

Masterclass 2025

Facciamo un esperimento di fisica delle alte energie

Cosa vedremo oggi

An abstract visualization of particle physics, featuring a central bright point from which numerous glowing lines radiate outwards. These lines are interspersed with various sized circles and spheres, some of which are labeled with mathematical symbols like π , $Z(2, 2)$, and $Z(1, 1, 2)$. The overall color palette is dominated by teal, blue, and green, with a dark background.

- ◎ Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- ◎ Particelle, forze, mediatori
- ◎ L'acceleratore LHC al CERN
- ◎ Come si rivelano le particelle
- ◎ Tocca a voi!
- ◎ Domande, domande ed ancora domande

Perché studiamo la Fisica delle Particelle?



“La cosa più bella che possiamo sperimentare è il mistero; è la fonte di ogni vera arte e di ogni vera scienza”

(A. Einstein)

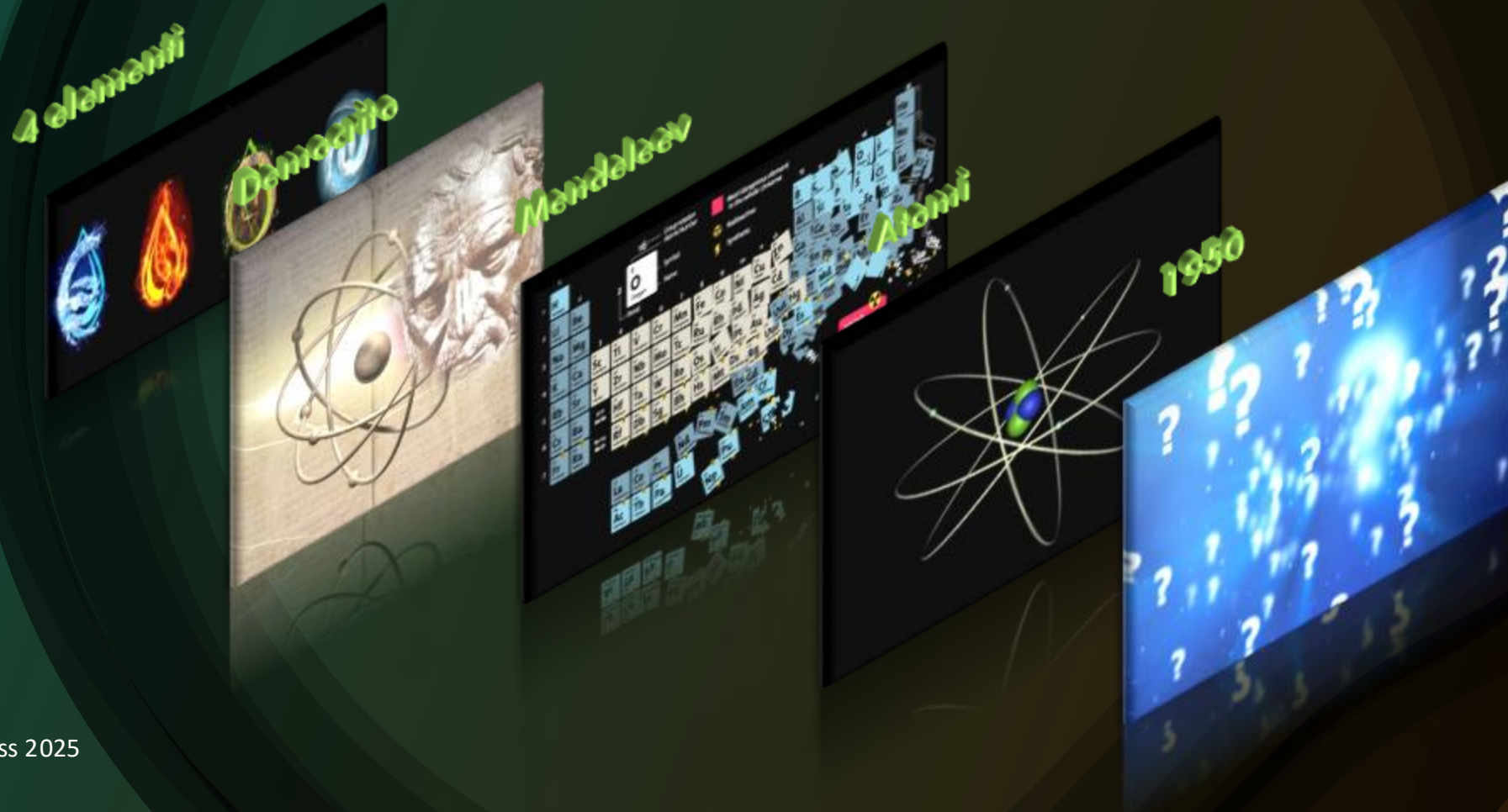
Le grandi domande della Fisica Fondamentale

- 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...

Di cosa siamo fatti?

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



Lo sviluppo tecnologico e i progressi della teoria hanno portato alla scoperta di nuove particelle

Nuove particelle

- 1932 - Neutrone
- 1932 - Positrone
- 1936 - Muone
- 1947 – Pioni, kaoni, iperoni

Gli esperimenti con acceleratori di particelle riveleranno che il mondo delle particelle è molto ricco!!

Nei primi anni '60 sono già identificate circa 100 particelle!

E molte altre ancora!

Cosa vedremo oggi

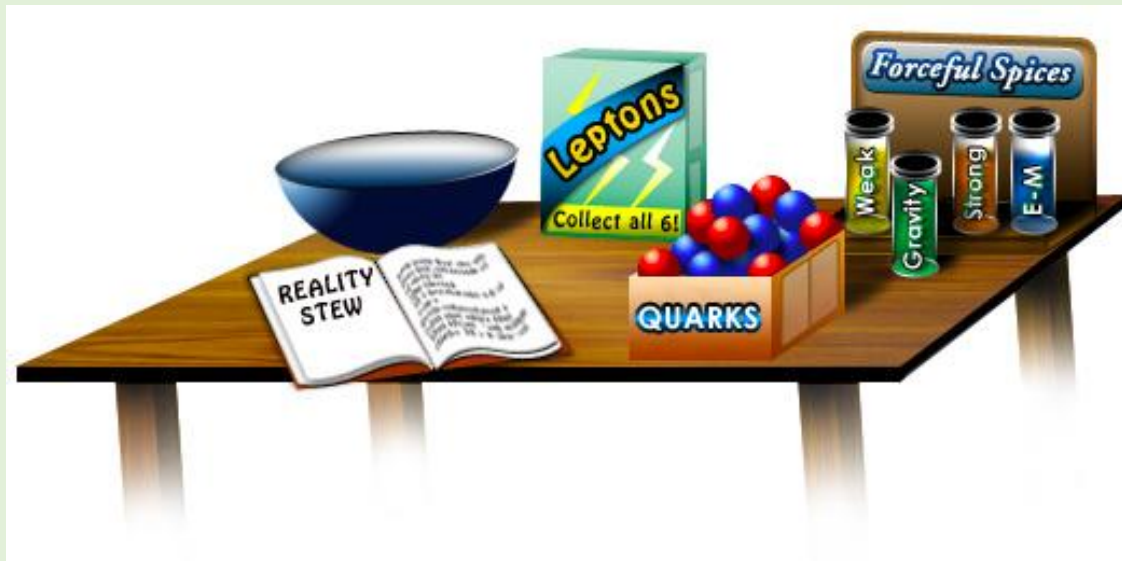
A complex visualization of particle tracks and interactions, likely from a particle detector. It features a central bright point from which numerous lines radiate outwards, some ending in small circles or dots. The lines are colored in shades of blue, green, and yellow. Several labels are visible: $Z(2, 2)$, π , and $Z(1, 1, 2)$. The background is dark with a grid of faint lines and dots.

- ⊙ Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- ⊙ Particelle, forze, mediatori
- ⊙ L'acceleratore LHC al CERN
- ⊙ Come si rivelano le particelle
- ⊙ Tocca a voi!
- ⊙ Domande, domande ed ancora domande

Mettiamo un pò di ordine...

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.



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

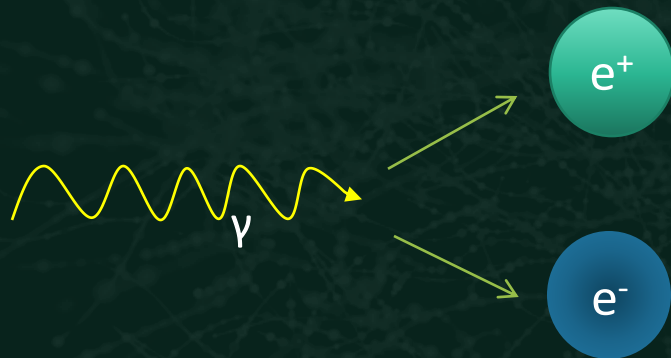
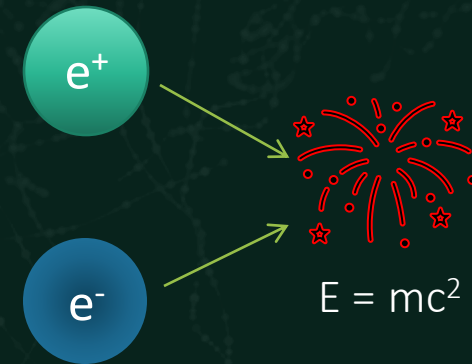
Energia guadagnata (o persa) dalla carica elettrica di un singolo elettrone, quando viene mosso nel vuoto tra due punti tra i quali vi è una differenza di 1 volt.

Anche le masse delle particelle le misuriamo in eV!

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



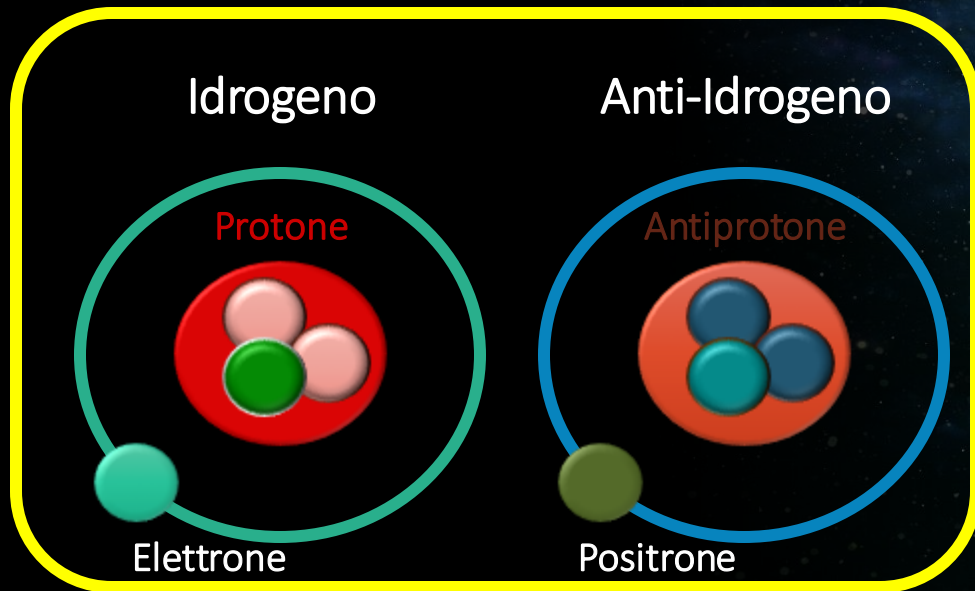
Anche il processo inverso è possibile: un fotone “converte” in una coppia elettrone-positrone

L'idea dell'antimateria appare alquanto bizzarra. L'Universo, per come lo conosciamo, sembra composto da sola materia!

Tuttavia esistono prove sperimentali che mostrano l'esistenza di antimateria!

Antimateria

Se materia e antimateria sono esattamente uguali ma opposte nelle loro quantità fondamentali perché esiste questo disequilibrio in natura?



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

Quark

Gli esperimenti fatti tra gli anni '50 e '60 mostravano che sia il protone che il neutrone erano particelle aventi una struttura interna, composte da particelle elementari dette **quark**.

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

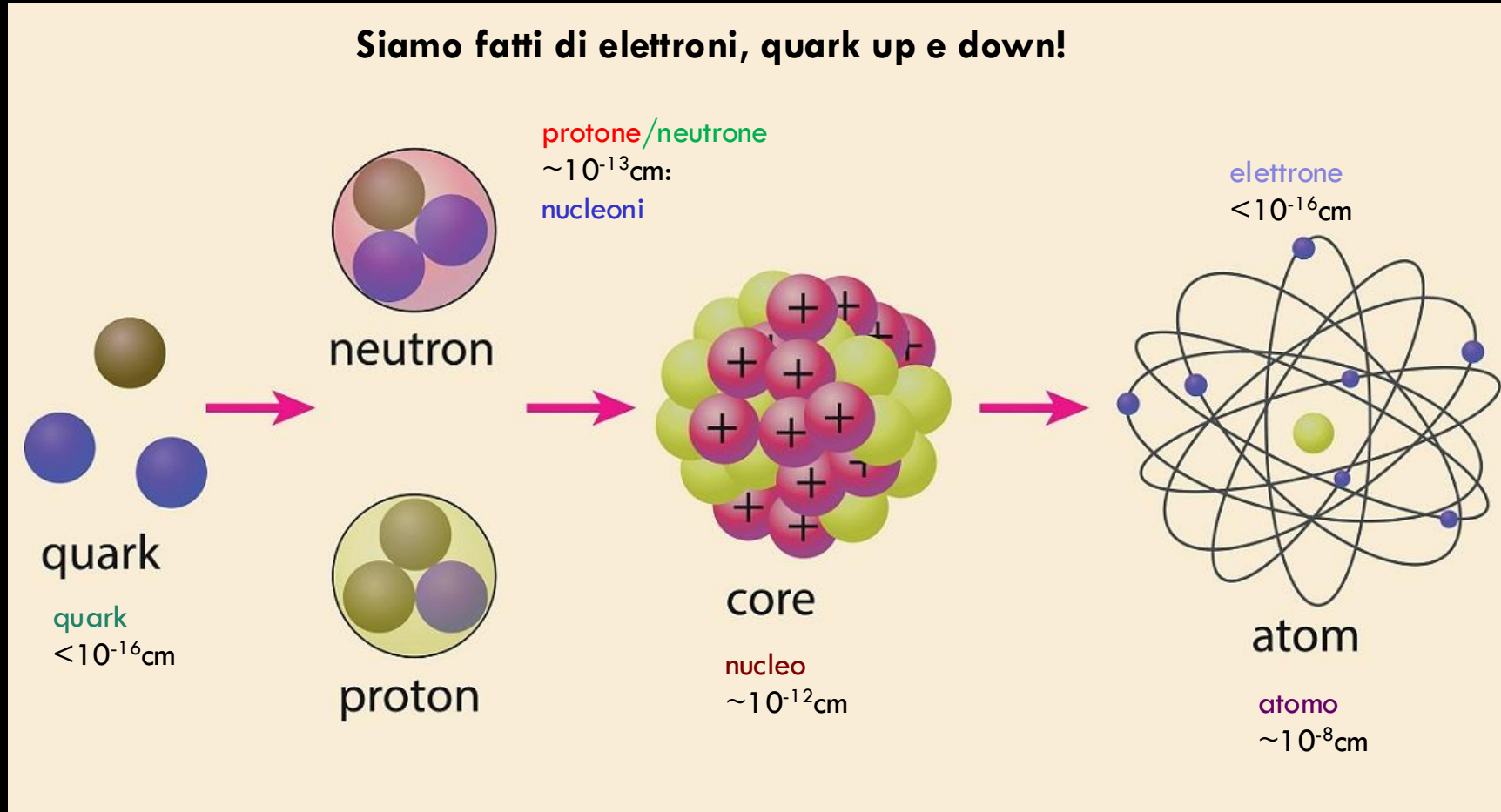
- Spin $\frac{1}{2}$, quindi fermioni
- Carica frazionaria
 - Up $\frac{2}{3}$
 - Down e strange $-\frac{1}{3}$
- Ovviamente ci sono gli antiquark $\bar{u}, \bar{d}, \bar{s}$
- Possono esistere in tre stati fisici detti **colore: rosso, blu e verde** (e anticolori!)



1969



Quark



Il quark s si trova in altre particelle dette “strane”

Quark

Attualmente sono stati scoperti 6 tipi di quark, divisi in **3 famiglie**

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

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
	u up	c charm	t top
	d down	s strange	b bottom

QUARKS



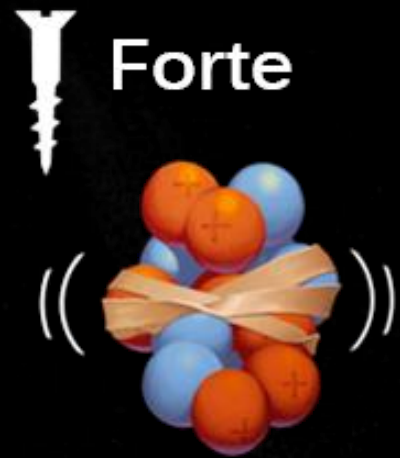
Leptoni

Particelle elementari molto più leggere dei quark. Esistono 6 leptoni divisi in 3 famiglie

- Spin $\frac{1}{2}$
- **elettrone, muone e tau** con carica elettrica negativa
- **neutrini** con carica elettrica neutra

LEPTONS	0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau
	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino





Le Interazioni fondamentali

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

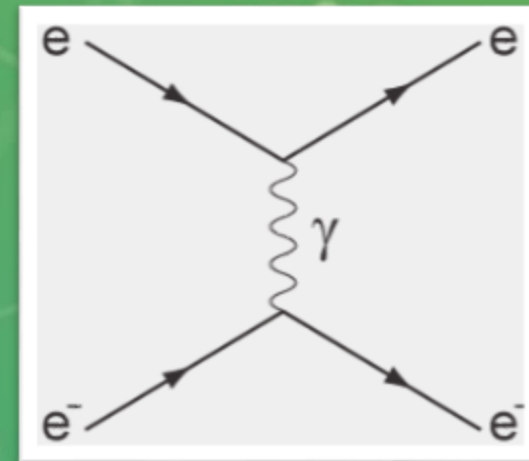
Le particelle mediatrici sono
bosoni!



L'interazione 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

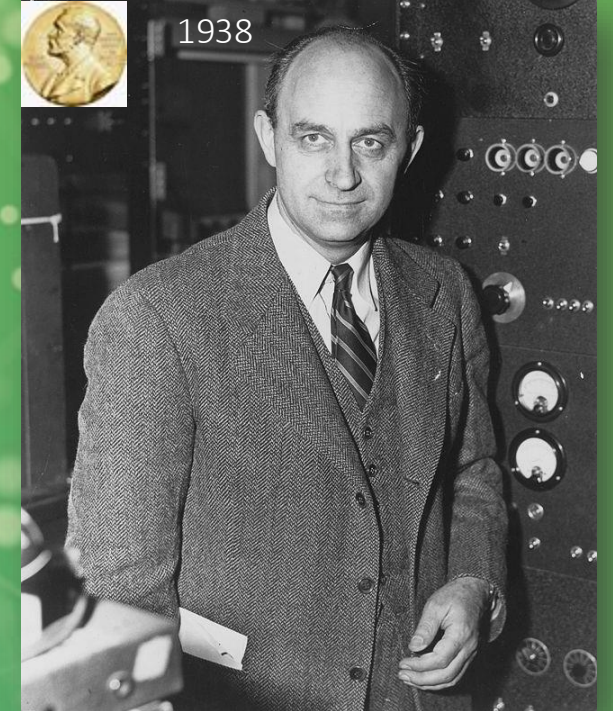
$$-i\mathcal{M} = [ie\bar{u}(s', k') \gamma^\mu u(s, k)] \left[\frac{-ig_{\mu\nu}}{q^2} \right] [ie\bar{u}(r', p') \gamma^\nu u(r, p)]$$



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

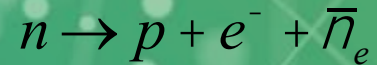
L'interazione debole

- 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
- Teorizzata inizialmente da Enrico Fermi nel 1933 e poi sviluppata negli anni a seguire



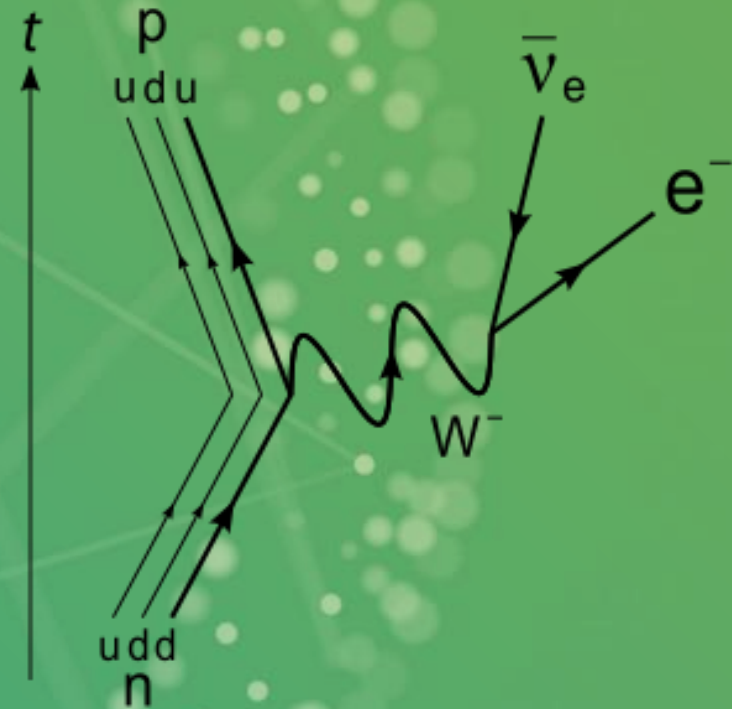
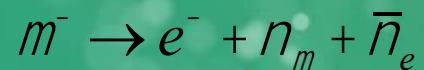
L'interazione debole

- Nel decadimento β un neutrone decade in un protone, in un elettrone ed in un neutrino. Ciò che avviene è il decadimento di un quark d in un quark u



- I neutrini sono stati scoperti perchè nella teoria del decadimento β i conti non tornavano!

- Anche i muoni decadono attraverso l'interazione debole



L'unificazione elettrodebole

Il Modello Standard descrive la forza elettromagnetica e l'interazione debole come due aspetti di una medesima forza, l'interazione elettrodebole, teorizzata da Glashow Weinberg e Salam nel 1968

- Ad energie molto alte le due forze risultano “unite” in quella elettrodebole, ad energie minori siamo in grado di “notare” le differenze
- Energie alte significa circa 100 GeV

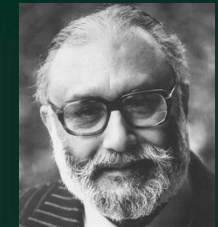
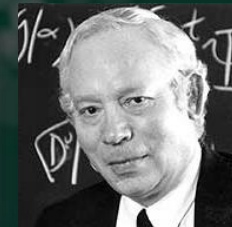
Elettrodinamica quantistica

Interazioni deboli

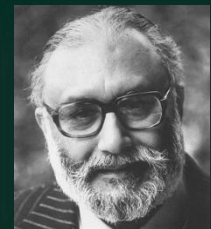
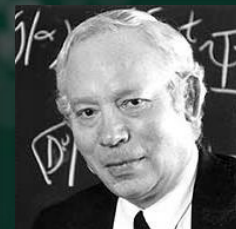
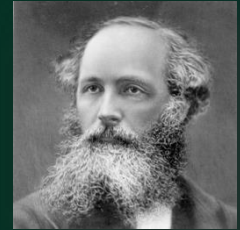
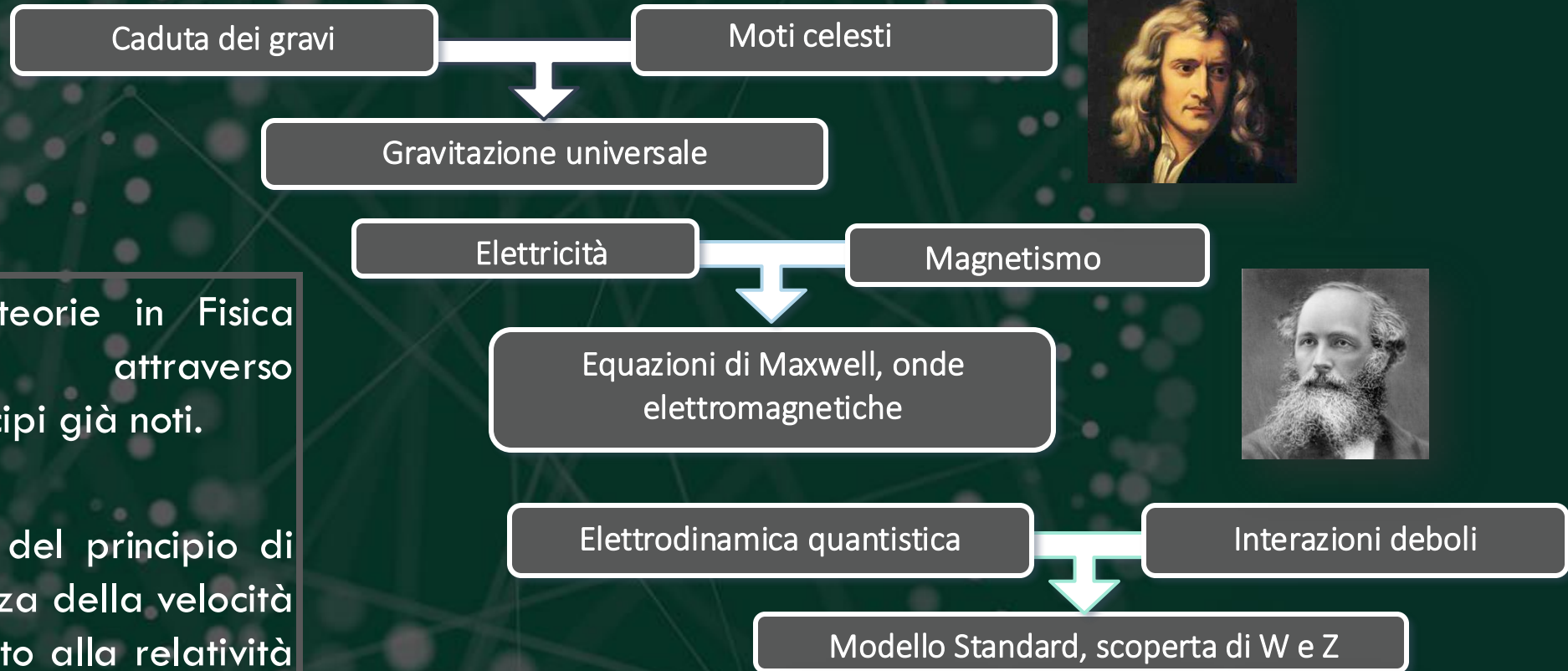
Modello Standard, scoperta di W e Z



1979



L'unificazione elettrodebole



1979

L'evoluzione delle teorie in Fisica procede spesso attraverso l'unificazione di principi già noti.

Anche l'unificazione del principio di inerzia con la costanza della velocità della luce ha condotto alla relatività ristretta

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
- Mediata dai gluoni (ce ne sono 8), che trasportano una carica di "colore", da cui Cromodinamica Quantistica
- I gluoni hanno massa nulla



È l'interazione più forte!

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!

~~Non esistono prove della sua
esistenza!~~



Onde gravitazionali?

Foto di gruppo



Interazione	Intensità
Gravità	10^{-38}
Debole	10^{-5}
Elettromagnetica	10^{-2}
Forte	1

Foto di gruppo

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & \sum_{l=e,\mu,\tau} i\bar{\psi}_l \gamma^\mu \partial_\mu \psi_l + \sum_{f=u,c,s} i\bar{\psi}_f \gamma^\mu \partial_\mu \psi_f + \sum_i^3 \sum_{q=u,c,t} i\bar{\psi}_q \gamma^\mu \partial_\mu \psi_q + \sum_i^3 \sum_{q'=d,s,b} i\bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \partial_\mu \psi_{q'} - \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_{l=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_l v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_l \psi_l - \sum_i^3 \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q - \sum_i^3 \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'} v}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} \\
 & - \left(\frac{g v}{2} \right)^2 W_\mu^+ W^{-\mu} - \frac{1}{2} \left(\frac{g v}{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_{l=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_l \gamma^\mu (4 \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_l Z_\mu + \sum_{l'=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_{l'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{l'} Z_\mu \right) \\
 & + \frac{g}{4 \cos \theta_W} \left(\sum_i^3 \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3} \sin^2 \theta_W - \gamma^5) \psi_q Z_\mu + \sum_i^3 \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (\frac{4}{3} \sin^2 \theta_W - 1 + \gamma^5) \psi_{q'} Z_\mu \right) + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left(\sum_{l=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_l \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_l W_\mu^+ + \sum_{l=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_l \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_l W_\mu^- \right) \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left(\sum_i^3 \sum_{\substack{q=u,c,t \\ q'=d,s,b}} V_{qq'} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{q'} W_\mu^+ + \sum_i^3 \sum_{\substack{q=u,c,t \\ q'=d,s,b}} V_{qq'}^* \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_q W_\mu^- \right) + g_{em} \left(- \sum_{l=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_l \gamma^\mu \psi_l A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} A_\mu \right) \\
 & + g_s \left(\sum_{i,j}^3 \sum_a^8 \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q G_\mu^a T_{ij}^a + \sum_{i,j}^3 \sum_a^8 \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} G_\mu^a T_{ij}^a \right) - \sum_{l=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_l}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_l \psi_l h - \sum_i^3 \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q h - \sum_i^3 \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} h \\
 & + \frac{g}{2\sqrt{2}} \left(\sum_i^3 \sum_{\substack{q=u,c,t \\ q'=d,s,b}} V_{qq'} \bar{\psi}_q \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_{q'} W_\mu^+ + \sum_i^3 \sum_{\substack{q=u,c,t \\ q'=d,s,b}} V_{qq'}^* \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu (1 - \gamma^5) \psi_q W_\mu^- \right) + g_{em} \left(- \sum_{l=e,\mu,\tau} \bar{\psi}_l \gamma^\mu \psi_l A_\mu + \frac{2}{3} \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q A_\mu - \frac{1}{3} \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} A_\mu \right) \\
 & + g_s \left(\sum_{i,j}^3 \sum_a^8 \sum_{q=u,c,t} \bar{\psi}_q \gamma^\mu \psi_q G_\mu^a T_{ij}^a + \sum_{i,j}^3 \sum_a^8 \sum_{q'=d,s,b} \bar{\psi}_{q'} \gamma^\mu \psi_{q'} G_\mu^a T_{ij}^a \right) - \sum_{l=e,\mu,\tau} \frac{\lambda_l}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_l \psi_l h - \sum_i^3 \sum_{q=u,c,t} \frac{\lambda_q}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_q \psi_q h - \sum_i^3 \sum_{q'=d,s,b} \frac{\lambda_{q'}}{\sqrt{2}} \bar{\psi}_{q'} \psi_{q'} h \\
 & + i g_{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] \\
 & + i g \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_\mu A^\mu - W_\nu^+ W^{-\nu} A_\nu A^\nu] + g^2 \cos^2 \theta_W [W_\nu^+ W^{-\nu} Z_\mu Z^\mu - W_\nu^+ W^{-\nu} 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^{c\nu} - \frac{g_s^2}{4} \sum_{a,b,c} f^{abc} f^{abc} G_\mu^a G_\nu^b G_\rho^c G^{\mu\nu\rho}
 \end{aligned}$$

$$g_{em} = g \sin \theta_W, \quad v^2 = \frac{-m^2}{\lambda} \quad (m^2 < 0, \lambda > 0), \quad m_l = \frac{\lambda_l v}{\sqrt{2}}, \quad m_q = \frac{\lambda_q v}{\sqrt{2}}, \quad m_W = \frac{g v}{2}, \quad m_Z = \frac{g v}{2 \cos \theta_W}, \quad m_h = \sqrt{-2m^2}$$

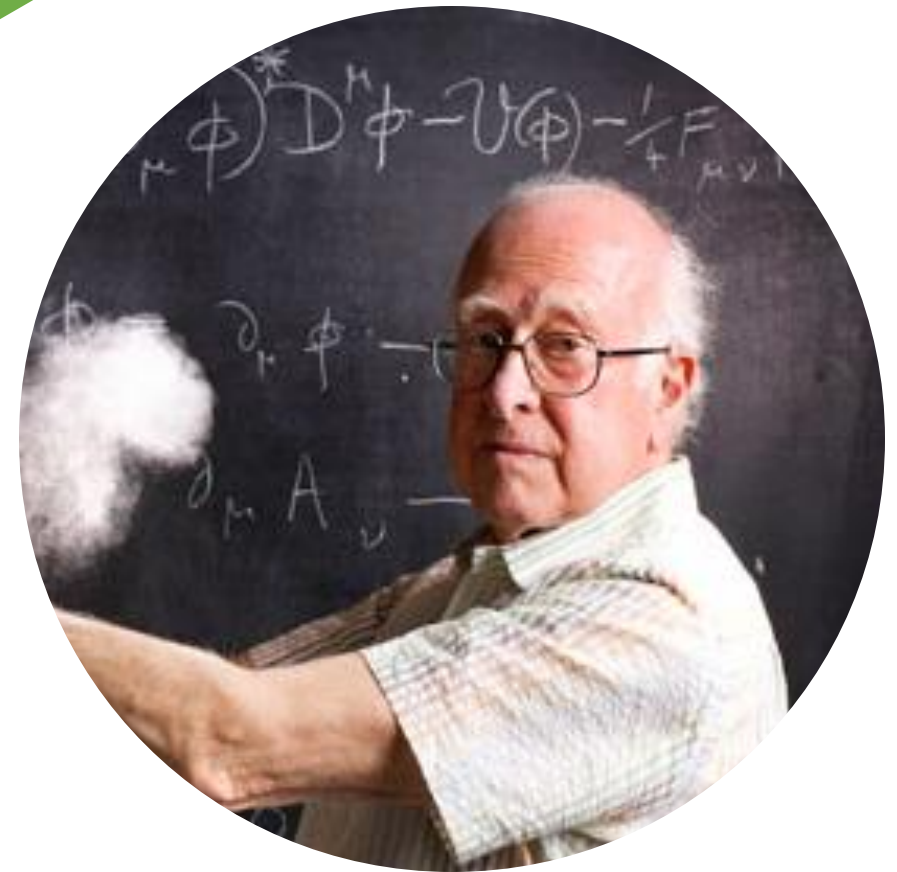
Manca ancora qualcosa...

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.

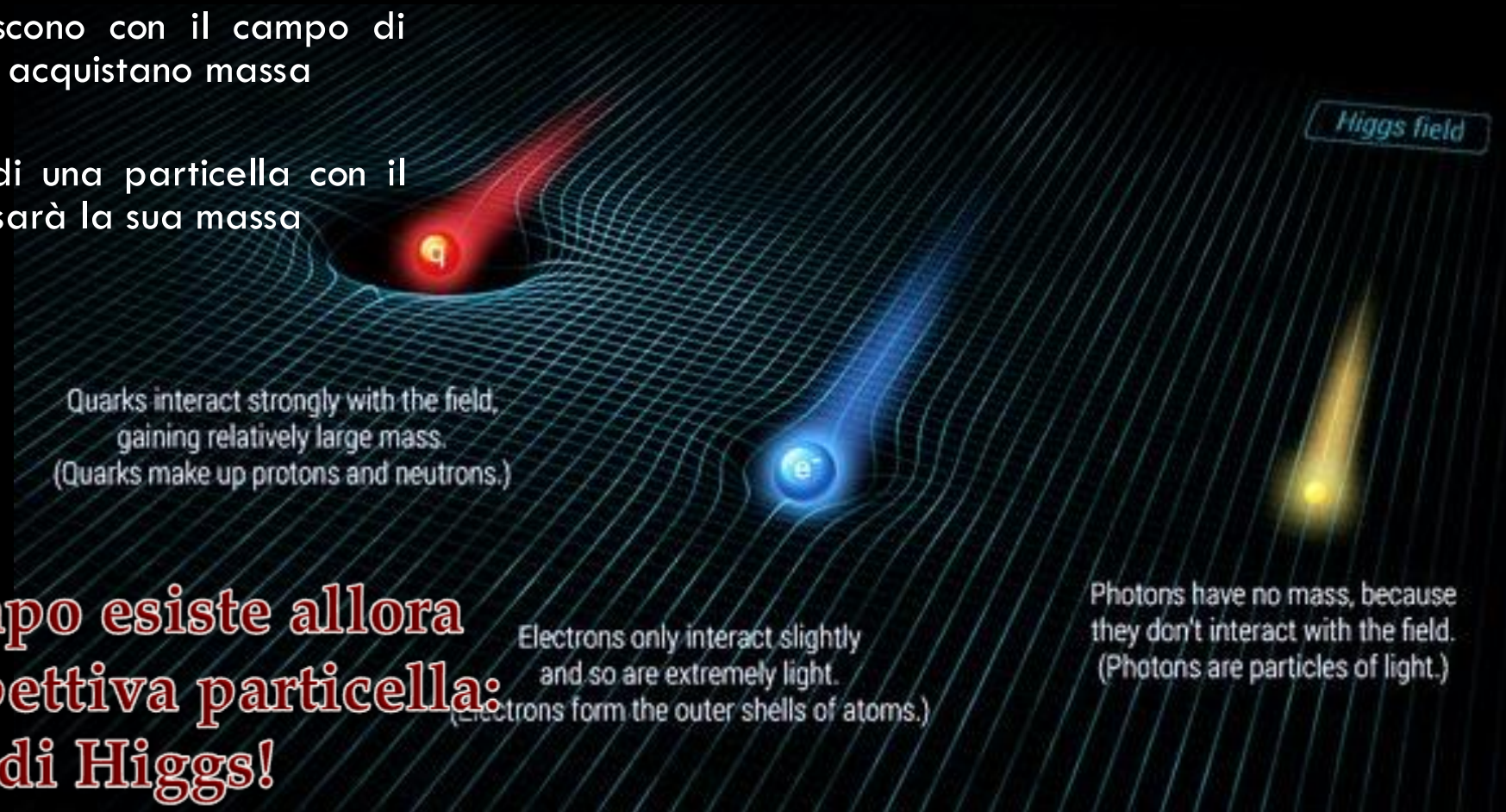
Ma il mondo non è fatto così: le particelle elementari ed anche i mediatori delle forze hanno una massa!

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



Il campo di Higgs

- Le particelle che interagiscono con il campo di Higgs vengono rallentate e acquistano massa
- Maggiore è l'interazione di una particella con il campo di Higgs maggiore sarà la sua massa



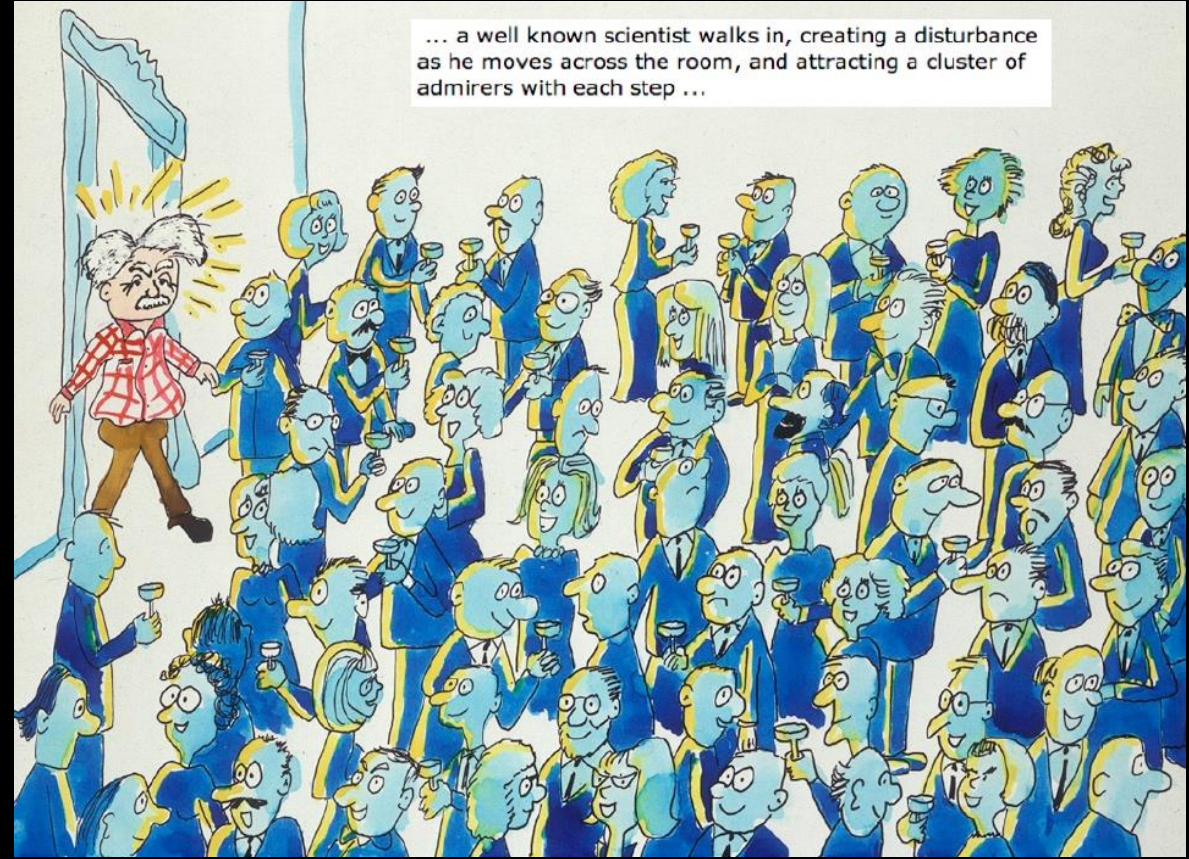
Se esiste un campo esiste allora anche una corrispettiva particella: il bosone di Higgs!

Come funziona il meccanismo di Higgs?

To understand the Higgs mechanism, imagine that a room full of physicists quietly chattering is like space filled only with the Higgs field....



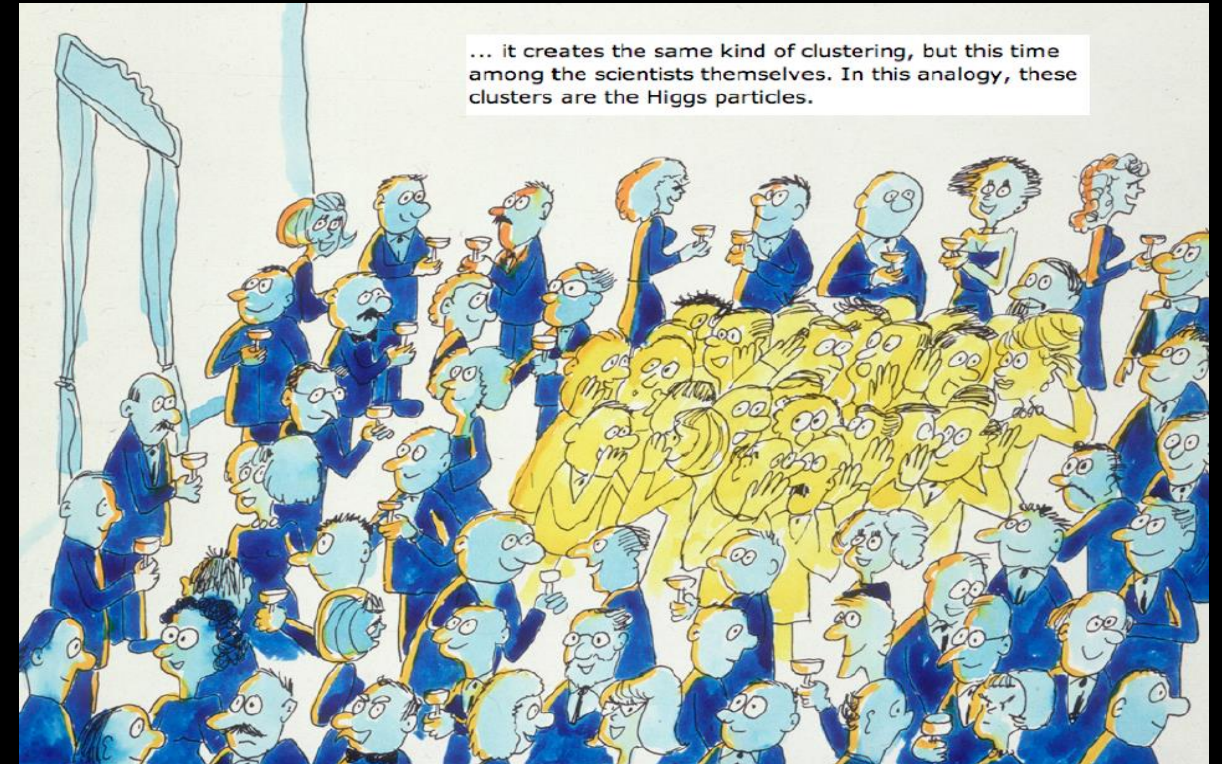
... a well known scientist walks in, creating a disturbance as he moves across the room, and attracting a cluster of admirers with each step ...



Come funziona il meccanismo di Higgs?



Come funziona il meccanismo di Higgs?



Scoperto 10 anni fa!

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”



II Modello Standard

	three generations of matter (fermions)			interactions / force carriers (bosons)	
	I	II	III		
mass	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$	0	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$
charge	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	$\frac{2}{3}$	0	0
spin	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	$\frac{1}{2}$	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H higgs
	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	e electron	μ muon	τ tau	Z Z boson	
	ν_e electron neutrino	ν_μ muon neutrino	ν_τ tau neutrino	W W boson	

QUARKS

LEPTONS

Gauge bosons
Vector bosons

SCALAR BOSONS



Cosa vedremo oggi

A complex particle physics diagram with a central bright point from which numerous lines radiate outwards. The lines are colored in shades of blue, green, and yellow. Various particles are represented by circles and dots, some with labels like $Z(2, 2)$, π , and $Z(1, 1, 2)$. The background is dark with a grid of small dots and lines.

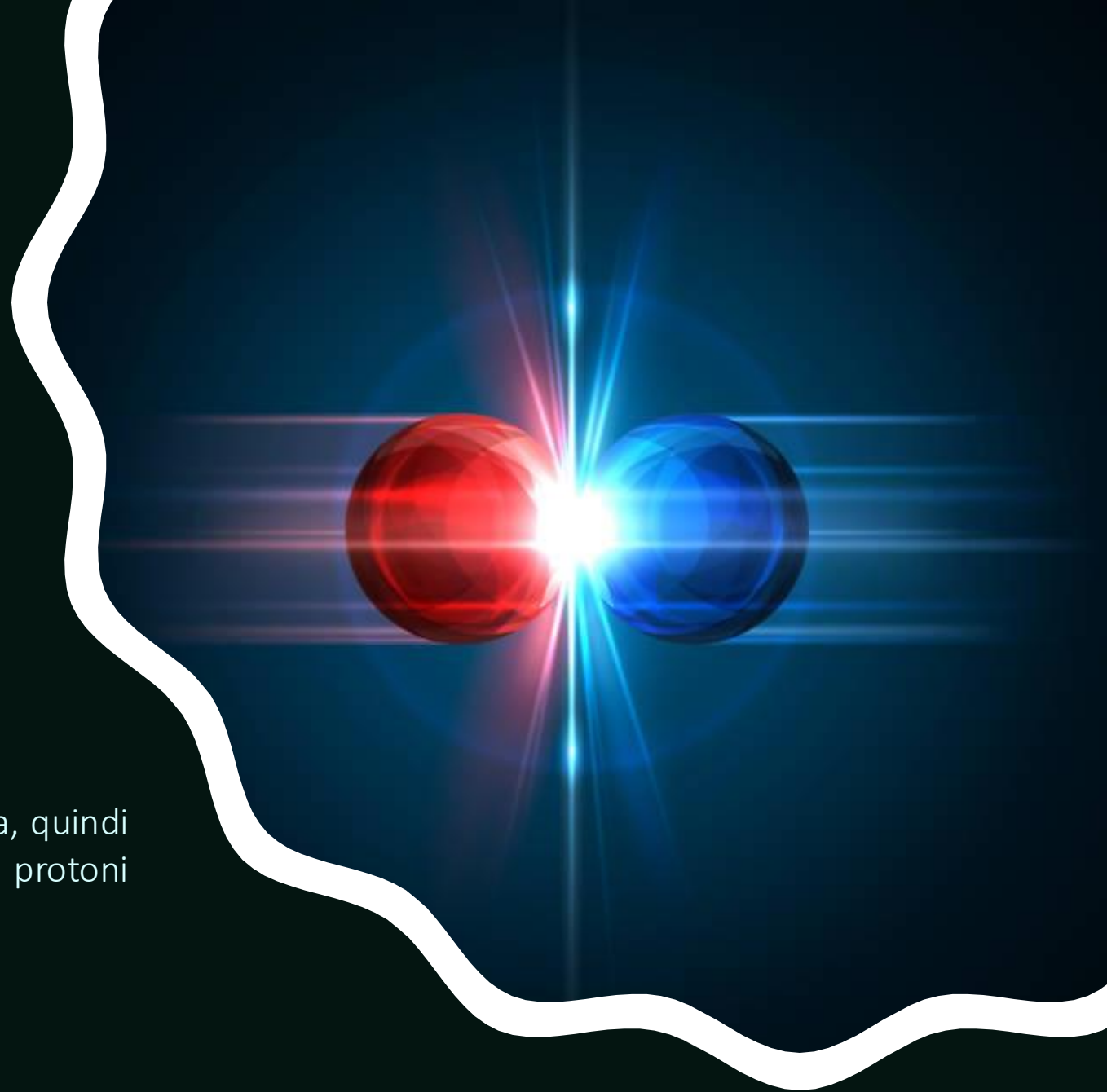
- ⦿ Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- ⦿ Particelle, forze, mediatori
- ⦿ **L'acceleratore LHC al CERN**
- ⦿ Come si rivelano le particelle
- ⦿ Tocca a voi!
- ⦿ Domande, domande ed ancora domande

Ma come si scoprono le particelle?

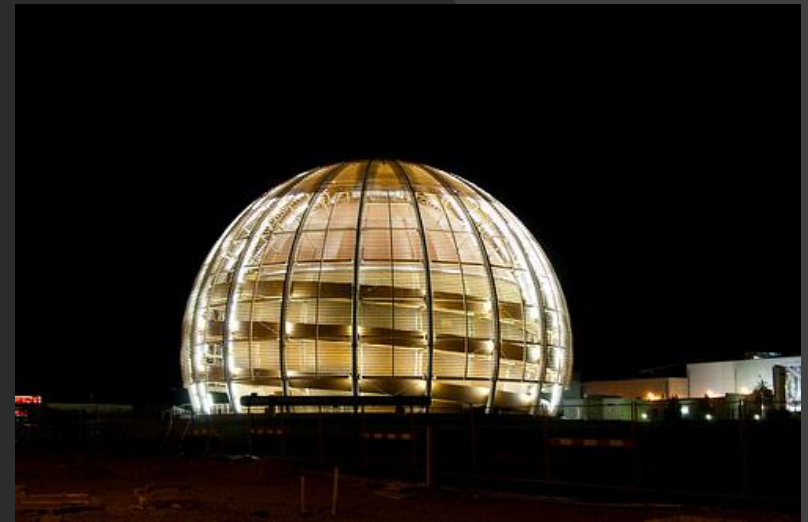
- Una volta solo grazie allo studio della radiazione cosmica
- Oggi siamo in grado di creare nuove particelle in laboratorio, grazie agli acceleratori di particelle

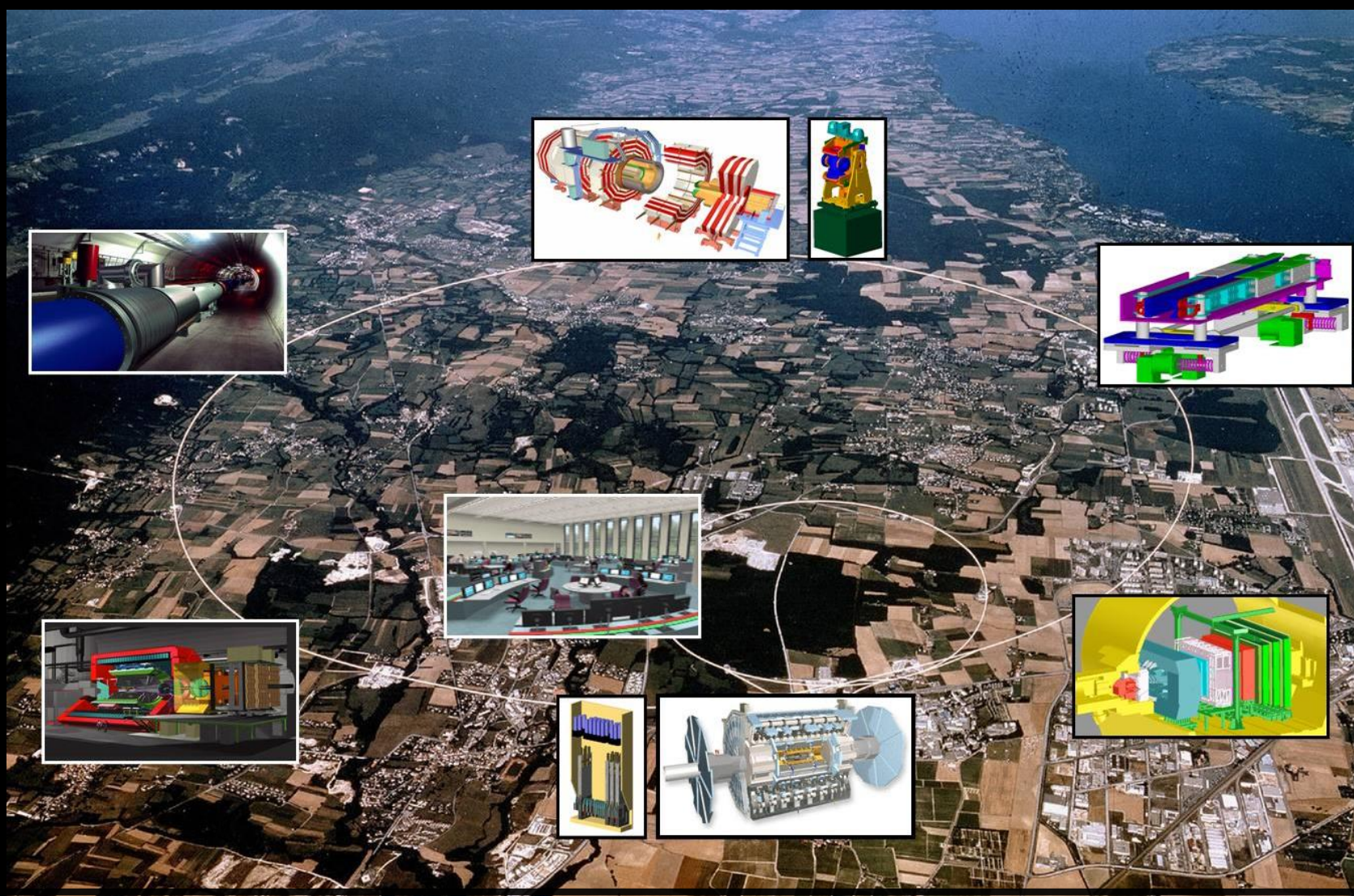
$$E = mc^2$$

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



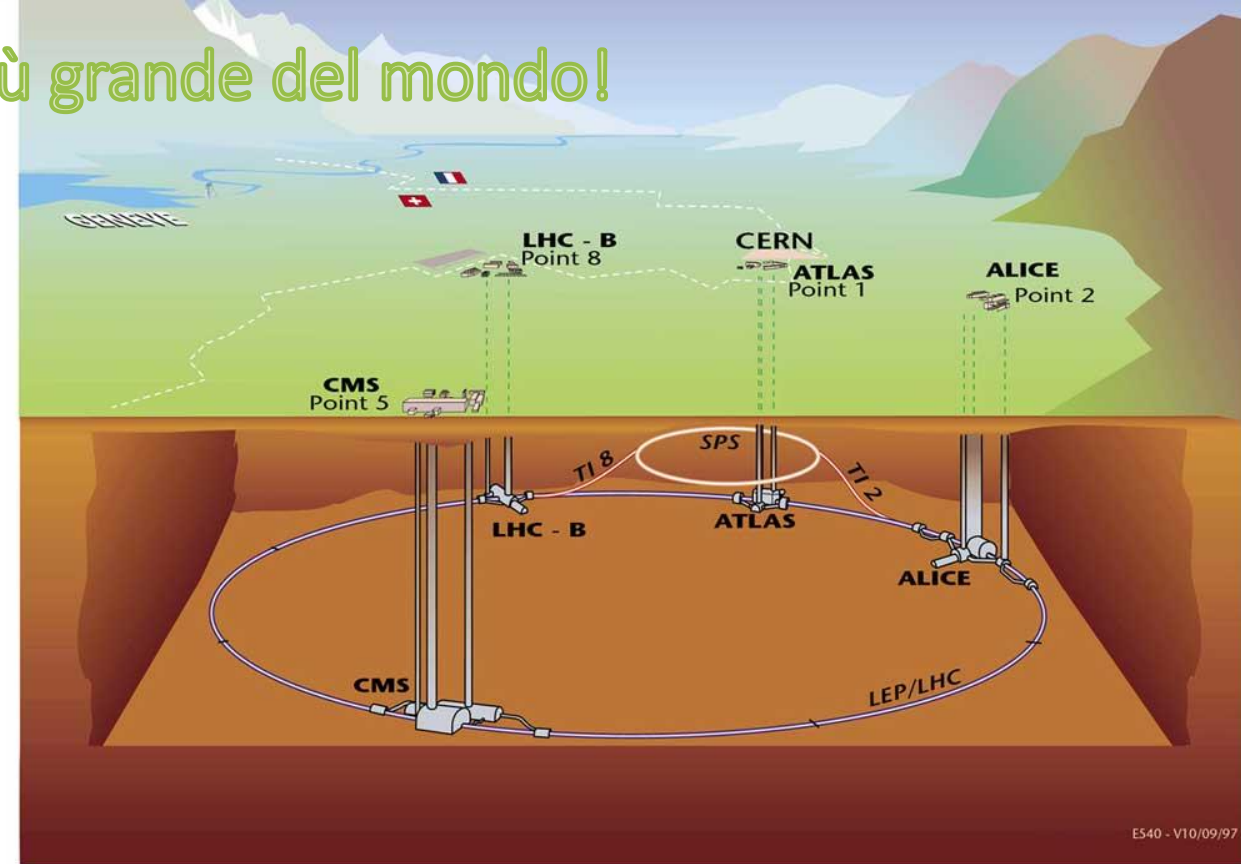
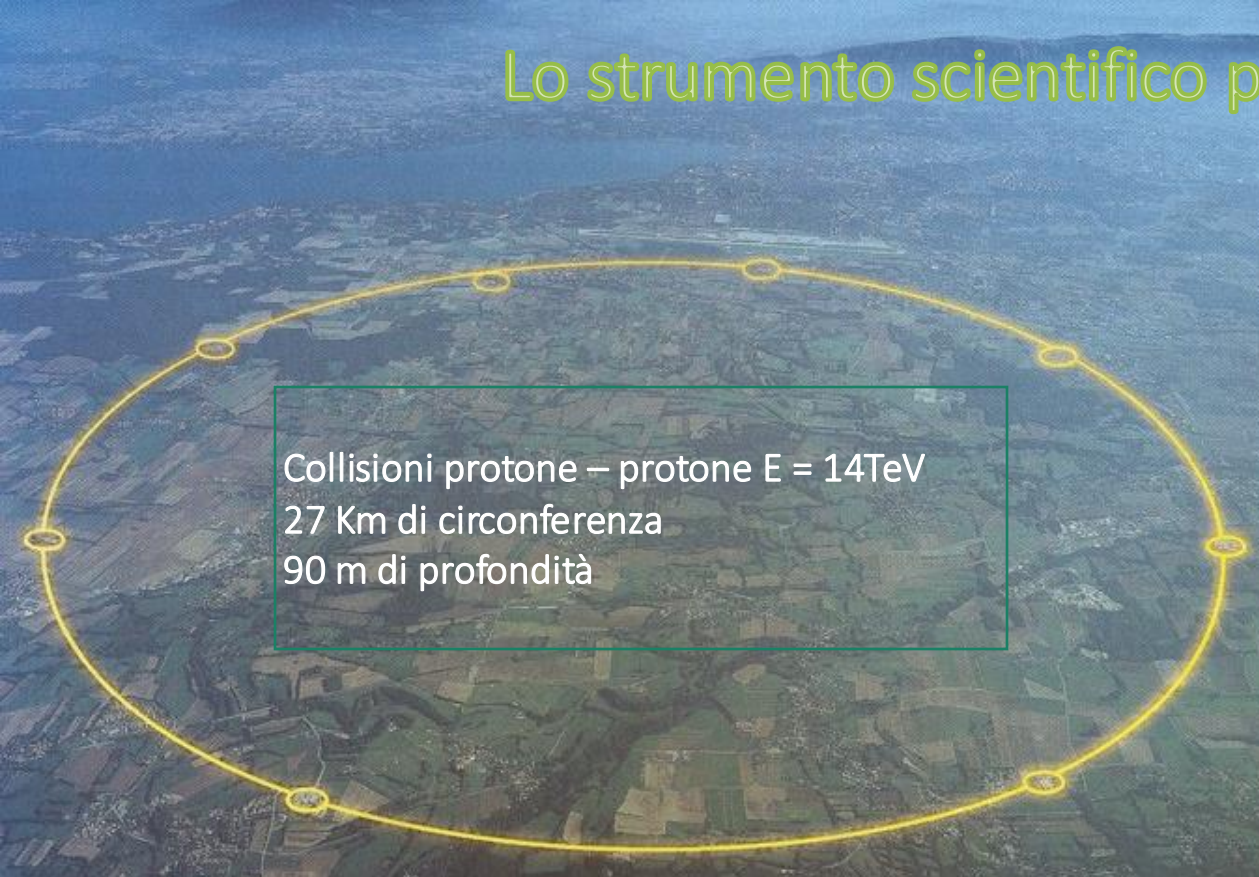
II CERN





Large Hadron Collider (LHC)

Lo strumento scientifico più grande del mondo!

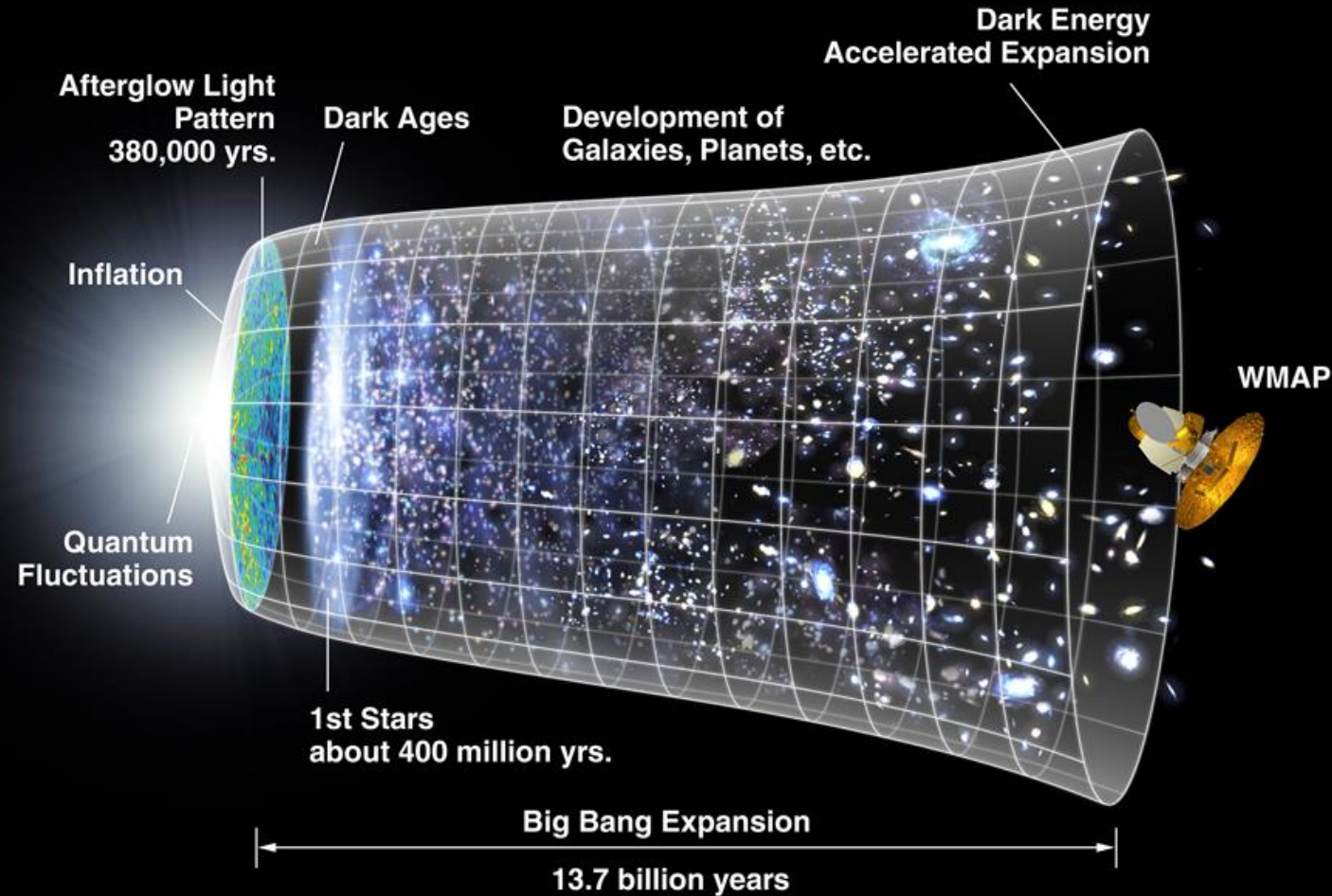


Large Hadron Collider

- Ad LHC si fanno collidere fasci di protoni ad energie mai raggiunte prima
- Dai prodotti di queste collisioni studiamo il funzionamento delle interazioni
- **4 esperimenti principali: ALICE, ATLAS, CMS, LHCB**

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!

É 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



Qualche “numeretto”

I magneti superconduttori che deviano il fascio di LHC operano ad una temperatura di -271.35°C : LHC è il posto più freddo dello spazio!

Campo magnetico generato di 8 Tesla (circa duecentomila volte il campo magnetico terrestre medio)

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

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

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, 40 milioni di volte al secondo!

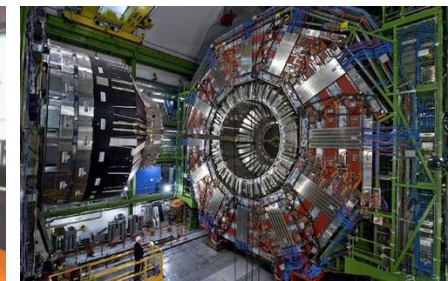
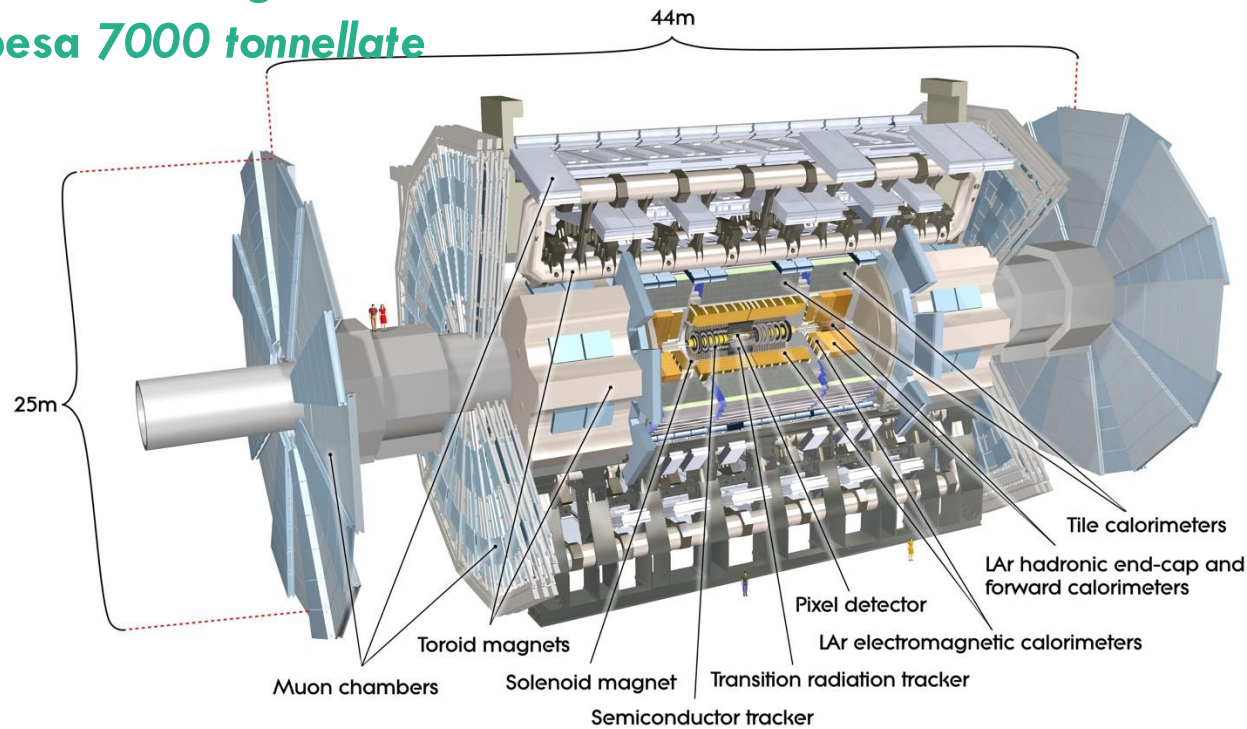
I fasci di protoni sono “larghi” circa 16 micrometri

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

ATLAS

2000 scienziati provenienti da 176 istituti di 38 nazioni

ATLAS è lungo 44 metri con un diametro di 25 metri e pesa 7000 tonnellate



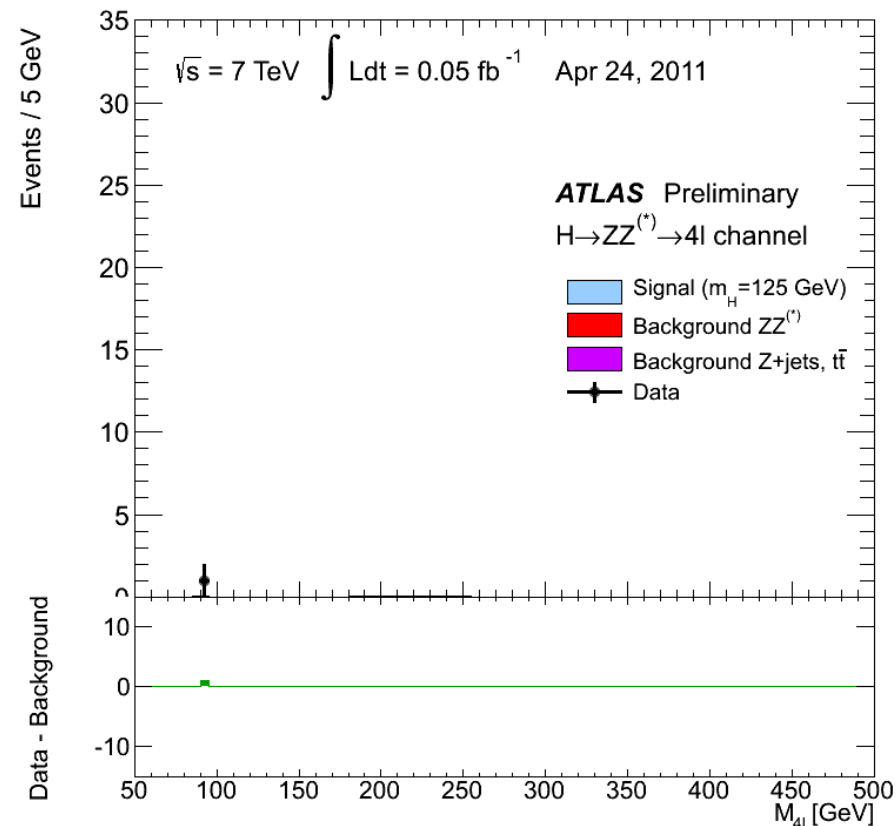
Il più grande rivelatore mai costruito

Risultati

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

Ogni secondo ho 40 milioni di collisioni

Ogni ora produco un evento di Higgs!



Cosa vedremo oggi

An abstract visualization of particle physics, featuring a central bright point from which numerous glowing lines radiate outwards. These lines are interconnected by various sized circles and spheres, some of which are labeled with mathematical symbols like π , $Z(2, 2)$, and $Z(1, 1, 2)$. The overall color palette is dominated by teal, blue, and green, with a dark background.

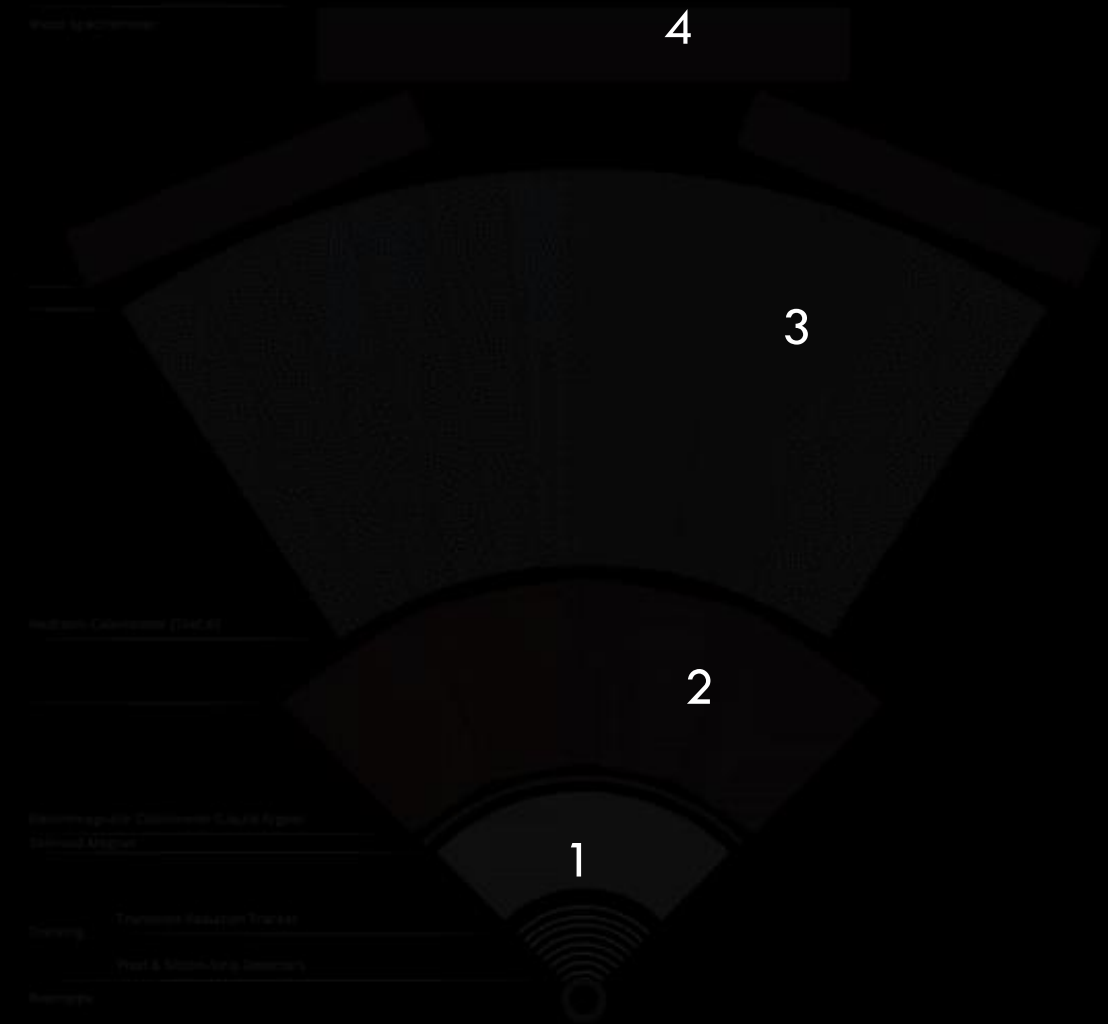
- © Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- © Particelle, forze, mediatori
- © L'acceleratore LHC al CERN
- © Come si rivelano le particelle
- © Tocca a voi!
- © Domande, domande ed ancora domande

Come si rivelano le particelle

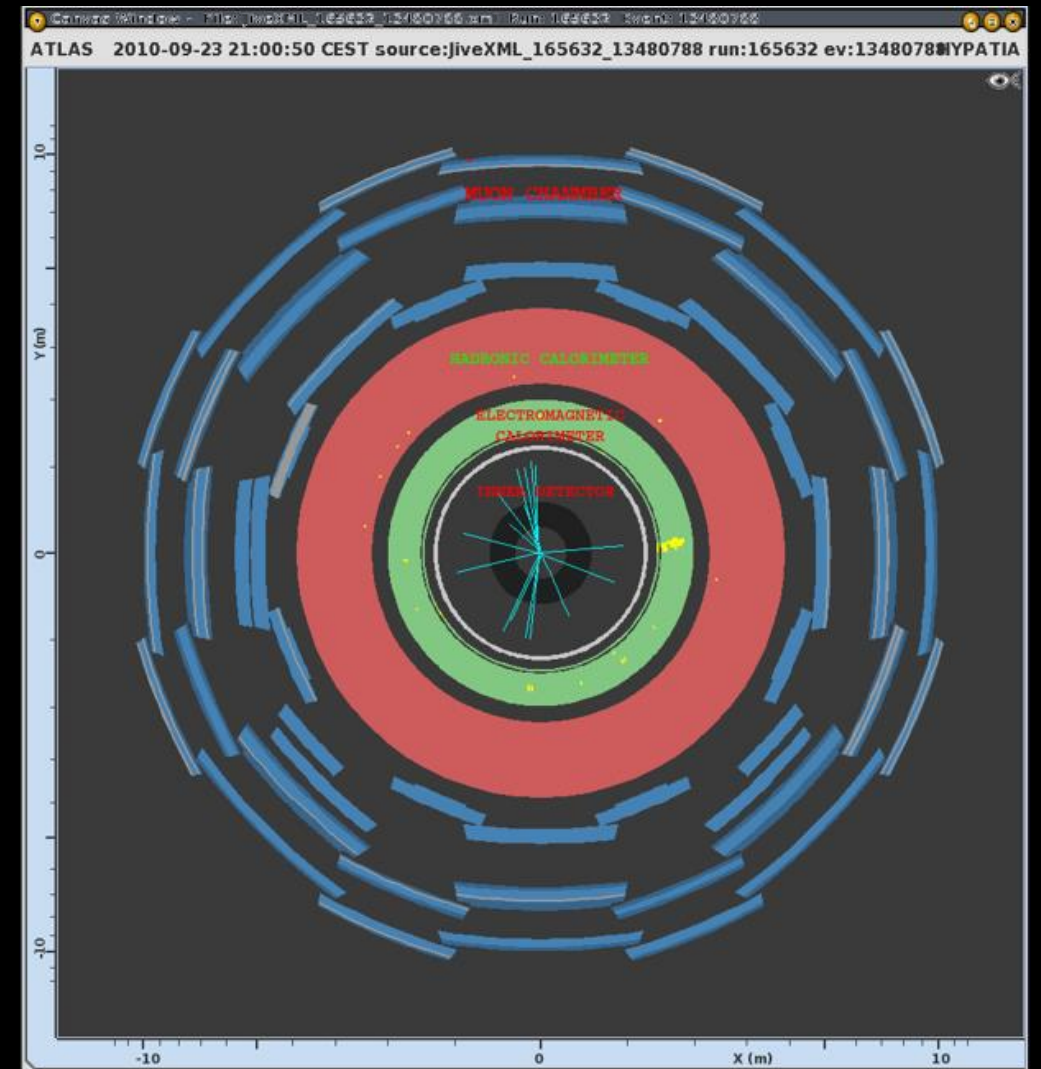
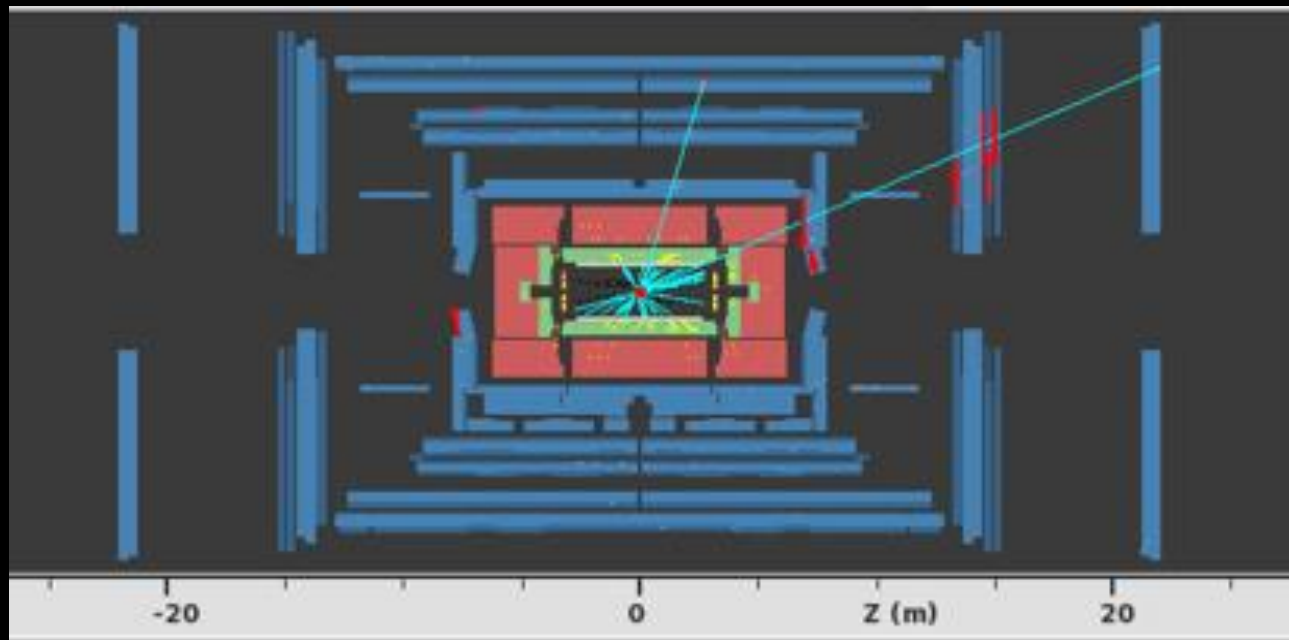
La struttura di ATLAS

Un magnete solenoidale per deviare le particelle

1. Rivelatore interno: per la misura degli impulsi di tutte le tracce cariche. I pixel hanno dimensioni di poche decine e centinaia di micrometri
2. Calorimetro elettromagnetico: fotoni/elettroni
3. Calorimetro adronico: protoni, neutroni, adroni
4. Spettrometro per muoni: muoni



Come si rivelano le particelle



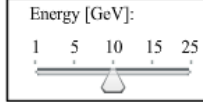
Come si rivelano gli elettroni

ATLAS

animation

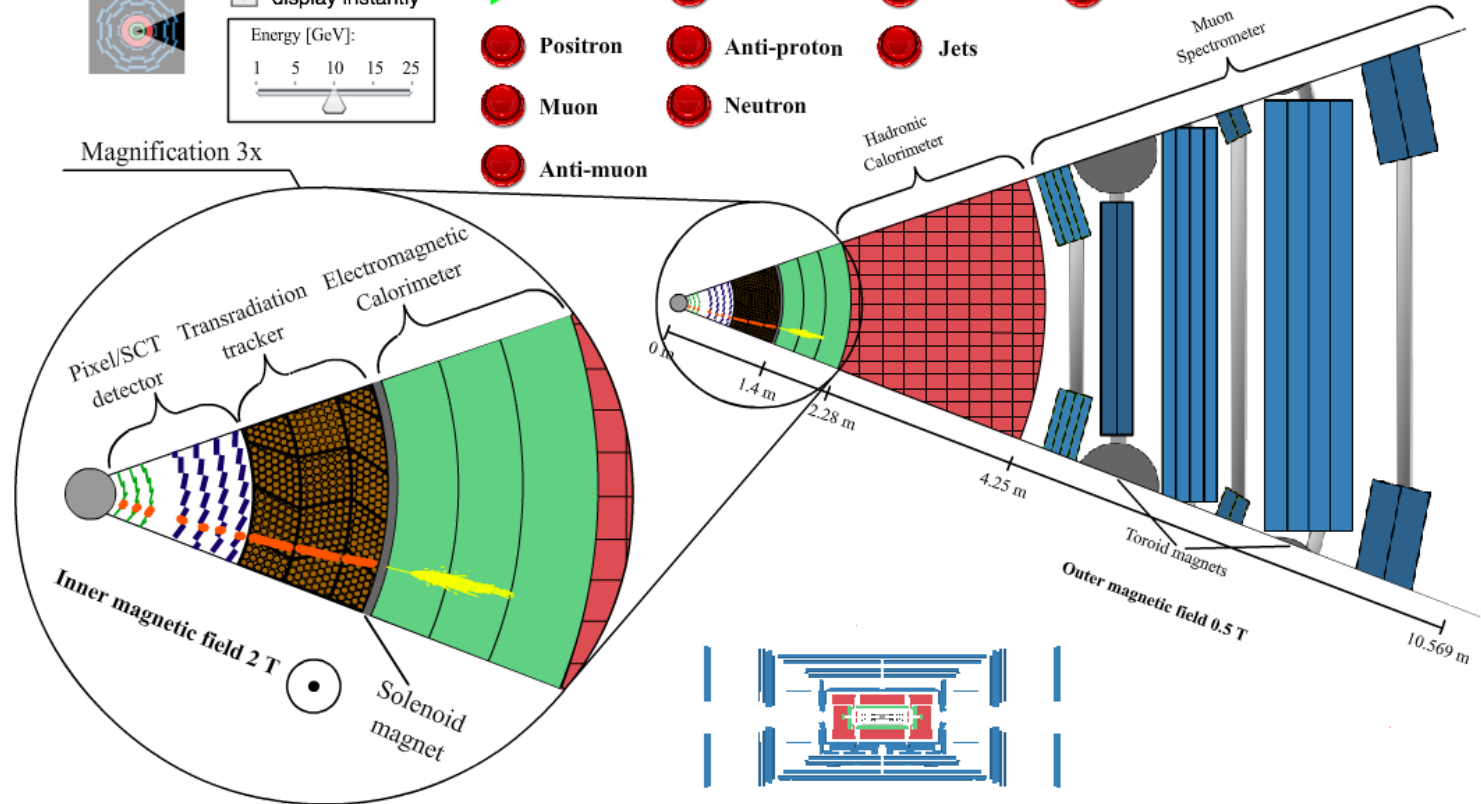


display instantly



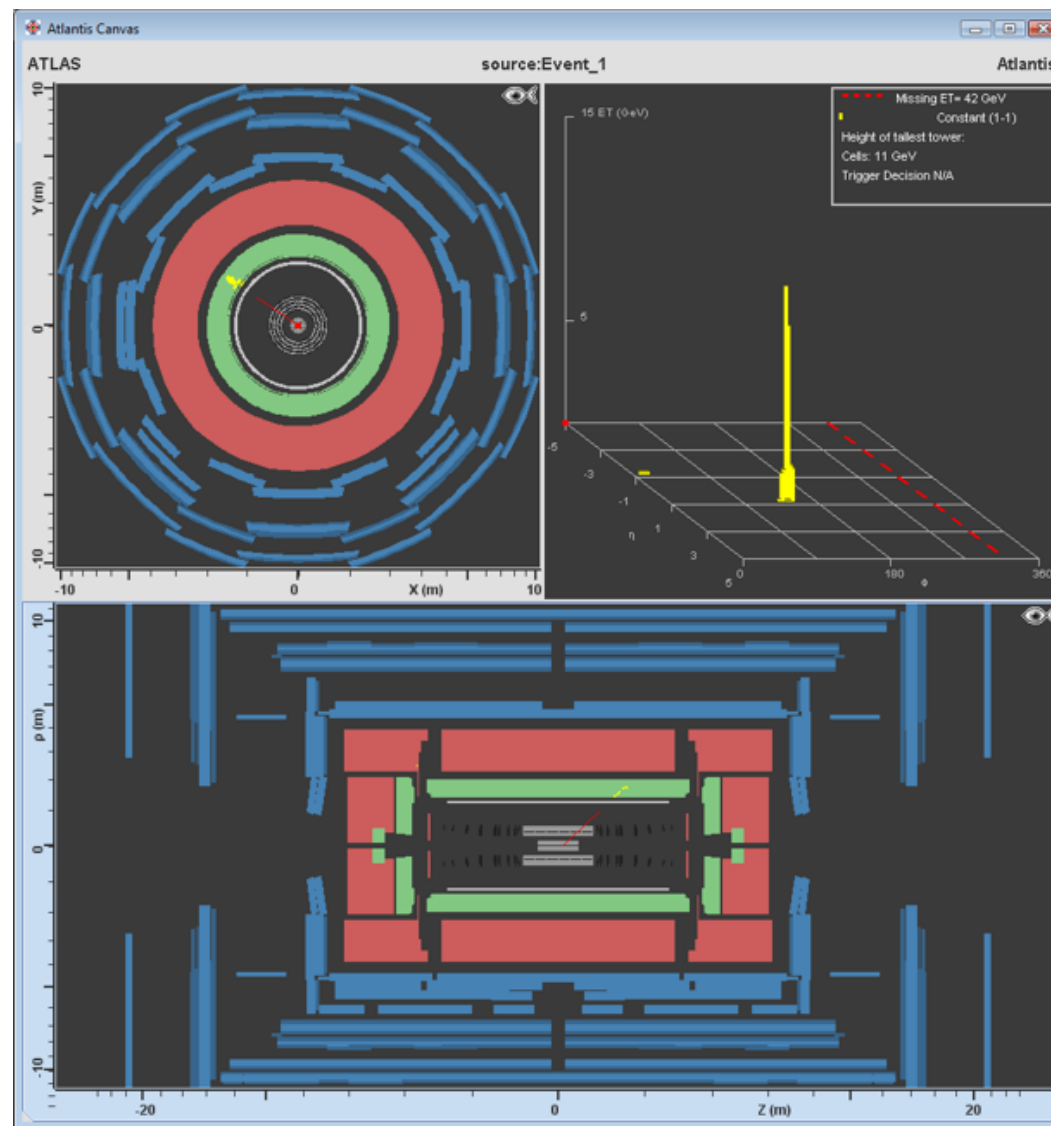
Magnification 3x

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

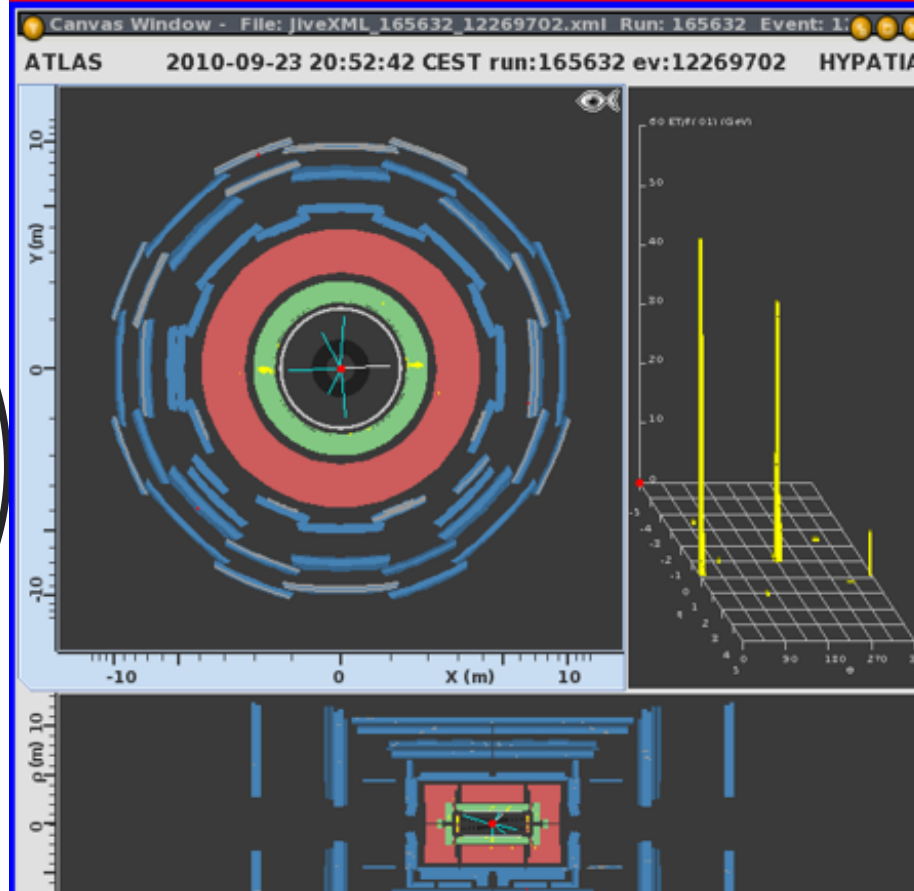


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Come si
rivelano gli
elettroni



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



HYPATIA - Track Momenta Window

Previous Event Next Event Insert Electron Insert Muon Delete Track
 ETMIs: 9.265 GeV ϕ : -1.000 rad Collection: MET Reffinal
[naikenp/pages/MasterClass/zpath/Els//jiveXML_165632_12269702](#)

Reconstructed Tracks

Track	+/-	P [GeV]	Pt [GeV]	ϕ	θ
Tracks 0	+	42.22	42.22	-3.101	1.569
Tracks 1	-	50.46	37.04	0.030	0.824
Tracks 13	+	1.66	1.44	1.725	1.057
Tracks 16	-	3.67	1.04	1.838	2.855
Tracks 29	-	5.55	1.38	-2.121	0.251
Tracks 35	+	2.16	1.43	-1.259	0.728

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

HYPATIA - Control Window

Parameter Control Interaction and Window Control Output Display
 Projection Data Cuts InDet Calo MuonDet Objects Geometry

Data

Name	Value
<input checked="" type="checkbox"/> Status	
<input checked="" type="checkbox"/> InDet	
<input checked="" type="checkbox"/> Calo	
<input checked="" type="checkbox"/> MuonDet	

Due tracce e due 'cluster' nel calorimetro elettromagnetico

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

Come si rivelano i fotoni

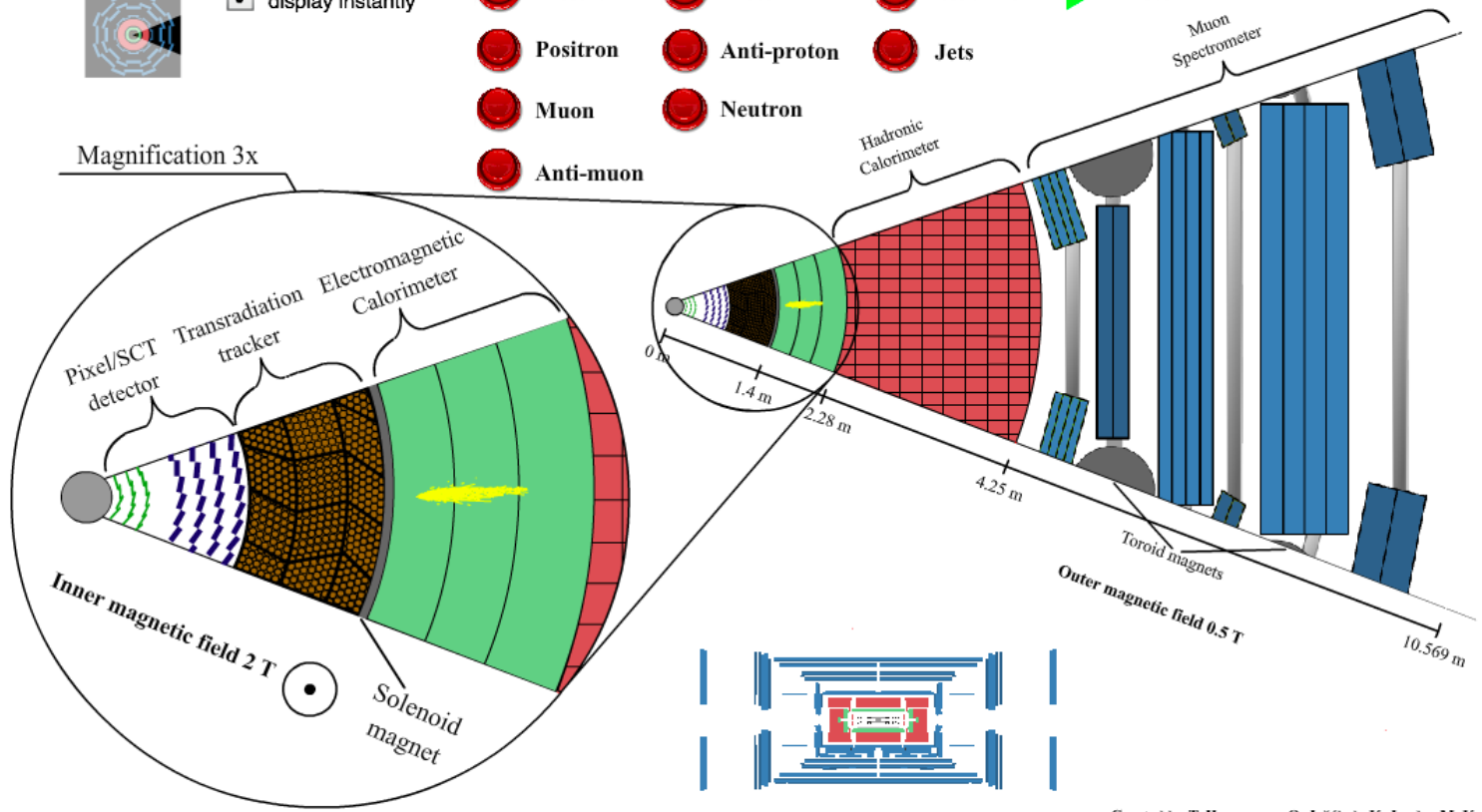
ATLAS



display instantly

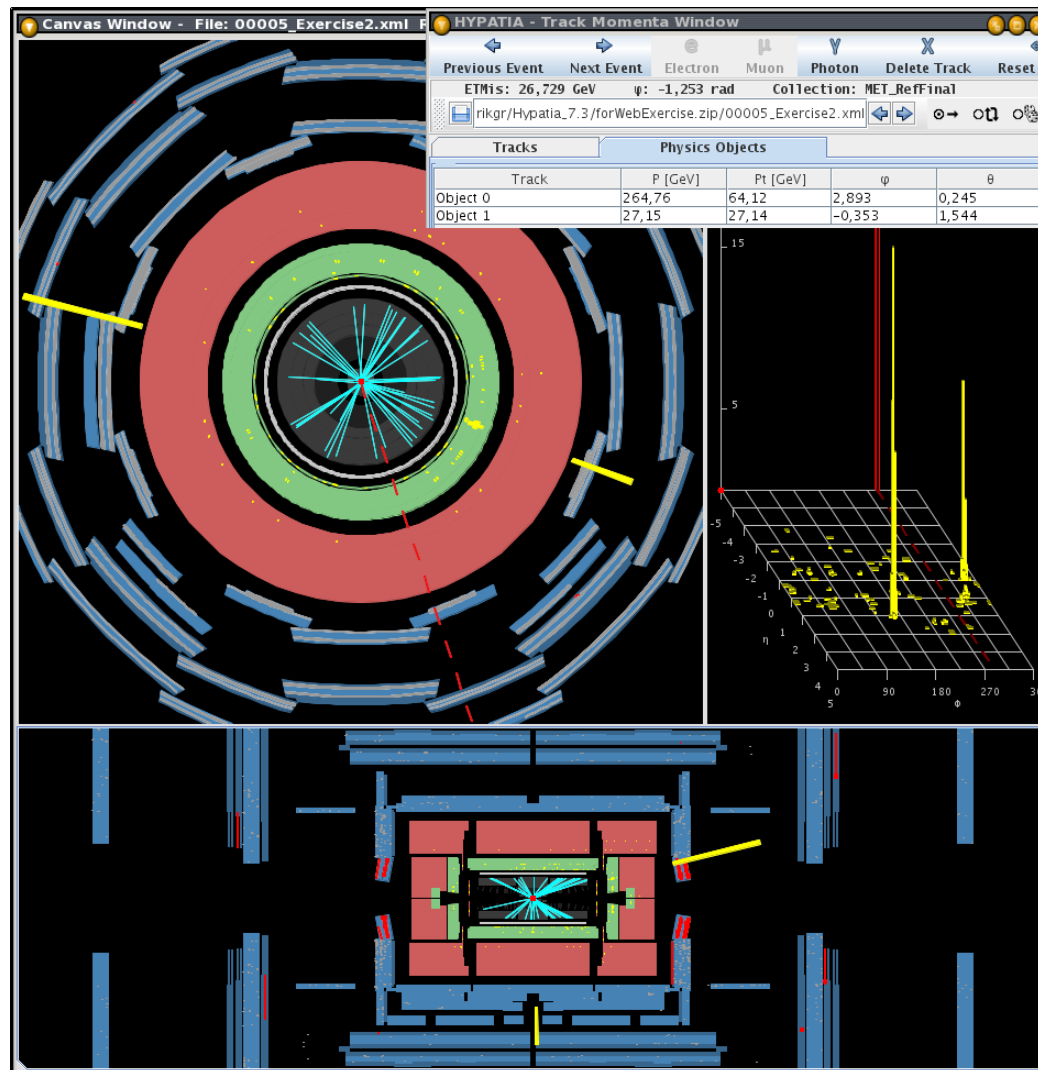
- Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon

Magnification 3x



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

Come si
rivelano i
fotoni



Come si rivelano i muoni

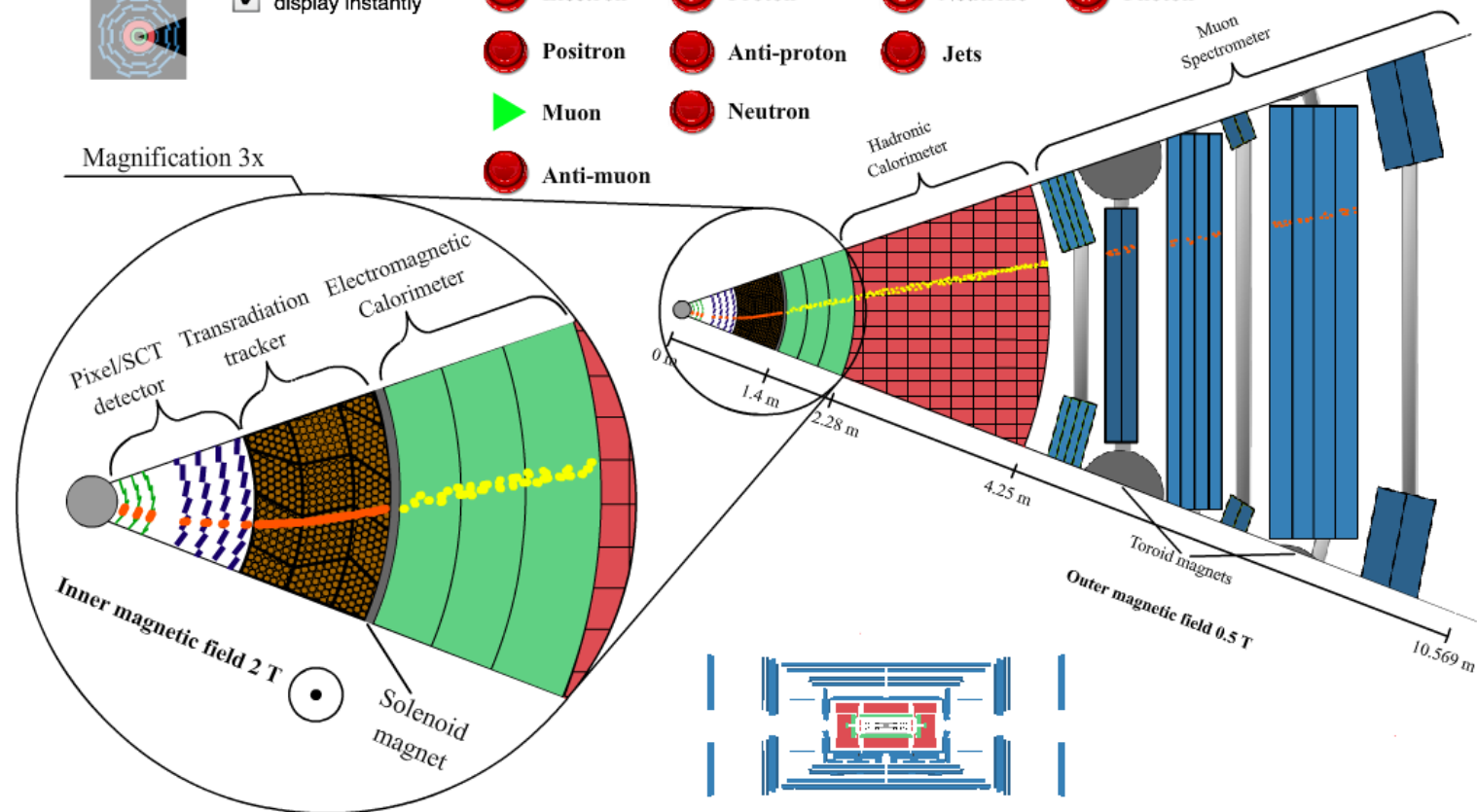
ATLAS



display instantly

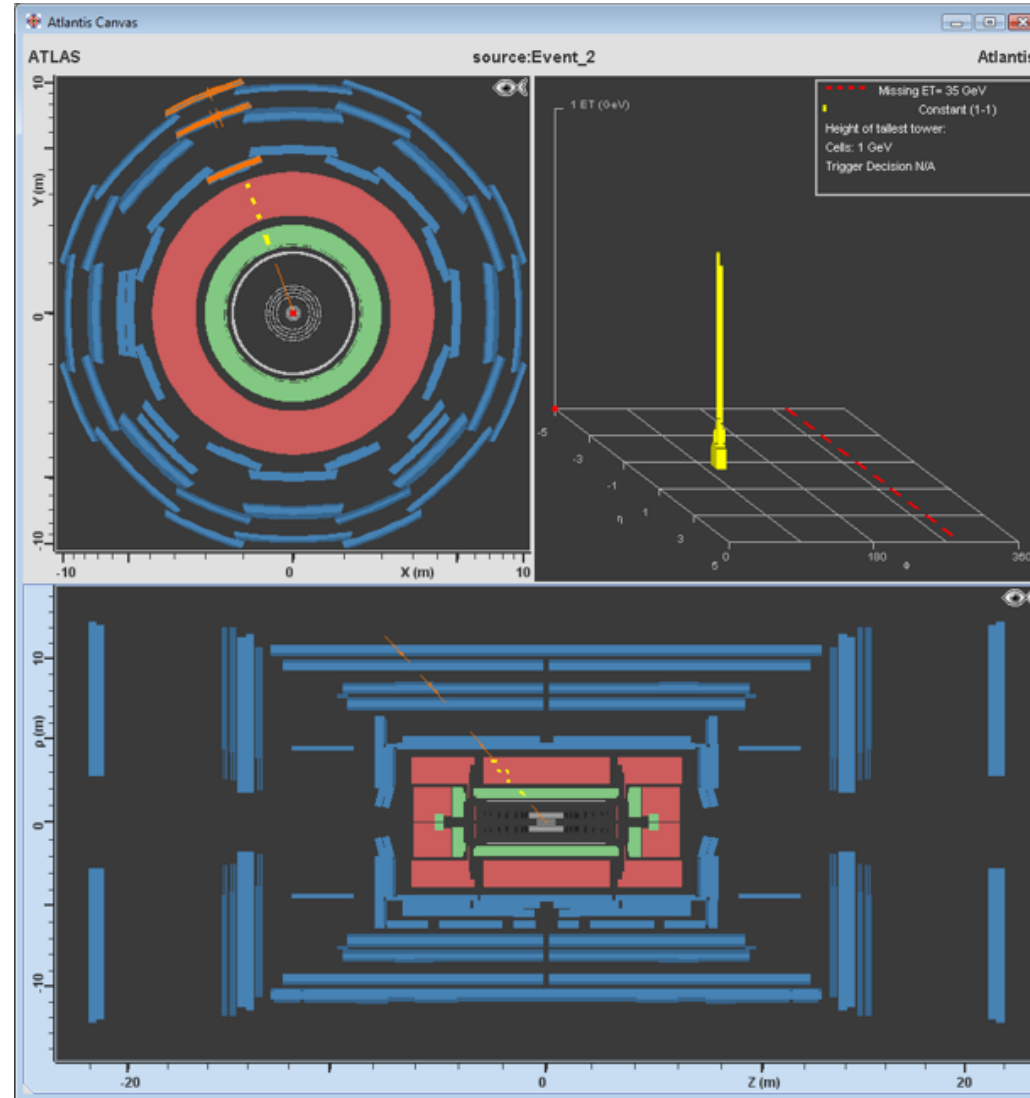
- Electron
- Proton
- Neutrino
- Photon
- Positron
- Anti-proton
- Jets
- Muon
- Neutron
- Anti-muon

Magnification 3x

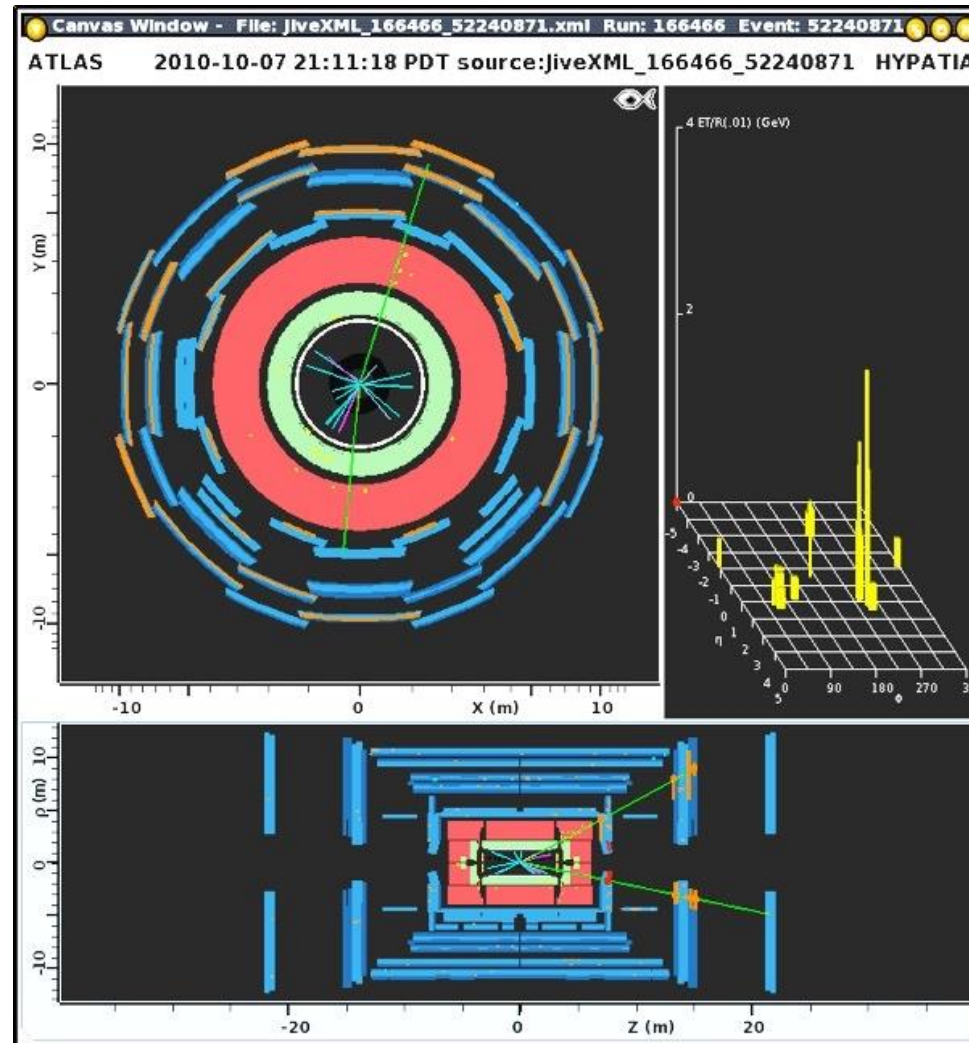


Created by T. Herrmann, O. Jeřábek, K. Jende, M. Kobel

Come si
rivelano i
muoni

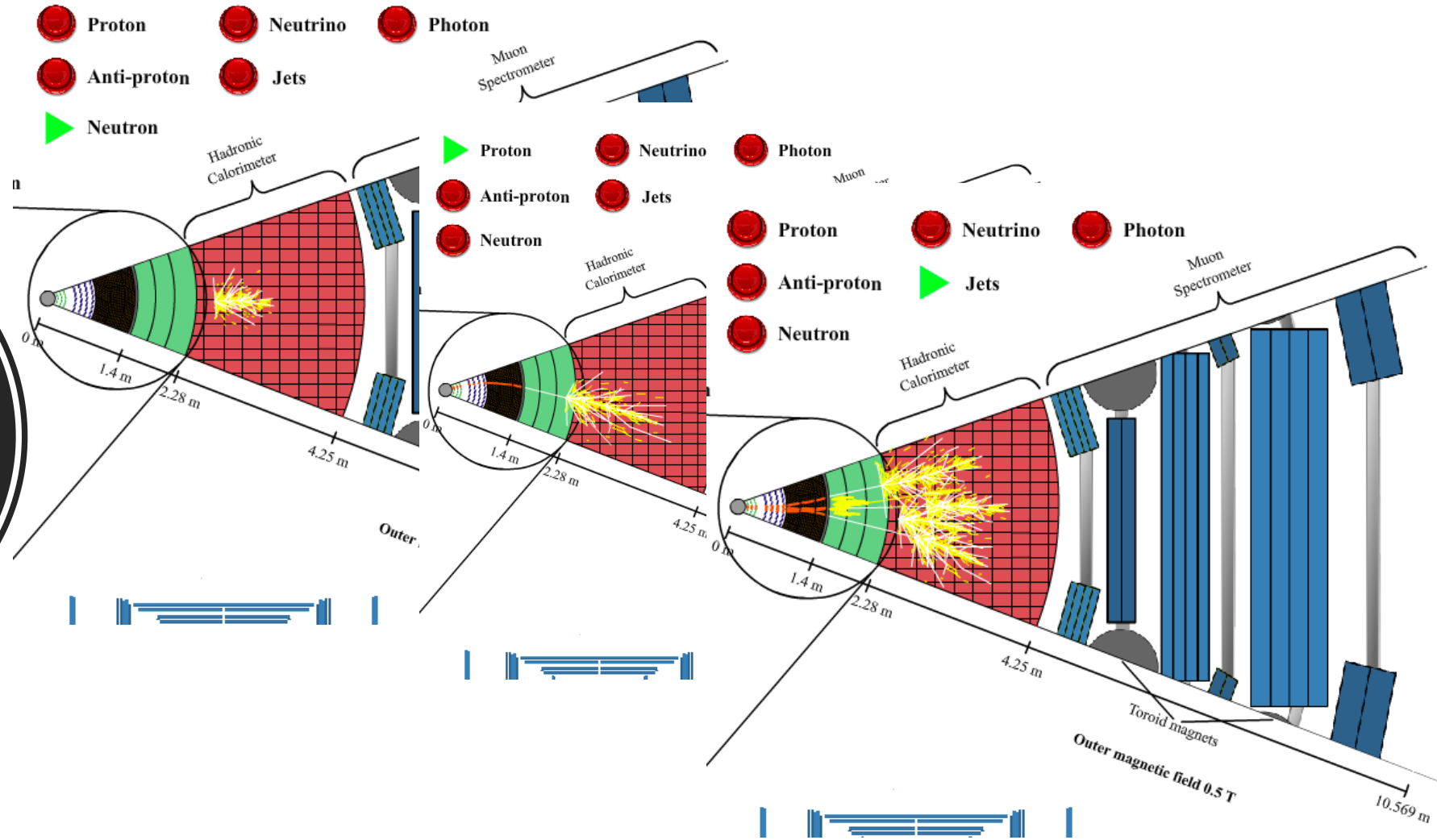


Esempio:
 $Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$

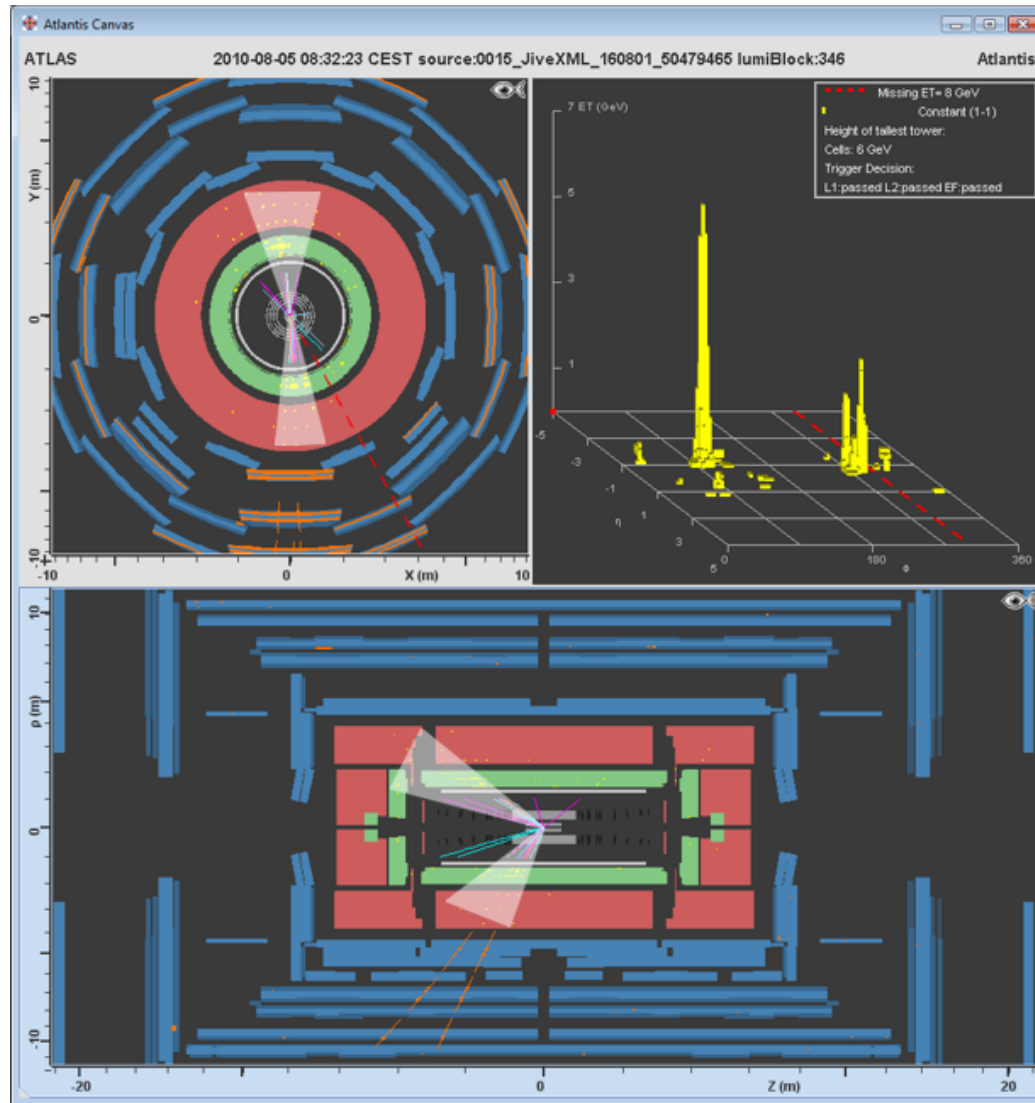


Muoni: particelle cariche penetranti \rightarrow tracce nei rivelatori di vertice e nello spettrometro a muoni (rivelatori esterni) e piccoli depositi di energia nei calorimetri

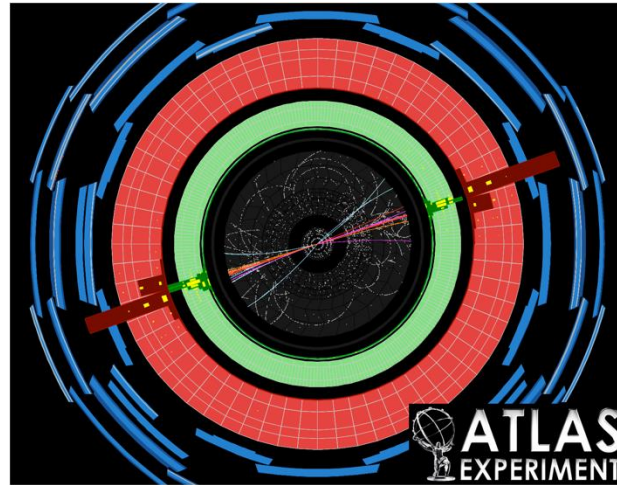
Come si rivelano gli adroni



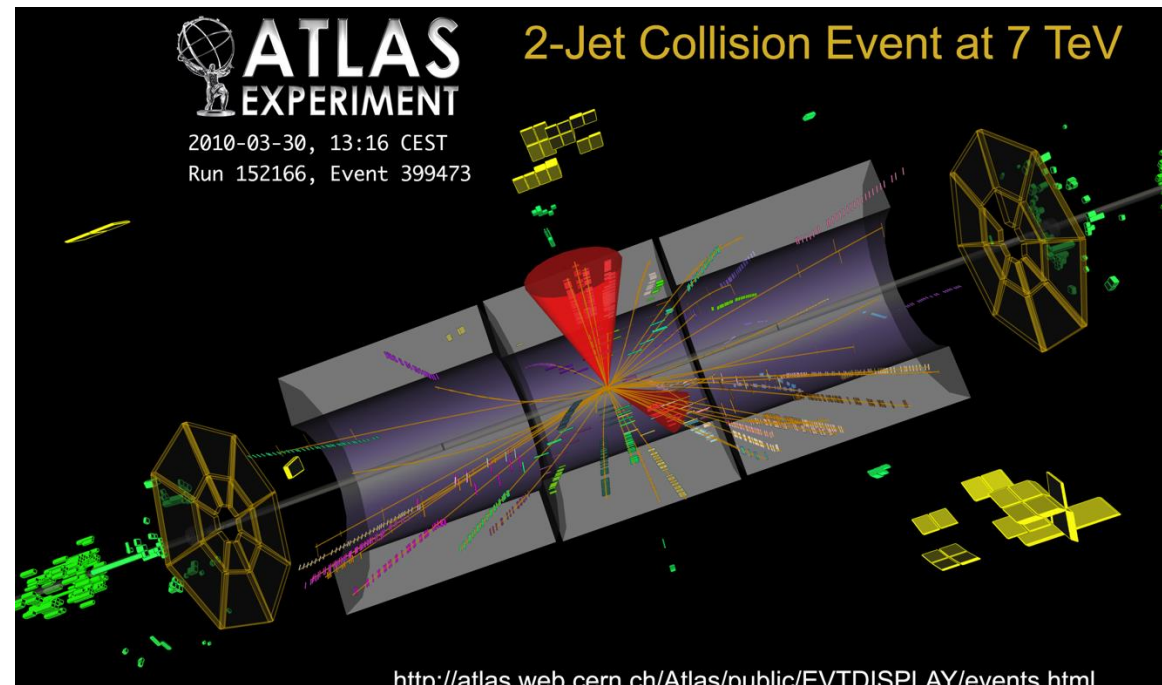
Come si
rivelano gli
adroni



Come si
rivelano gli
adroni

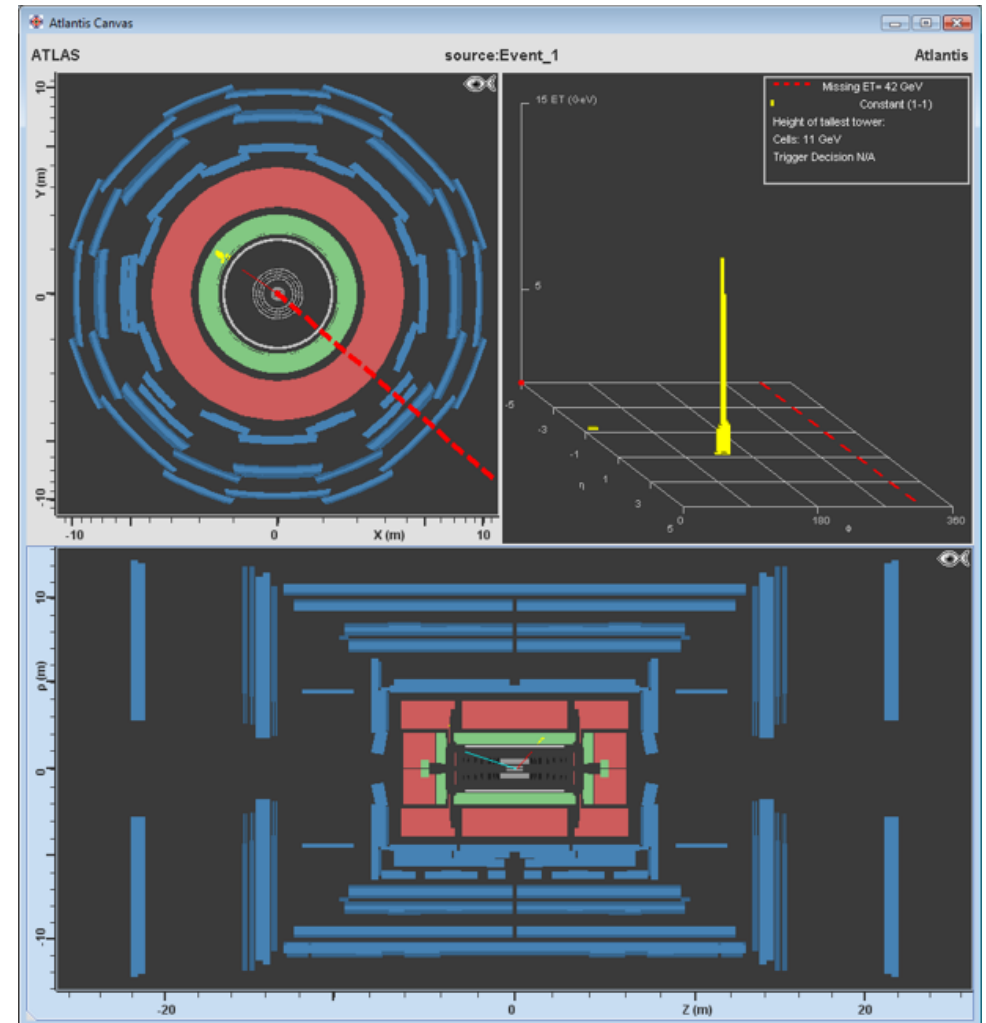


Un singolo jet può contenere molte (decine) tracce cariche, depositi di energia nei calorimetri em ed adronico



I neutrini non interagiscono con nessun rivelatore di ATLAS (interazione debole). Un modo per ricostruirli è utilizzare la conservazione del quadrimomento \rightarrow misura indiretta

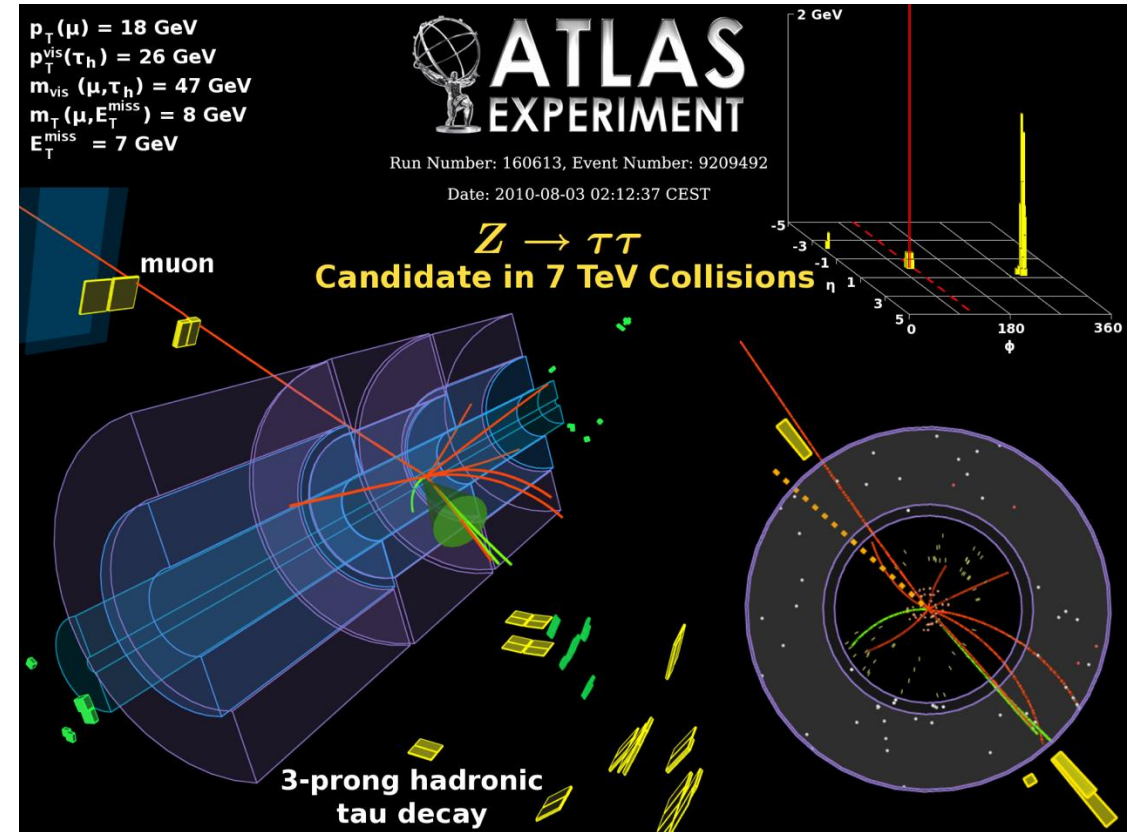
E i neutrini?



I tau decadono molto in fretta (a causa della massa $m=1.81\text{GeV}$ elevata rispetto a elettroni e muoni) \rightarrow la loro presenza va ricostruita

E i tau?

- $\tau \rightarrow e \nu \nu$
- $\tau \rightarrow \mu \nu \nu$
- $\tau \rightarrow \nu \text{ adroni}$



Per una Z che decade in due tau: $Z \rightarrow \tau^+\tau^-$ lo stato finale è più complesso di quelli visti finora

Cosa vedremo oggi

An abstract visualization of particle physics, featuring a central bright point from which numerous glowing lines radiate outwards. These lines are interspersed with various sized circles and spheres, some of which are labeled with mathematical symbols like π , $Z(2, 2)$, and $Z(1, 1, 2)$. The overall color palette is dominated by teal, blue, and green, with a dark background.

- ⦿ Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- ⦿ Particelle, forze, mediatori
- ⦿ L'acceleratore LHC al CERN
- ⦿ Come si rivelano le particelle
- ⦿ **Tocca a voi!**
- ⦿ Domande, domande ed ancora domande



Cosa farete oggi

Il vostro obiettivo sarà quello di ricostruire delle particelle a partire dalle tracce lasciate all'interno del rivelatore dai loro prodotti di decadimento

- Z (91 GeV) \rightarrow decade in coppie di leptoni, di quark
- H (125 GeV) \rightarrow decade in fotoni, bosoni Z/W (che decadono a loro volta) e altro (che non vedrete!)
- J/ψ (3.1 GeV) \rightarrow decade in coppie di leptoni
- Υ (9.4 GeV) \rightarrow decade in coppie di leptoni

In ogni evento che analizzerete, selezionerete delle particelle e potrete combinarle per verificare se provengono dalle particelle sopraelencate

COME? Misurando la massa!



Dettagli da ricordare!

- La carica si conserva! Se una particella neutra decade in due particelle cariche, le due cariche devono essere opposte!
 - Va bene $Z \rightarrow e^+e^-$?
- Una coppia di particelle che decade è sempre del tipo particella/antiparticella, **non mischiamo le cose!**
 - Va bene $Z \rightarrow e^+\mu^-$?
- Qual'è la mia "tolleranza" nel ricostruire una particella? Se ho una coppia elettrone/positrone che mi dà una massa di 89 GeV, posso dire che ho trovato una Z(91 GeV)?
 - Se peso 85 kg su una bilancia, e 84.5 su un'altra, sono sempre io? Sì, se la bilancia ha una sensibilità del kg!
 - È importante capire la sensibilità dello strumento!

Cosa vedremo oggi

- © Perché studiamo la Fisica delle Particelle
- © Particelle, forze, mediatori
- © L'acceleratore LHC al CERN
- © Come si rivelano le particelle
- © Tocca a voi!
- © Domande, domande ed ancora domande



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:

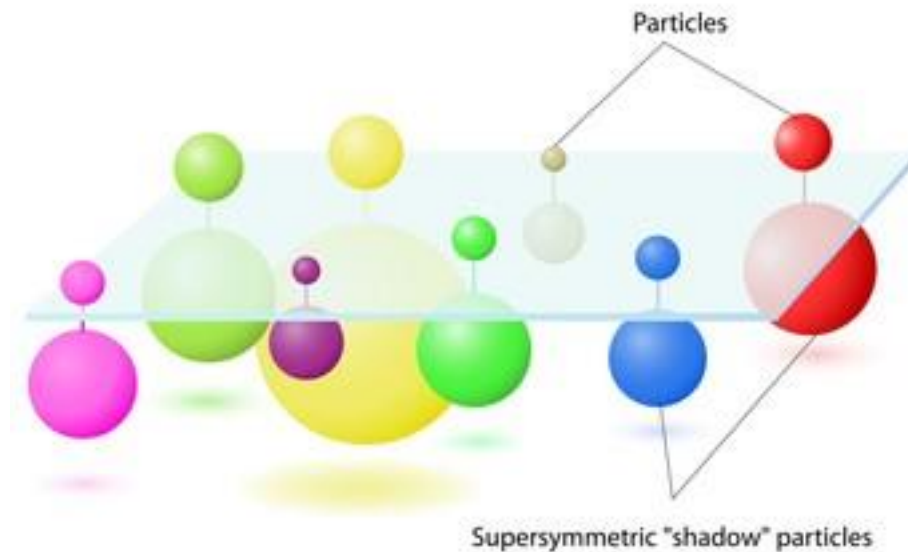
- come si è evoluto dal Big-Bang ad oggi ?*
- qual è la natura della materia/energia oscura che lo pervade ?*
- dove e come è finita l'antimateria che era presumibilmente presente alle origini ?*
- esiste un quadro interpretativo unitario a piccola e a grande scala ?*

LHC può rispondere a questi quesiti?

SuperSimmetria?

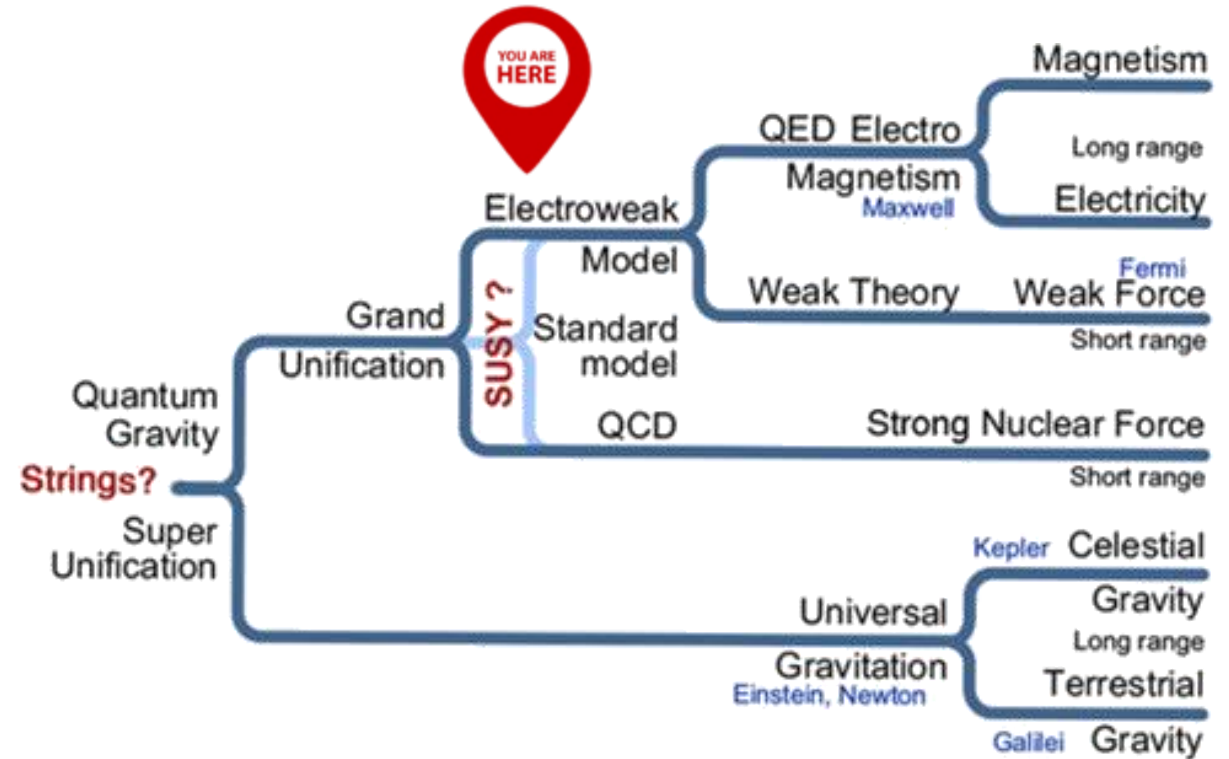
LHC potrebbe fare un passo verso la “Grande Unificazione” trovando le particelle supersimmetriche. Secondo la teoria della Supersimmetria (SUSY), ogni particella ha una “compagna” detta sparticella

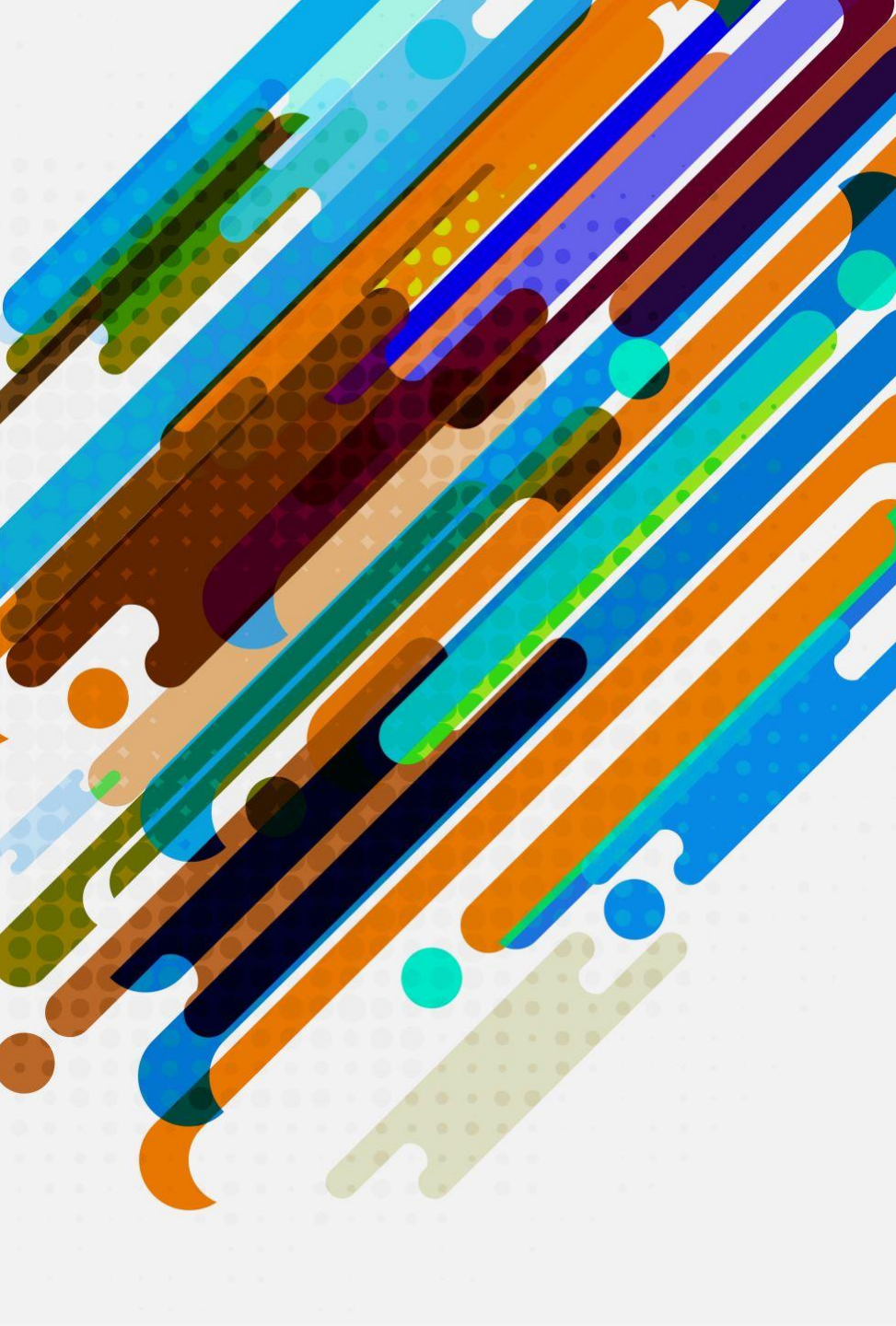
SUPERSYMMETRY



Nessuna traccia di SUSY finora!

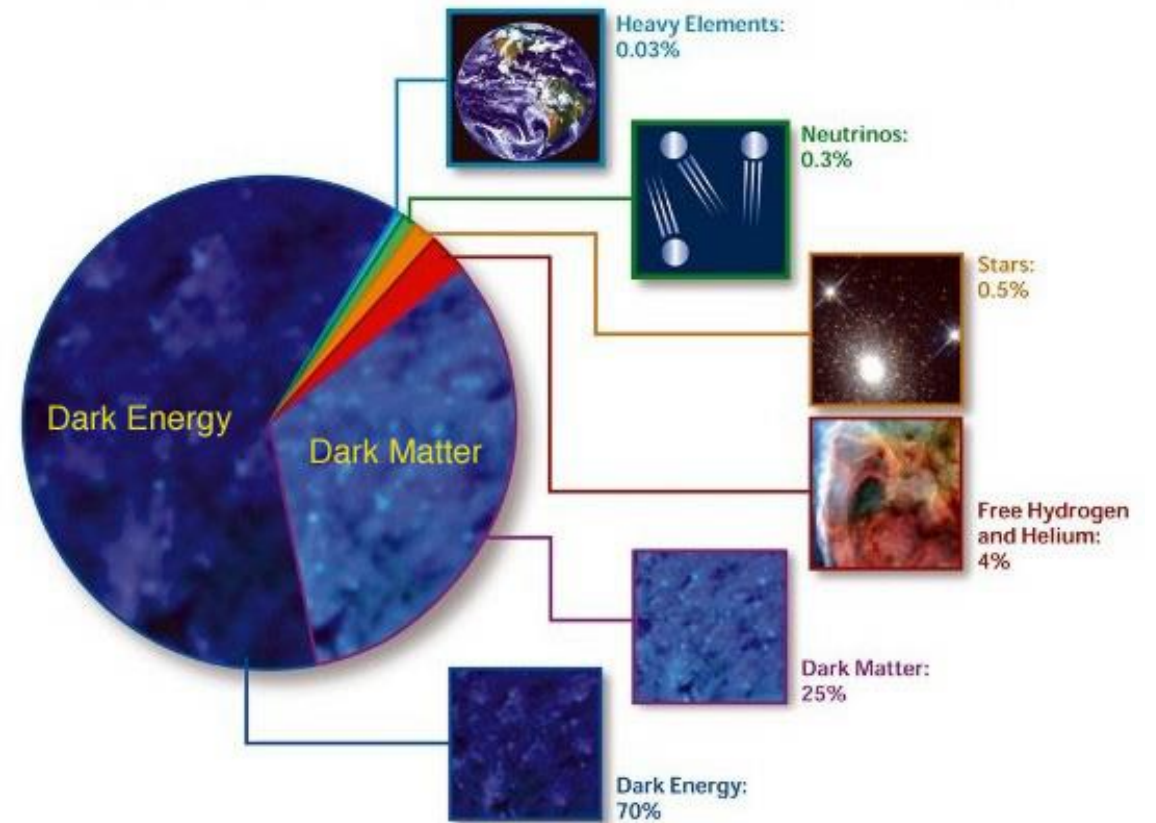
Unificazione delle interazioni





La materia oscura

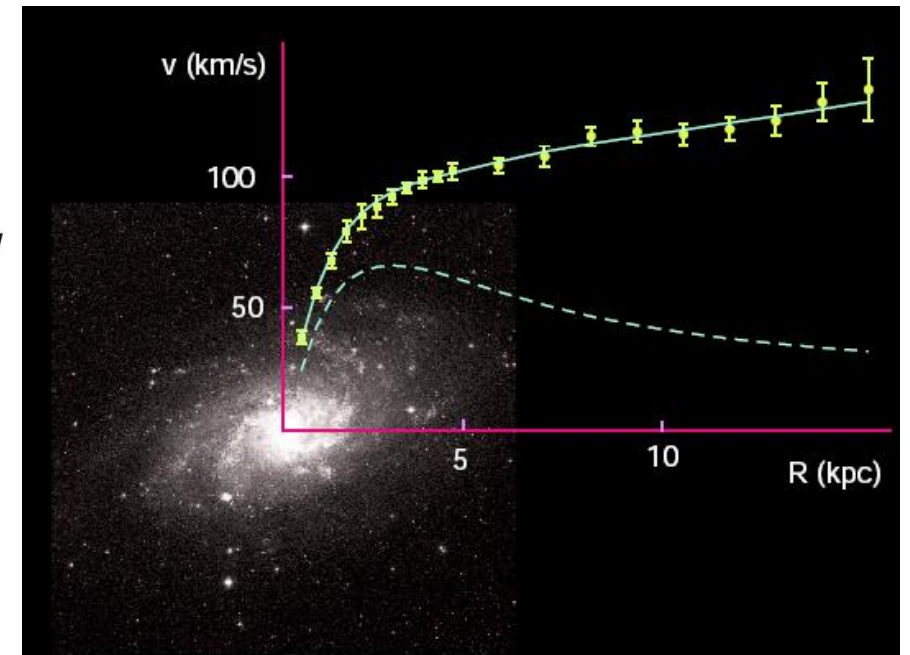
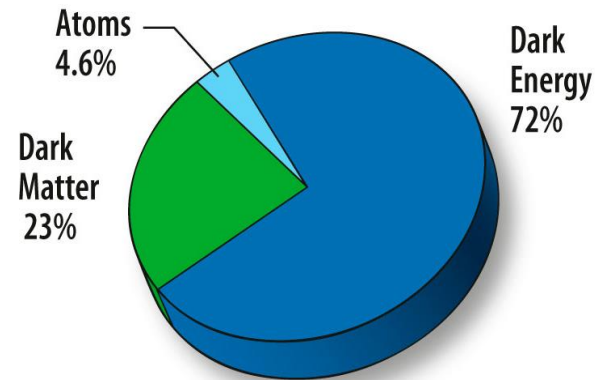
Negli ultimi anni abbiamo scoperto che il 95% dell'Universo è composto di cose che non capiamo: materia oscura ed energia oscura



LHC può aiutarci?

La materia oscura

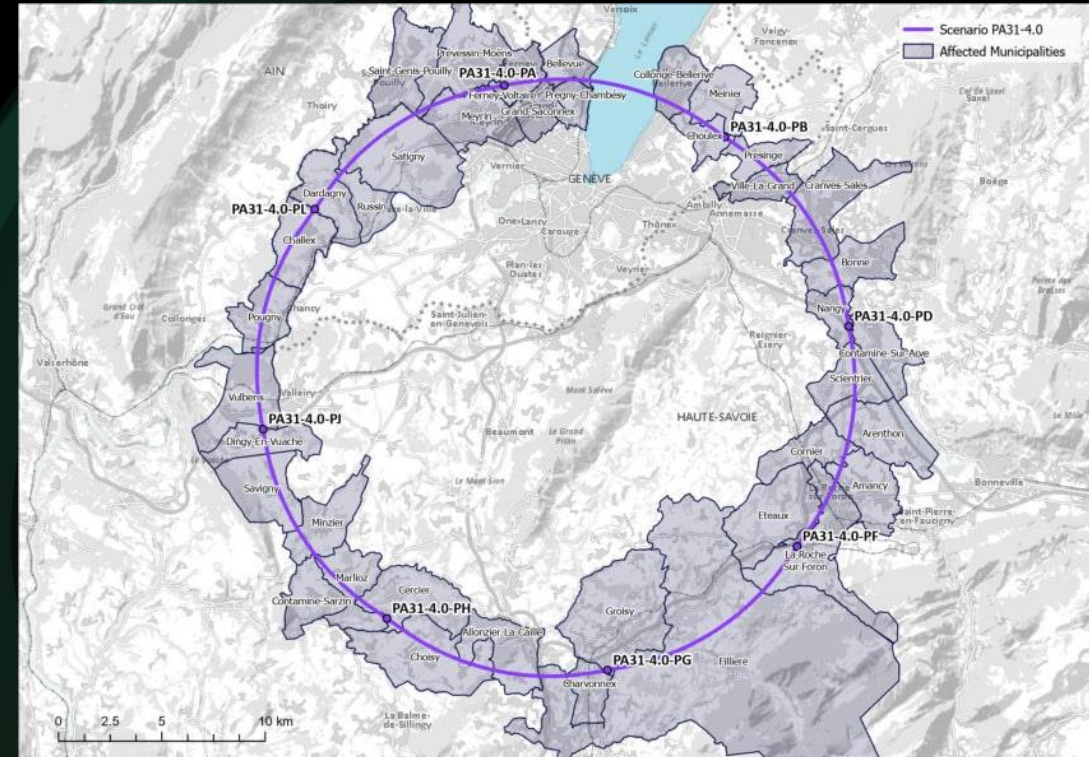
- Stelle e pianeti costituiscono solo il 5% circa del contenuto dell'universo
- Gran parte della massa non è visibile direttamente, ma solo attraverso i suoi effetti gravitazionali



Il futuro

Il Future Circular Collider (FCC) potrebbe essere il futuro della fisica delle particelle

- **Acceleratore di 91 km!**
- **Fino a 100 TeV**
- **Collisioni dal 2040....tocca a voi!**



CLASSICAL PHYSICS

ISAAC NEWTON

LAWS OF MOTION

CALCULUS

$$\int x^2 dx$$

$$\frac{dy}{dx}$$

CLASSICAL MECHANICS

FLUID MECHANICS

FLOW

LIFT

AERODYNAMICS

CHAOS THEORY

LAW OF UNIVERSAL GRAVITATION

GRAVITY

ORBITS

OPTICS

PRISM

MICROSCOPE

TELESCOPE

ELECTROMAGNETISM

ELECTRIC FIELDS

MAGNETIC FIELDS

ELECTRICITY

LIGHT

THERMODYNAMICS

ENERGY

HEAT

TEMPERATURE

ENTROPY

COSMOLOGY

ASTROPHYSICS

REFLECTION

REFRACTION

DIFFRACTION

WAVES

TRANSVERSE

LONGITUDINAL

JAMES CLERK MAXWELL

ATOMIC THEORY

CONDENSED MATTER PHYSICS

QUANTUM INFORMATION

COMPUTERS

LASERS

RELATIVITY

CONSTANT SPEED OF LIGHT



GENERAL THEORY OF RELATIVITY

SPECIAL THEORY OF RELATIVITY

$E=mc^2$

TIME

SPACE

SPACETIME

QUANTUM FIELD THEORY

THE STANDARD MODEL

QUANTUM ELECTRODYNAMICS

NUCLEAR PHYSICS

FISSION

FUSION

QUANTUM PHYSICS

COMPUTERS

LASERS

THE CHASM OF IGNORANCE

THE STANDARD MODEL

PARTICLE PHYSICS

PHILOSOPHY

PHILOSOPHY OF SCIENCE

FREE WILL

HOW COME?

NATURE OF REALITY

JUST...WHY?

THE FUTURE

QUANTUM GRAVITY

STRING THEORY

SUPER SYMMETRY

LOOP QUANTUM GRAVITY

DARK ENERGY

DARK MATTER

AND MANY MORE...

A cosa serve studiare la Fisica?

“Ma quindi tu la mattina vai al lavoro e ti metti il camice bianco...”

“Ma che mestiere è lo scienziato?”

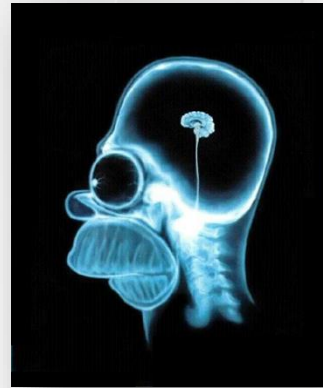
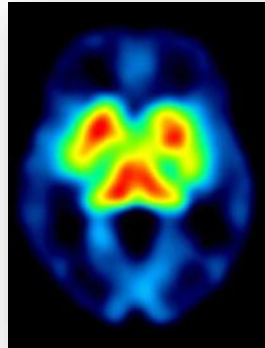
“Ma a che servono le particelle?”



“Ma a noi che ce ne frega?”

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



atlasitalia

Segui già

Messaggio



160 post

1.696 follower

117 seguiti

ATLAS Italia

Pagina italiana che contribuisce a @atlasexperiment, esperimento di fisica delle particelle a #LHC, al @cern di Ginevra.

linkin.bio/esperimentoatlasitalia

Account seguito da [giorni.dorelli](#), [fantasmagoricoprofilodiantonio](#) + altri 11



ATLAS ITALI...



IFAE2024



ATLAS ITALI...



MC 2023



FTAG Amste...



SIF 22 MILA...



BOOST 2022



atlasitalia

Segui già

Messaggio



160 post

1.696 follower

117 seguiti

ATLAS Italia

Pagina italiana che contribuisce a @atlasexperiment, esperimento di fisica delle particelle a #LHC, al @cern di Ginevra.

linkin.bio/esperimentoatlasitalia

Account seguito da [giorni.dorelli](#), [fantasmagoricoprofilodiantonio](#) + altri 11



ATLAS ITALI...



IFAE2024



ATLAS ITALI...



MC 2023



FTAG Amste...



SIF 22 MILA...



BOOST 2022

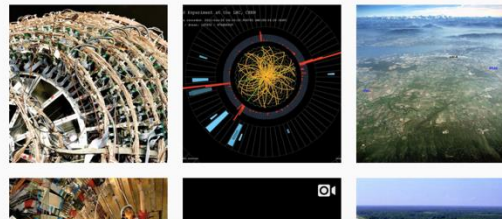
Instagram



inf_n Insights

18 post 255 follower 48 persone seguite

INFN Con gli occhi puntati sull'infinitamente piccolo www.infni.it/



Follow us!!!





Види діогно: —)