



International Particle  
Physics Outreach Group

INTERNATIONAL



**MASTERCLASSES**

hands on particle physics



Hands on Particle Physics Masterclasses

**INTL. DAY OF WOMEN AND GIRLS IN SCIENCE**

# Masterclass Girls 2022

## INTRODUZIONE ALLA FISICA DELLE PARTICELLE

**ELVIRA ROSSI**

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI NAPOLI FEDERICO II E INFN

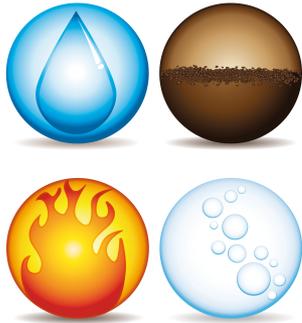


<https://physicsmasterclasses.org>  
<http://www.na.infn.it/it/masterclass>

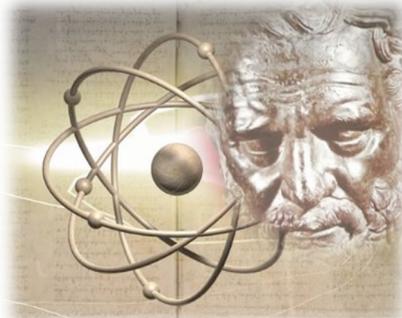
# COSA STUDIA LA FISICA DELLE PARTICELLE?

La Fisica delle Particelle (o Fisica Subnucleare o Fisica delle Alte Energie) studia i costituenti ultimi della materia e le loro interazioni

## Empedocle



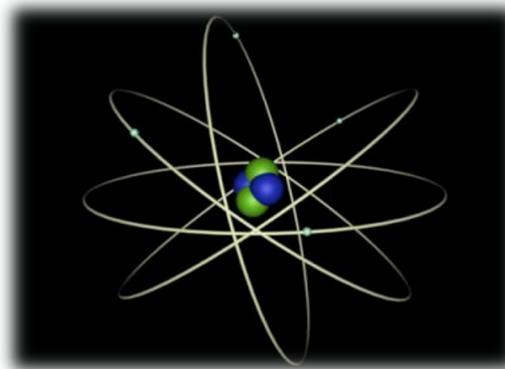
## Democrito



## Mendeleev

A periodic table of elements with various annotations. A red box highlights Oxygen (O) with the text "Most dangerous element in the whole Universe". A red box highlights Chkornium (Ch) with the text "1000 Ch Chkornium". Other elements are labeled with their symbols and names. The table includes group numbers, periods, and symbols for various elements.

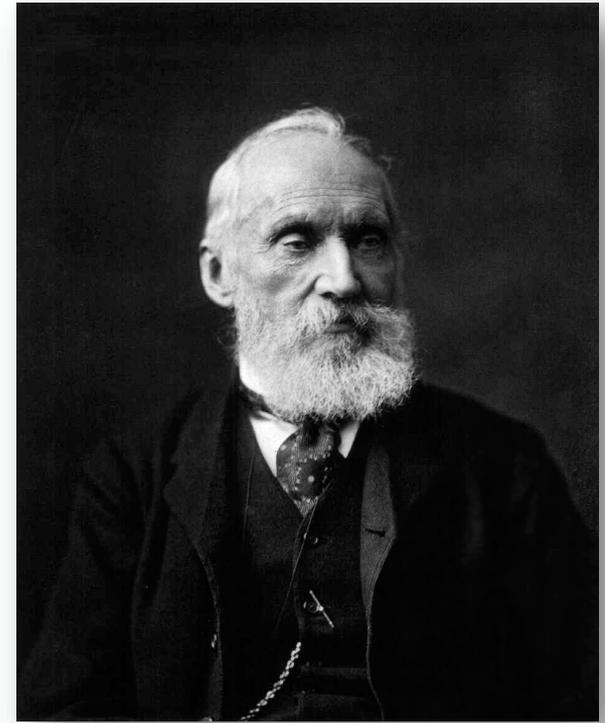
## Atomi



# ...LE ULTIME PAROLE FAMOSE!

“There is nothing new to be discovered in physics now. All that remains is more and more precise measurement.”

Lord Kelvin, 1900



Nei 30 anni successivi si svilupparono una serie di teorie che costituiranno le fondamenta della Fisica Moderna: Relatività e Meccanica Quantistica

# LE GRANDI DOMANDE DELLA FISICA FONDAMENTALE

- ★ Qual è la natura dello Spazio e del Tempo?
- ★ Quali sono i costituenti fondamentali della materia?
- ★ E quali le forze che li governano?
- ★ Qual è la storia dell'Universo?
- ★ E quali sono le leggi che lo regolano?

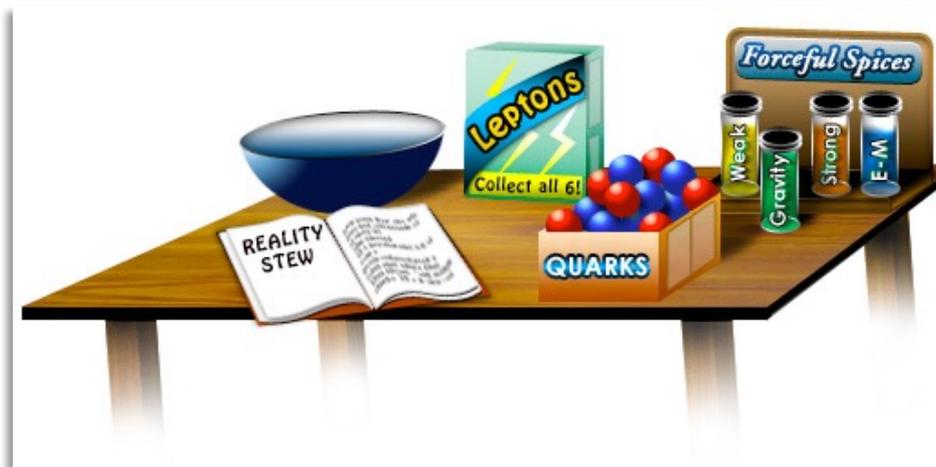
Le risposte sono note solo in parte...



# IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

In realtà nel corso della storia i fisici sono riusciti a individuare una serie di particelle (**particelle elementari**) e di forze (**interazioni**) fondamentali per descrivere la maggior parte dei fenomeni

Il **Modello Standard** è ad oggi la teoria che descrive le particelle elementari e le loro interazioni fino all'energia di centinaia di GeV.



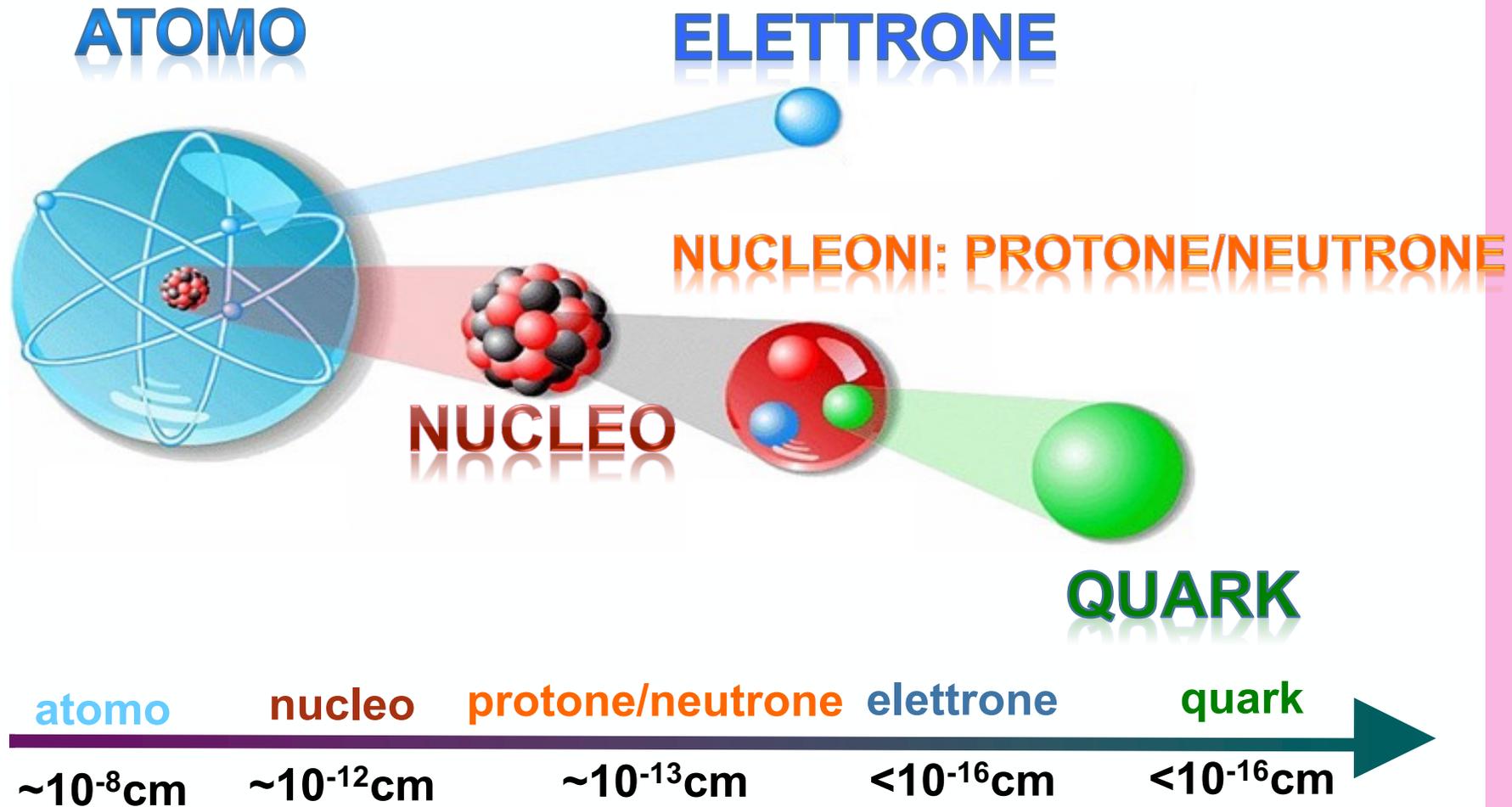
## ELETTRONVOLT

$$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene mosso nel vuoto tra due punti tra i quali vi è una differenza di 1 volt.

Anche le masse delle particelle le misuriamo in eV!  
(Unità di misura naturali in cui  $c=1$ )

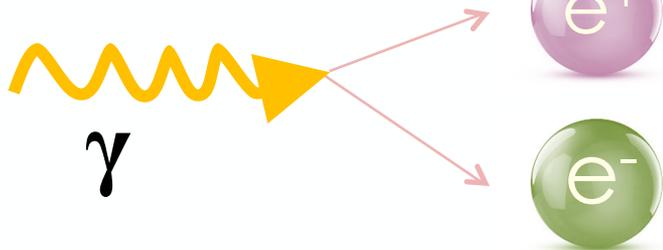
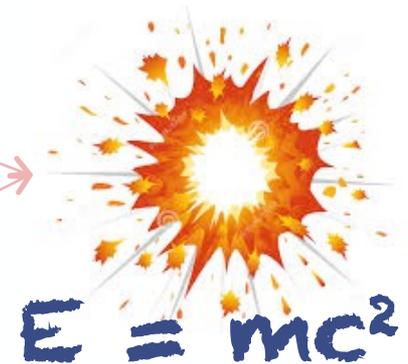
# LE PARTICELLE



# ANTIPARTICELLE

La **teoria quantistica dei campi** prevede che per ogni particella esista una copia del tutto identica ma con carica e altre caratteristiche opposte

Quando una particella ed un'antiparticella interagiscono si annichilano producendo energia



Anche il processo inverso è possibile: un fotone "converte" in una coppia elettrone-positrone



Esistono prove sperimentali che mostrano l'esistenza di antimateria!

**Domanda fondamentale:** perché l'Universo è composto prevalentemente di materia anziché di antimateria?

# LEPTONI

Esistono 6 leptoni divisi in 3 famiglie con le rispettive antiparticelle

LEPTONS	mass →	0.511 MeV/c <sup>2</sup>	105.7 MeV/c <sup>2</sup>	1.777 GeV/c <sup>2</sup>
	charge →	-1	-1	-1
	spin →	1/2	1/2	1/2
		<b>e</b>	<b>μ</b>	<b>τ</b>
		electron	muon	tau
		<2.2 eV/c <sup>2</sup>	<0.17 MeV/c <sup>2</sup>	<15.5 MeV/c <sup>2</sup>
	0	0	0	
	1/2	1/2	1/2	
	<b>ν<sub>e</sub></b>	<b>ν<sub>μ</sub></b>	<b>ν<sub>τ</sub></b>	
	electron neutrino	muon neutrino	tau neutrino	

✓ Spin 1/2

✓ **elettrone, muone e tau** con carica elettrica negativa

✓ **neutrini** con carica elettrica neutra



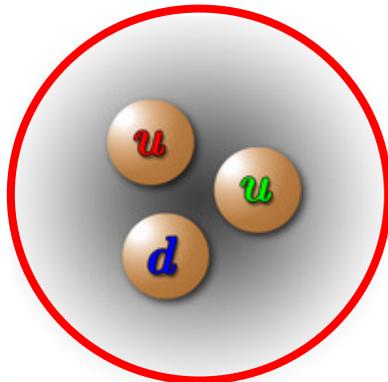
# QUARK

Nel 1963 Murray Gell-Mann propose un modello a quark che prevedeva l'esistenza dei quark **up (u)**, **down (d)** e **strange (s)**

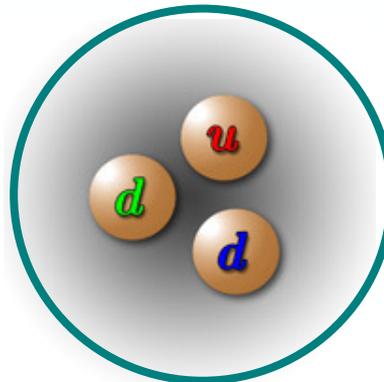
quark  $u, d, s$   $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$  antiquark

- **Spin**  $\frac{1}{2}$  quindi fermioni
- **Carica frazionaria:** Up  $\frac{2}{3}e$ , Down e Strange  $-\frac{1}{3}e$
- Possono esistere in tre stati fisici detti **colore**: **rosso**, **blu** e **verde** (e anticolori!)

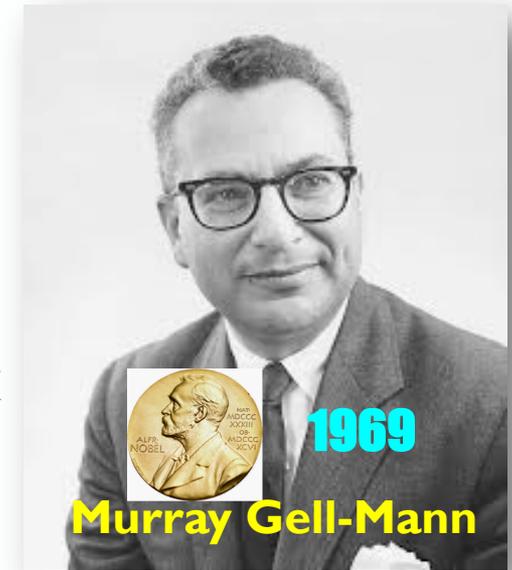
**Protone**



**Neutrone**



Siamo fatti di  
elettroni, quark  
up e down!



# QUARK

Attualmente sono stati scoperti **6 tipi di quark**, divisi in **3 famiglie con le rispettive antiparticelle**

mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	$2/3$	$2/3$	$2/3$
spin →	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	$-1/3$	$-1/3$	$-1/3$
	$1/2$	$1/2$	$1/2$
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom

L'unione tra quark costituisce una serie di particelle dette **adroni**

## ★ barioni

- spin semintero
- formati da tre quark
- protone, neutrone

## ★ mesoni

- spin intero
- formati da coppie quark-antiquark

**Gli adroni hanno colore complessivo nullo**

## QUARKS



### UP QUARK

A teeny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the down quark.



### CHARM QUARK

A charming second generation quark.



### TOP QUARK

This heavyweight champion doesn't live long enough to make friends with anyone.

### DOWN QUARK

A tiny little point inside the proton and neutron, it is friends forever with the up quark.



### STRANGE QUARK

What's so strange about this second generation quark?



### BOTTOM QUARK

This third generation quark is puttin' on the pounds.



# FORZE E CAMPI

Nella teoria quantistica dei campi le interazioni avvengono per scambio di una o più particelle dette **virtuali**. Queste particelle sono emesse e riassorbite dalle particelle interagenti

- il **raggio d'azione** indica la distanza entro la quale la forza considerata interagisce
- L'**intensità** delle interazioni fornisce i rapporti di forze tra queste
- I **diagrammi di Feynman** sono rappresentazioni efficaci delle interazioni microscopiche

**Le particelle mediatrici sono bosoni!**



«Che un corpo possa agire su un altro corpo a distanza senza la mediazione di null'altro è per me una così grande assurdità che ritengo che nessuna persona con un minimo di competenza nelle questioni filosofiche vi possa credere.»  
(Isaac Newton)

# LE FORZE FONDAMENTALI

Interazione	Mediatore	Magnitudine relativa	Andamento asintotico	Raggio d'azione	Agisce su
Interazione forte	gluone	$10^{38}$	$r$	$1.4 \cdot 10^{-15} \text{ m}$	Quark e Gluoni
Interazione elettromagnetica	fotone	$10^{36}$	$\frac{1}{r^2}$	$\infty$	Quark, leptoni e bosoni carichi
Interazione debole	Bosoni W e Z	$10^{25}$	$\frac{e^{-Mr}}{r}$	$10^{-18} \text{ m}$	Quark e leptoni
Interazione gravitazionale	gravitone (?)	$10^0=1$	$\frac{1}{r^2}$	$\infty$	Tutte le particelle con massa



Gravity



Weak



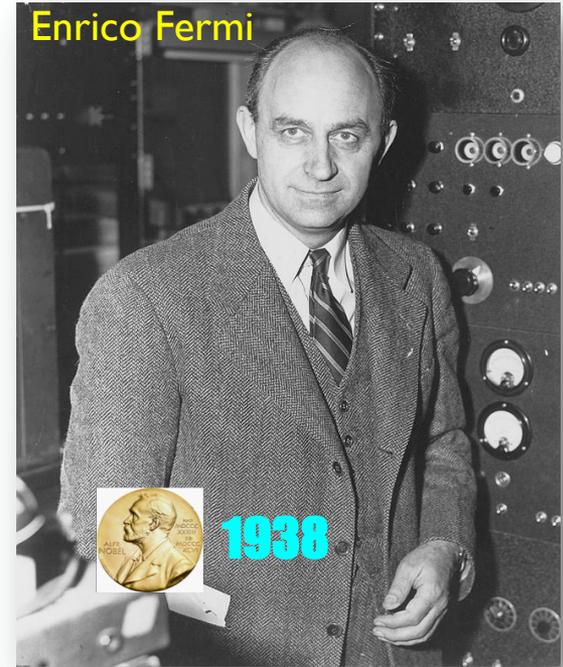
Electromagnetic  
(Electroweak)



Strong

# LA FORZA DEBOLE

- È responsabile dei decadimenti delle particelle e dei decadimenti dei nuclei
- Tutte le particelle elementari interagiscono tramite forza debole
- **Le particelle mediatrici dell'interazione debole sono i bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$**
- Teorizzata inizialmente da Enrico Fermi nel 1933 e poi sviluppata negli anni a seguire



80 e 90 volte più grandi di un protone!

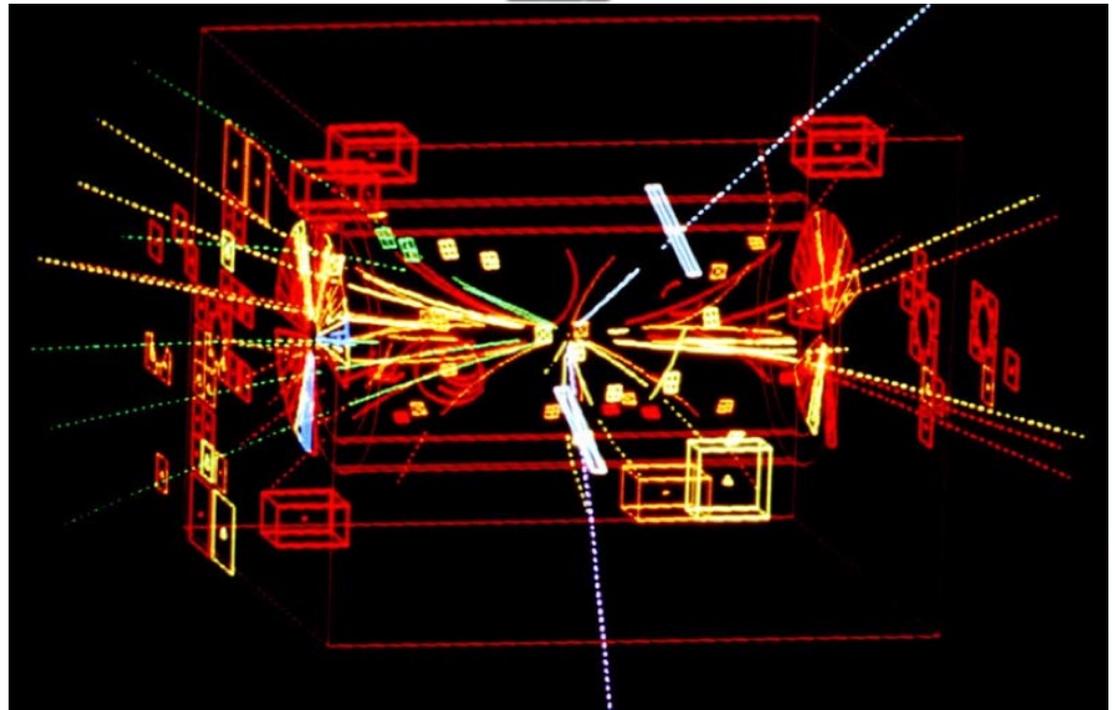
# Z: UNA PARTICELLA DA NOBEL

Cinque "eventi" vanno bene per vincere un premio Nobel, non per una misura di precisione!

Idea: costruire un acceleratore di elettroni e positroni per produrre milioni e milioni di bosoni Z:

$$e^+e^- \rightarrow Z$$

LEP



C. Rubbia e S. Van De Meer,  
premi nobel nel 1984 per la  
scoperta della Z e della W

# L'INTERAZIONE FORTE

**Perchè la forza di repulsione tra i protoni non fa esplodere il nucleo? Perchè c'è l'interazione forte!**

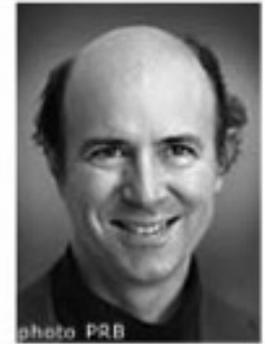
- Coinvolge solo i quark e gluoni
- Mediata dai **gluoni** (ce ne sono 8), che trasportano una carica di “colore”, da cui **Cromodinamica Quantistica**
  - I gluoni hanno massa nulla



David J. Gross



H. David Politzer



Frank Wilczek

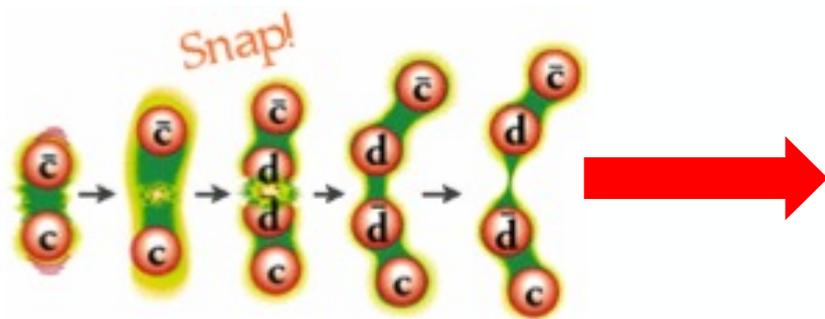
Il gluone



**È l'interazione più forte!**

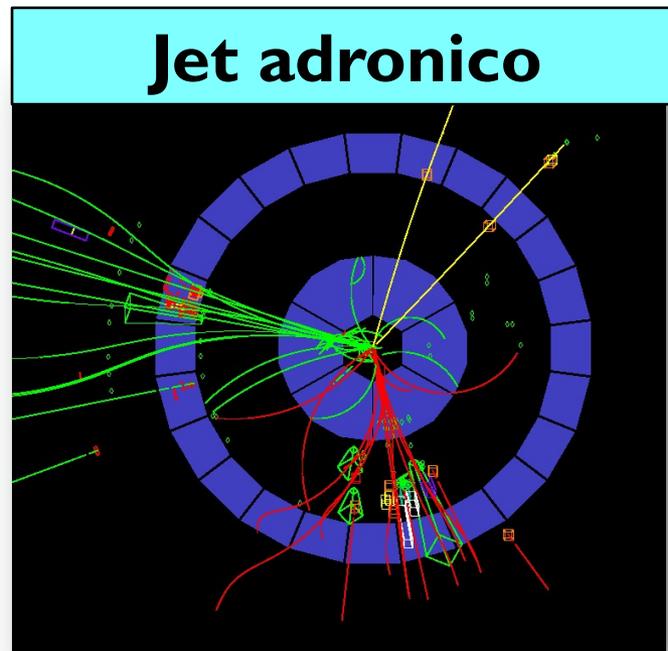
# CROMODINAMICA QUANTISTICA

I quark 'liberi' non esistono: possono trovarsi solo in stati legati in coppie quark-antiquark (**mesoni**) o in tripletti di quark (**barioni**, come il protone o il neutrone)



Adronizzazione: a partire da un quark iniziale si crea una "cascata" di quark che si combinano a formare particelle (adroni)

Quanto più i quark sono lontani tanto più la loro forza d'interazione è grande finché diviene energeticamente favorita la creazione di una coppia quark-antiquark





# FOTO DI GRUPPO

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \partial_\mu \psi_\ell + \sum_{\ell=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \partial_\mu \psi_\ell + \sum_i \sum_{a=u,c,t} i\bar{\psi}_{q_i} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{q_i} + \sum_i \sum_{a'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'_i} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{q'_i} - \frac{1}{2}(\partial_\mu W_\nu^+ - \partial_\nu W_\mu^+)(\partial^\mu W^{-\nu} - \partial^\nu W^{-\mu}) - \frac{1}{4}(\partial_\mu Z_\nu - \partial_\nu Z_\mu)(\partial^\mu Z^\nu - \partial^\nu Z^\mu) \\
 & - \frac{1}{4}(\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)(\partial^\mu A^\nu - \partial^\nu A^\mu) - \frac{1}{4} \sum_{a=1}^8 (\partial_\mu G_\nu^a - \partial_\nu G_\mu^a)(\partial^\mu G^{a\nu} - \partial^\nu G^{a\mu}) + \frac{1}{2} \partial_\mu h \partial^\mu h - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell - \sum_i \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_{qV}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{qV} \psi_{qV} - \sum_i \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'V}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'V} \psi_{q'V} \\
 & - \left(\frac{gv}{2}\right)^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{2} \left(\frac{gv}{2 \cos \theta_W}\right)^2 Z_\mu Z^\mu - \frac{1}{2} (-2m^2)^2 h^2 + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left( \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu (4 \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_\ell Z_\mu + \sum_{\ell'=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\ell'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell'} Z_\mu \right) \\
 & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left( \sum_i \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3} \sin^2 \theta_W - \gamma^5) \psi_{qV} Z_\mu + \sum_i \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'V} \gamma^\mu (\frac{4}{3} \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_{q'V} Z_\mu \right) + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left( \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\ell V} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^+ + \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{\ell V} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^- \right) \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left( \sum_i \sum_{q=u,c,t} V_{q\ell} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^+ + \sum_i \sum_{q=u,c,t} V_{q\ell}^* \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^- \right) + g_{em} \left( - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \psi_\ell A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu \psi_{qV} A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'V} \gamma^\mu \psi_{q'V} A_\mu \right) \\
 & + g_s \left( \sum_{i,j} \sum_a \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu \psi_{qV} G_\mu^a T_{ij}^a + \sum_{i,j} \sum_a \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'V} \gamma^\mu \psi_{q'V} G_\mu^a T_{ij}^a \right) - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell h - \sum_i \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_{qV}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{qV} \psi_{qV} h - \sum_i \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'V}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'V} \psi_{q'V} h \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left( \sum_i \sum_{q=u,c,t} V_{q\ell} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^+ + \sum_i \sum_{q=u,c,t} V_{q\ell}^* \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{\ell V} W_\mu^- \right) + g_{em} \left( - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_\ell \gamma^\mu \psi_\ell A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu \psi_{qV} A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'V} \gamma^\mu \psi_{q'V} A_\mu \right) \\
 & + g_s \left( \sum_{i,j} \sum_a \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_{qV} \gamma^\mu \psi_{qV} G_\mu^a T_{ij}^a + \sum_{i,j} \sum_a \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'V} \gamma^\mu \psi_{q'V} G_\mu^a T_{ij}^a \right) - \sum_{\ell=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_\ell}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_\ell \psi_\ell h - \sum_i \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_{qV}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{qV} \psi_{qV} h - \sum_i \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'V}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'V} \psi_{q'V} h \\
 & + ig_{em} [\partial_\mu A_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} A^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} A^\mu - \partial_\mu A_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} A^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} A^\nu] \\
 & + ig \cos \theta_W [\partial_\mu Z_\nu W^{-\mu} W^{+\nu} + \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\nu} Z^\mu + \partial_\mu W_\nu^- W^{+\nu} Z^\mu - \partial_\mu Z_\nu W^{-\nu} W^{+\mu} - \partial_\mu W_\nu^+ W^{-\mu} Z^\nu - \partial_\mu W_\nu^- W^{+\mu} Z^\nu] + \frac{g^2 v}{2} W_\mu^+ W^{-\mu} h + \frac{g^2 v}{4 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h - \lambda v h^3 \\
 & + g_{em}^2 [W_\nu^+ W^{-\nu} A_\nu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} A_\nu A^\nu] + g^2 \cos^2 \theta_W [W_\nu^+ W^{-\nu} Z_\nu Z^\nu - W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu Z^\nu] + g^2 \cos \theta_W \sin \theta_W [2W_\mu^+ W^{-\mu} Z_\nu A^\nu - W_\mu^+ W^{-\nu} A_\nu Z^\mu - W_\mu^+ W^{-\nu} A^\mu Z_\nu] \\
 & + \frac{g^2}{2} [W_\mu^- W^{-\mu} W_\nu^+ W^{+\nu} - W_\mu^- W^{+\mu} W_\nu^- W^{-\nu}] + \frac{g^2}{4} W_\mu^+ W^{-\mu} h^2 + \frac{g^2}{8 \cos^2 \theta_W} Z_\mu Z^\mu h^2 - \frac{\lambda}{4} h^4 - \frac{g_s}{2} \sum_{a,b,c} f^{abc} (\partial_\mu G^{a\nu} - \partial_\nu G_\mu^a) G^{\mu b} G^{\nu c} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{a,b,c} f^{abc} f^{ade} G_\mu^b G_\nu^c G_\mu^d G_\nu^e
 \end{aligned}$$

$$g_{em} = g \sin \theta_W, \quad v^2 = \frac{-m^2}{\lambda} \quad (m^2 < 0, \lambda > 0), \quad m_\ell = \frac{\lambda_\ell v}{\sqrt{2}}, \quad m_q = \frac{\lambda_{qV} v}{\sqrt{2}}, \quad m_W = \frac{gv}{2}, \quad m_Z = \frac{gv}{2 \cos \theta_W}, \quad m_h = \sqrt{-2m^2}$$



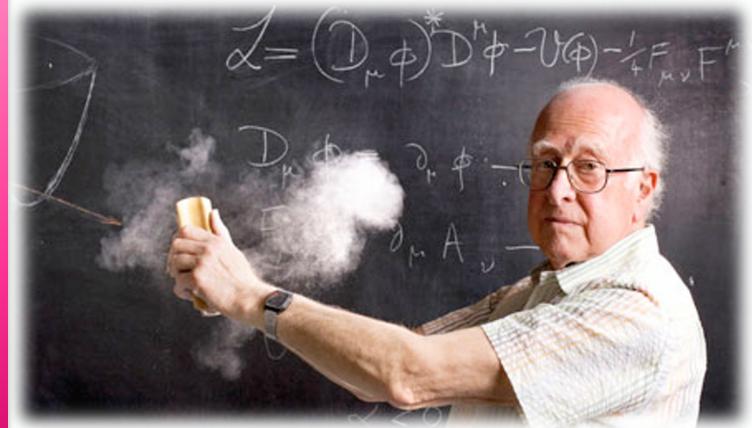
# MANCA ANCORA QUALCOSA...

Nel Modello Standard però, non c'è modo di spiegare perché le particelle hanno una massa:

Come il fotone, dovrebbero sempre viaggiare alla velocità della luce

Ma il mondo non è fatto così: le particelle elementari ed anche i mediatori delle forze hanno una massa!

Il Prof. Higgs nel 1964 ed indipendentemente anche i Prof. Brout ed Englert ipotizzarono un nuovo campo (e quindi una nuova particella) che dava massa a tutte le altre particelle mediante una interazione: le particelle che interagiscono con il campo di Higgs vengono rallentate e acquistano massa  
→ maggiore è l'interazione maggiore sarà la sua massa



# Come funziona il meccanismo di Higgs?

**Il campo di Higgs è come una stanza piena di persone che chiacchierano**



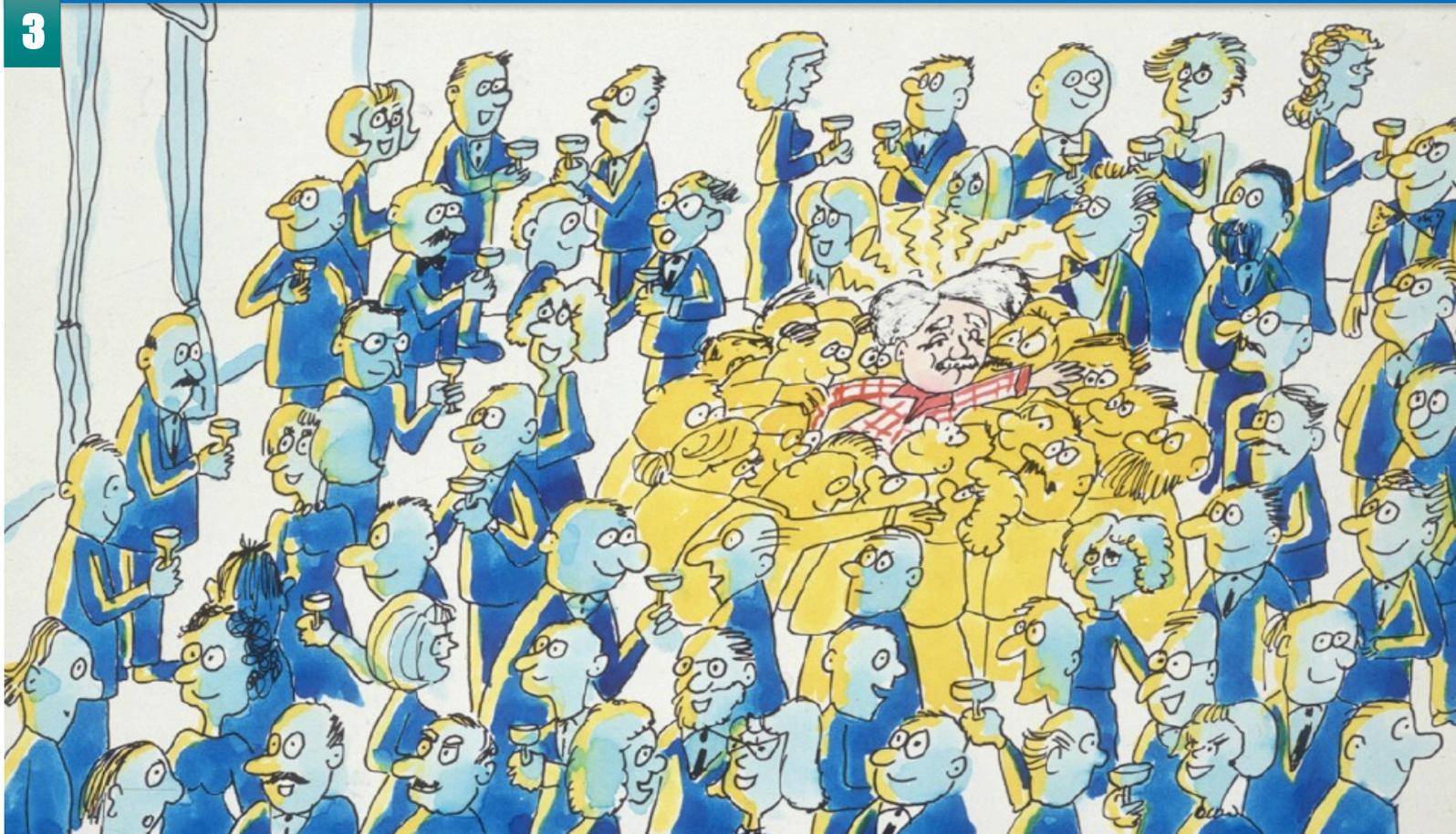
**Se arriva una persona famosa attirerà verso di sé i suoi ammiratori**



# COME FUNZIONA IL MECCANISMO DI HIGGS?

**Le persone si addensano vicino a lui facendo aumentare la sua massa proprio come accade ad una particella che attraversa il campo di Higgs**

3



# COME FUNZIONA IL MECCANISMO DI HIGGS?

**Se invece non arriva una persona famosa ma giunge in sala solo un pettegolezzo...**



**Le persone si addenseranno ma solo tra loro formando dei gruppi. Questo gruppo di persone così creato è analogo al bosone di Higgs che viene creato da piccole perturbazioni del campo di Higgs**



# L'ANNUNCIO DELLA SCOPERTA: 4 LUGLIO 2012

Il 4 Luglio le collaborazioni ATLAS e CMS hanno annunciato la scoperta di una nuova particella con massa  $\sim 125$  GeV prodotta nelle collisioni protone-protone dell'acceleratore LHC presso il CERN di Ginevra

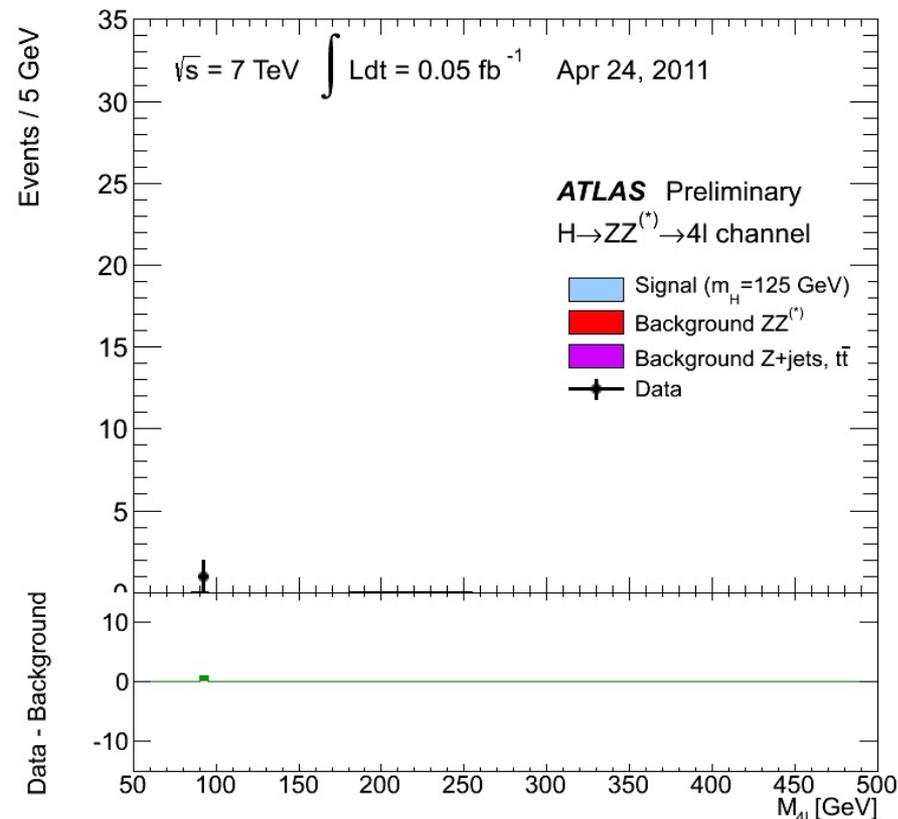


# HIGGS IN ATLAS

Produrre un bosone di Higgs è un evento raro...

Ogni secondo ho 40 milioni di collisioni

Ogni ora produco un evento di Higgs!



# PREMIO NOBEL PER LA FISICA 2013

## Premio Nobel per la Fisica 2013: Prof. Englert e Prof. Higgs

*“Per la scoperta teorica di un meccanismo che contribuisce alla comprensione dell’origine delle masse delle particelle subatomiche e che è stato recentemente confermato dalla scoperta della particella fondamentale che il meccanismo predice da parte degli esperimenti ATLAS e CMS al LHC al CERN”*

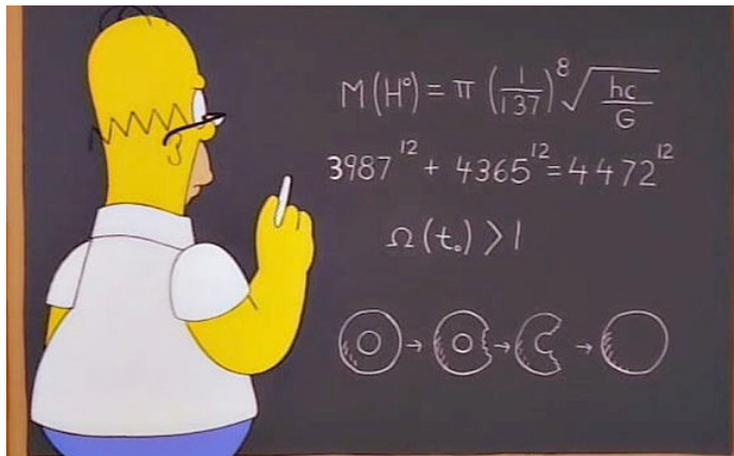


2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert  
Peter W. Higgs



<https://www.youtube.com/watch?v=fEooq9cl0y8>



# Persone che hanno lavorato e lavorano sull'Higgs nell'esperimento ATLAS

Atene 2011



Parigi 2012



Roma 2013



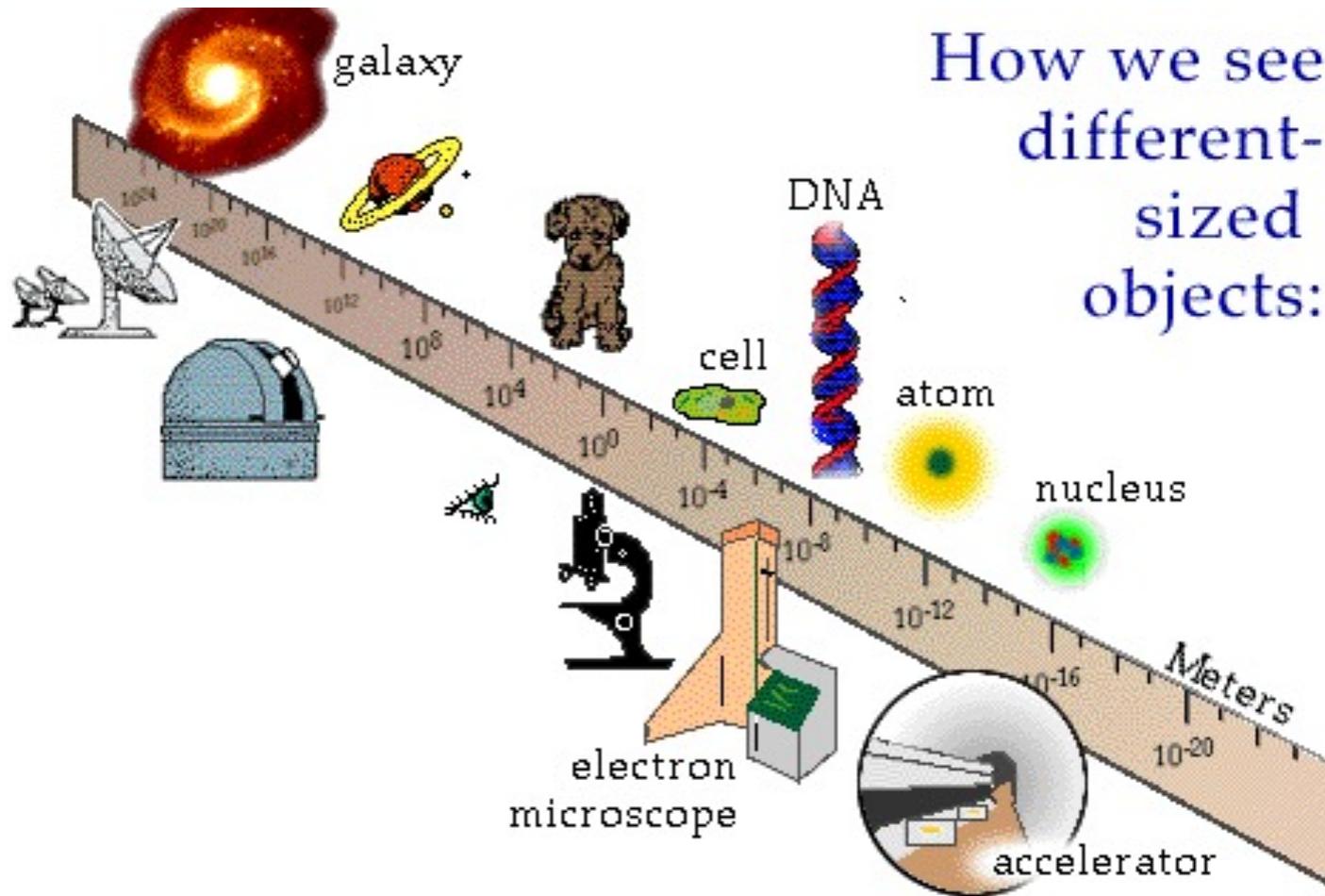
# LA SCOPERTA: LA FESTA AL CERN



# LA SCOPERTA: LA FESTA AL CERN



# COME VEDIAMO OGGETTI DI DIMENSIONI DIVERSE?



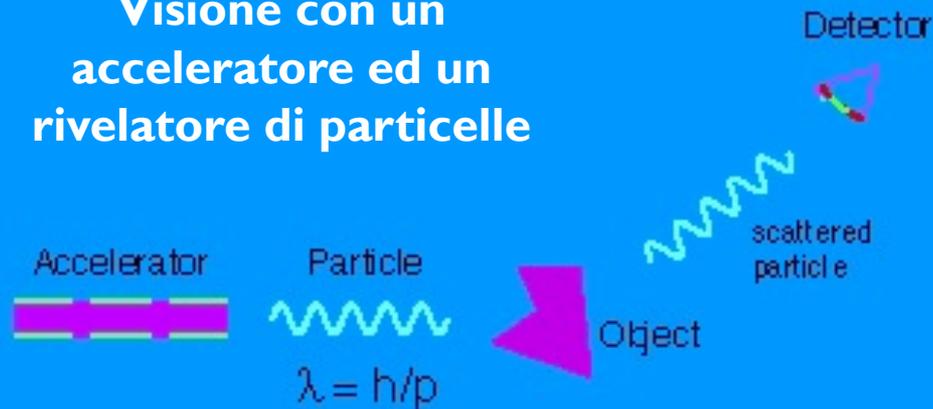
al di sotto delle dimensioni atomiche utilizziamo gli urti tra particelle e studiamo come queste vengono 'deviate' (e se ne vengono prodotte di nuove....)

# PERCHÉ ACCELERARE LE PARTICELLE?

## Visione con una lampada e gli occhi

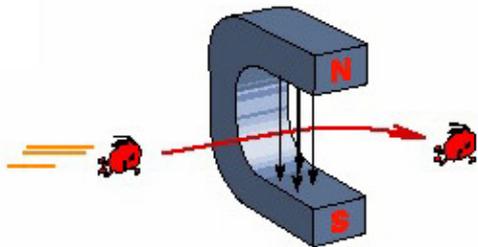
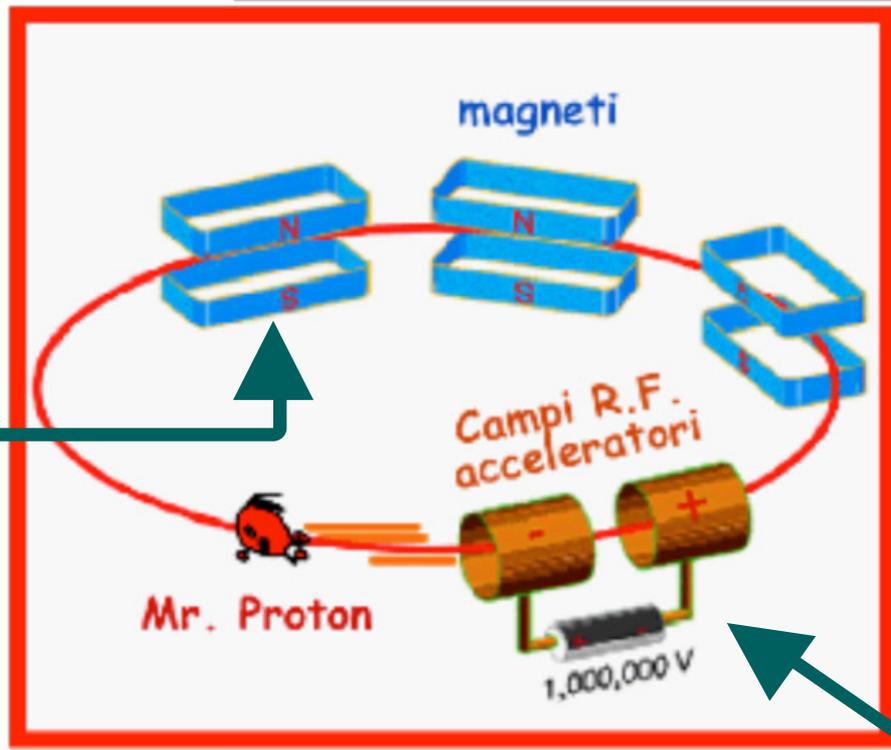


## Visione con un acceleratore ed un rivelatore di particelle

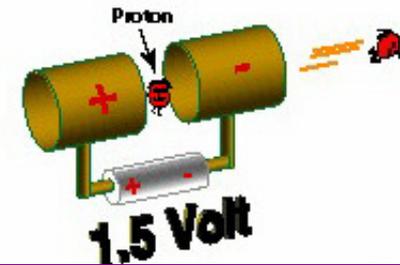


Aumentando l'energia della particella migliora la risoluzione con la quale si "vede" l'oggetto

# ACCELERATORI



**Campo magnetico:  
curva**



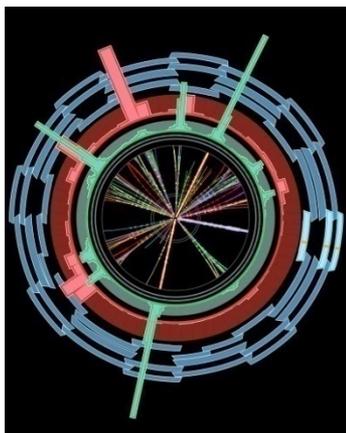
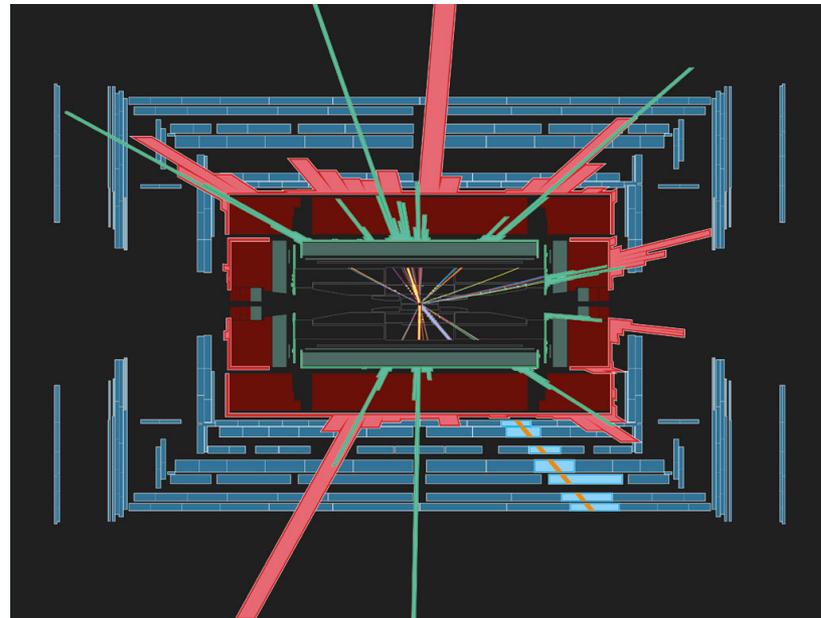
**Campo elettrico:  
accelera**

# A COSA SERVONO?

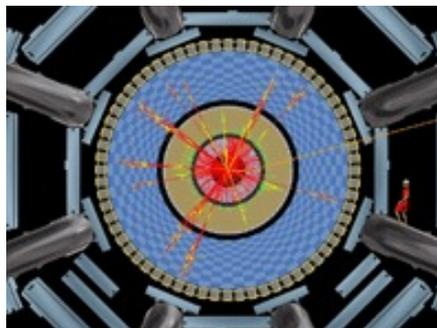
'vedere' le particelle  
prodotte dalle  
interazioni@LHC



3D-100Mpx-  
~100.000 foto/s



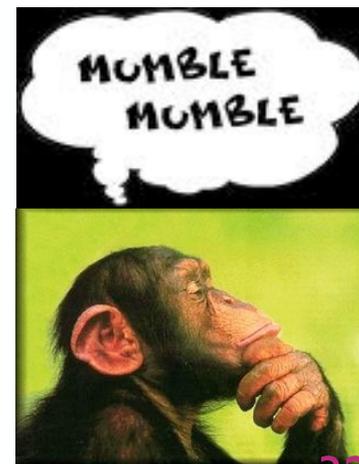
scegliere gli eventi interessanti....



conservarli

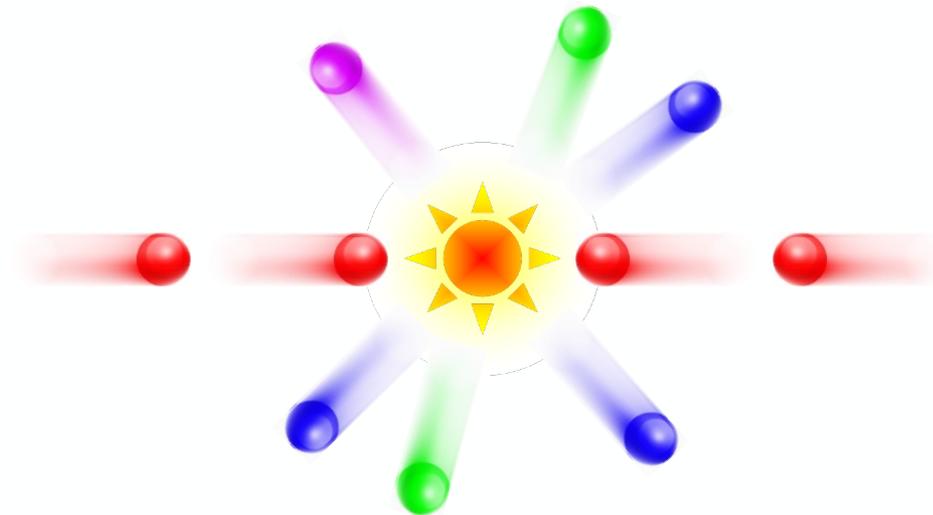


per l'analisi fisica successiva



# MA COME SI SCOPRONO LE PARTICELLE?

- Una volta solo grazie allo studio della radiazione cosmica
- Oggi siamo in grado di creare nuove particelle in laboratorio, grazie agli acceleratori di particelle



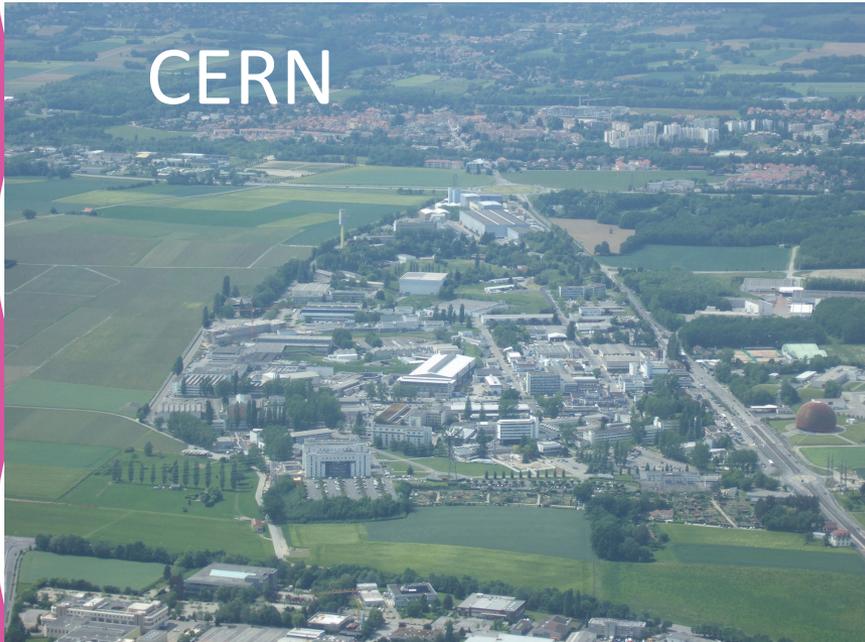
$$E = mc^2$$

**Sappiamo che è possibile convertire l'energia in massa, quindi a partire da particelle più leggere, come elettroni o protoni possiamo creare particelle molto più pesanti**



# CERN E INFN

European Organization for Nuclear Research  
Istituto Nazionale di fisica Nucleare

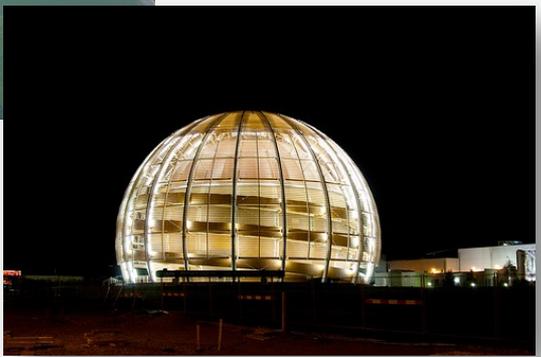


## © Lavorano al CERN:

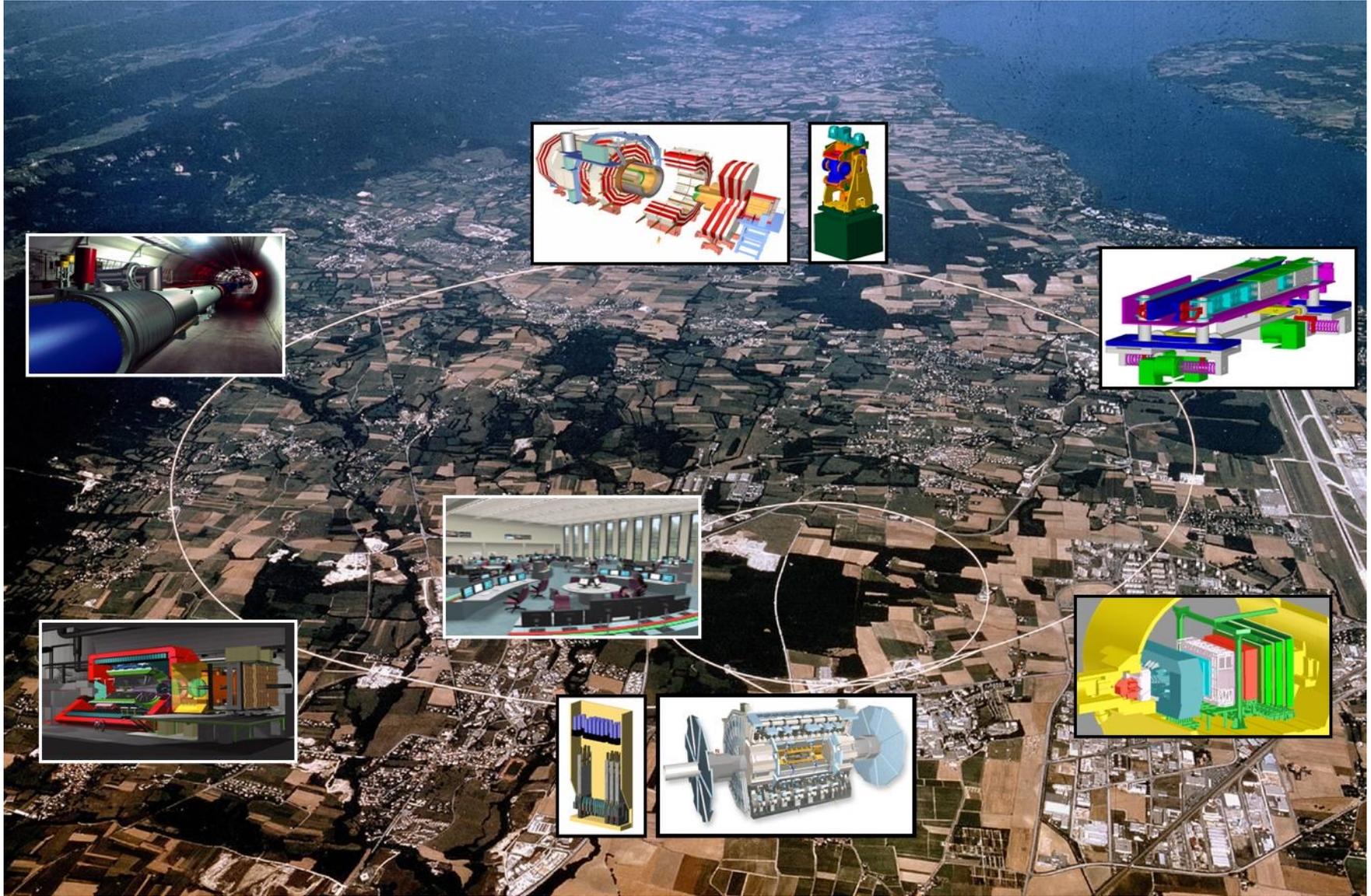
- ✧ 15000 persone in totale (scienziati, tecnici, amministrativi, etc...)
- ✧ 11200 scienziati provenienti da 69 nazioni



# IL CERN



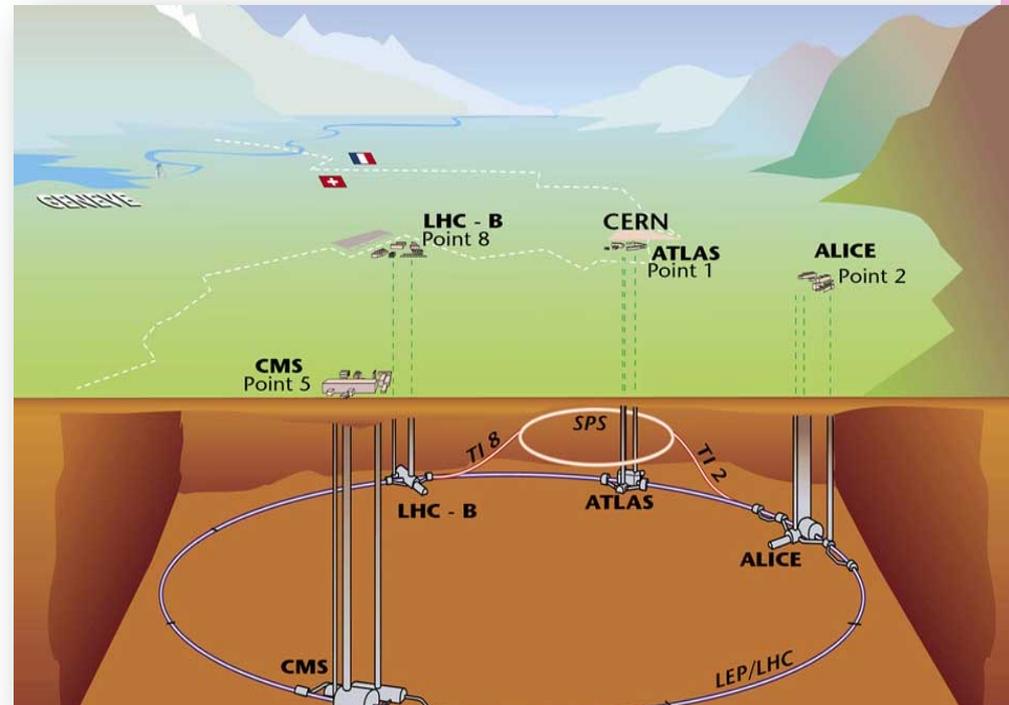
# LARGE HADRON COLLIDER(LHC)



# LARGE HADRON COLLIDER

- Ad LHC si fanno collidere fasci di protoni ad energie mai raggiunte prima (Run 1 7/8 TeV, Run 2 14 TeV)
- Dai prodotti di queste collisioni studiamo il funzionamento delle interazioni
- 4 esperimenti principali: **ALICE, ATLAS, CMS, LHCb**

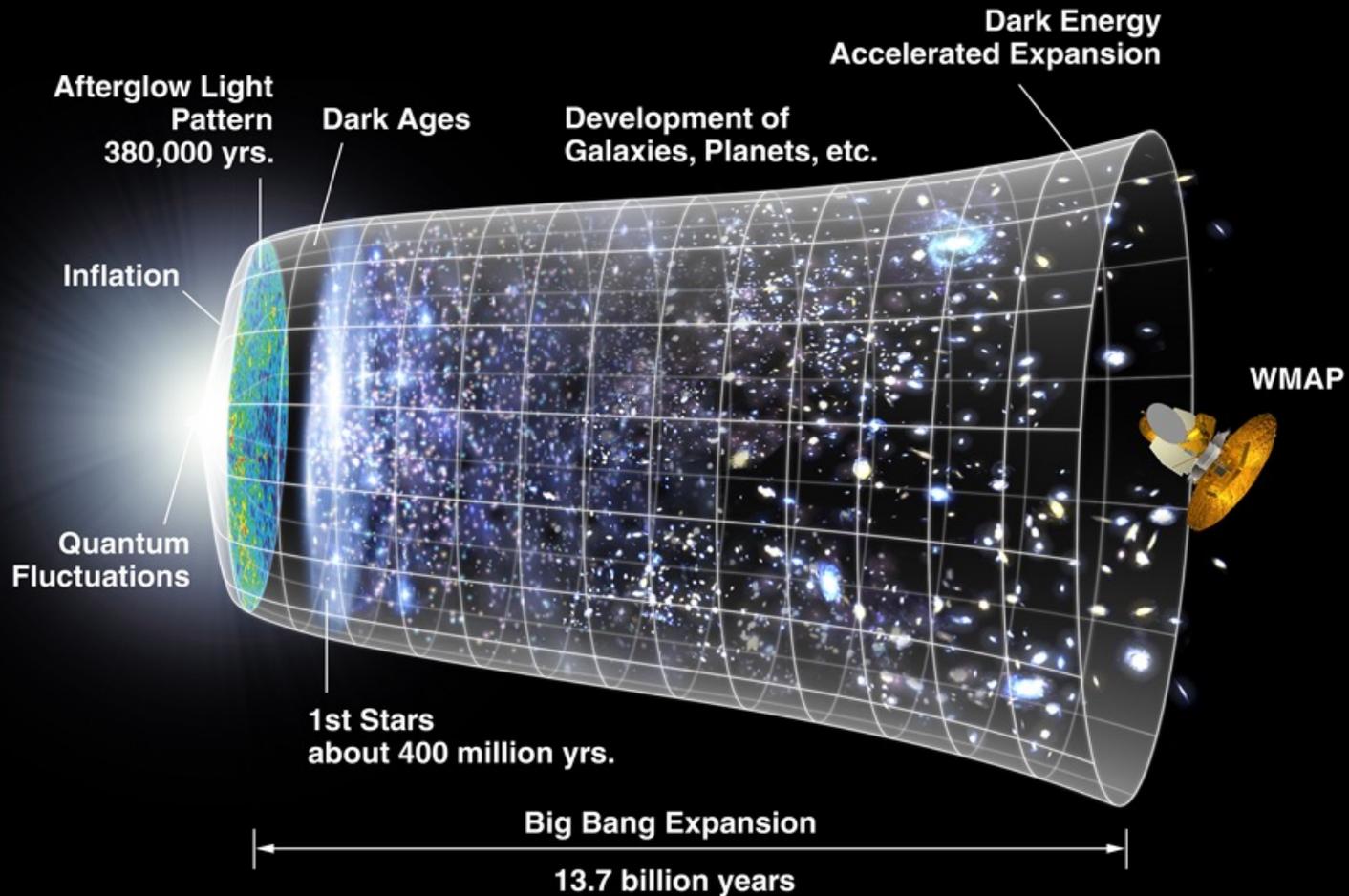
Collisioni protone – protone  
 $E = 14\text{TeV}$   
27 Km di circonferenza  
90 m di profondità



Lo strumento scientifico più grande del mondo!

# COSA CERCHIAMO A LHC?

Riprodurre le condizioni dell'universo circa  $1/10^6$  di secondo dopo il big-bang per studiare fenomeni fisici mai osservati



# LHC 27 KM...IMPEGNATIVI DA FARE A PIEDI!



Progetto iniziato nel 1984 operante da fine 2008 e funzionerà per altri 10 anni!

È costato circa 5 miliardi di euro dal 1984

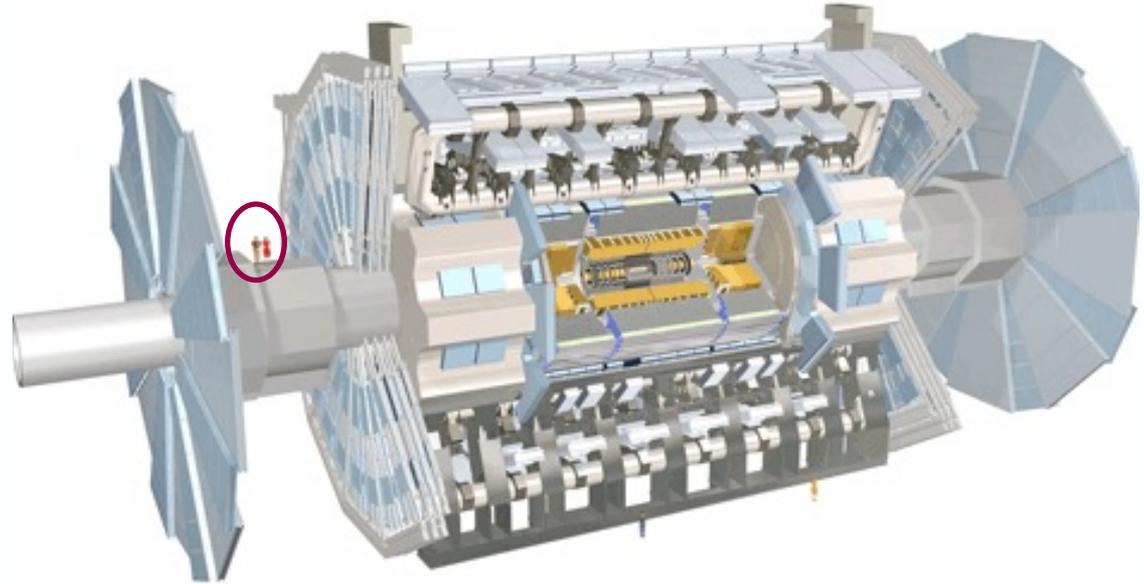
Circa **10000** persone fra fisici e ingegneri coinvolti nella costruzione  
Oltre **2000** fisici coinvolti nel funzionamento e nell'analisi dei dati



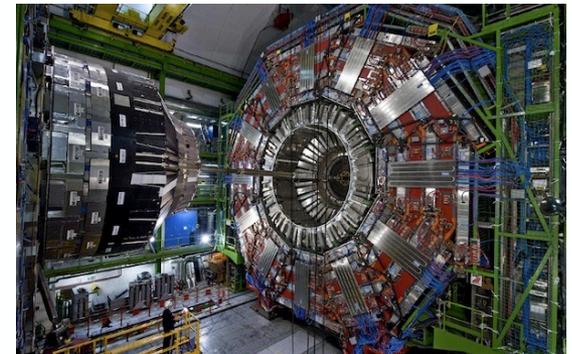
# ATLAS

2000 scienziati provenienti da 176 istituti di 38 nazioni

**ATLAS è lungo 46 metri  
con un diametro di 25  
metri e pesa 7000  
tonnellate**



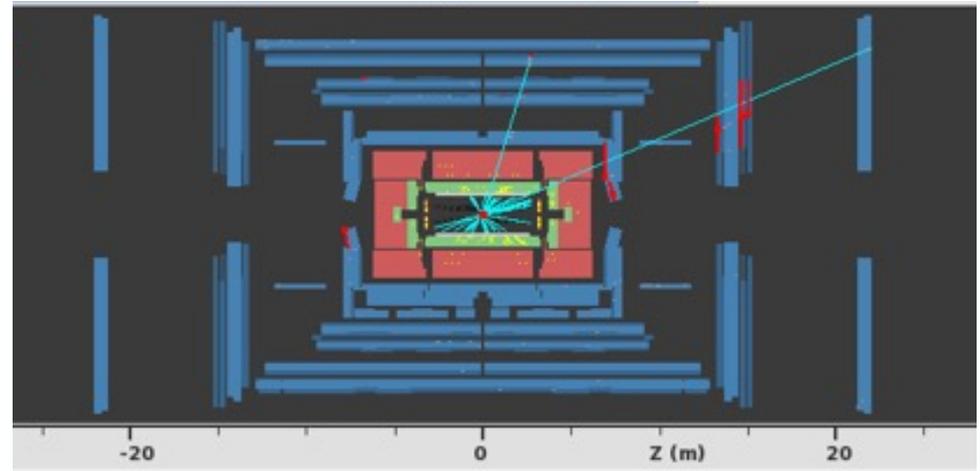
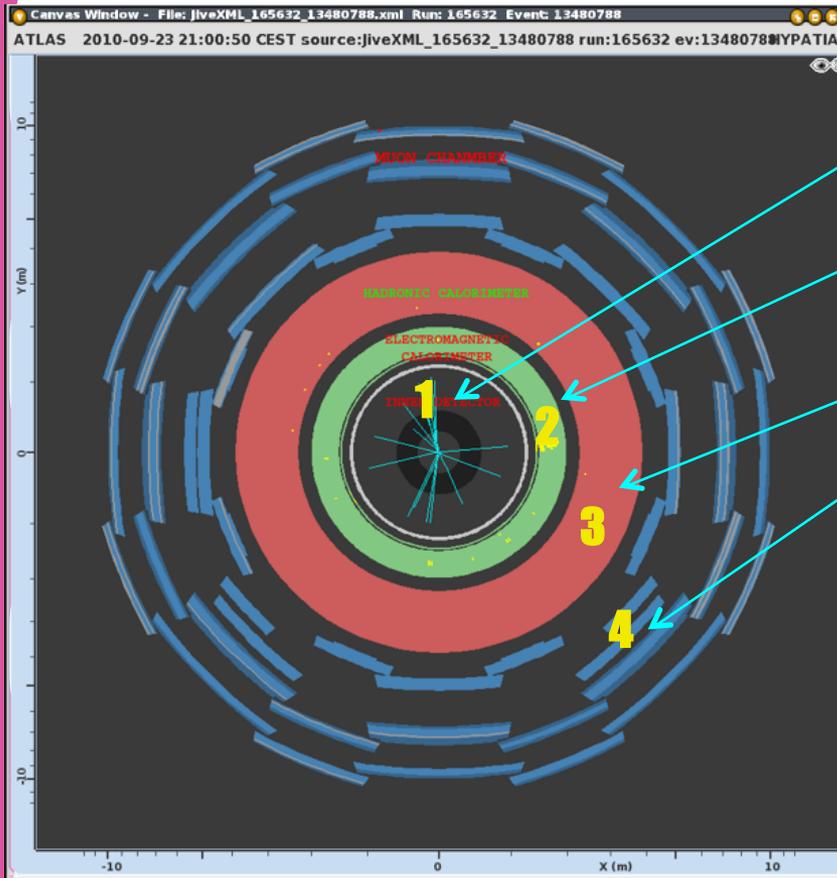
**Il più grande rivelatore mai costruito**



# COME SI PRODUCONO E RIVELANO LE PARTICELLE?

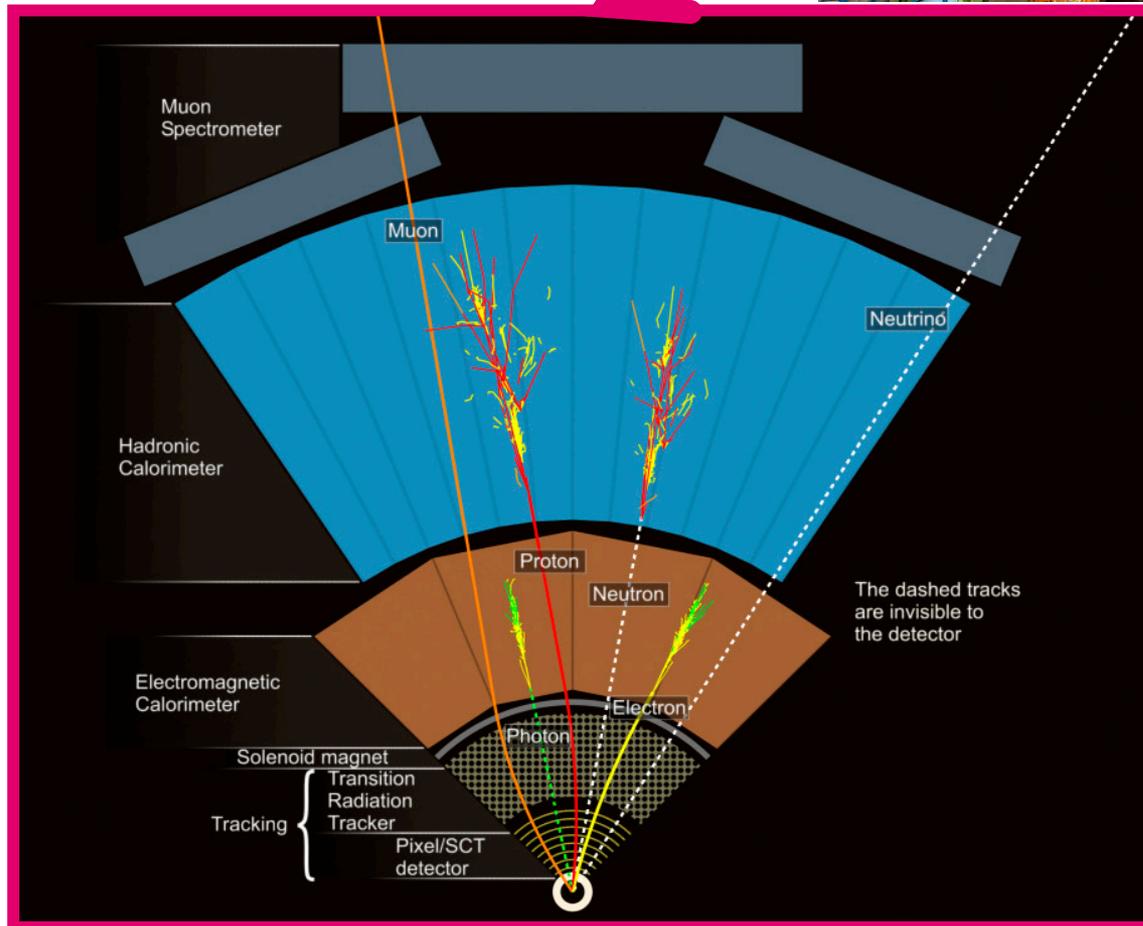
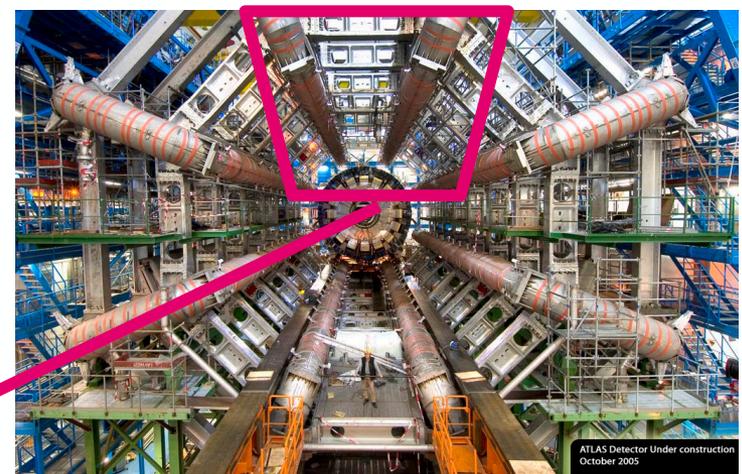
## La struttura di ATLAS

1. Rivelatore interno: per la misura degli impulsi di tutte le tracce cariche
2. **Calorimetro elettromagnetico: fotoni/elettroni**
3. **Calorimetro adronico: protoni, neutroni, adroni**
4. **Spettrometro per muoni: muoni**



## Dimensioni legate all'energia delle particelle prodotte:

- per assorbire un'  $e^\pm$  da 1TeV  $\Rightarrow$  18 cm di Pb
- per assorbire un adrone da 1TeV  $\Rightarrow$  2 m di Fe
- per misurare l'impulso di  $\mu$  da 1TeV  $\Rightarrow$  grandi valori di  $BL^2$  poichè  $\Delta p/p \approx 1/(BL^2)$



# EVENTO CON UN BOSONE DI HIGGS

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2e + 2e$$

ATLAS  
EXPERIMENT

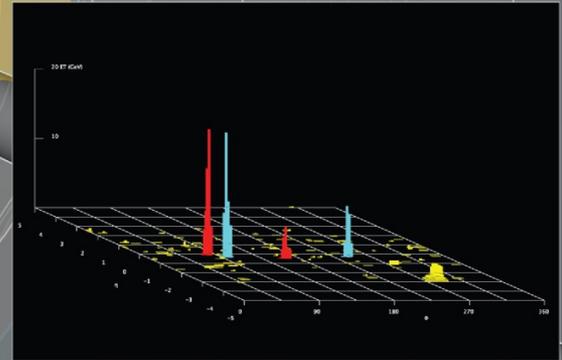
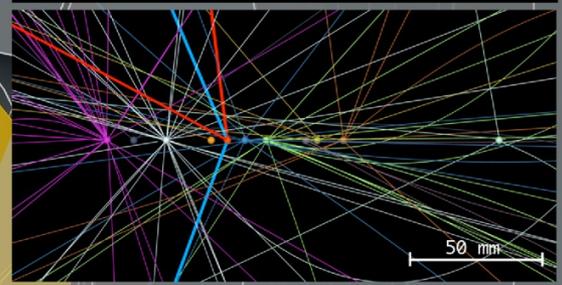
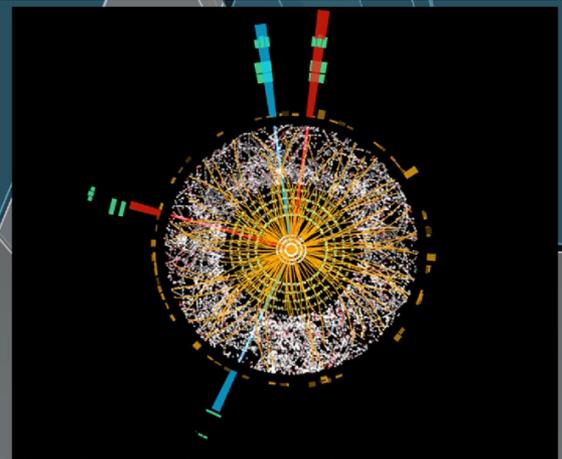
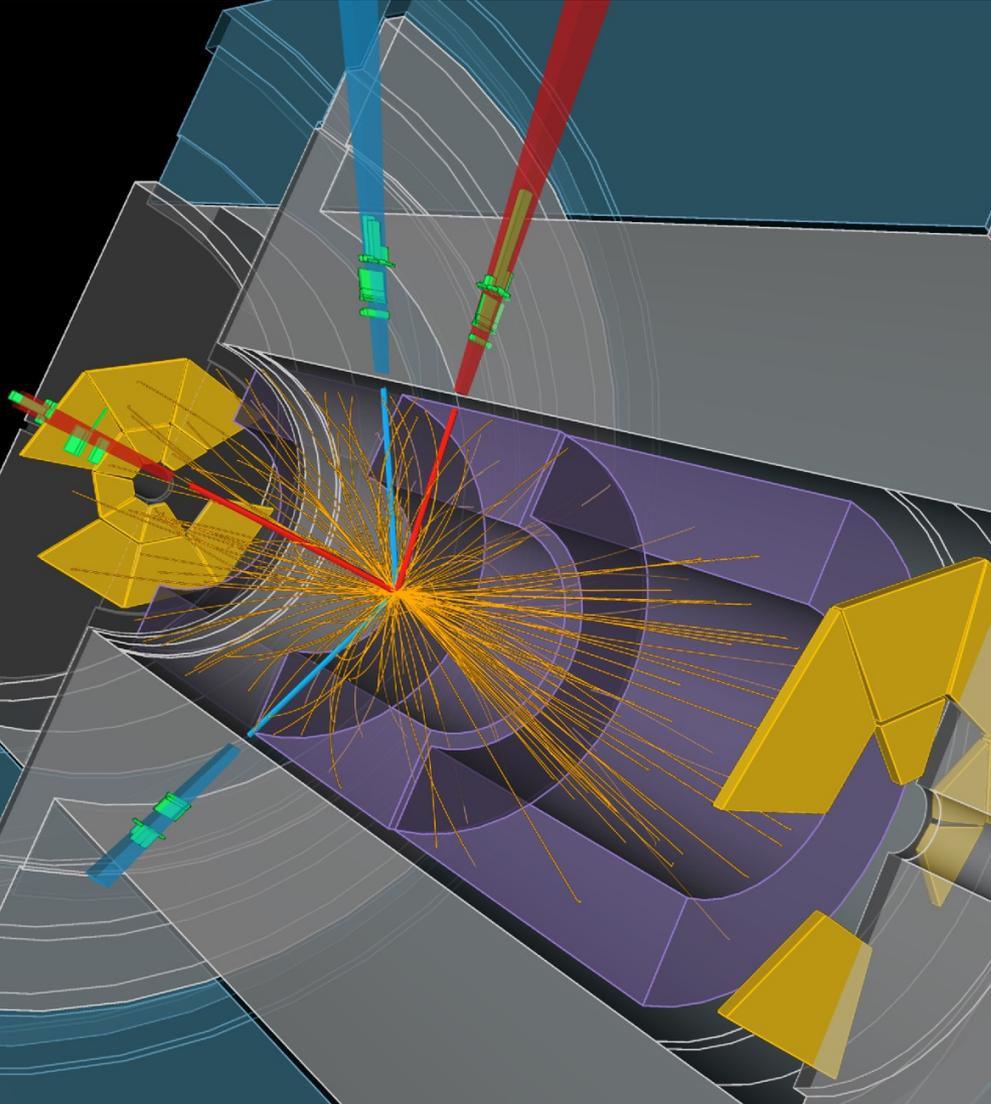
<http://atlas.ch>

Run: 203602

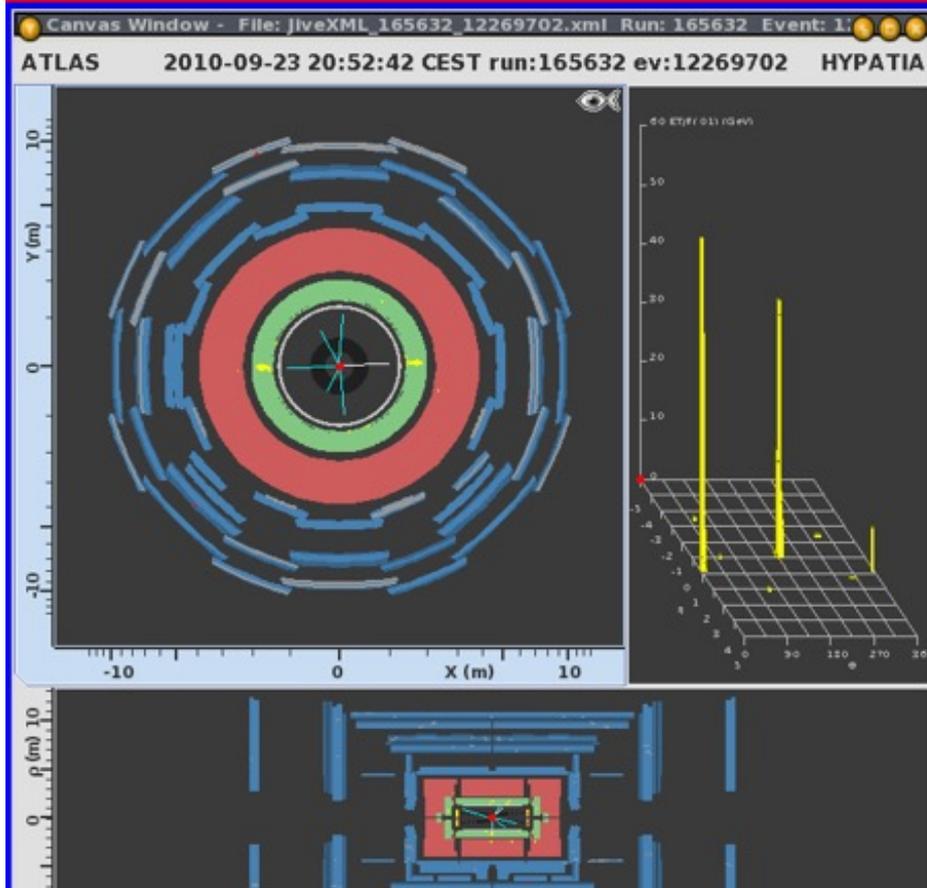
Event: 82614360

Date: 2012-05-18

Time: 20:28:11 CEST



# UN ESEMPIO: $Z \rightarrow e^+ e^-$



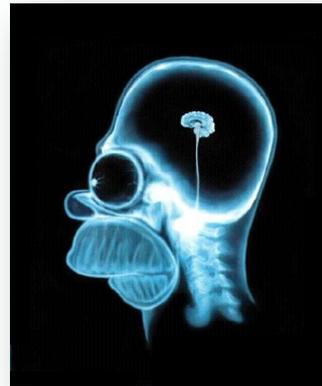
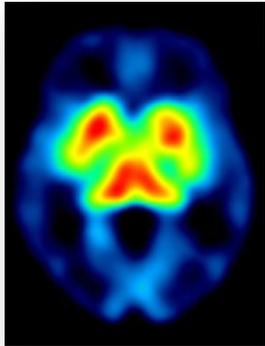
Dalla energia misurata dei due elettroni si ricostruisce la massa della  $Z$

$$m_0^{(Z)} = \sqrt{(m_0^{(1)})^2 + (m_0^{(2)})^2 + 2 \left( \frac{1}{c^4} \cdot E_1 \cdot E_2 - \frac{1}{c^2} \cdot \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \right)}$$

Due tracce e due 'cluster' nel calorimetro elettromagnetico

# A COSA SERVE STUDIARE LA FISICA?

Innanzitutto a capire com'è fatto l'Universo...  
vi sembra poco?



La tecnologia utilizzata per gli esperimenti ha poi ripercussioni anche nella vita quotidiana



Anche la relatività entra nella vita comune...un esempio? Il GPS

# INFN/CERN/ATLAS SUI SOCIALS

facebook facebook E-mail o telefono Password Accedi

Non ricordi più come accedere all'account?

INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare @IstitutoFisicaNucleare

Home Mi piace Condividi Suggerisci modifiche Invia messaggio

Informazioni Foto

Personae a cui piace Video

Eventi Post

Crea una Pagina

Organizzazione governativa

Info: Place a 15.655 persone

Informazioni: 06 666 81...  
www...  
Organizzazione governativa

Personae

Instagram Cerca

cern Messaggio

Post: 1.352 754mila follower 106 profili seguiti

CERN  
#CERN, the European Organization for Nuclear Research, is the world's largest particle physics laboratory.  
Images © CERN, unless otherwise stated.  
home.cern

Followers: pino\_diesse, gianni.dorelli, atlasitalia + altri 2

#BL4S T or F? Guess What Openlab Dark Matter For Society Sparks!

POST REELS VIDEO POST IN CUI TI HANNO TAGGATO

FOLLOW US!!!!

Instagram Cerca Scarica l'applicazione

infn\_insights Segui

18 post 255 follower 48 persone seguite

INFN Con gli occhi puntati sull'infinitamente piccolo [home.infn.it/it](http://home.infn.it/it)

Twitter

Instagram Cerca

atlasitalia Messaggio

Post: 36 671 follower 69 profili seguiti

ATLAS Italia  
Pagina italiana che contribuisce a @atlasexperiment, esperimento di fisica delle particelle a #LHC, situato al @cern di Ginevra  
[atlas.cern/updates/press-statement/atlas-observes-tth-production](http://atlas.cern/updates/press-statement/atlas-observes-tth-production)

Followers: luca.lista, pollogram\_geneve, gianni.dorelli + altri 1

POST VIDEO POST IN CUI TI HANNO TAGGATO



**ORA TOCCA A VOI!**

Se questa importanza (della scienza) è stata messa a volte in dubbio, è perché gli sforzi dell'umanità verso le sue più belle aspirazioni sono stati imperfetti, come qualunque cosa appartenga alla sfera umana, e sono stati sviati dal loro cammino dalle forze dell'egoismo nazionale e della regressione sociale. Sopra ogni cosa è attraverso lo sforzo quotidiano per il progresso della scienza che l'uomo ha raggiunto il posto eccezionale che occupa sulla Terra. Noi dobbiamo appartenere a quelli che... credono, in modo irriducibile, che la scienza trionferà sull'ignoranza e la guerra.

Maria Curie, 1926

BACKUP

# QUALCHE "NUMERETTO"

I magneti superconduttori che deviano il fascio di LHC operano ad una temperatura di  $-271.35^{\circ}\text{C}$ : LHC è il posto più freddo dello spazio!

Per accelerare i protoni si crea un vuoto spinto: LHC è il posto più vuoto del Sistema Solare!

Milioni di miliardi di protoni che viaggiano praticamente alla velocità della luce percorrono i 27 km scontrandosi ogni 25 ns  $\rightarrow$  40 milioni di volte al secondo!

Gli esperimenti di LHC producono circa 10-15 milioni di GB di dati ogni anno: una pila di CD alta ~20 km

Il fascio dura, in media, 10 ore: i protoni di LHC potrebbero andare, in 10 ore, ai confini del sistema solare e ritorno

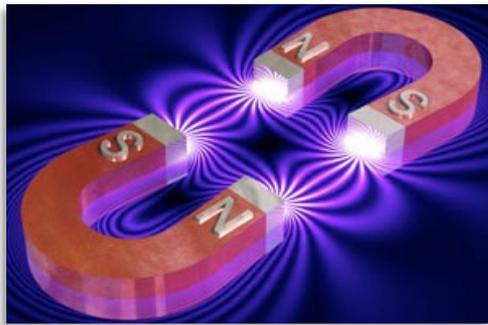
Lunghezza totale dei filamenti superconduttori:  $1.7 \times 10^9$  km  $\approx$  10 Unità Astronomiche !!

Quando due fasci di protoni collidono generano temperature 100000 volte superiori a quelle del Sole (in uno spazio infinitesimo): LHC è il posto più caldo della Galassia

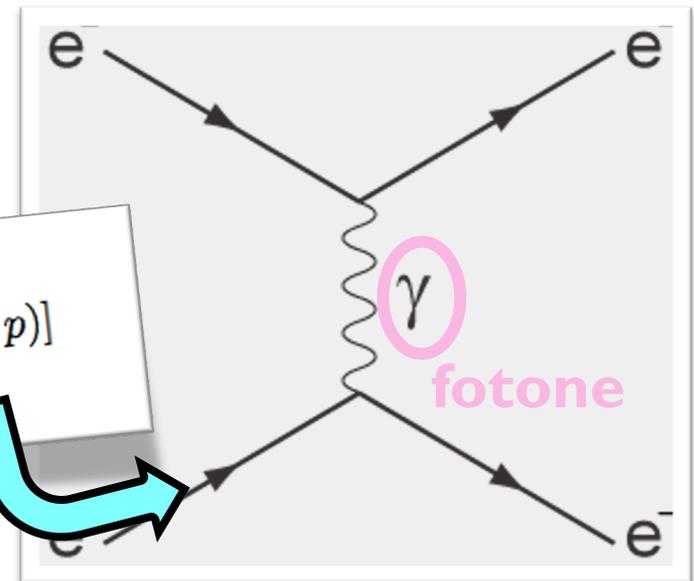
# LA FORZA ELETTROMAGNETICA

Si esercita tra tutte le particelle cariche: quark, elettroni, muoni e tau (cioè i leptoni carichi)

**Il fotone è il mediatore della forza elettromagnetica**



$$-i\mathcal{M} = [ie\bar{u}(s', k') \gamma^\mu u(s, k)] \left[ \frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \right] [ie\bar{u}(r', p') \gamma^\nu u(r, p)]$$



**L'elettrodinamica quantistica (QED) è la teoria più precisa del mondo!**  
**Risultati con precisione accuratissima!**

# E LA GRAVITÀ?

Formulare una descrizione quantistica della gravità non è affatto semplice

- Meccanica quantistica e Relatività Generale sono difficilmente conciliabili
- La gravità dunque non fa parte del Modello Standard
- Si pensa che la particella mediatrice dell'interazione sia il **gravitone**, particella di spin 2



Trovate!

Onde  
gravitazionali?

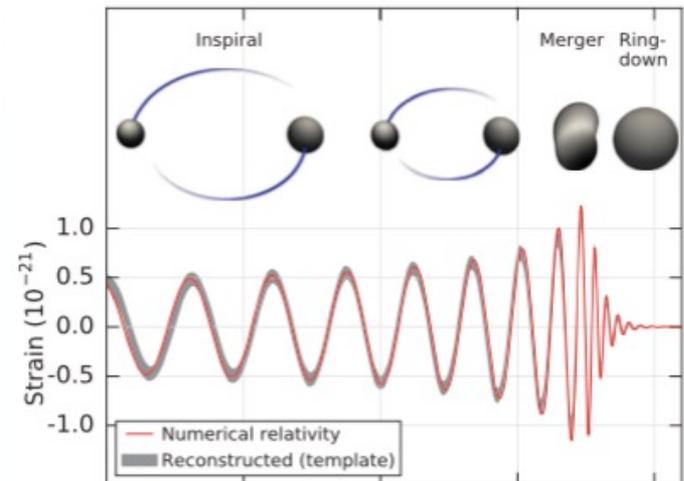
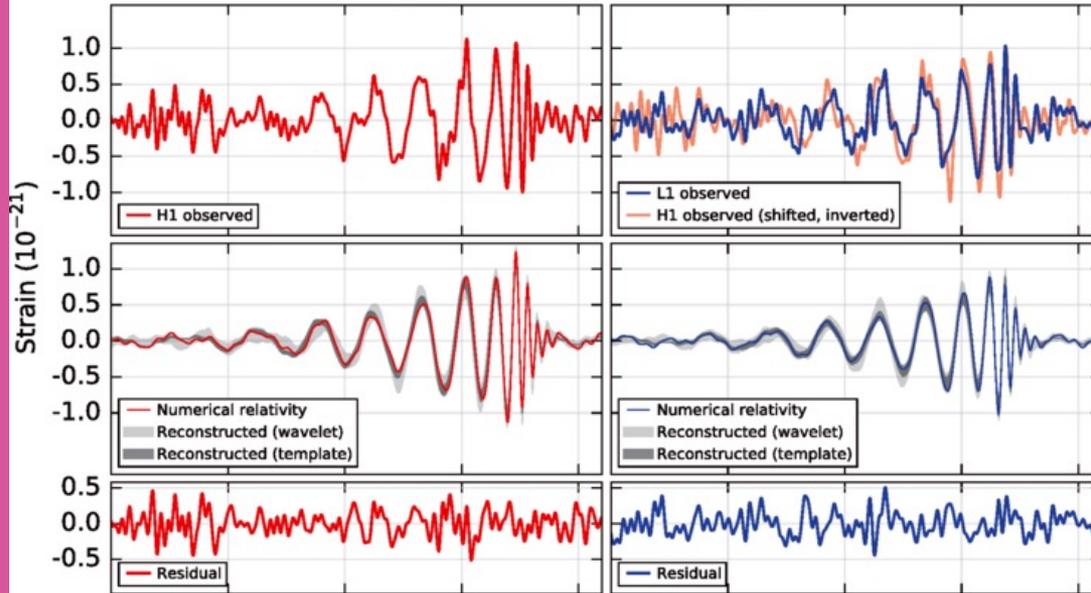


# L'ULTIMA ARRIVATA!

11 Febbraio 2016: le onde gravitazionali esistono!

Hanford, Washington (H1)

Livingston, Louisiana (L1)

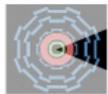


# COME SI PRESENTANO GLI ELETTRONI

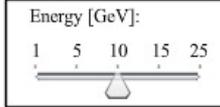
x

## ATLAS

animation

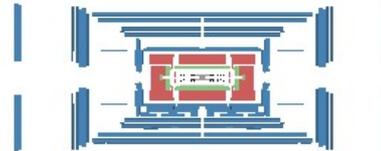
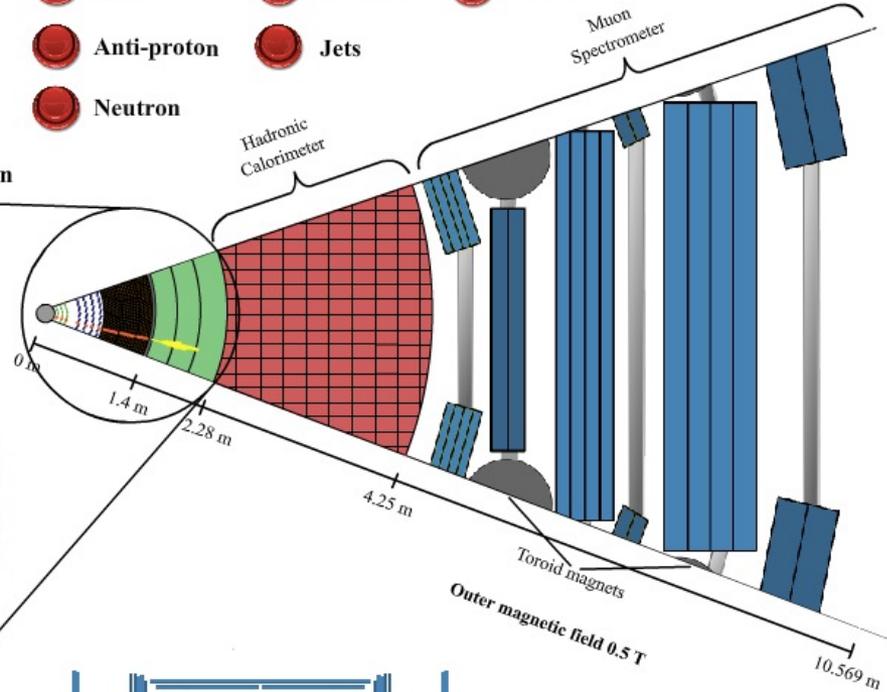
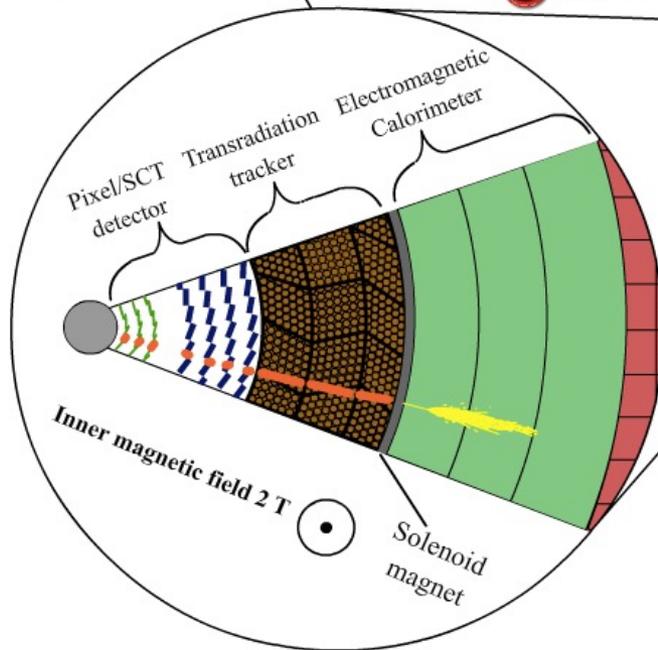


display instantly



- ▶ Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon

Magnification 3x



Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

# OLTRE IL MODELLO STANDARD

**La scoperta del bosone di Higgs conferma l'accuratezza del Modello Standard, che tuttavia non può essere considerata come una teoria definitiva**

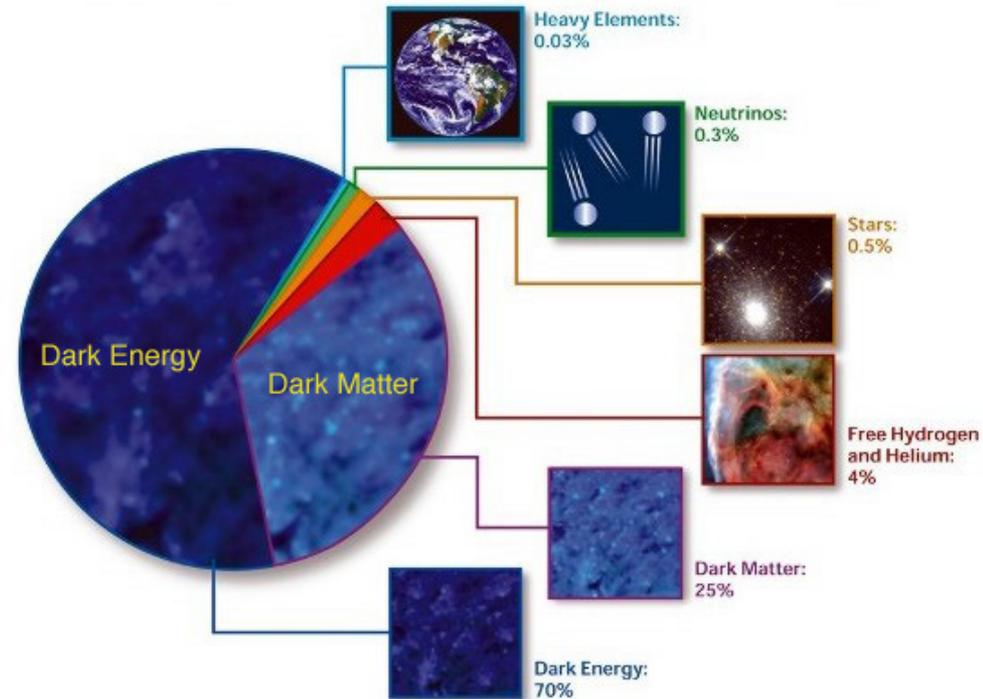
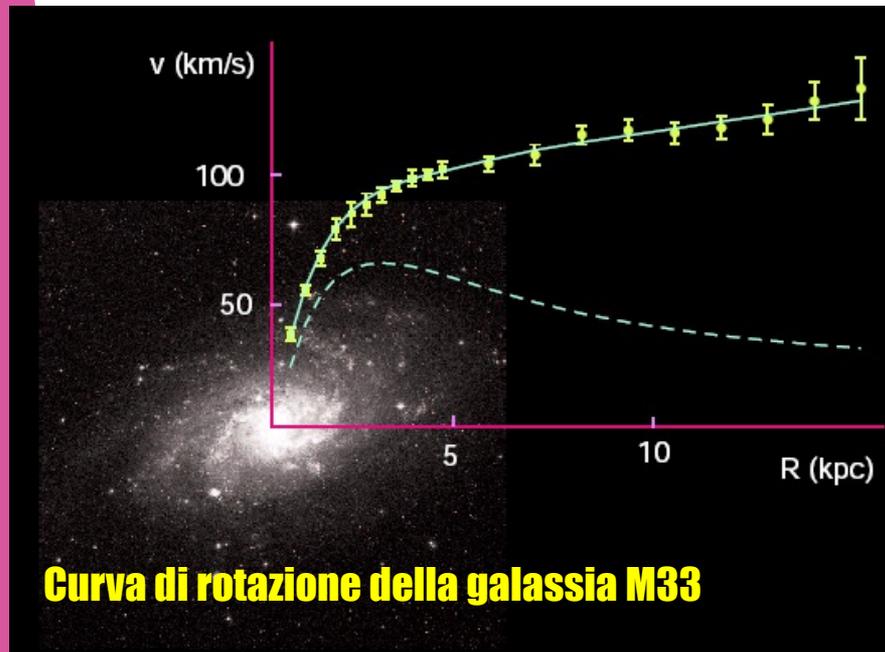
Attraverso lo studio dell' **"Infinitamente piccolo"** (**microcosmo**) si cerca anche di contribuire a rispondere a domande cruciali sull'Universo quali:

- ✦ *come si è evoluto dal Big-Bang ad oggi ?*
- ✦ *qual è la natura della materia/energia oscura che lo pervade ?*
- ✦ *dove e come è finita l'antimateria che era presumibilmente presente alle origini ?*
- ✦ *esiste un quadro interpretativo unitario a piccola e a grande scala ?*

**LHC può rispondere a questi quesiti?**

# MATERIA OSCURA

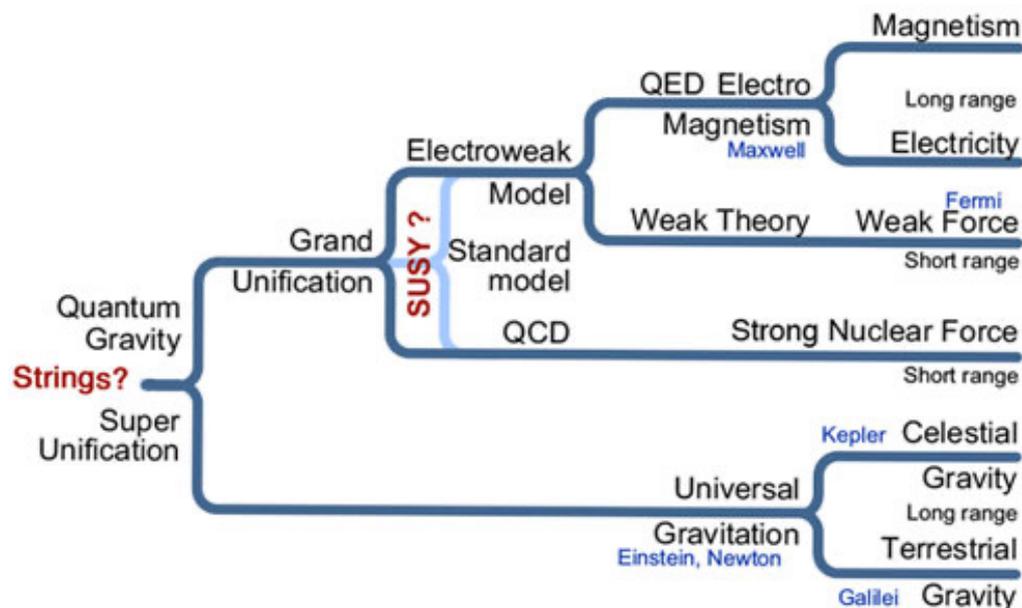
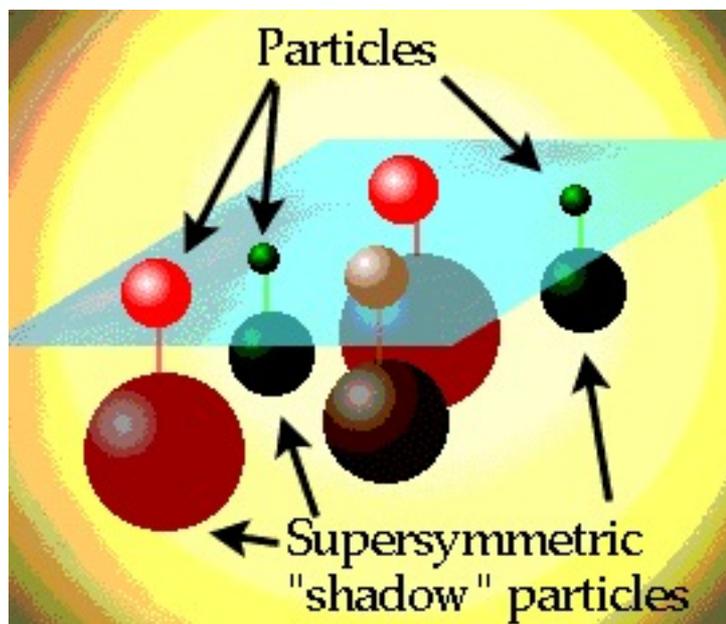
Negli ultimi anni abbiamo scoperto che il 95% dell'Universo è composto di cose che non capiamo: materia oscura ed energia oscura



**LHC potrebbe trovare nuove particelle che spieghino la dark matter e forse la dark energy!**

# SUPERSIMMETRIA?

LHC potrebbe fare un passo verso la "Grande Unificazione" trovando le particelle supersimmetriche. Secondo la teoria della Supersimmetria (**SUSY**), ogni particella ha una "compagna" detta **sparticella**



**Finora non è stata trovata alcuna traccia di supersimmetria!**

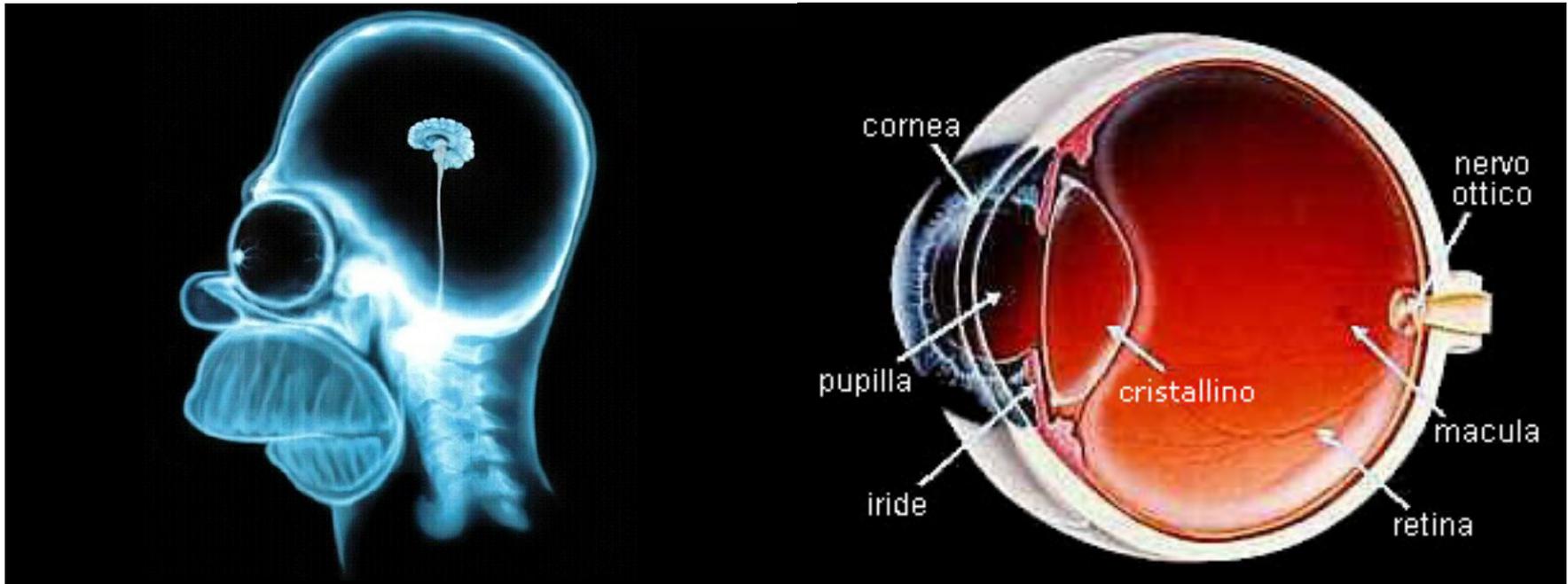
# come si rivelano le particelle?

tramite la loro interazione con la materia che attraversano

## ...ESEMPI NELLA VITA QUOTIDIANA...

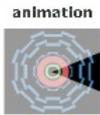
Lastre fotografiche.....

Occhio umano.....



# COME SI PRESENTANO I FOTONI

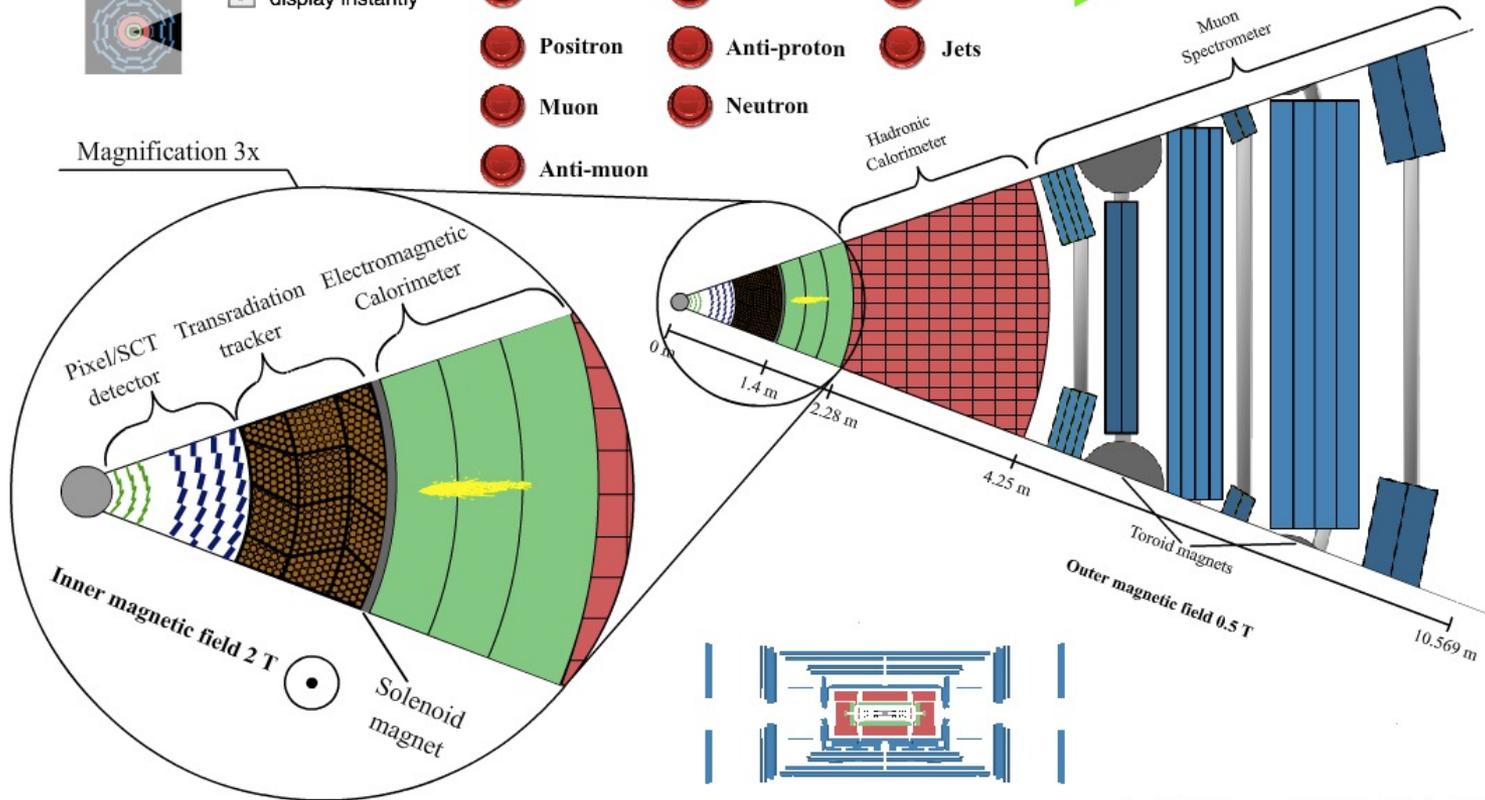
## ATLAS



display instantly

- Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon

Magnification 3x



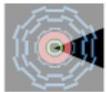
Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

# COME SI PRESENTANO I MUONI

x

## ATLAS

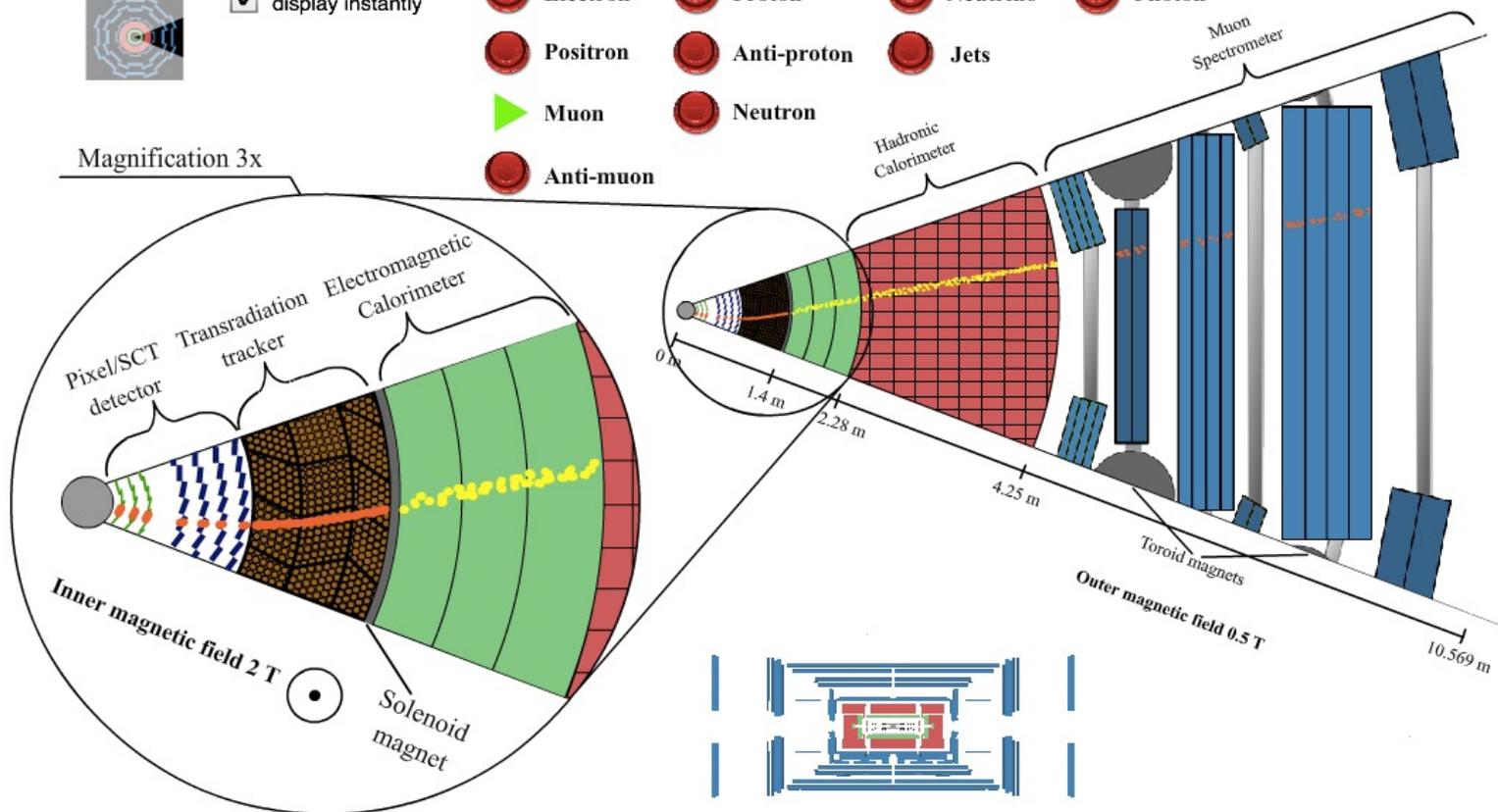
animation



display instantly

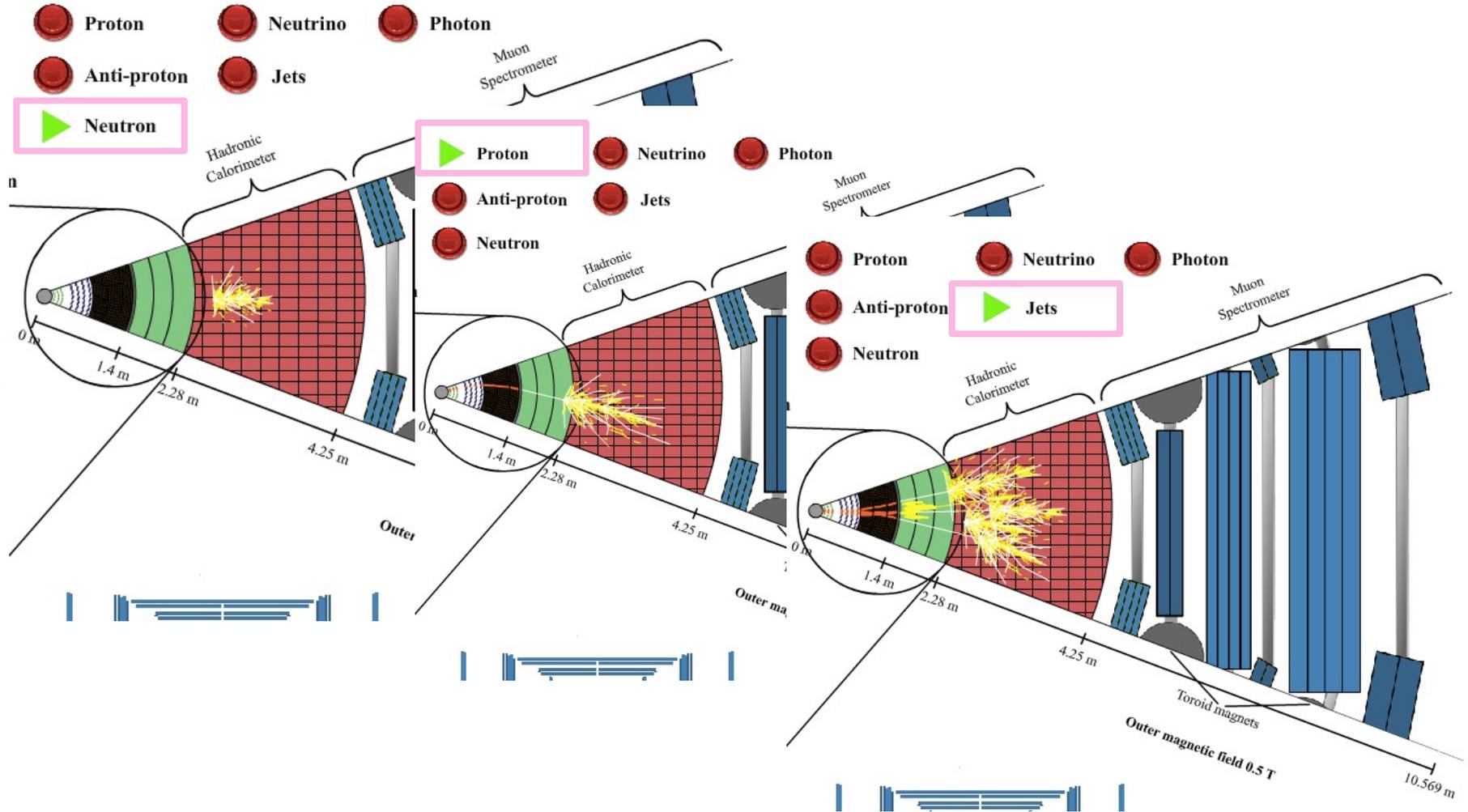
-  Electron
-  Proton
-  Neutrino
-  Photon
-  Positron
-  Anti-proton
-  Jets
-  Muon
-  Neutron
-  Anti-muon

Magnification 3x



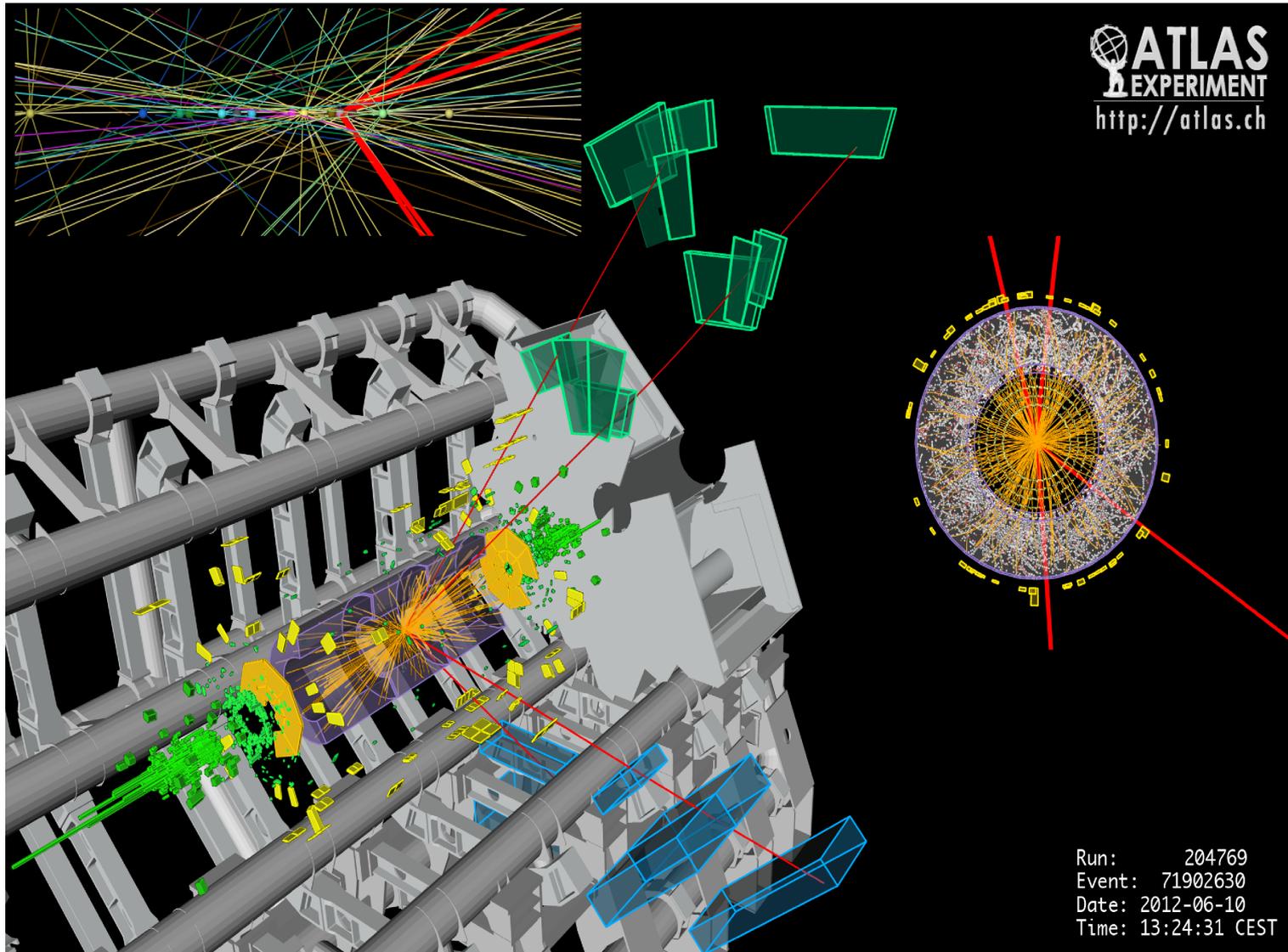
Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

# COME SI PRESENTANO GLI ADRONI



# Evento con un bosone di Higgs

$$H \rightarrow ZZ \rightarrow 2\mu + 2\mu$$



# RAPPORTI DI DECADIMENTO “BRANCHING RATIO” (BR) DELLA Z

La Z può decadere in coppie particella-antiparticella

**Branching ratios = quanto spesso decade in una certa  
coppia particella-antiparticella sul totale**

$$BR(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{\text{Numero}(Z \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\text{Numero}(Z)}$$

**Oggi misurerete i BR della Z**



# ENERGIA, TANTA ENERGIA

(LE PARTICELLE DA CERCARE HANNO "GRANDE MASSA")

A regime (2014)

- **Energia magnetica** immagazzinata nei dipoli:

per ciascun dipolo  $E_{\text{dipolo}} = 7 \text{ MJ}$

tutti i dipoli  $E_{\text{stored}} = 10.4 \text{ GJ} !!!$

- I 2808 "pacchetti del fascio di LHC contengono grande **energia cinetica**:

singolo pacchetto:  $E_{\text{bunch}} = N \times E = 1.15 \times 10^{11} \times 7 \text{ TeV} = 129 \text{ kJ}$

singolo fascio :  $E_{\text{beam}} = k \times E_{\text{bunch}} = 2808 \times E_{\text{bunch}} = 362 \text{ MJ}$

**Ciascuno dei due fasci di protoni avrà un'energia equivalente a un treno da 400 tonnellate (come un TGV francese) che viaggi a 150 km/h.**

**Tale quantità di energia sarebbe in grado di «sciogliere» 500 kg di rame**

**Consumo elettrico di LHC : 120 MW  
(come tutte le case del cantone di Ginevra)**