamo  
ingrandirla



Possiamo ingrandire  
abbastanza da vedere  
un atomo?

*bersaglio*

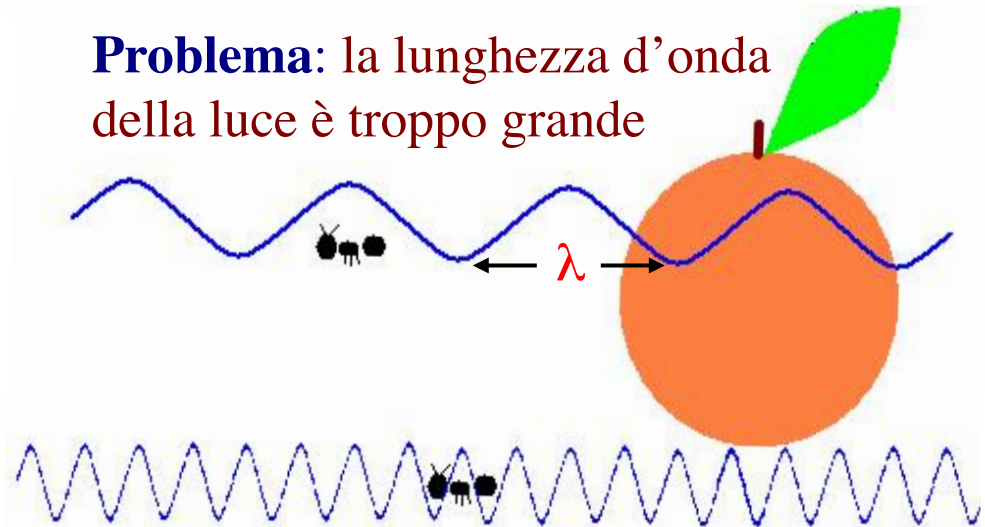


*rivelatore  
(occhio)*

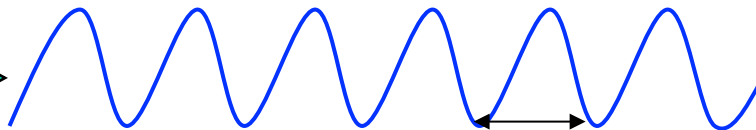


*Con la luce visibile, in una lunghezza  
d'onda stanno 50000 atomi*

**Problema:** la lunghezza d'onda  
della luce è troppo grande



**Soluzione:** per la fisica moderna,  
una particella è anche un'onda

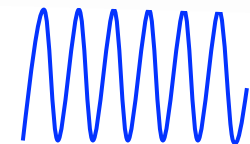
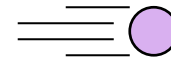


particella

onda

$$\lambda = h/p$$

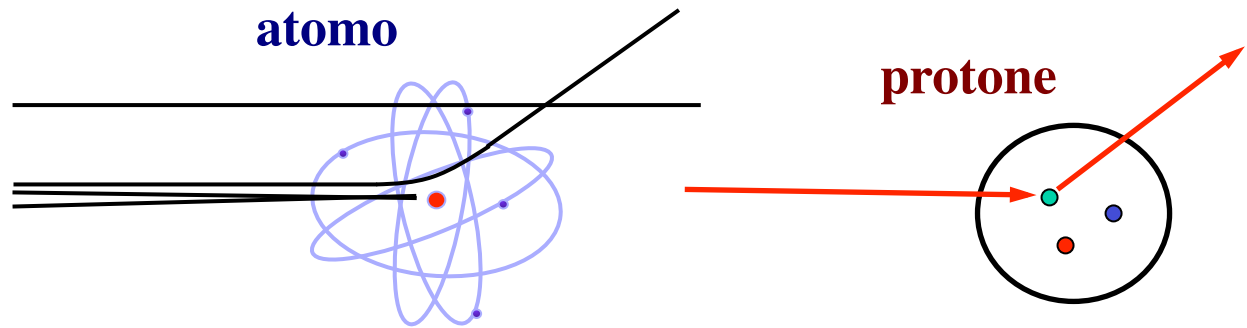
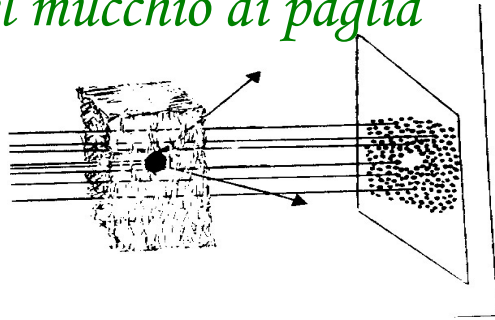
...e più energia ha la particella,  
più piccola è  $\lambda$ !



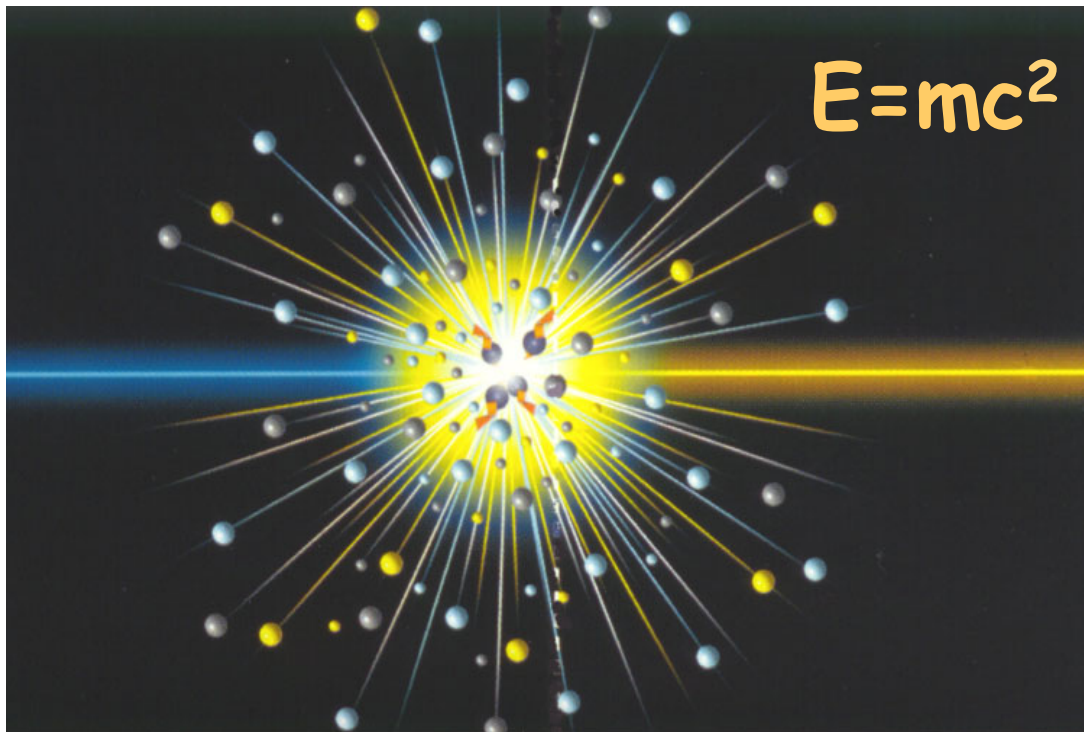
*ci occorrono particelle accelerate*

# Con la "sonda" giusta, possiamo guardare dentro la materia

*Esperimento: proiettili nel mucchio di paglia*



Accelerando le particelle, possiamo fare anche un'altra cosa

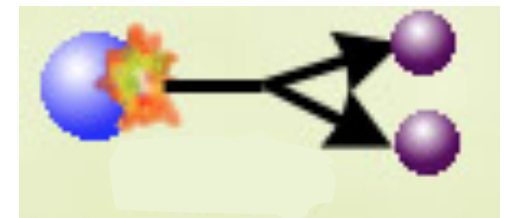


massa ↔ energia

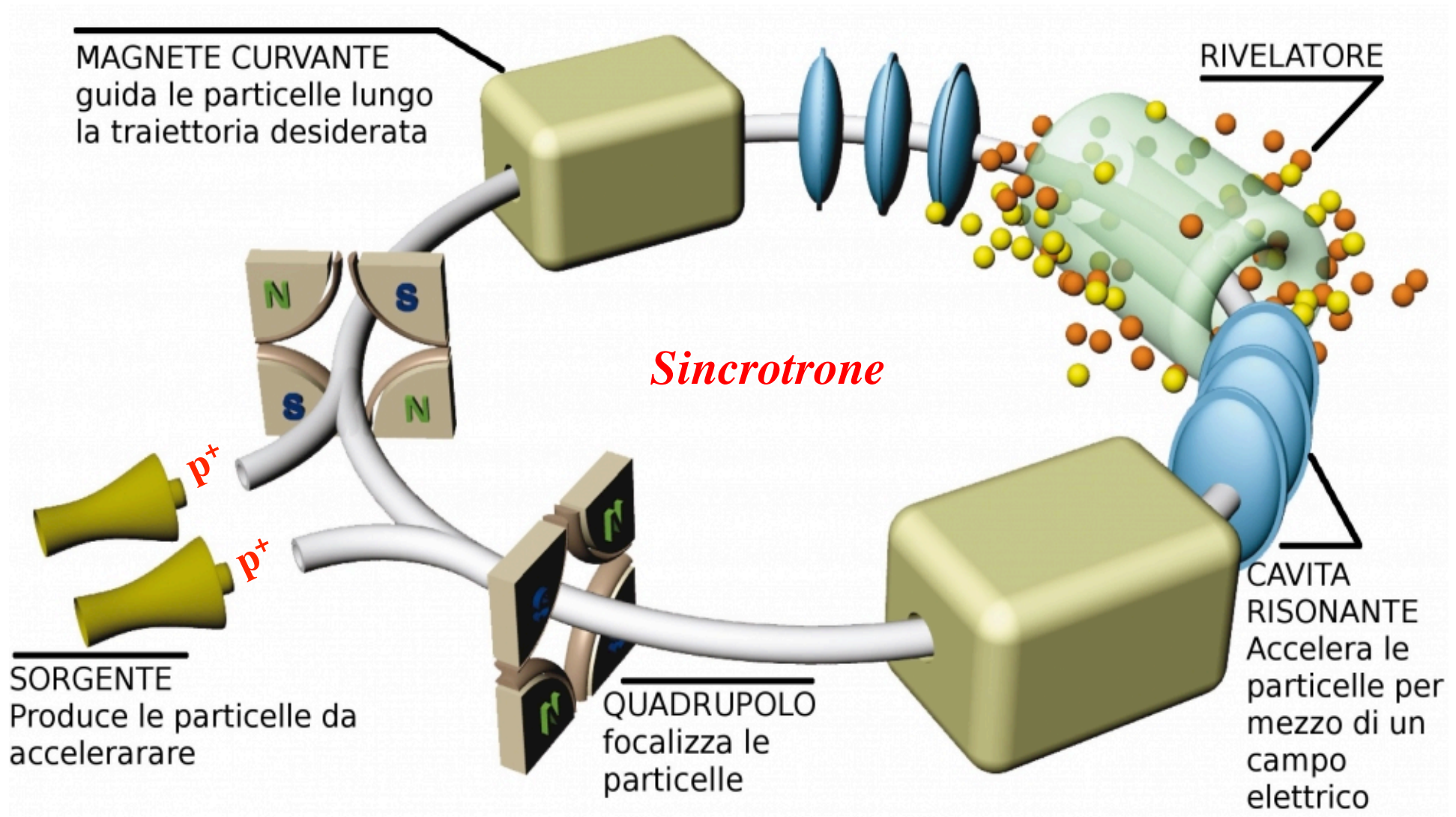
**Possiamo creare nuova materia**

Particelle che sono esistite un tempo nell'universo, ora scomparse...

... che subito si disintegrano (come il bosone di Higgs)



# Come si fa ad accelerare le particelle?



*per ottenere la massima  
concentrazione di energia*

Lake of Geneva

SPS

6.9 km

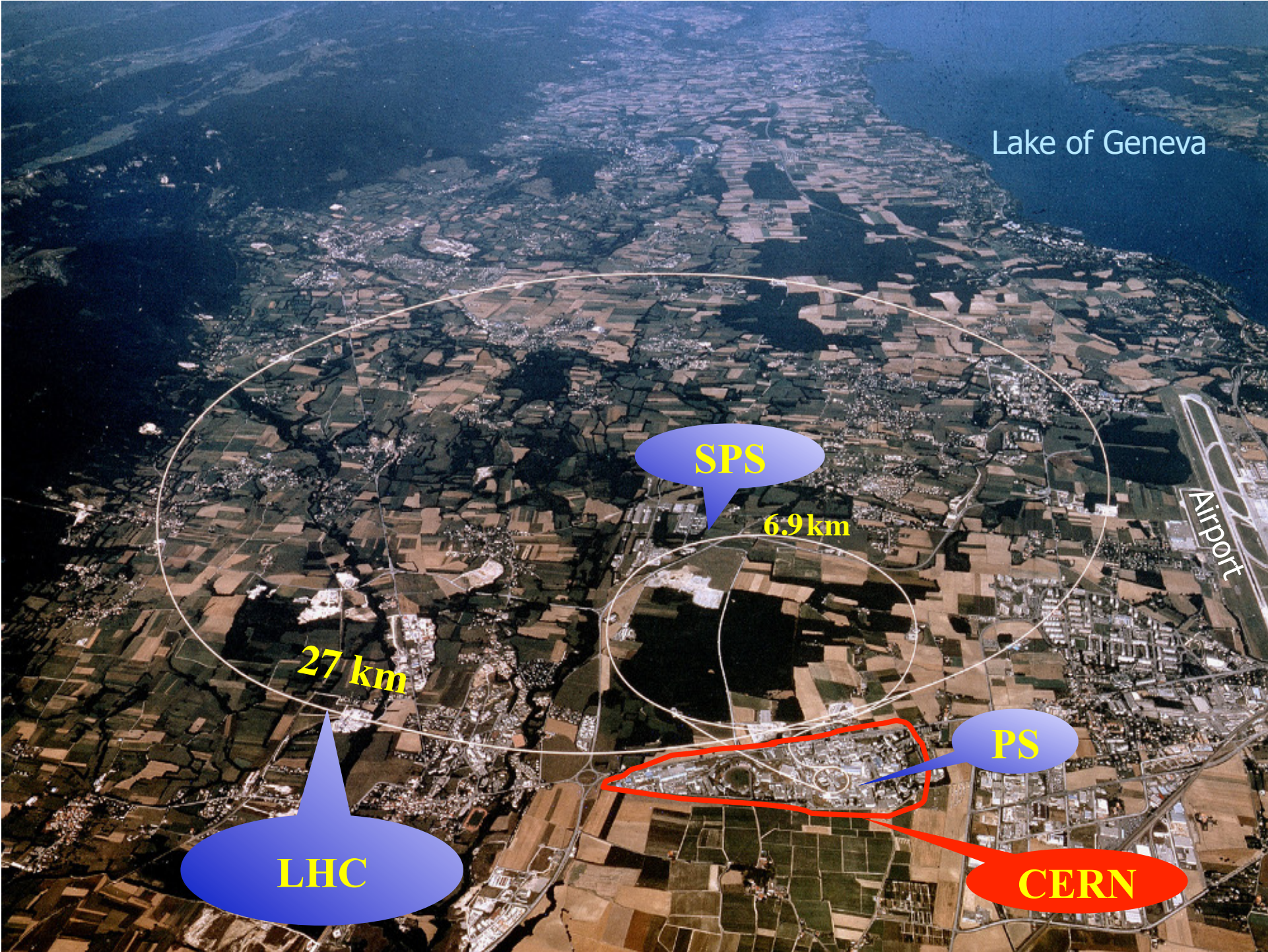
27 km

LHC

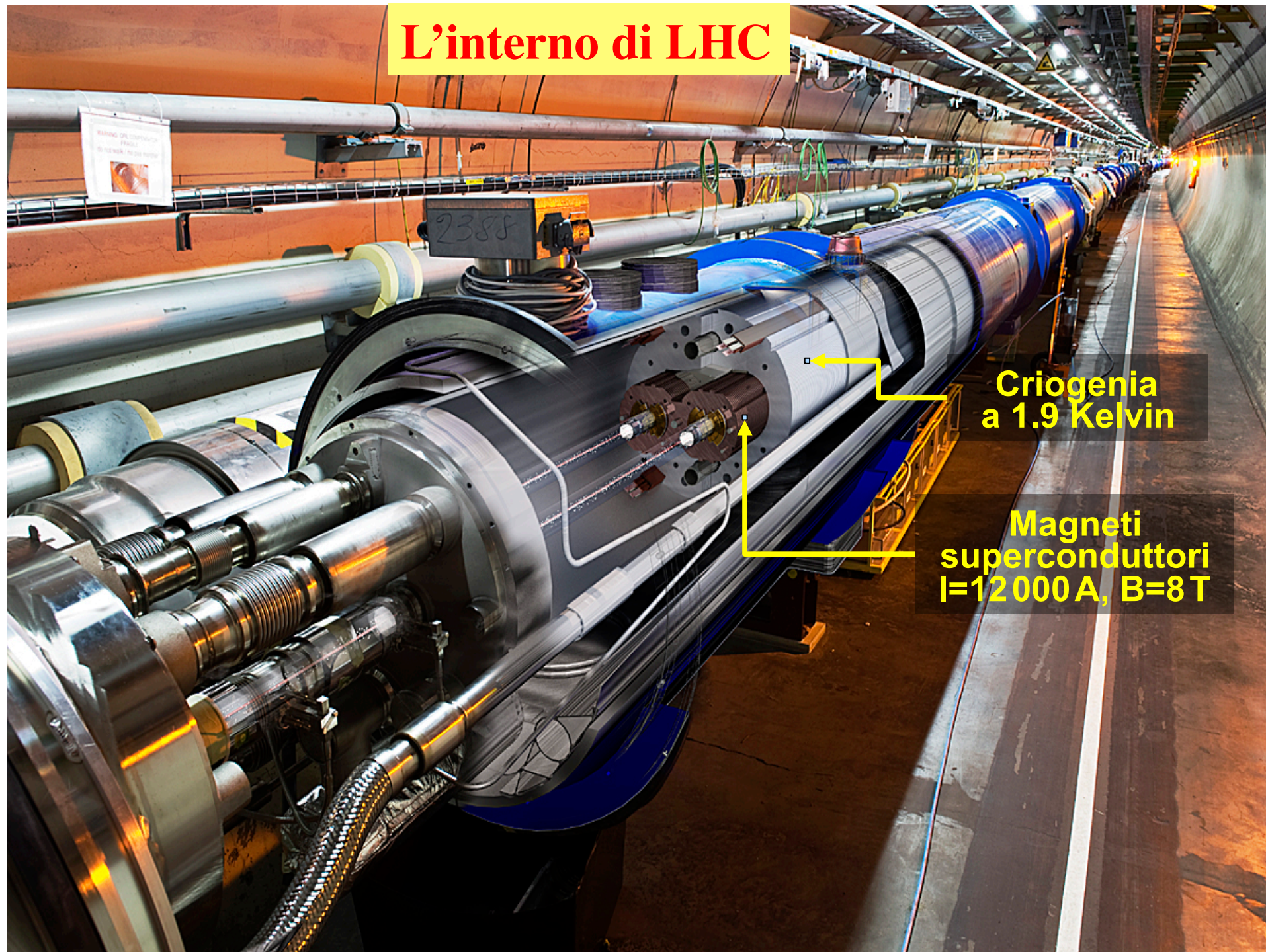
PS

CERN

Airport



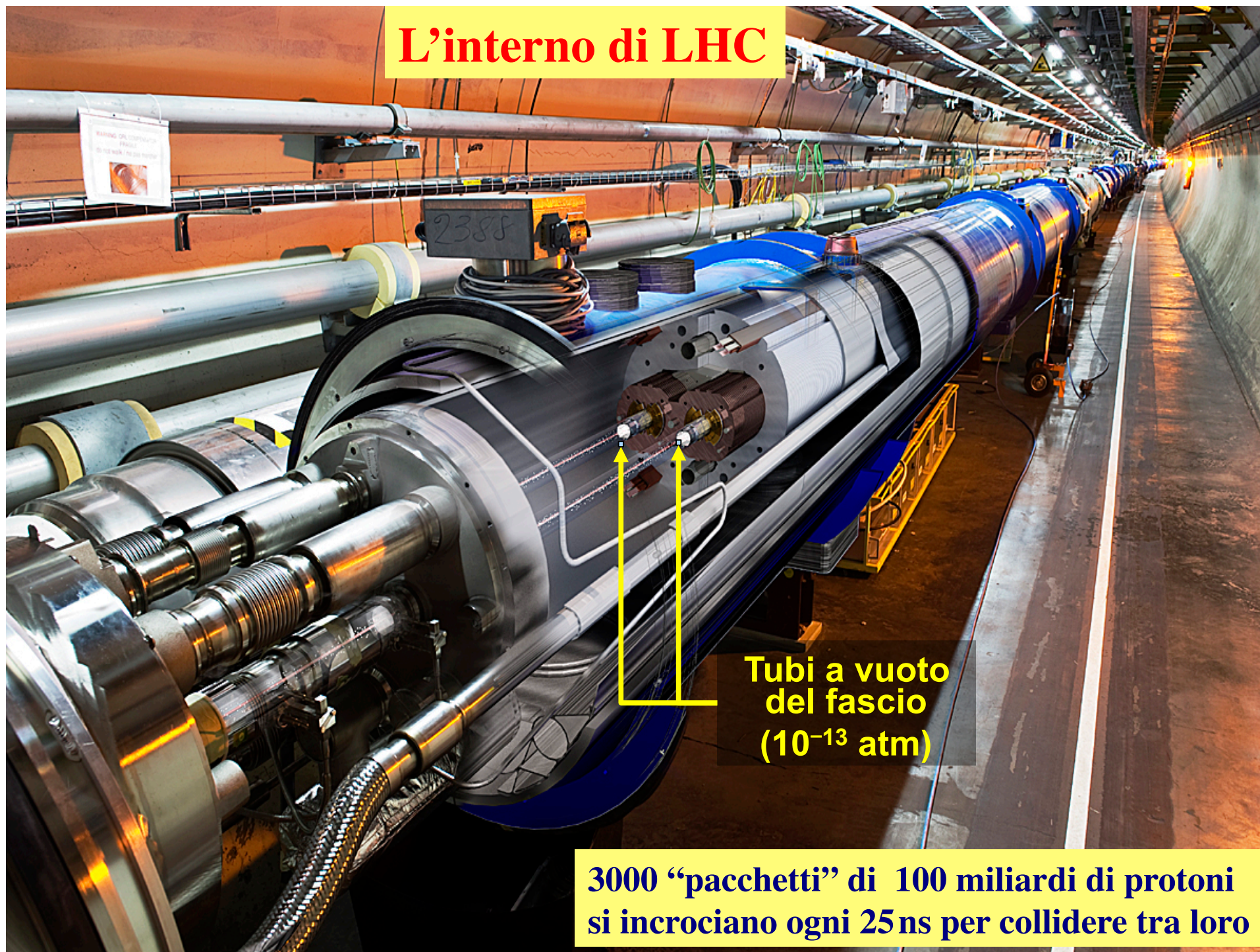
# L'interno di LHC



Criogenia  
a 1.9 Kelvin

Magneti  
superconduttori  
 $I=12000\text{ A}$ ,  $B=8\text{ T}$

## L'interno di LHC



Tubi a vuoto  
del fascio  
( $10^{-13}$  atm)

3000 “pacchetti” di 100 miliardi di protoni  
si incrociano ogni 25 ns per collidere tra loro

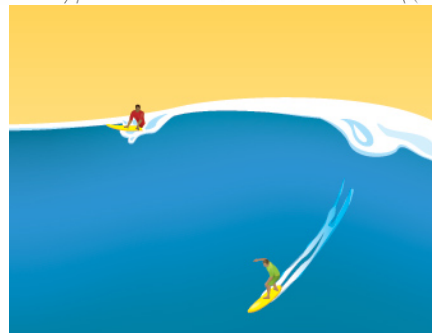
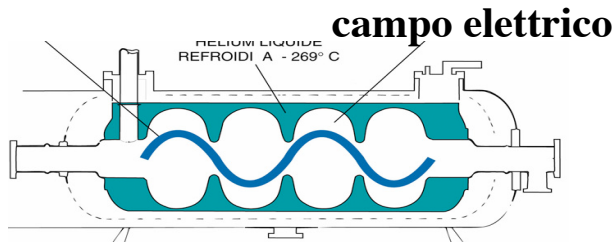




120 tonnellate di elio liquido raffreddano una massa totale di 37000 tonnellate (40000 m<sup>2</sup>)

**Numero di dipoli: 1232**  
**totale di magneti: 9300**

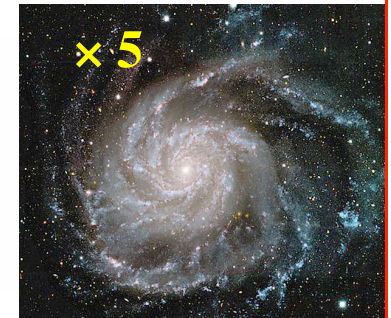
**Accelerazione: 8 cavità**  
**da 2000000 volt**



*I protoni passano per le cavità 11000 volte al secondo, per 20 minuti*

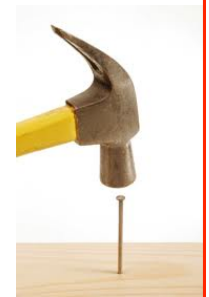
**Energia finale: 7 TeV**  
**(7000 miliardi di eV)**

**E=1.5 eV**



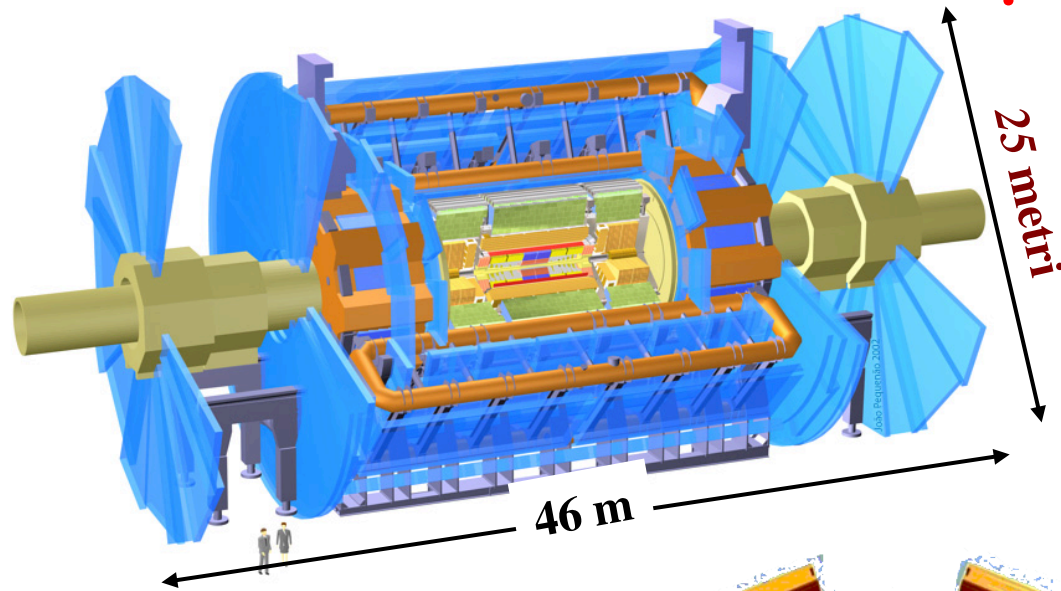
*Per un singolo protone, l'energia di una zanzara in volo...*

**ma in una zona mille miliardi di volte più piccola**



**Nel punto di collisione, la temperatura è 100000 volte più alta dell'interno del sole**

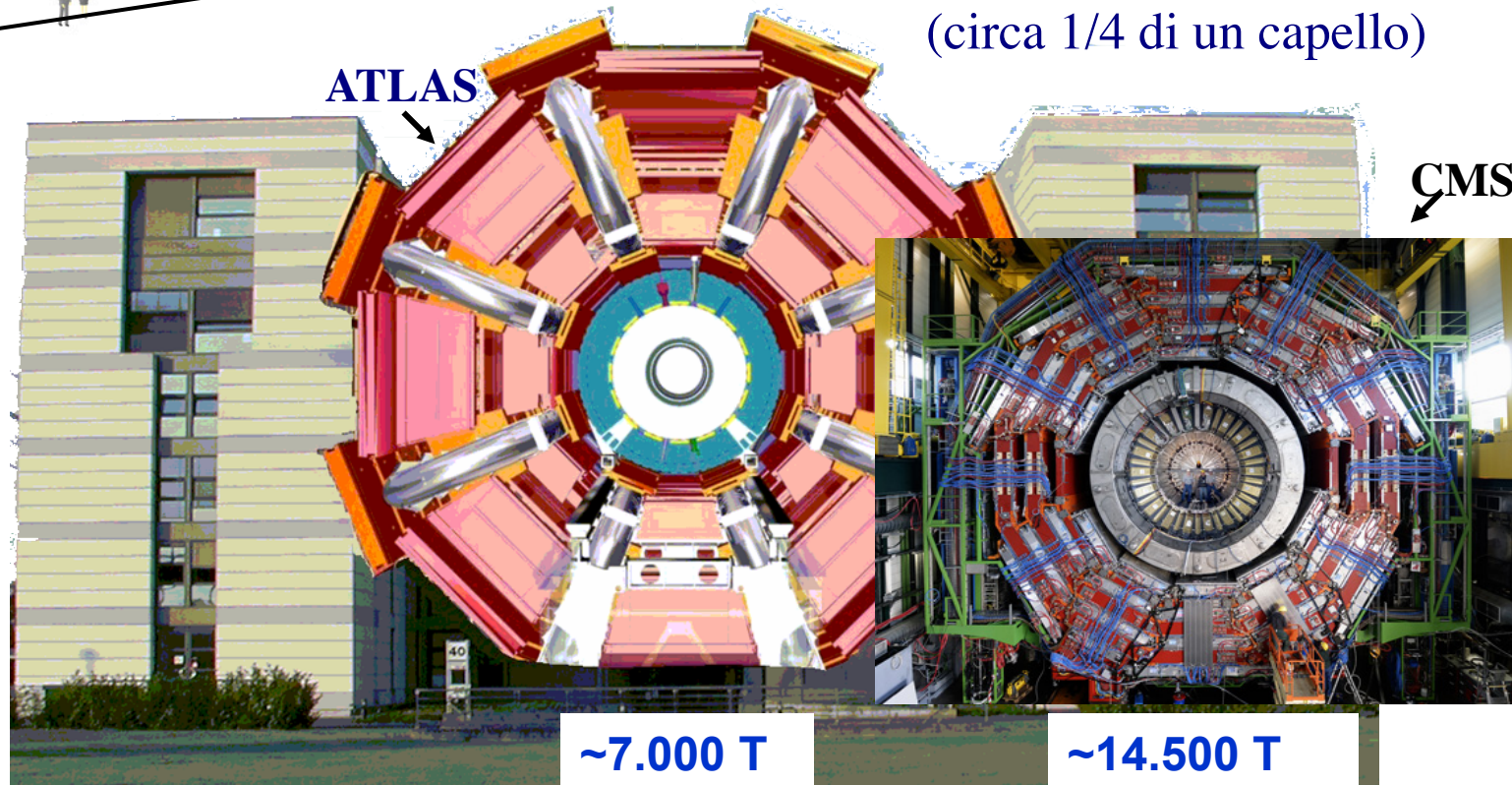
# I rivelatori di particelle



A LHC vi sono 4 rivelatori principali:  
**Alice, LHCb, CMS, ATLAS**

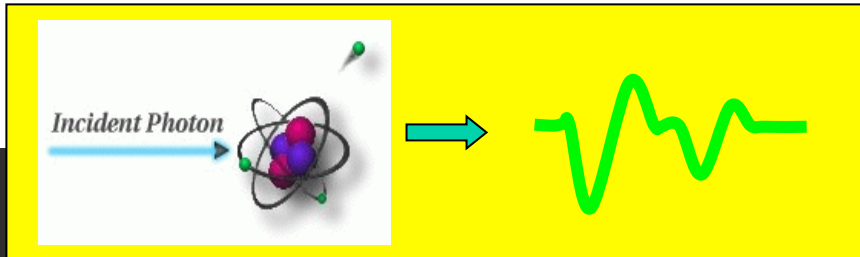
← **ATLAS**

Composti da moltissime parti.  
Alcune sono posizionate con  
la precisione di 20 micron  
(circa 1/4 di un capello)



*La maggior parte delle particelle generate dagli urti dei protoni si disintegrano prima di poter attraversare l'apparato, producendo altre particelle*

*Quelle che vivono abbastanza a lungo lasciano un segnale in strati successivi di rivelatori (disposti come in una cipolla), che ne misurano diverse caratteristiche*

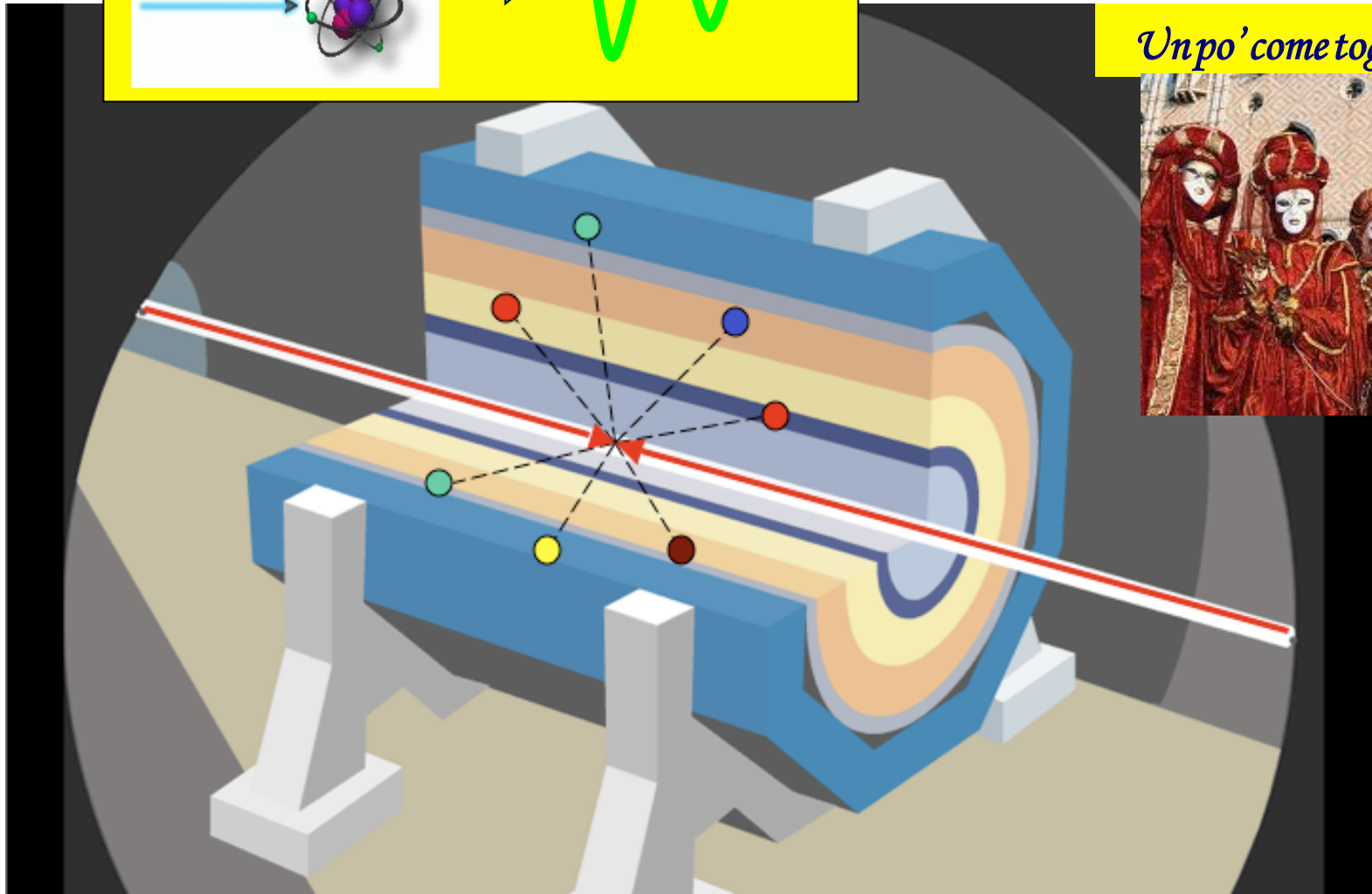


*Alla fine vengono "identificate"*

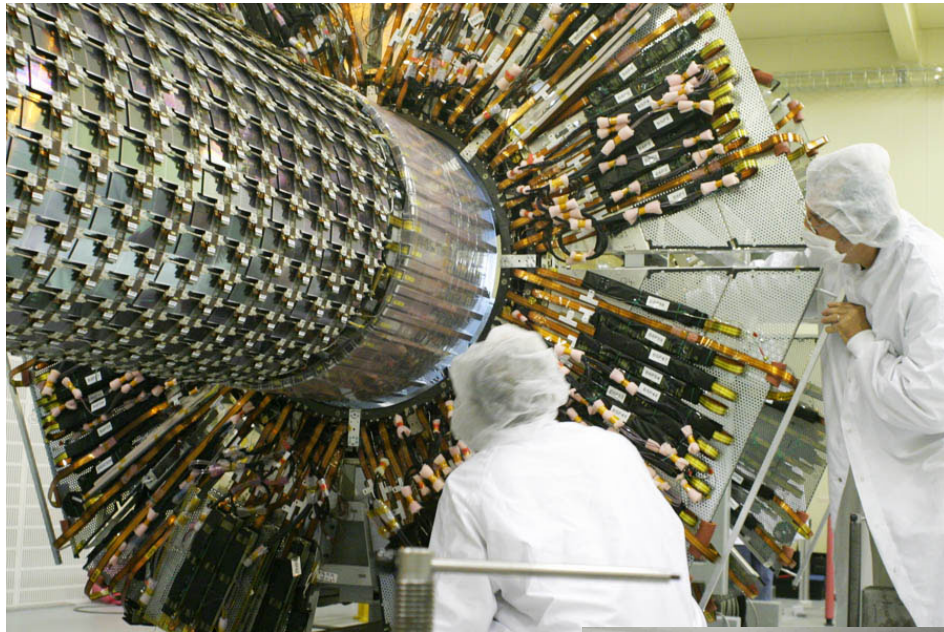
*Un po' come togliere la maschera*



**Protoni  
Neutroni  
Fotoni  
Elettroni  
Muoni  
Neutrini**



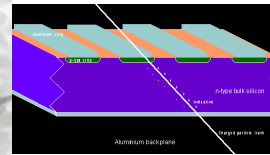
# I rivelatori interni



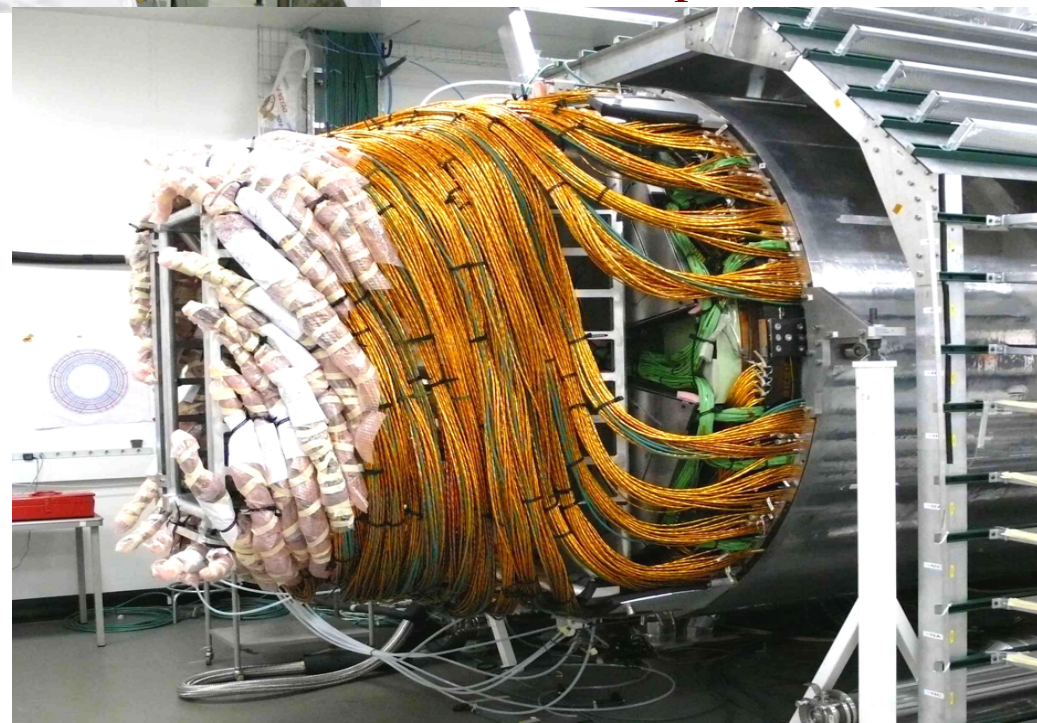
↑  
ATLAS



*Tre strati uno dentro l'altro, come nelle Matrioske russe*

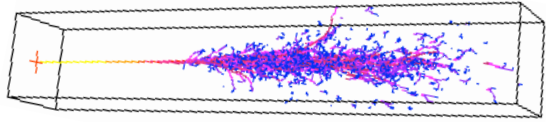


Il guscio più interno è fatto di 80 milioni di tasselli (pixel) di silicio larghi 50 micron e lunghi 400 micron, che segnalano il passaggio delle particelle

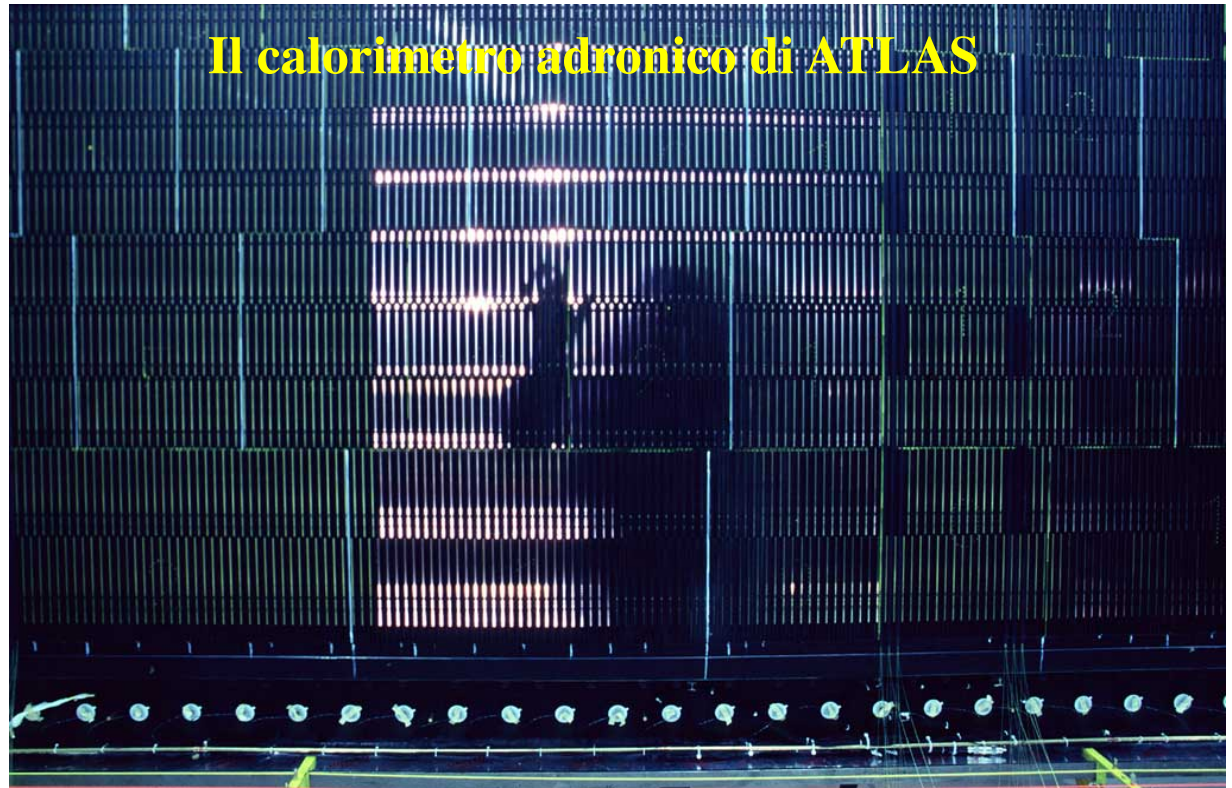
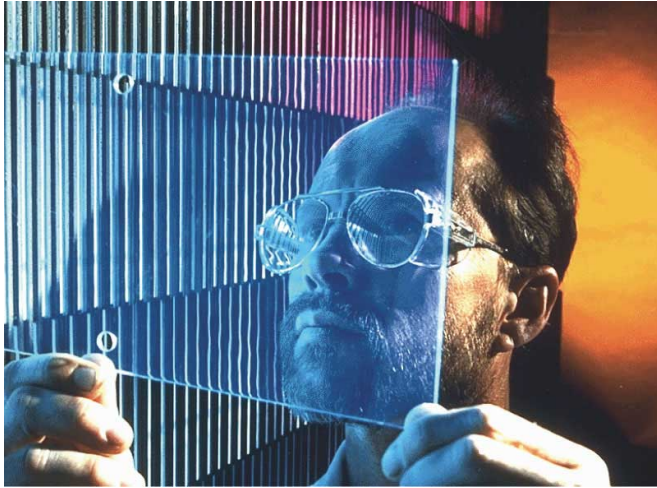


CMS →

## I calorimetri



→ energia della particella

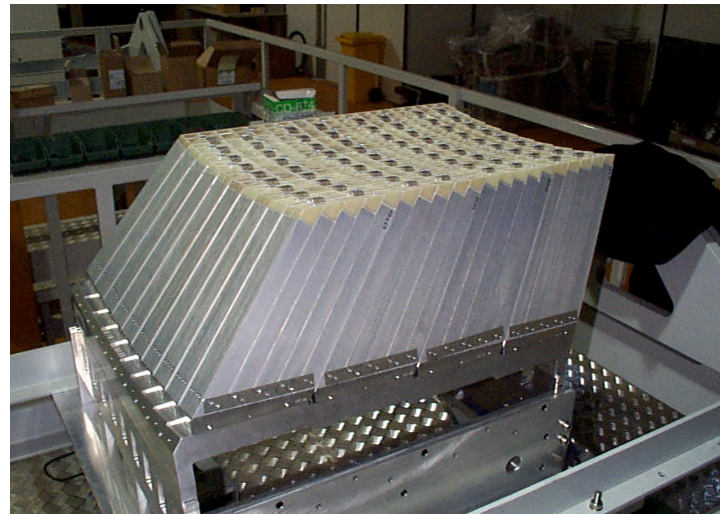


## Il calorimetro adronico di ATLAS

50000 “mattonelle” di scintillatore immerse in una struttura di acciaio

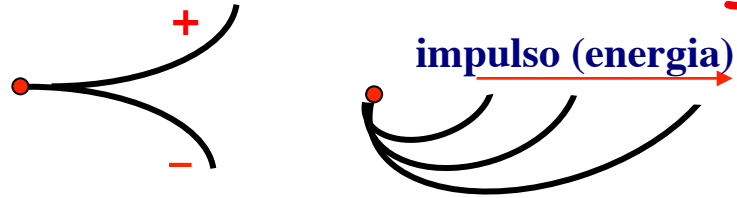


## Il calorimetro elettromagnetico di CMS



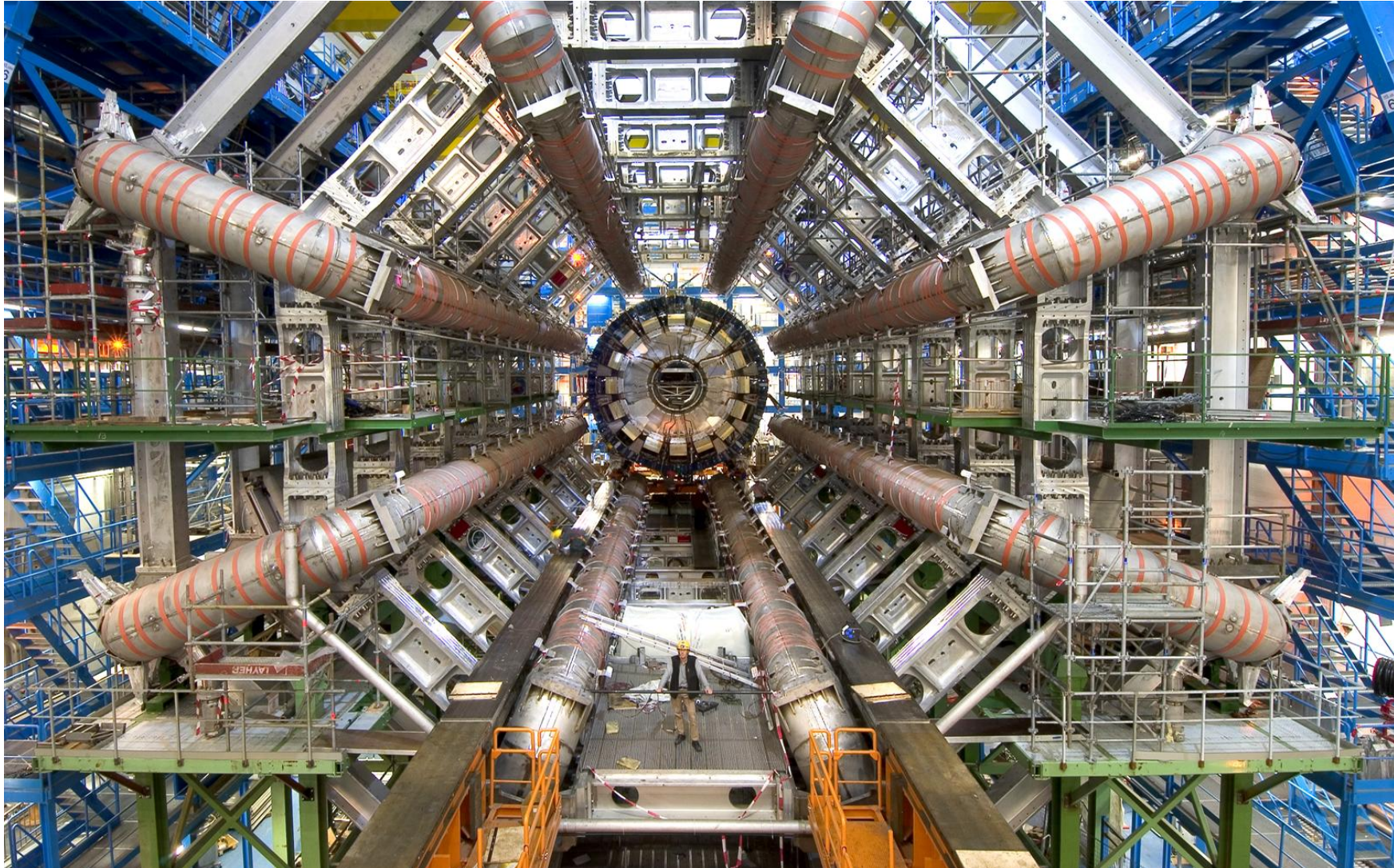
80 000  
cristalli  
di tungstato  
di piombo

## I magneti

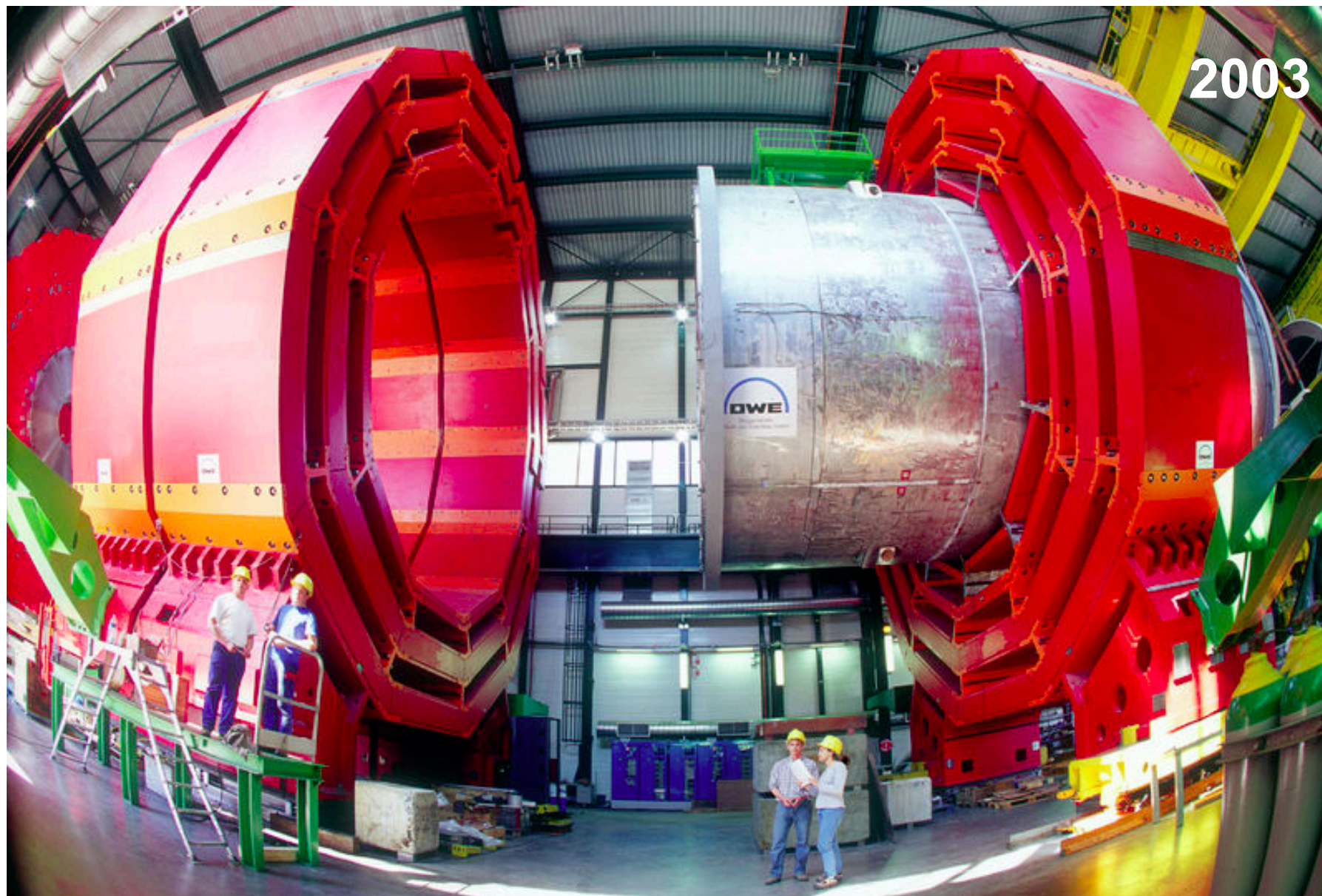


Il campo magnetico curva le tracce delle particelle cariche per misurarne l'impulso

Le 8 grandi bobine del magnete toroidale di ATLAS per il rivelatore dei muoni



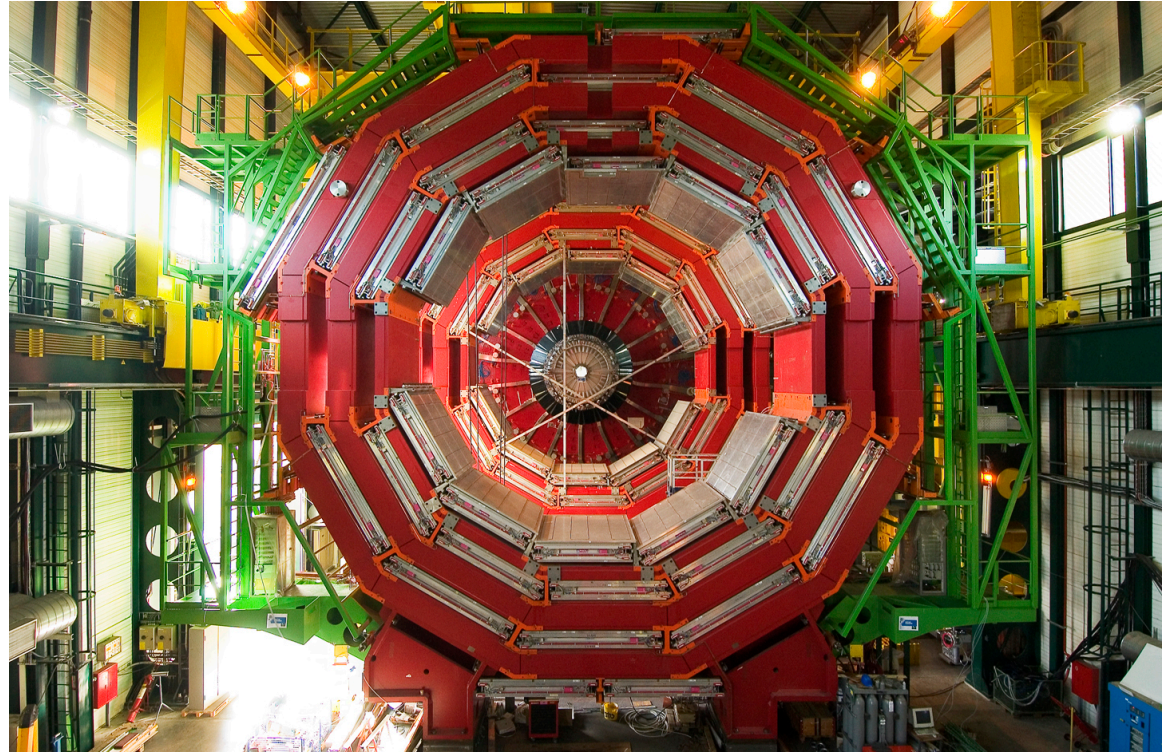
## Il magnete solenoide di CMS durante la costruzione



## I rivelatori per misurare le tracce dei muoni



Le grandi ruote (6 in tutto) che ospitano le camere dei muoni nella parte avanti-indietro di ATLAS



Le camere per i muoni inserite nella struttura di ferro che circonda il magnete di CMS



# Collaborazione ATLAS

(Aprile 2008)

**3000 Autori Scientifici in totale**

**38 Paesi 178 Istituti**

*I ricercatori vengono da quasi  
tutte le parti del mondo.*

*Ogni Istituto si prende la responsabilità  
per realizzare una parte dell'apparato  
sperimentale*

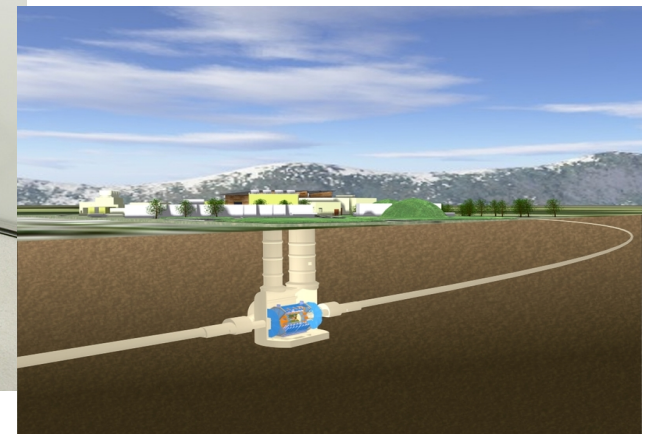


Albany, Alberta, NIKHEF Amsterdam, Ankara, LAPP Annecy, Argonne NL, Arizona, UT Arlington, Athens, NTU Athens, Baku, IFAE Barcelona, Belgrade, Bergen, Berkeley LBL and UC, HU Berlin, Bern, Birmingham, UAN Bogota, Bologna, Bonn, Boston, Brandeis, Bratislava/SAS Kosice, Brookhaven NL, Buenos Aires, Bucharest, Cambridge, Carleton, Casablanca/Rabat, CERN, Chinese Cluster, Chicago, Chile, Clermont-Ferrand, Columbia, NBI Copenhagen, Cosenza, AGH UST Cracow, IFJ PAN Cracow, DESY, Dortmund, TU Dresden, JINR Dubna, Duke, Frascati, Freiburg, Geneva, Genoa, Giessen, Glasgow, Göttingen, LPSC Grenoble, Technion Haifa, Hampton, Harvard, Heidelberg, Hiroshima, Hiroshima IT, Indiana, Innsbruck, Iowa SU, Irvine UC, Istanbul Bogazici, KEK, Kobe, Kyoto, Kyoto UE, Lancaster, UN La Plata, Lecce, Lisbon LIP, Liverpool, Ljubljana, QMW London, RHBNC London, UC London, Lund, UA Madrid, Mainz, Manchester, Mannheim, CPPM Marseille, Massachusetts, MIT, Melbourne, Michigan, Michigan SU, Milano, Minsk NAS, Minsk NCPHEP, Montreal, McGill Montreal, FIAN Moscow, ITEP Moscow, MPhI Moscow, MSU Moscow, Munich LMU, MPI Munich, Nagasaki IAS, Nagoya, Naples, New Mexico, New York, Nijmegen, BINP Novosibirsk, Ohio SU, Okayama, Oklahoma, Oklahoma SU, Oregon, LAL Orsay, Osaka, Oslo, Oxford, Paris VI and VII, Pavia, Pennsylvania, Pisa, Pittsburgh, CAS Prague, CU Prague, TU Prague, IHEP Protvino, Regina, Ritsumeikan, UFRJ Rio de Janeiro, Rome I, Rome II, Rome III, Rutherford Appleton Laboratory, DAPNIA Saclay, Santa Cruz UC, Sheffield, Shinshu, Siegen, Simon Fraser Burnaby, SLAC, Southern Methodist Dallas, NPI Petersburg, Stockholm, KTH Stockholm, Stony Brook, Sydney, AS Taipei, Tbilisi, Tel Aviv, Thessaloniki, Tokyo ICEPP, Tokyo MU, Toronto, TRIUMF, Tsukuba, Tufts, Udine/ICTP, Uppsala, Urbana UI, Valencia, UBC Vancouver, Victoria, Weizmann Rehovot, FH Wiener Neustadt, Wisconsin, Wuppertal, Yale, Yerevan

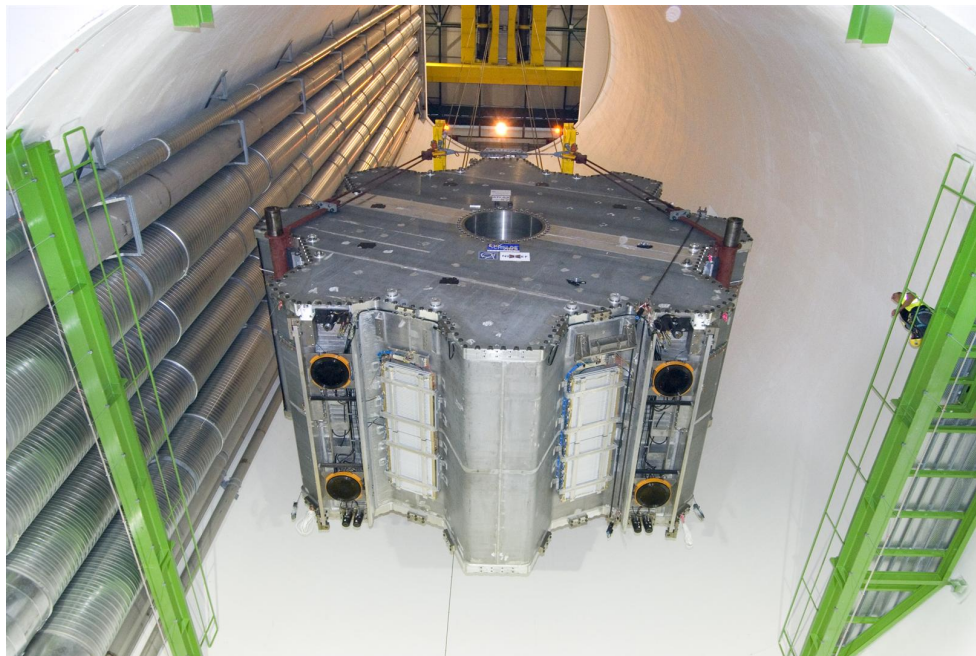
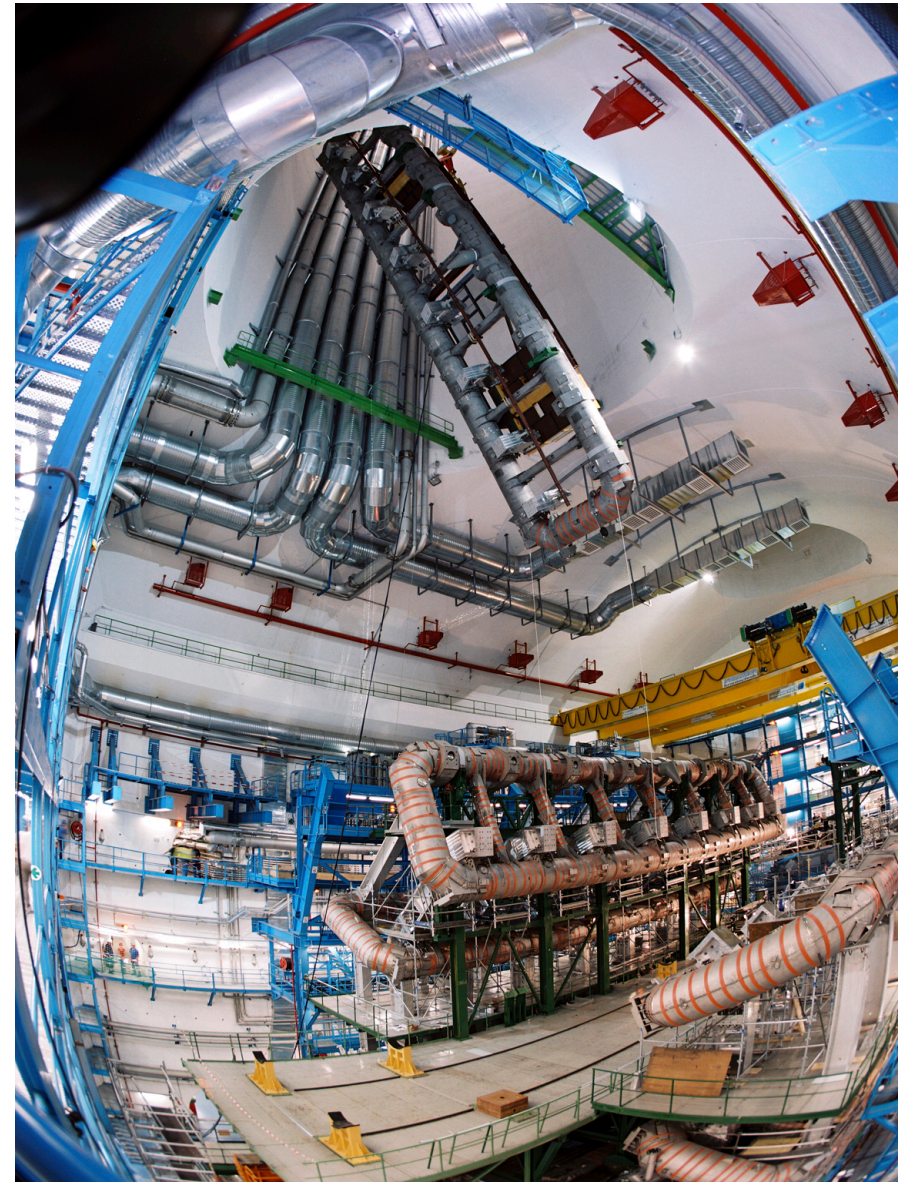
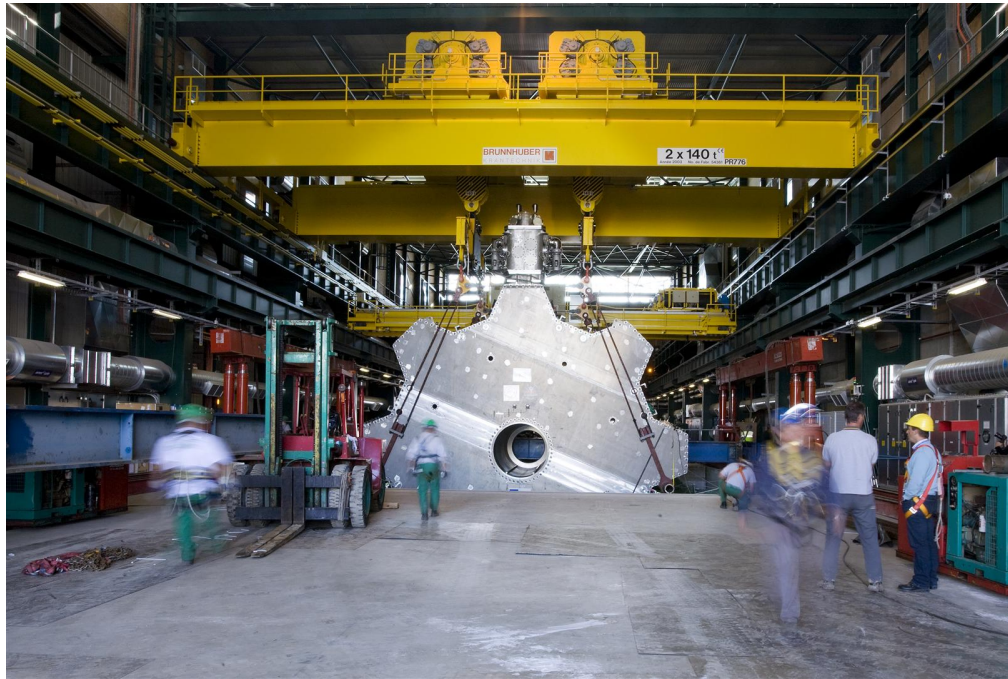
*Una volta pronte, le diverse parti del rivelatore sono state portate al CERN per essere installate*



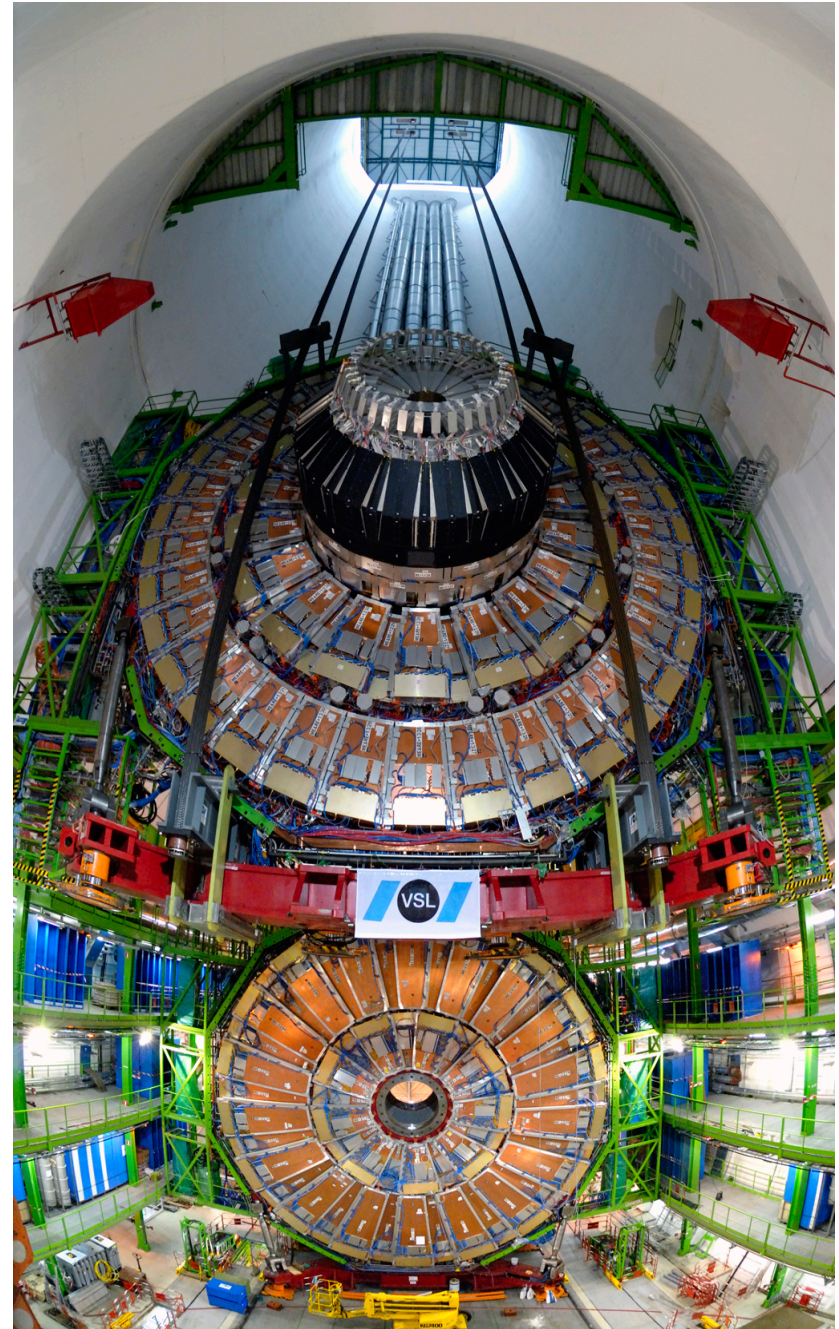
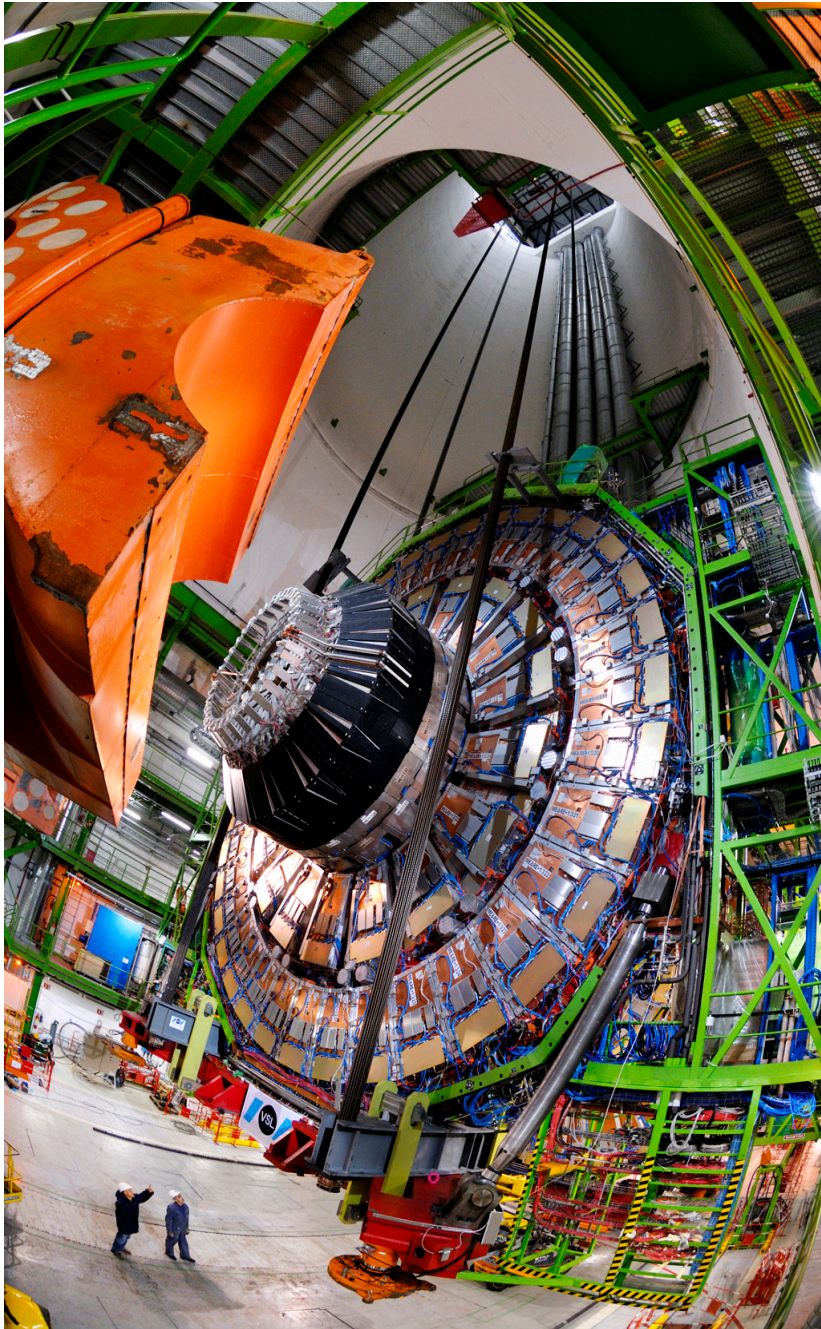
L'inizio. La caverna di ATLAS nel luglio 2003: lunga 53 metri, larga 30 metri e alta 35 metri



*e infine le varie parti sono state unite: l'assemblaggio di ATLAS*

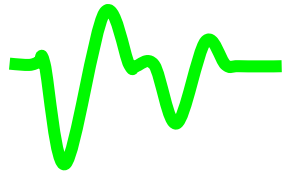


...e di CMS

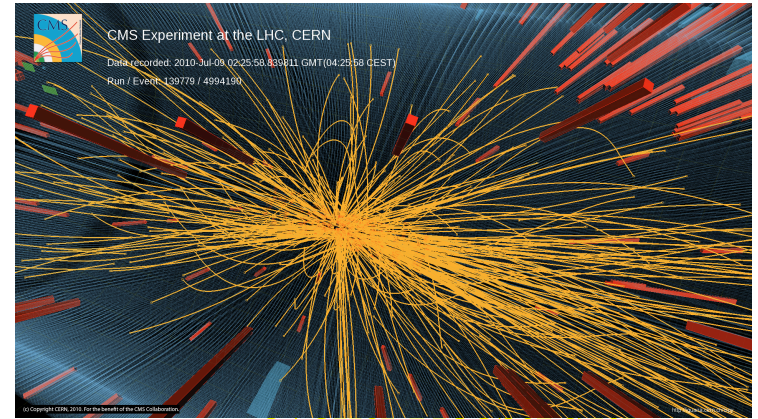




**ATLAS control room**

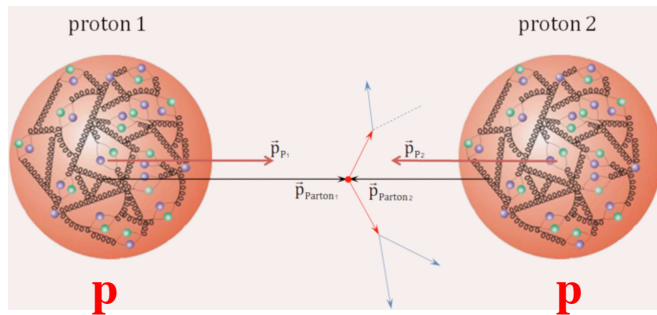


segnali elettronici →  
punti → tracce (percorsi  
delle particelle) oppure  
depositi di energia

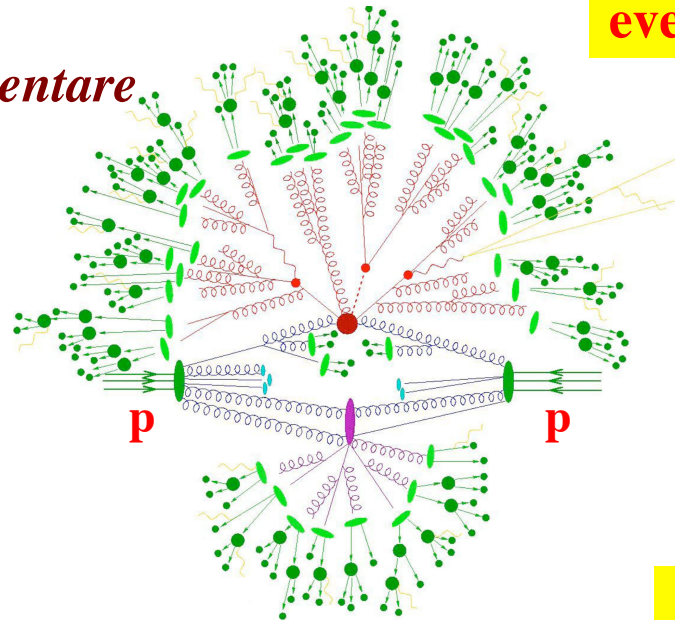


**evento ricostruito**

*Il protone non è una particella elementare*

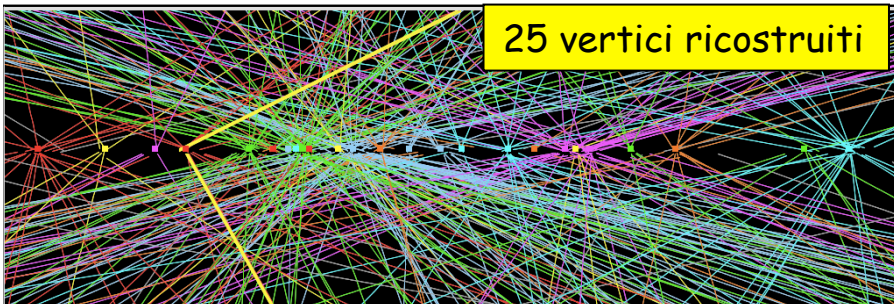


Urto tra due costituenti (partoni)



Gli altri partoni  
producono eventi  
con centinaia di  
particelle

*più protoni interagiscono a ogni incrocio*

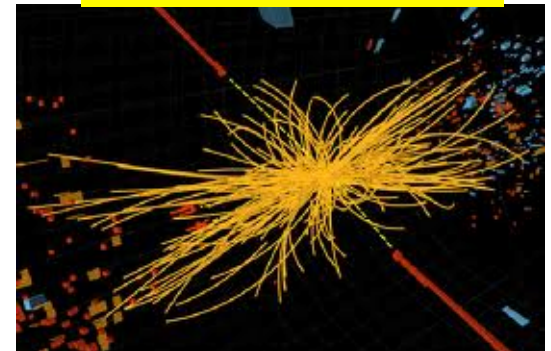


**25 vertici ricostruiti**

**Gli eventi  
interessanti →  
sono rari**

Higgs prodotto una  
volta su 10 miliardi

**Candidato Higgs**



## Enorme quantità di dati da gestire

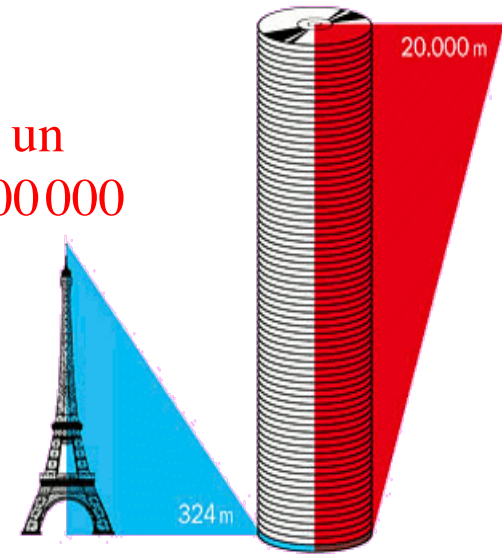
Vengono acquisiti 40 milioni di volte al secondo 100 milioni di canali di elettronica (~ 60 TB/s)

*preselezione*

Ritenuto solo un evento su 1 000 000

Anche così, vengono prodotti dagli esperimenti di LHC circa 10 milioni di GB all'anno

**Come analizzarli?**

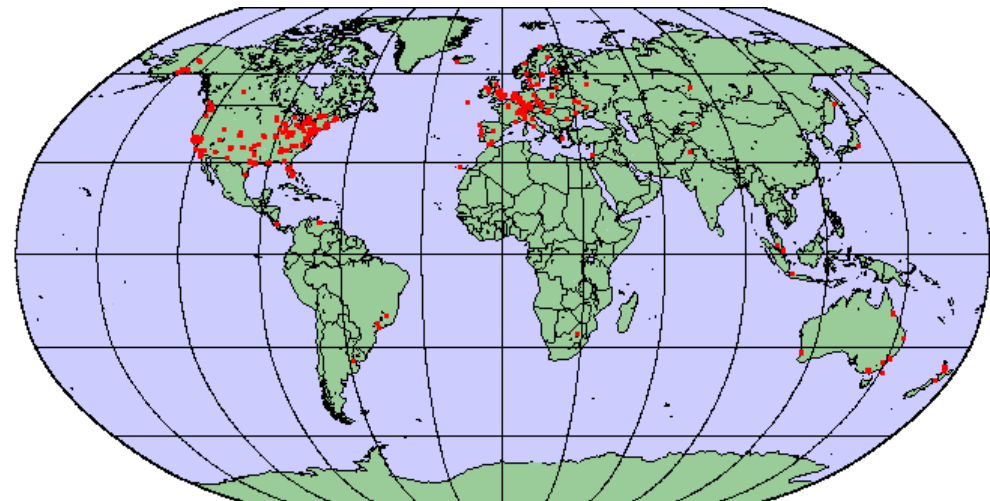


**Soluzione:** connettere tra loro centri di calcolo che prima erano isolati, unendo tutte le risorse disponibili su scala planetaria



**La GRID** decine di migliaia di computer

140 Istituti 35 nazioni



**4 luglio 2012: la grande Sala Conferenze del CERN è gremita come nelle grandi occasioni ...e moltissimi altri fisici sono collegati da tutto il mondo**



Tra il pubblico, un signore di oltre 80 anni particolarmente interessato

È Peter Higgs, che 50 anni prima aveva predetto l'importantissima particella che porta il suo nome

**Ora viene annunciato che quella particella è stata trovata**

*Che cosa hanno mostrato i fisici?*



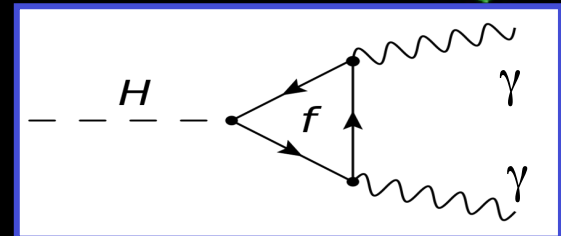
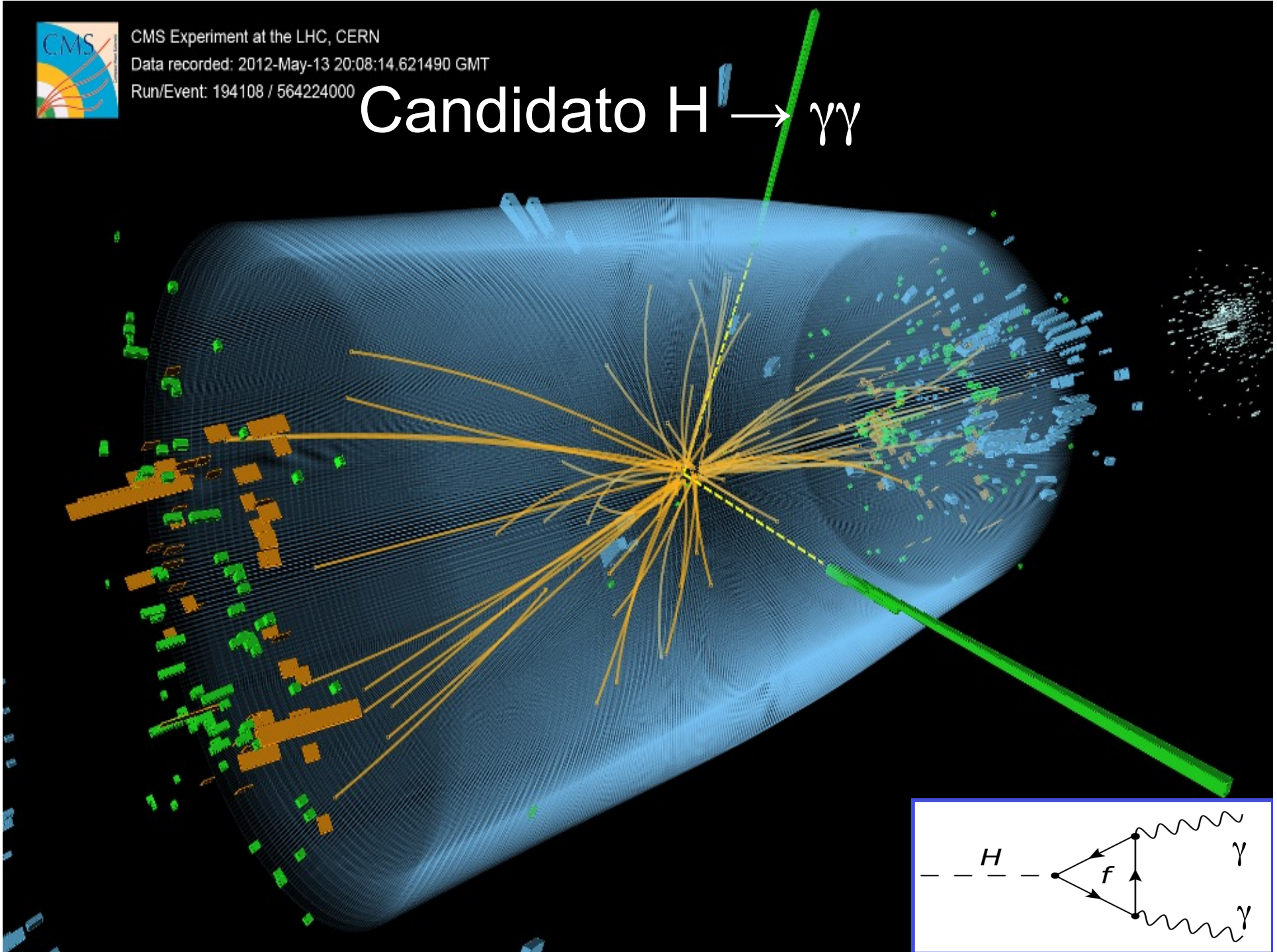


CMS Experiment at the LHC, CERN

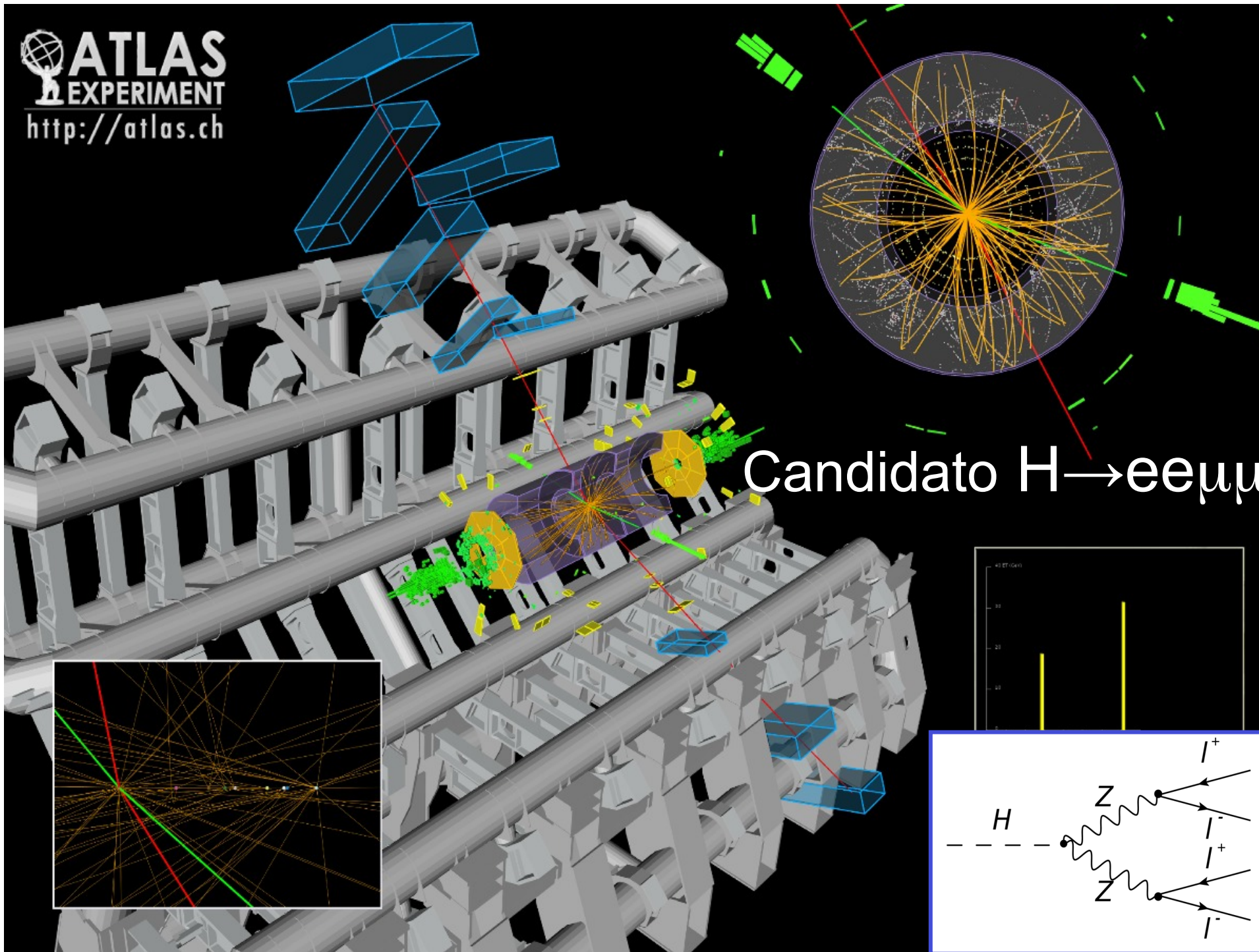
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT

Run/Event: 194108 / 564224000

# Candidato $H \rightarrow \gamma\gamma$

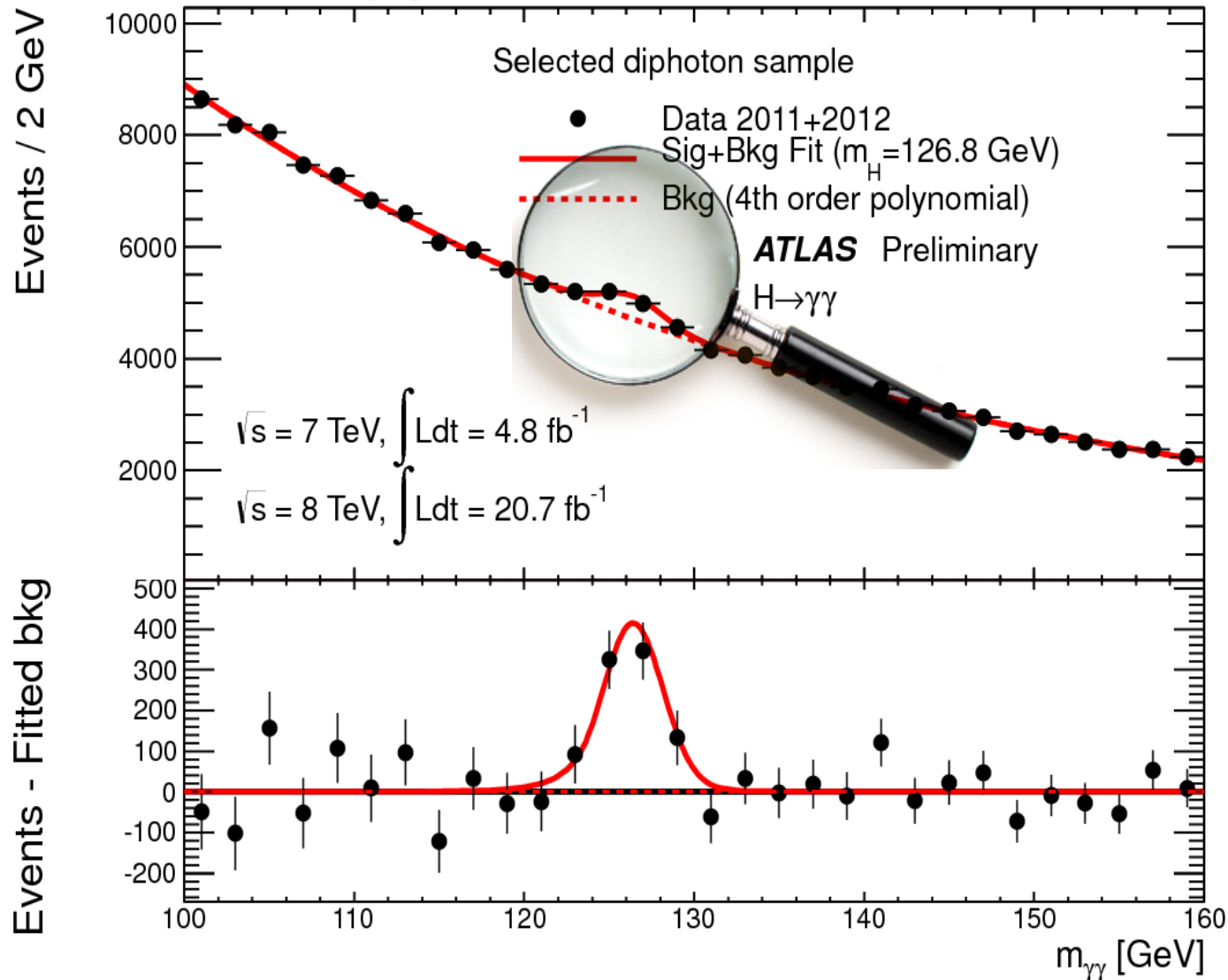




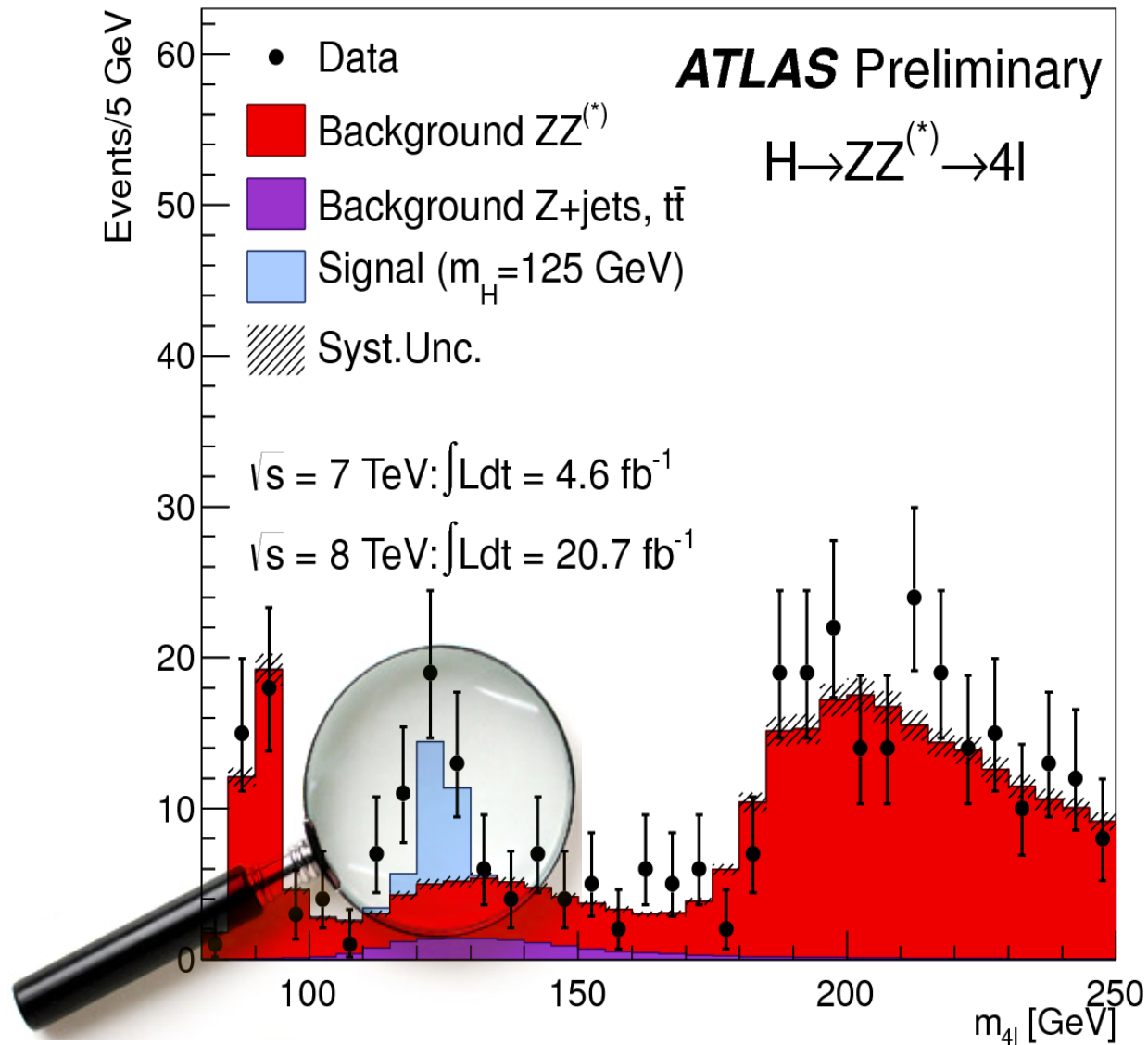


Ma non basta trovare eventi come questi: bisogna provare che un numero sufficiente (il segnale) emerge dal fondo, con un dato valore di massa (che la teoria non prevede)

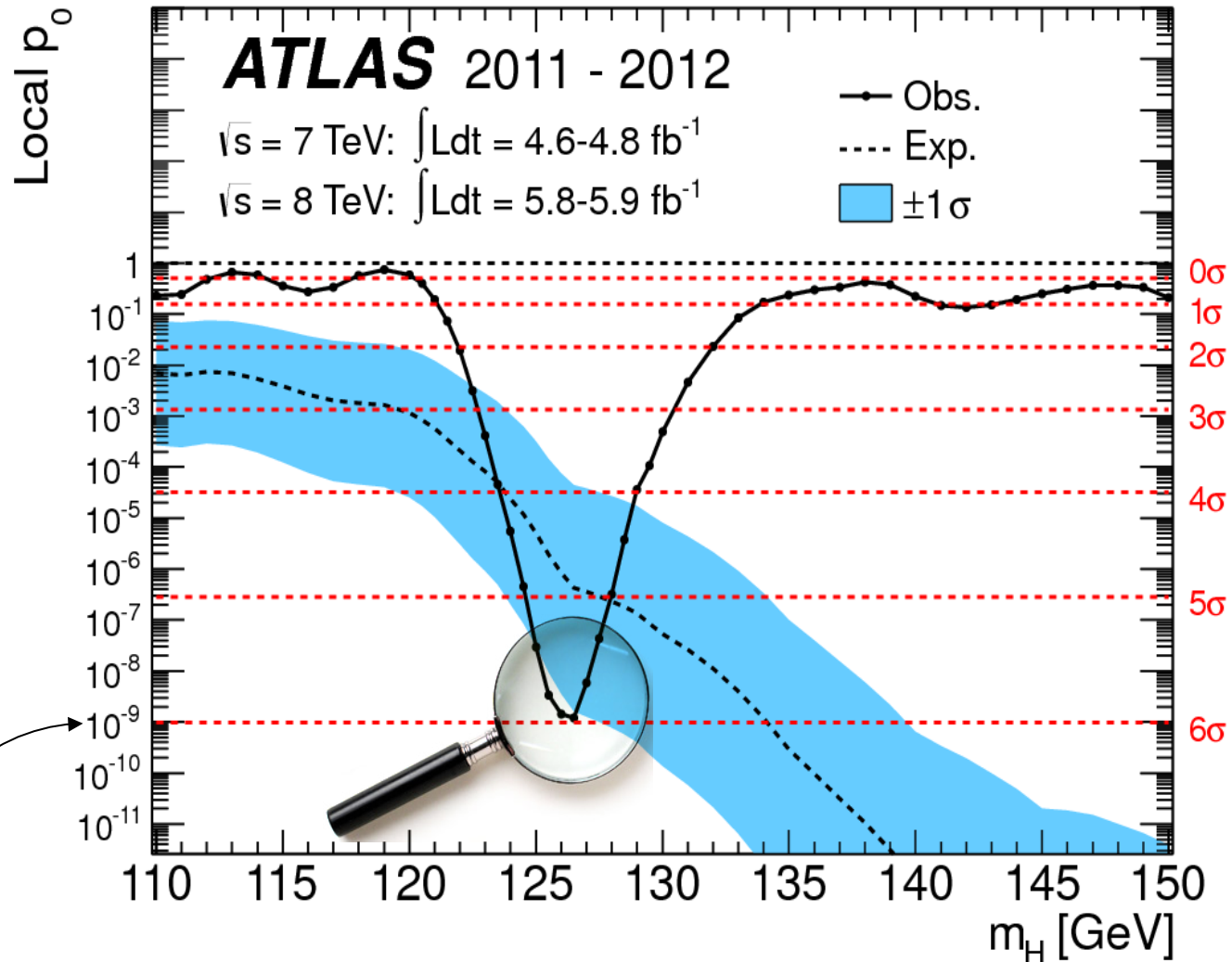
# H $\rightarrow$ $\gamma\gamma$ : ultimi risultati



# H → 4 leptoni: ultimi risultati



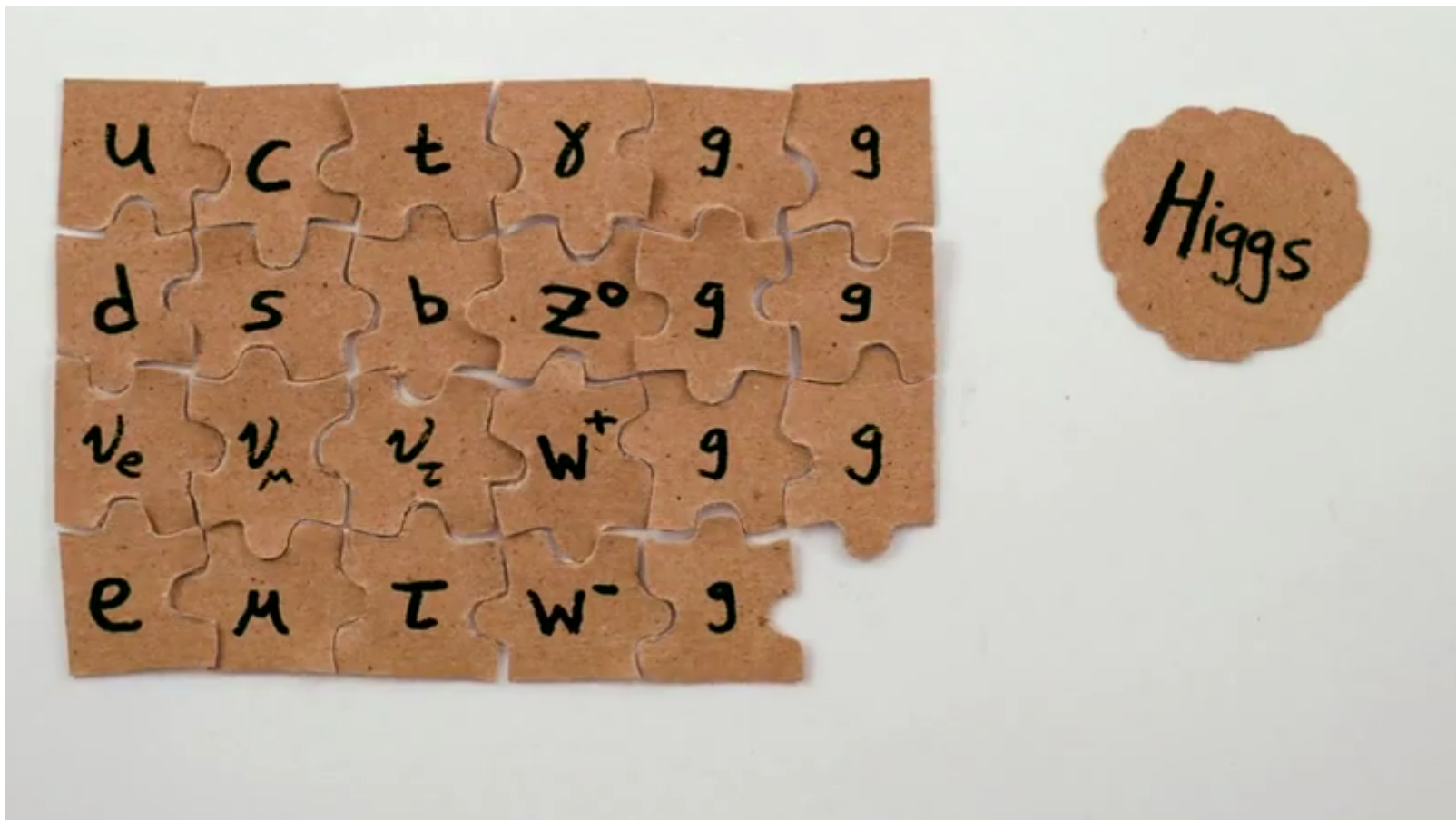
# Annuncio della scoperta



- La probabilità che il segnale osservato sia solo una fluttuazione statistica del fondo è 1 su miliardo

È stata osservata una nuova particella con massa tra 125 e 126 GeV

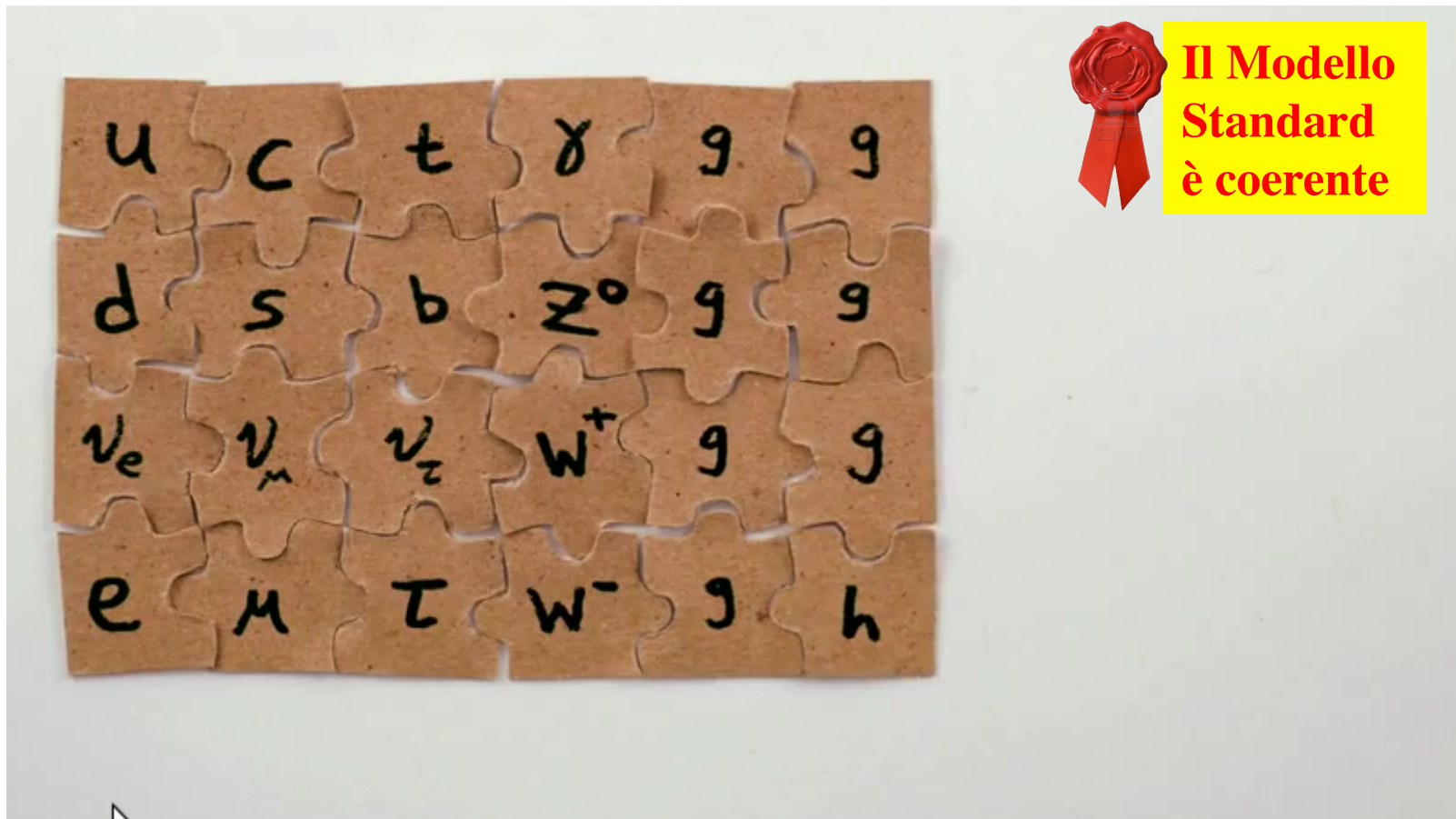
Lo studio delle sue proprietà mostra (con alta probabilità)  
che è proprio il Bosone di Higgs



È stata osservata una nuova particella con massa tra 125 e 126 GeV

Lo studio delle sue proprietà mostra (con alta probabilità)  
che è proprio il Bosone di Higgs

*Ma potrebbe essere più interessante*

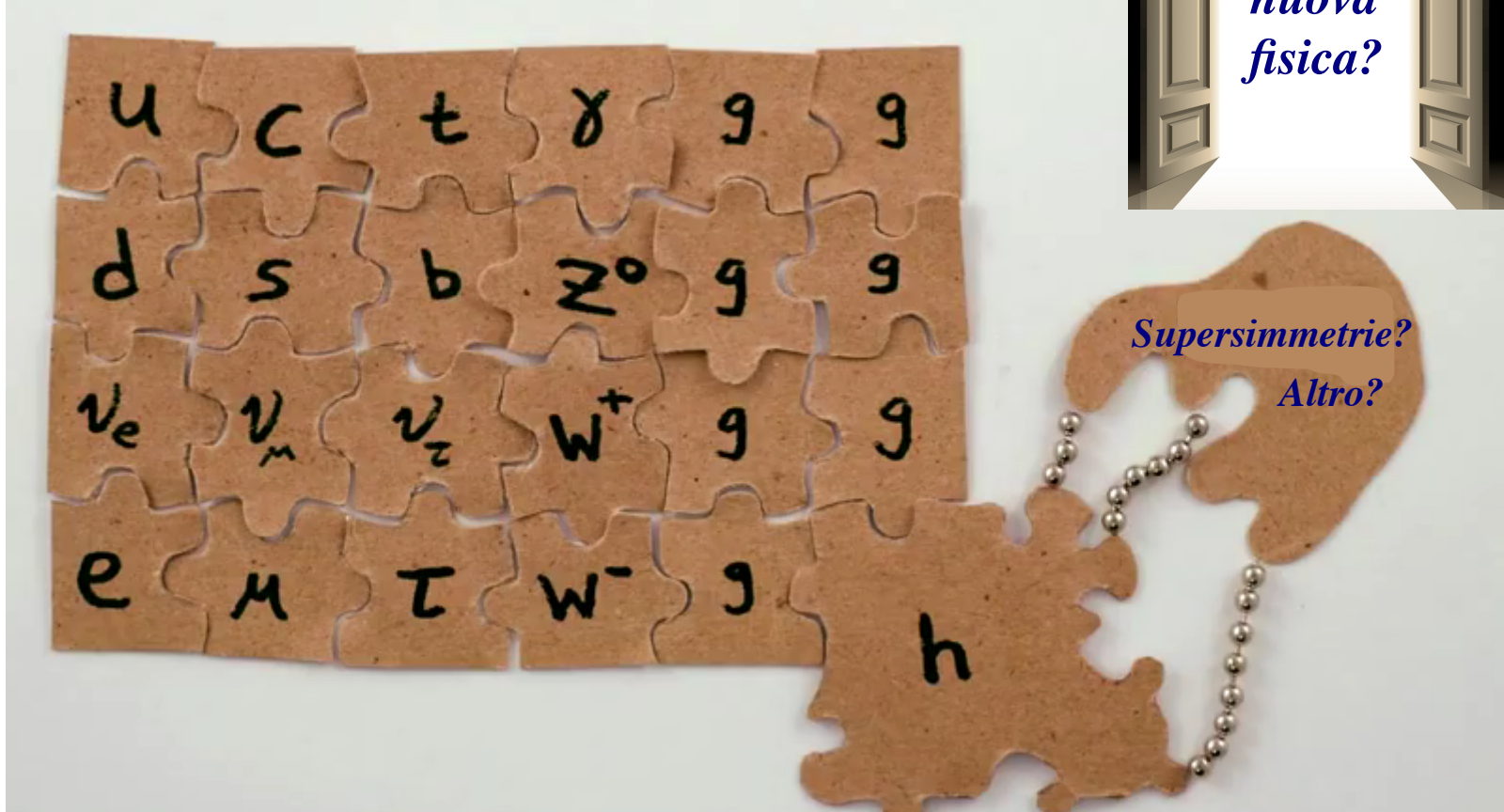


**È stata osservata una nuova particella con massa tra 125 e 126 GeV**

**Lo studio delle sue proprietà mostra (con alta probabilità)  
che è proprio il Bosone di Higgs**

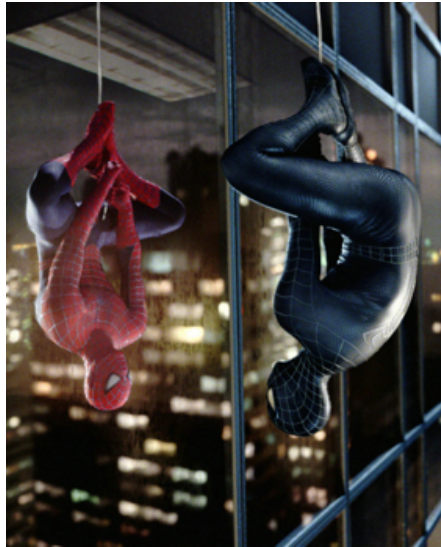
*Ma potrebbe essere più interessante: **uno Higgs oltre il Modello standard***

**Molte altre domande attendono risposta:  
la ricerca continua...**



# Non soltanto LHC

## Produzione e studio di atomi di antimateria (anti-idrogeno)

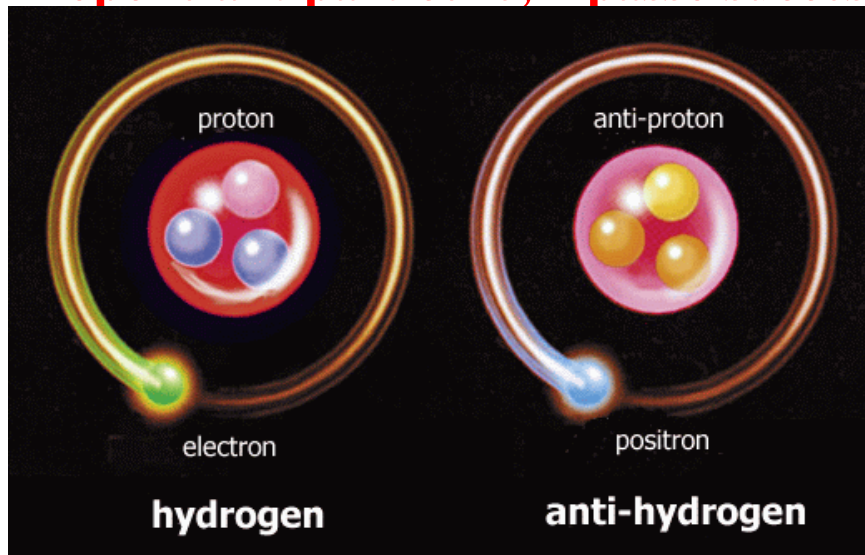


**antimateria:**

*a ogni particella di materia  
corrisponde un'antiparticella*

*Ma la materia non è solo  
fatta di particelle:  
proseguendo nella scala della  
complessità ci sono atomi,  
molecole...*

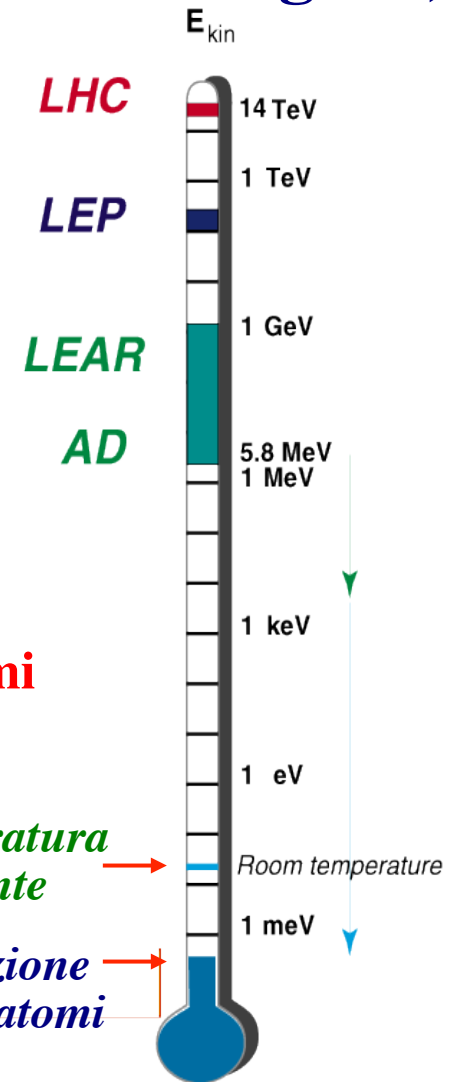
**Dopo le antiparticelle, il passo successivo è studiare gli antiatomi**



**Il più semplice:  
l'anti-idrogeno  
(antiprotone+  
positrone)**

*temperatura  
ambiente*

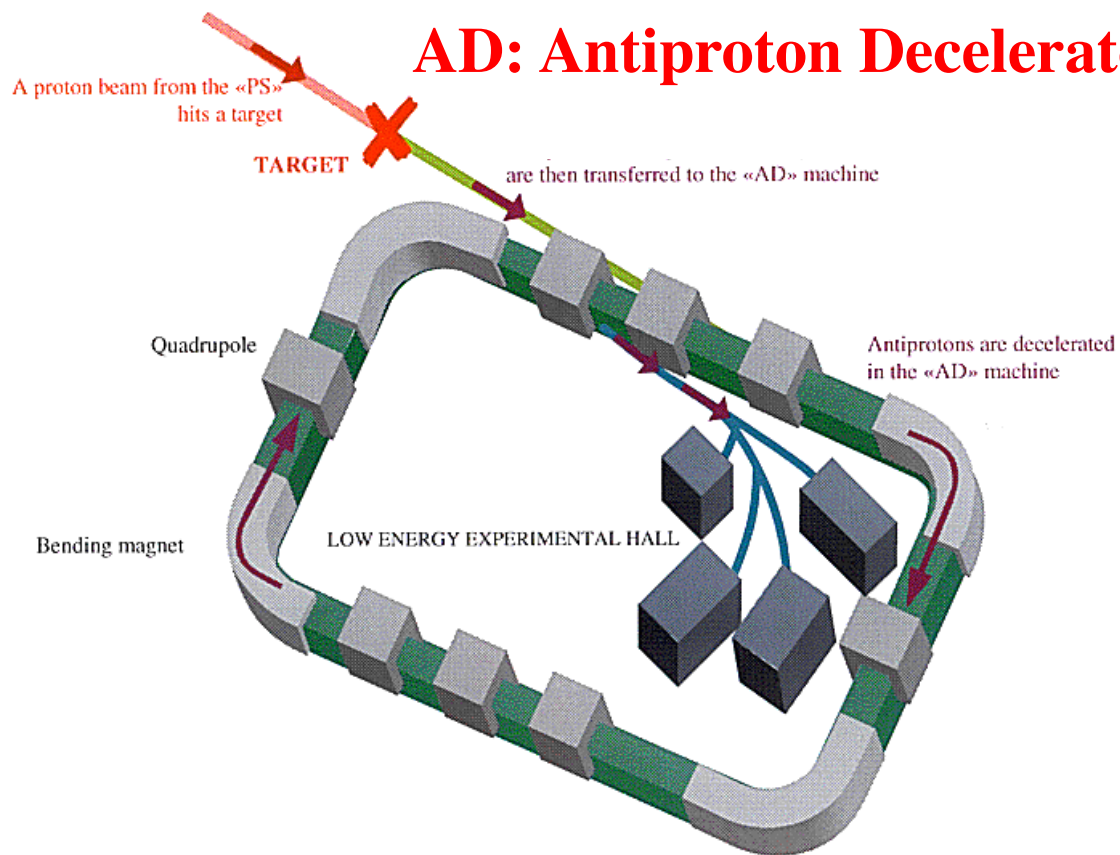
*formazione  
di antiatomi*



**Per formare l'anti-idrogeno, dobbiamo  
raffreddare (decelerare) le particelle**



# AD: Antiproton Decelerator



anti-idrogeno rivelato da annichilazione di  $\bar{p}$  e  $e^+$

Obiettivo: farlo vivere abbastanza per studiarlo (finora circa 1000 s)

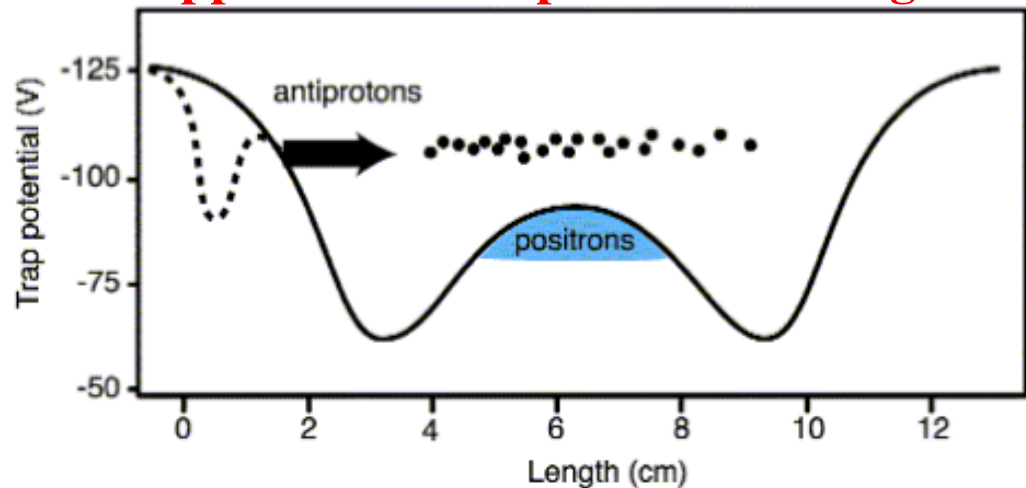
## Spettroscopia

(le transizioni sono le stesse dell'idrogeno?)

## Test gravitazionali

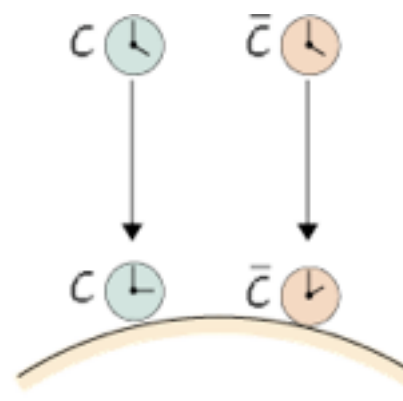
(la gravità agisce allo stesso modo per materia e antimateria?)

## “Trappola” con campi elettrici e magnetici



Infinity

Earth



Gli orologi rallentano allo stesso modo?

**g** è la stessa? (caduta libera)

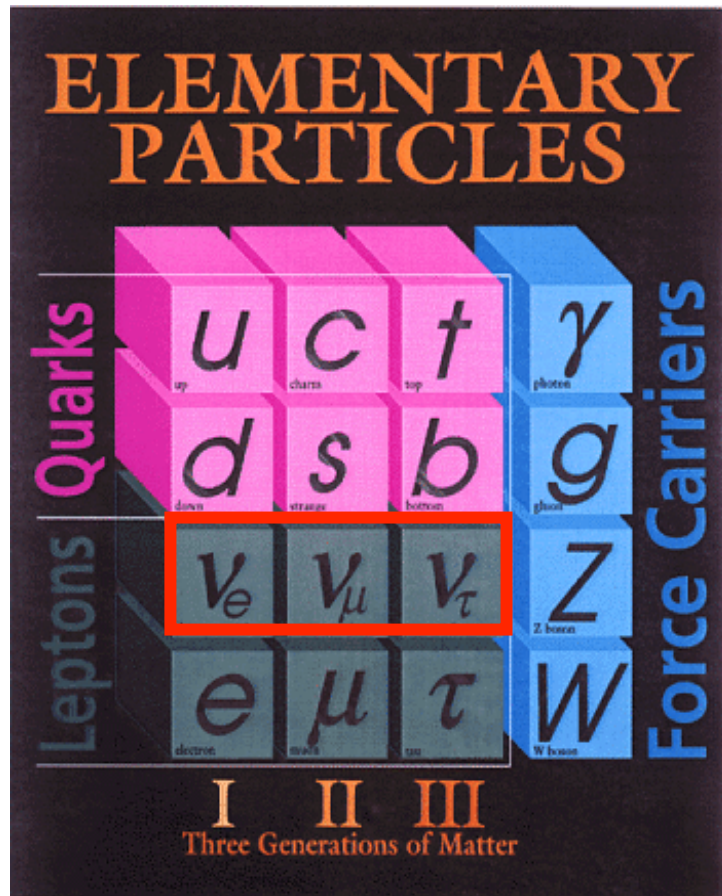


## La fisica del neutrino (oscillazioni)



I neutrini occupano un posto importante tra le particelle

**Il modello standard: ritratto di famiglia con neutrini**



3 famiglie di 4 particelle (i "mattoni")  
+ 4 "veicoli di forza"

Il neutrino è presente tra le  
particelle "fondamentali" in 3 specie:

$\nu_e$  neutrino dell'elettrone

$\nu_\mu$  neutrino del muone

$\nu_\tau$  neutrino del tau



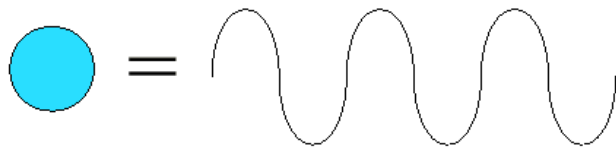
Tra i costituenti del modello standard, il neutrino è il più enigmatico

Ha una massa molto più piccola delle altre particelle

Risente solo dell'interazione debole → non interagisce quasi mai

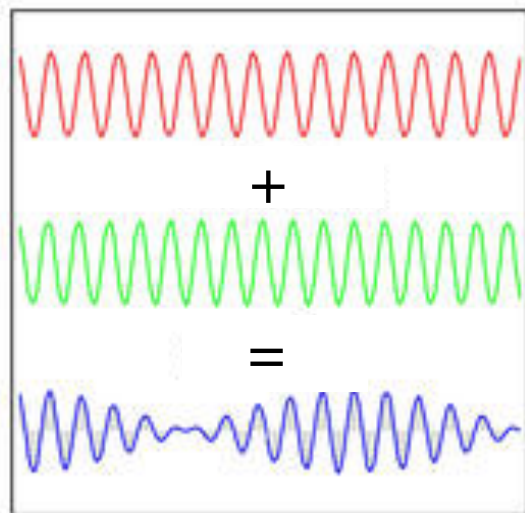
Il neutrino ha la sua identità ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), ma, in viaggio, la può cambiare

Per es:  $\nu_e$  → oscillazione →  $\nu_\mu$  (o  $\nu_\tau$ )



Una particella si comporta anche come un'onda

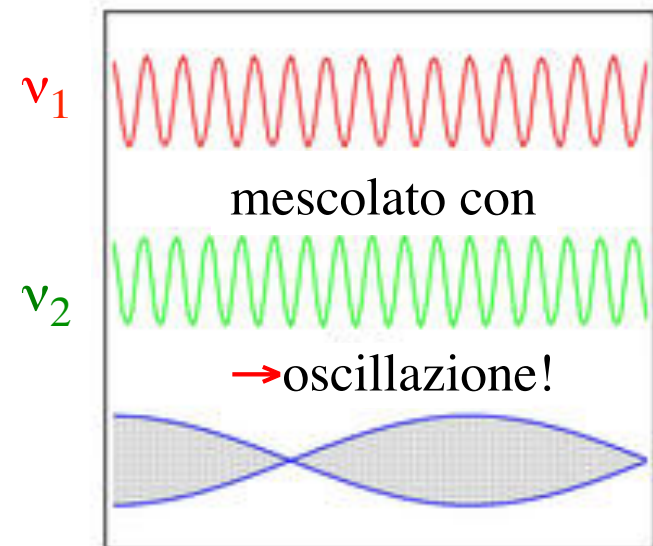
Onde sonore



*battimenti*

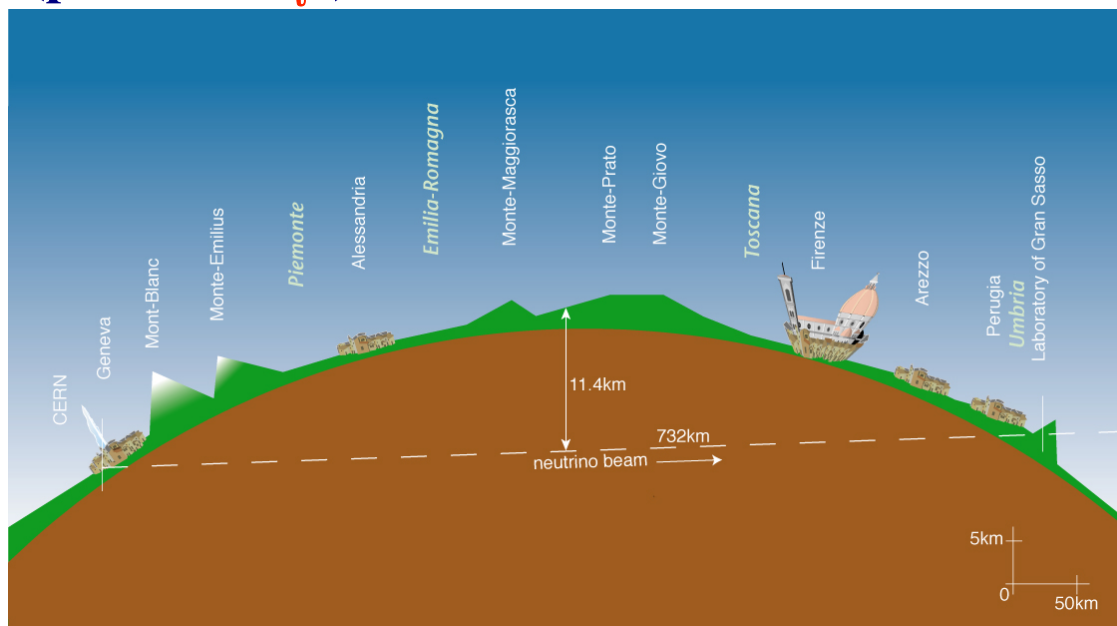
**Ipotesi:**

$\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$  (che si manifestano nelle interazioni) sono un miscuglio di tre stati  $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ , di massa definita, che si manifestano nella propagazione





Gli acceleratori producono  $\nu_\mu$   
 Anche loro si trasformano  
 (per es. in  $\nu_\tau$ ?)



**Trovati alcuni indizi di oscillazione**

*“sottoprodotto”*: misura della velocità del neutrino

$$\delta t = t(\text{neutrino}) - t(\text{luce, vel. } c)$$

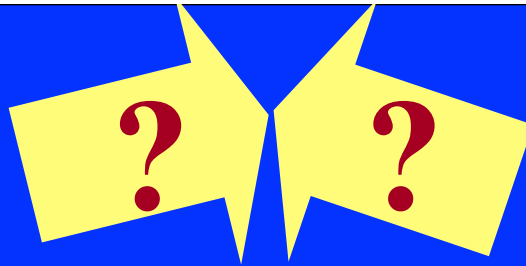
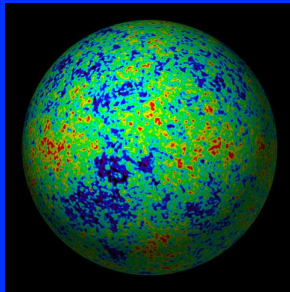
**ICARUS:  $\delta t = 5.1 \pm 1.1(\text{stat}) \pm 5.5(\text{sys}) \text{ ns}$**

**Borexino:  $\delta t = 2.7 \pm 1.2(\text{stat}) \pm 3(\text{sys}) \text{ ns}$**

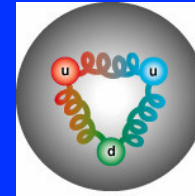
**LVD:  $\delta t = 2.9 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 3(\text{sys}) \text{ ns}$**

**OPERA:  $\delta t = 1.6 \pm 1.1(\text{stat}) \pm [+6.1, -3.7](\text{sys}) \text{ ns}$**

radiazione cosmica



quark



*Di cosa è fatta la "materia oscura"?*

*Da dove viene l' "energia oscura"?*

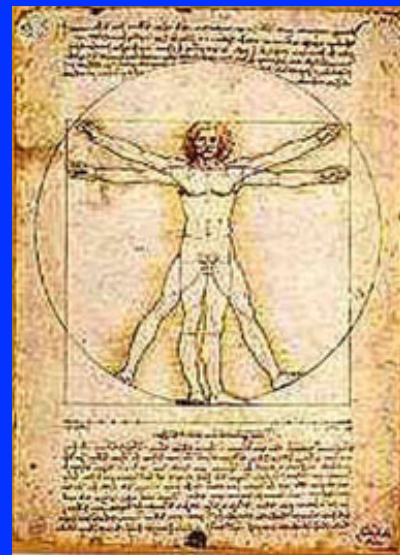
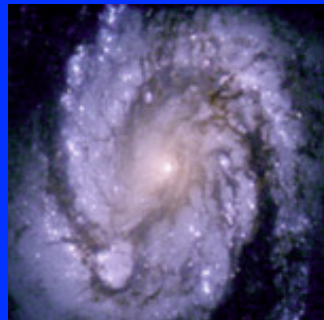
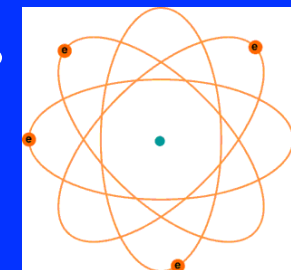
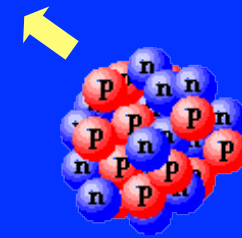
*Dove è finita l' antimateria nell' Universo?*

*Esiste una teoria più completa oltre il Modello Standard?*

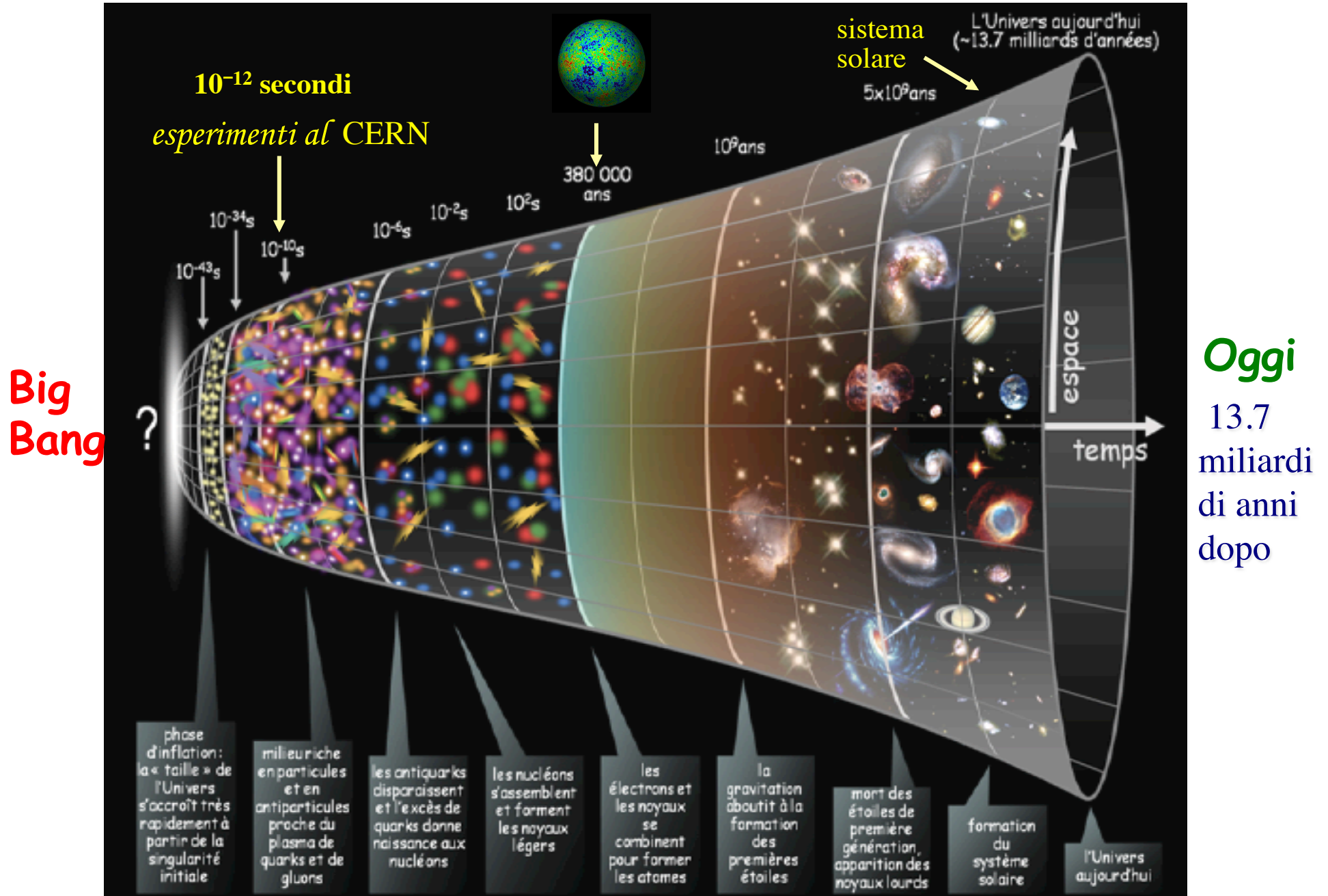
*Esistono altre dimensioni spaziali (nascoste)?*

.....

*Sorprese?*



# La storia dell'Universo



Oggi  
13.7  
miliardi  
di anni  
dopo



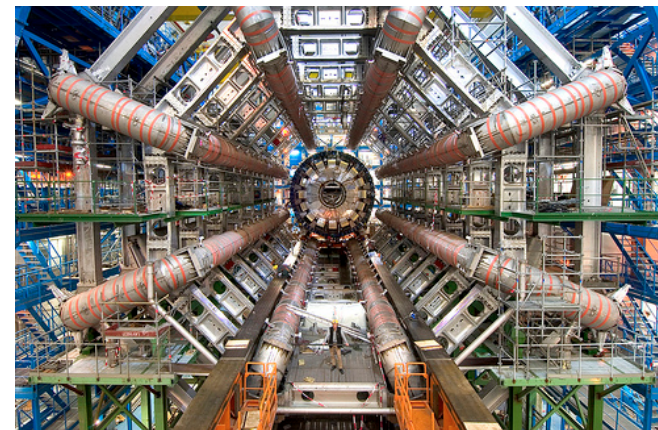
*LHC*

## Quanto costa?

**LHC:** 4 miliardi di euro  
(in 10 anni)

**Esperimenti:** 1 miliardo  
di euro (materiale)

**Bilancio del CERN:** 800 milioni di euro/anno,  
pagato dai paesi membri in proporzione al PIL  
(quota dell'Italia 13%)



*ATLAS*

*Nota: c'è un ritorno industriale per i Paesi contribuenti.*

*L'Italia ha ricevuto un ammontare in commesse superiore a quanto investito*

## *Per confronto...*

*Portaerei*



**Portaerei** (*classe Gerald Ford*):  
4.5 miliardi di euro

**Bombardiere B-2:** 750 milioni di euro

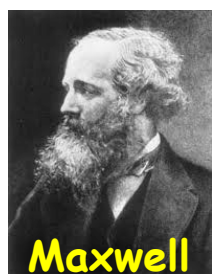
**Programma per la costruzione dei B-2:**  
> 30 miliardi di euro

*Bombardiere B-2*

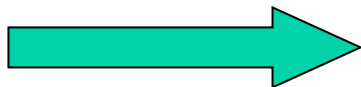


# A che cosa serve?

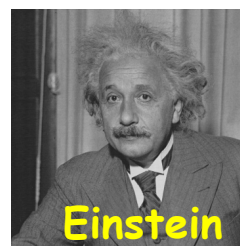
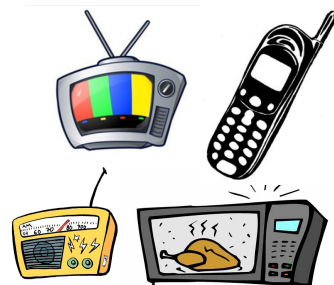
*Non sappiamo (ancora) a cosa potrebbe servire -in sé- la scoperta del bosone di Higgs  
... ma la “scienza pura” porta ad esiti a volte inaspettati*



*elettromagnetismo*



*scienza pura*



*relatività generale  
(e ristretta)*



*scienza pura*



Nell' '800, Faraday rispose al Ministro delle Finanze che gli chiedeva a cosa servissero le sue scoperte:

*“Non lo so, Signore, ma un giorno Lei potrà metterci sopra una tassa”*

Immaginate  
di essere all'  
inizio dell'800



*Volete risolvere il problema dell'illuminazione :  
investite il 2% del PIL per migliorare la candela,  
inventare la lampada a gas e il lume a petrolio*

*La ricerca applicata migliora la candela...*

*Intanto, gente come Volta, Faraday,  
Edison, Ampère... fanno ricerca di base*

*...ma solo la ricerca di base  
porta alla lampadina*





**Ma gli "effetti collaterali" di queste ricerche possiamo vederli già ora.**  
Infatti, per sfidare i limiti delle nostre conoscenze, dobbiamo spingere più in là le frontiere della tecnologia, con applicazioni nei campi più diversi

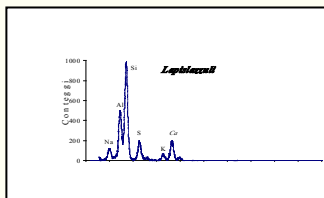
**Il Web e la Grid nell'informatica...**

**Gli usi dei rivelatori e degli acceleratori in tanti campi, per esempio la medicina (tra le più recenti la PET, l'adroterapia in centri come il CNAO)**

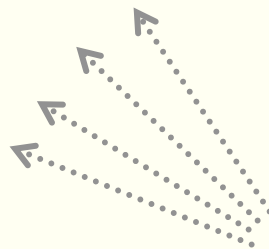
### *Un esempio di uso degli acceleratori*

Nel campo dei beni culturali...

*Radiation detection and spectral analysis*



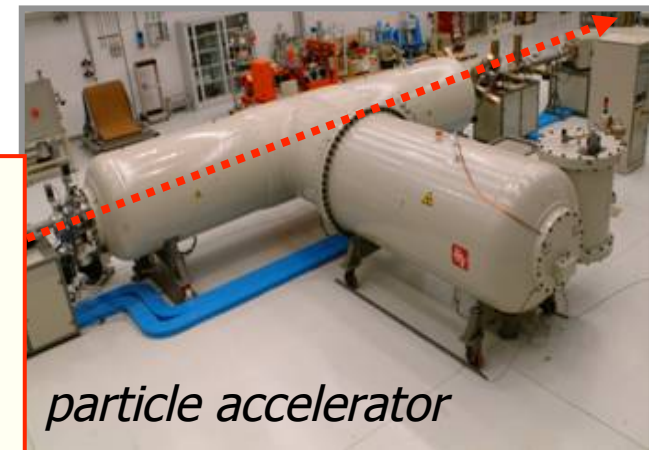
*Emission of radiation of characteristic energies (X-rays,  $\gamma$ , particles...)*



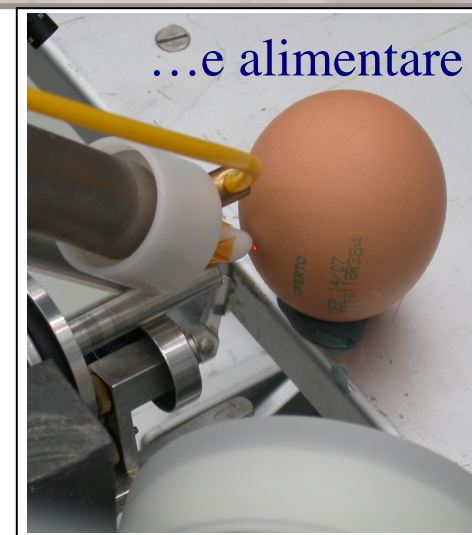
*particle beam*



*Object to analyse*



*particle accelerator*



*...e alimentare*

*Gli “effetti collaterali” positivi non riguardano soltanto il campo tecnologico*

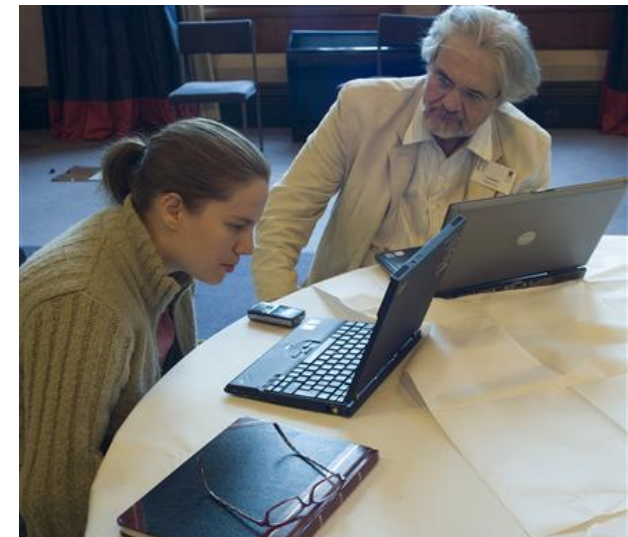
**Il CERN non è solo un laboratorio per la ricerca scientifica:  
è anche un laboratorio di sperimentazione “sociale”**



Nel lavoro, ognuno ha un campo preferito, ma si è coinvolti in molti aspetti del sistema  
Ogni giorno nuovi argomenti da studiare, nuove tecnologie da imparare e...inventare



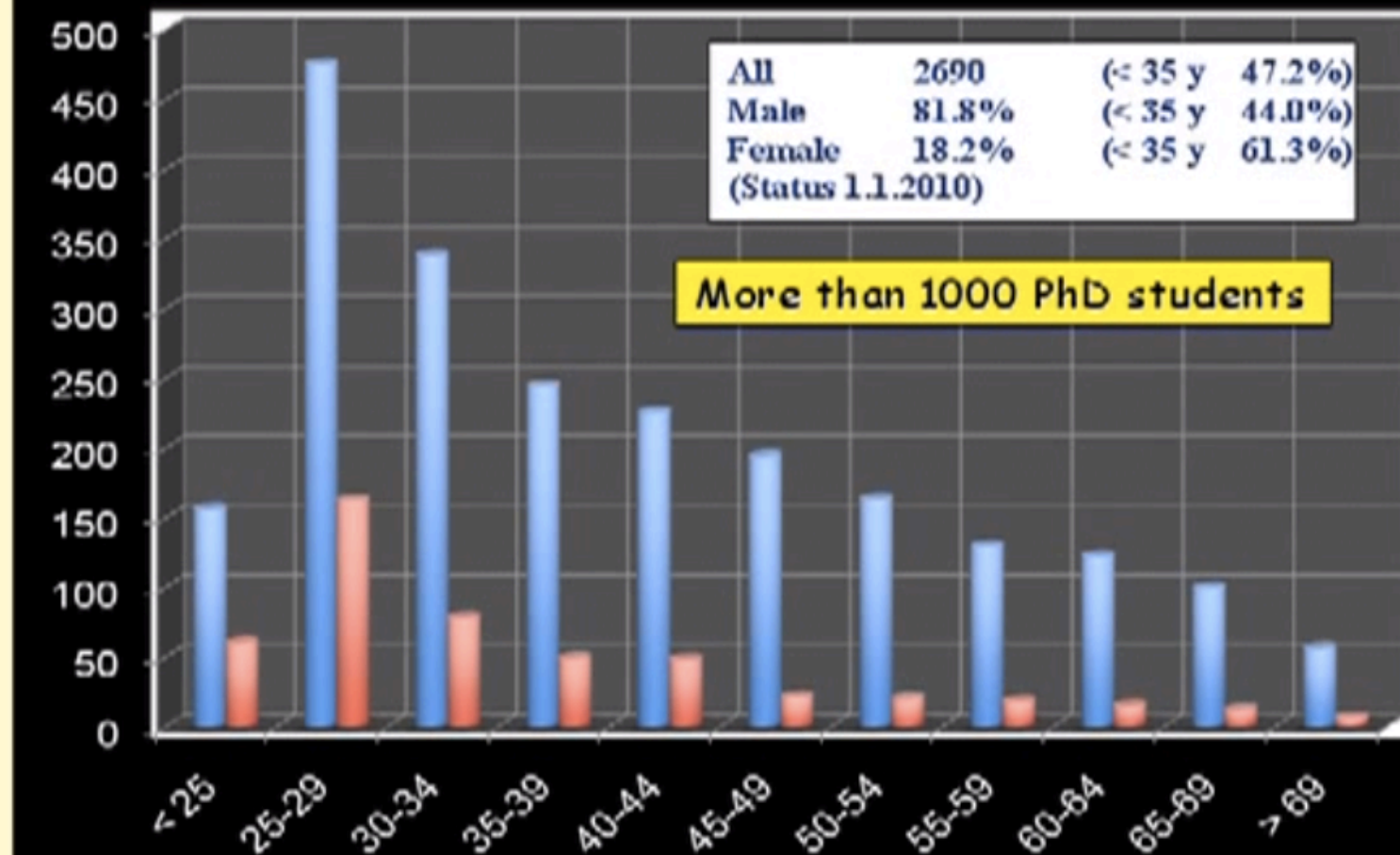
**Non ci sono segreti  
(per statuto):  
i risultati sono messi  
a disposizione  
di tutti**



L'atteggiamento mentale che si impara serve  
anche a chi, poi, va a fare un altro lavoro

La trasmissione di conoscenze tra  
generazioni è fondamentale

## Age distribution of the ATLAS population



Sur le terrain du futur institut nucléaire



Sous la conduite de M. A. Picot, les membres du Conseil européen pour la recherche nucléaire se sont rendus hier à Meyrin pour reconnaître le terrain où s'élèvera le Centre nucléaire (voir en Dernière heure)  
(Photo Freddy Bertrand, Genève)

La Suisse du 30 octobre 1953

## Il CERN è una delle prime cooperazioni europee

*“Abbiamo rivolto la nostra attenzione alla creazione di questo nuovo ente internazionale, un laboratorio o un istituto dove sia possibile fare ricerca al di là del quadro nazionale dei vari stati membri...”*

L.De Broglie (1949)

*Il CERN resta un laboratorio europeo, però ora la collaborazione tra i fisici è universale*



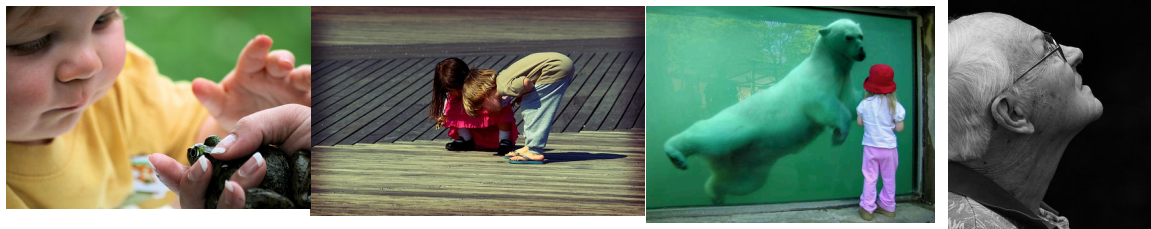
Vi è anche molta competizione. **Ma è la scienza che ne detta le regole.**

**Non contano età, anzianità di servizio, sesso, razza, credo politico, nazionalità: conta la competenza e il contributo di ognuno, senza barriere di lingua e di cultura**

*Il party degli studenti estivi israeliani e palestinesi (agosto 2007)*



**E, infine, la conoscenza ha valore in sè**



*La curiosità e il bisogno di esplorare il mondo fanno parte della natura umana*

*“Come è fatta la materia?  
Come ha avuto origine l’Universo, come si è evoluto?  
Qual è il nostro posto nella Natura?”*



**Richard P. Feynman**  
**The meaning of it all**  
(Il senso delle cose, Adelphi)

*Non si lavora (solo) per le applicazioni pratiche, ma per l’emozione della scoperta. Magari molti di voi lo sanno già; a quelli che non lo sanno mi è impossibile comunicare, in una conferenza, questo aspetto importantissimo, l’emozione, che è la vera molla dell’impresa scientifica .....*  
*Non si può capire la Scienza se non la si conosce e si apprezza per quello che è: la grande avventura dei nostri tempi. Non potete dirvi cittadini del nostro tempo se non sentite quanto è meravigliosa ed esaltante questa avventura.*