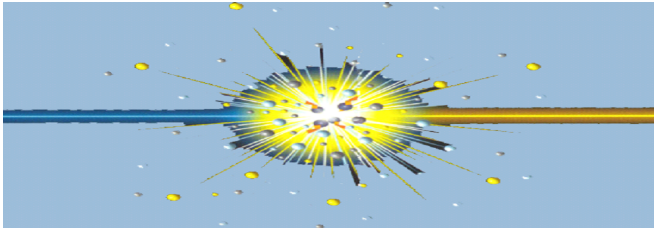


Introduzione alle particelle elementari



Andrea Bizzeti

Università di Modena e Reggio Emilia e
Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Sezione di Firenze
`andrea.bizzeti@fi.infn.it`

Physics Masterclass, Modena 23 febbraio 2018

La materia nell'Universo: ordini di grandezza

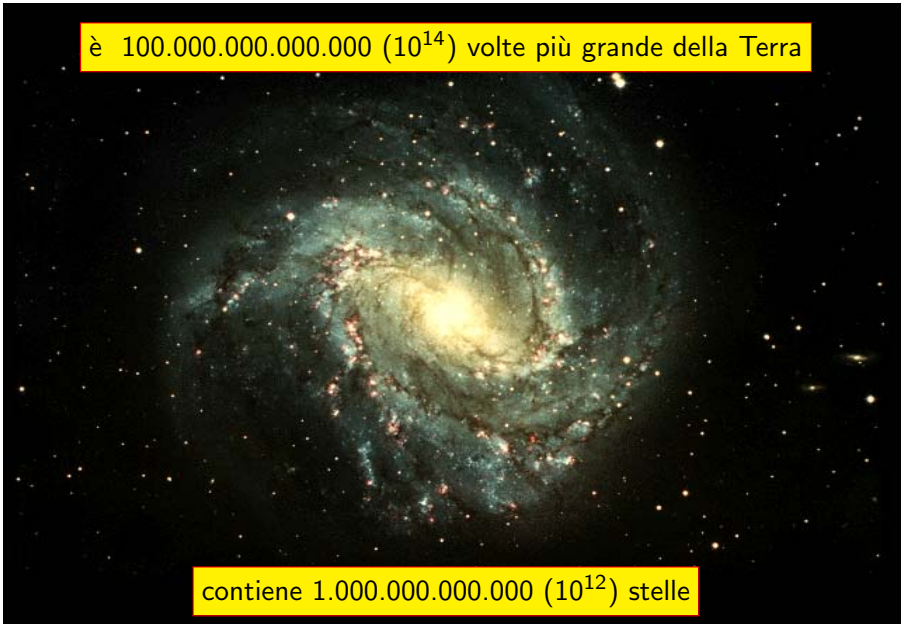


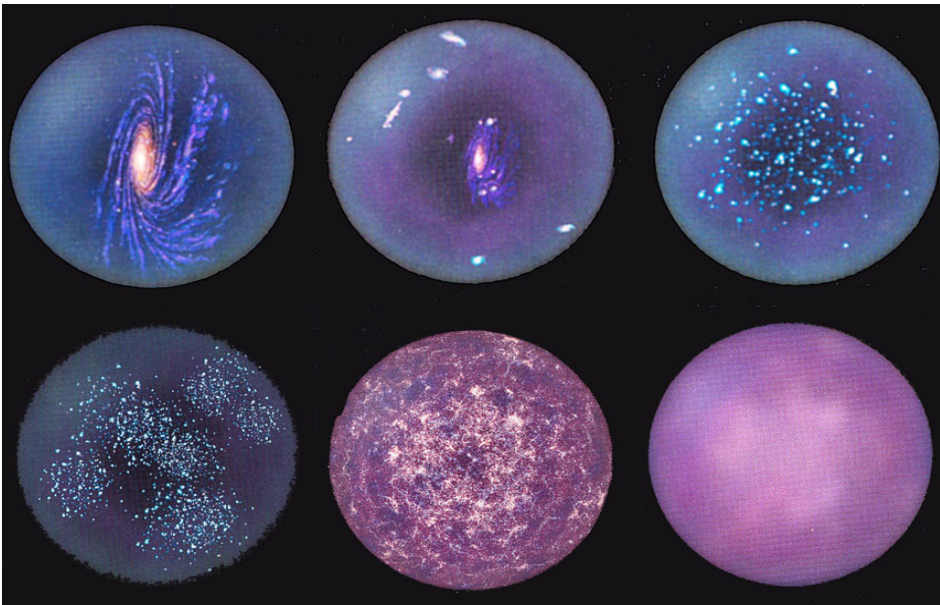
10^7 m

Una galassia

è 100.000.000.000.000 (10^{14}) volte più grande della Terra

contiene 1.000.000.000.000 (10^{12}) stelle



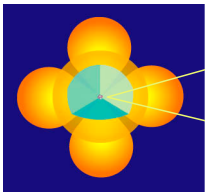


Nell'Universo ci sono 100.000.000.000 (10^{11}) galassie ...

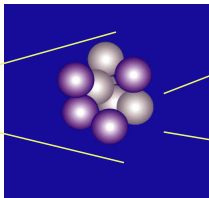
... per un totale di 10.000.000.000.000.000.000.000 (10^{22}) stelle



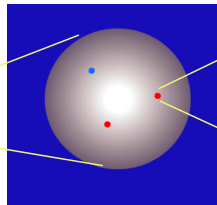
Tutte composte dagli stessi identici elementi di materia



atomi



nuclei
+ elettroni



protoni/neutroni



quark

Nell'Universo ci sono

100.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000
000.000.000.000.000.000.000.000.000.000.000
000.000.000.000.000.000.000 (10⁸⁰)

quark, tutti identici tra loro e che si sono formati
nei primissimi istanti dell'Universo

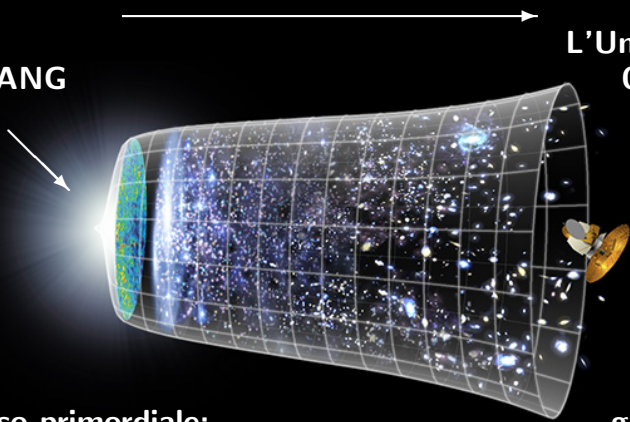
14 miliardi di anni

BIG BANG


**L'Universo
OGGI :**

**Universo primordiale:
piccolo, caldo, denso**

**grande,
freddo,
rarefatto**



Al CERN di Ginevra studiamo le interazioni della materia nelle condizioni esistenti pochi attimi dopo il Big Bang,



che hanno determinato la composizione dell'Universo e la sua evoluzione nella forma che conosciamo oggi

Il CERN – Organizzazione Europea per la Ricerca Nucleare



- ▶ Fondato nel 1954
- ▶ 22 Stati membri
- ▶ In Svizzera e in Francia, vicino alla città di Ginevra
- ▶ Esperimenti con acceleratori e rivelatori di particelle
- ▶ Luogo di nascita del “World Wide Web”
- ▶ <http://cern.ch/>

+ Israele (dal 2014) + Romania (dal 2016)

Large Hadron Collider (LHC)

Una enorme macchina costruita al CERN per fare scoperte nel campo della fisica delle particelle



La Fisica delle Particelle studia i costituenti elementari della materia.

Filosofia antica



(c) Andy Brice 1998

Empedocle
492–432 a.C.

4 elementi
fondamentali

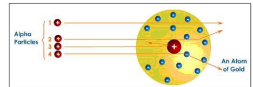
Scienza classica

H 1																	He 2									
Li 3	Be 4											B 5	C 6	N 7	O 8	F 9	Ne 10									
Na 11	Mg 12											Al 13	Si 14	P 15	S 16	Cl 17	Ar 18									
K 19	Ca 20	Sc 21	Ti 22	V 23	Cr 24	Mn 25	Fe 26	Co 27	Ni 28	Cu 29	Zn 30	Ga 31	Ge 32	As 33	Se 34	Br 35	Kr 36									
Rb 37	Sr 38	Y 39	Zr 40	Nb 41	Mo 42	Tc 43	Ru 44	Rh 45	Pd 46	Ag 47	Cd 48	In 49	Sn 50	Sb 51	Te 52	I 53	Xe 54									
Cs 55	Ba 56											Hf 72	Ta 73	W 74	Re 75	Os 76	Ir 77	Pt 78	Au 79	Hg 80	Tl 81	Pb 82	Bi 83	Po 84	At 85	Rn 86
Fr 87	Ra 88	Rf 104	Db 105	Sg 106	Bh 107	Hs 108	Mt 109	Ds 110	Rg 111	Cn 112	Uut 113	Uuq 114	Uup 115	Uuh 116	Uus 117	Uuo 118										
La 57	Ce 58	Pr 59	Nd 60	Pm 61	Sm 62	Eu 63	Gd 64	Tb 65	Dy 66	Ho 67	Er 68	Tm 69	Yb 70	Lu 71												
Ac 89	Th 90	Pa 91	U 92	Np 93	Pu 94	Am 95	Cm 96	Bk 97	Cf 98	Es 99	Fm 100	Md 101	No 102	Lr 103												

Mendeleev
19° secolo

Tavola Periodica
~ 100 elementi: atomi

Meccanica Quantistica

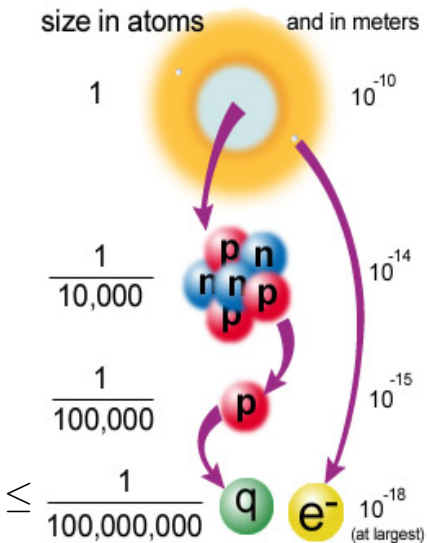


Rutherford, Bohr
inizio 20° secolo

3 particelle: elettrone,
protone, neutrone

Oggi: quark e leptoni

Quali forze tengono insieme la materia



atomo: interazione elettromagnetica

tra nucleo(+) ed **elettroni**(-)


Per rimuovere un elettrone da un **atomo** occorrono

10 eV ~ 10 

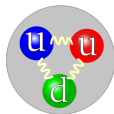
nucleo: interazione forte

tra protoni e neutroni

Per rimuovere un protone da un **nucleo** occorrono 10 MeV

$\sim 10\,000\,000$ 

protoni e neutroni: interazione forte
tra i **quark**



Decadimento delle particelle

Ogni particella possiede una energia “di riposo” $E = m c^2$
(c = velocità della luce nel vuoto). Es.: $m_{\text{protone}} c^2 \approx 1 \text{ GeV} \sim 1\,000\,000\,000$



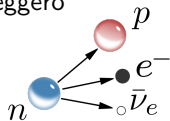
Nel decadimento una particella instabile **scompare**
trasformandosi in **altre particelle** più leggere.

Ad esempio, per effetto della interazione **debole**:

- ▶ il **neutrone** libero (n) **decade** trasformandosi in un protone (p), un elettrone (e^-) ed un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$) neutro e leggero

Conservazione energia:

$$m_n c^2 \rightarrow m_p c^2 + m_e c^2 + m_{\bar{\nu}_e} c^2 + E_c$$

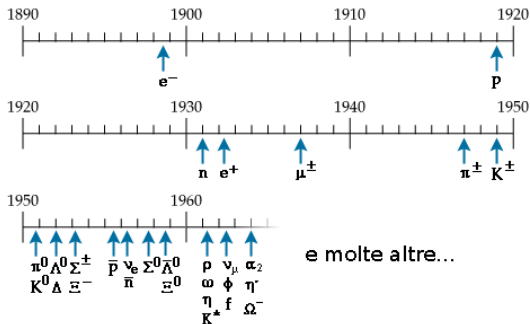


- ▶ il **muone** negativo (μ^-) **decade** trasformandosi in un neutrino (ν_μ), un elettrone (e^-) e un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$)

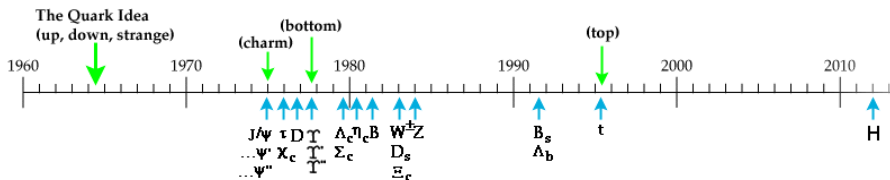


Le **particelle prodotte** non sono “pezzi” della particella iniziale.
Sono particelle completamente nuove, che **prima non esistevano**.

Sono state scoperte molte particelle, quasi tutte **instabili**

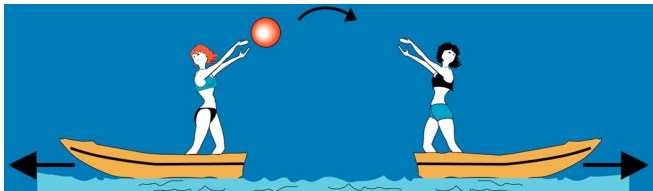


e quasi tutte composte da **quark**



Le quattro forze della Natura

- ▶ La Meccanica Quantistica descrive le interazioni come scambio di particelle “portatori di forza”
- ▶ una analogia in fisica classica:



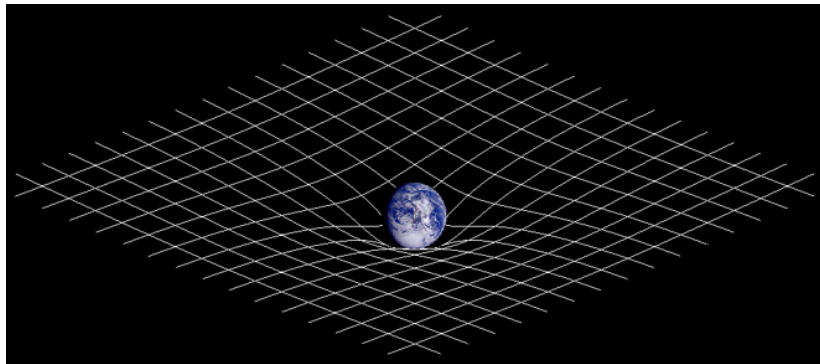
Lo scambio di particelle (pallone) è responsabile della forza

Tipo di forza	Particella scambiata	Dove si manifesta
forte	gluoni g	nuclei atomici
elettromagnetica	fotone γ	elettricità, luce, onde radio
debole	bosoni W, Z	Sole, decadimenti, neutrini
gravitazionale	gravitone (?)	peso, moto corpi celesti

Non si riesce (ancora) a trattare quantisticamente l'interazione gravitazionale.

L'interazione gravitazionale

La presenza di una massa **deforma** la struttura dello **spazio-tempo** (relatività generale, Einstein 1915), cambiando le **distanze**

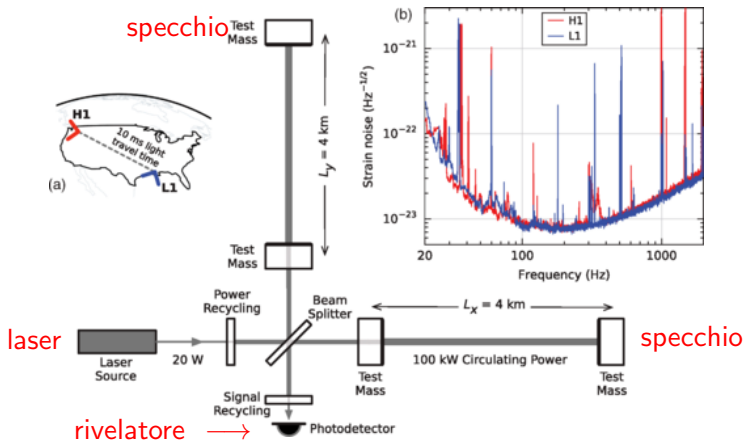


Masse in movimento possono produrre una deformazione dello spazio-tempo che si propaga come un'onda (Einstein 1916)

⇒ **onde gravitazionali**

Come rivelarle?

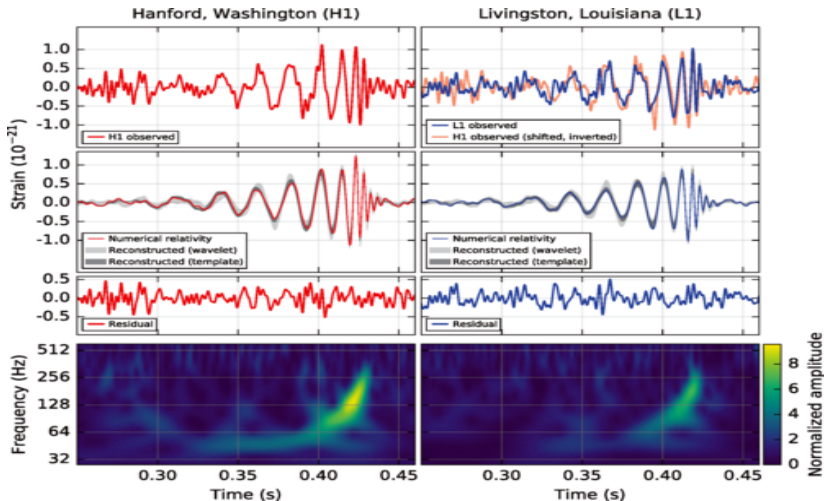
Rivelatori di onde gravitazionali



- Interferometro di Michelson, con bracci di lunghezza ($L_x = L_y = 4 \text{ Km}$)
- Sensibile a **piccolissime** variazioni di $L_x - L_y$ prodotte da onde gravitazionali
- $\delta L \approx 10^{-18} \text{ m}$, 1000 volte più piccole di un protone!
- LIGO: due rivelatori uguali a 3000 Km di distanza, negli USA

La scoperta delle onde gravitazionali (settembre 2015)

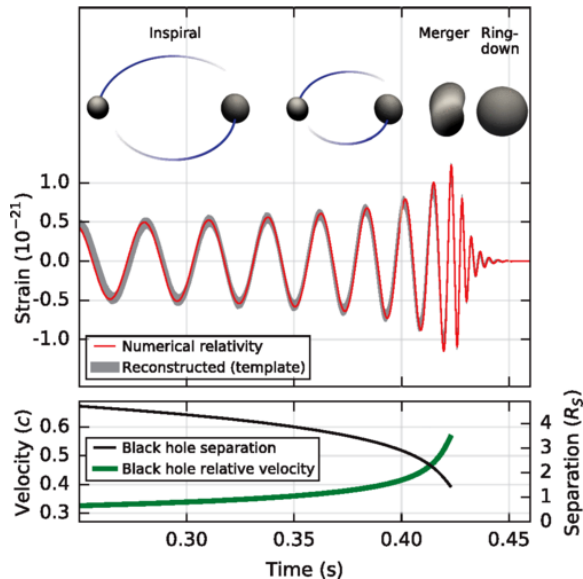
Segnale osservato quasi **simultaneamente** dai due interferometri



- Tempi compatibili con onda gravitazionale che viaggia a velocità della luce
- Stessa forma del segnale per visto dai due interferometri
- La frequenza delle oscillazioni aumenta nel tempo

L'interpretazione del segnale

Avvicinamento a spirale e successiva fusione di due buchi neri



Masse: $2 \times \approx 30 M(\text{Sole})$

Distanza ≈ 400 Mpc
 ≈ 1.2 milioni di anni-luce

Energia emessa (onde grav.)
 $\approx 3 M(\text{Sole}) c^2$!

Deformazione distanze
misurata: $\delta L/L \approx 10^{-21}$

I costituenti fondamentali della materia

Tre generazioni di fermioni (materia)			Bosoni		
	I	II	III		
Quark	Massa → 2,3 MeV Carica → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → u up	Massa → 1,275 GeV Carica → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → c charm	Massa → 173,07 GeV Carica → $\frac{2}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → t top	Massa → 0 Carica → 0 Spin → 1 Nome → γ Fotone	125,09 GeV 0 0 H Bosone di Higgs
	Massa → 4,8 MeV Carica → $-\frac{1}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → d down	Massa → 95 MeV Carica → $-\frac{1}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → s strange	Massa → 4,18 GeV Carica → $-\frac{1}{3}$ Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → b bottom	Massa → 0 Carica → 0 Spin → 1 Nome → g Gluone	
Leptoni	Massa → <2 eV Carica → 0 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → ν_e Neutrino elettronico	Massa → <0,19 MeV Carica → 0 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → ν_μ Neutrino muonico	Massa → <18,2 MeV Carica → 0 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → ν_τ Neutrino tauonico	Massa → 91,2 GeV Carica → 0 Spin → 1 Nome → Z⁰ Bosone Z	80,4 GeV ±1 1 W[±] Bosone W
		Massa → 0,511 MeV Carica → -1 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → e Elettrone	Massa → 105,7 MeV Carica → -1 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → μ Muone	Massa → 1,777 GeV Carica → -1 Spin → $\frac{1}{2}$ Nome → τ Tauone	

- ▶ 12 fermioni (particelle di materia):
6 quark + 6 leptoni
- ▶ 4 bosoni di gauge (portatori di forza)
- ▶ 1 bosone di Higgs

L'interazione debole provoca il decadimento dei quark e leptoni più pesanti in quark e leptoni più leggeri

⇒ Uniche particelle di materia stabili: neutrini, elettrone, protone

Materia e anti-materia

- ▶ Per ogni particella costituente della materia (quark o leptone) esiste una antiparticella, costituente dell'antimateria.
- ▶ Le antiparticelle hanno alcune proprietà **identiche** alle corrispondenti particelle (es.: massa, spin) ed altre **opposte** (es.: carica elettrica, momento magnetico).

Alcuni esempi:

Particella		carica elettrica	Antiparticella		carica elettrica
elettrone	e^-	$-e$	positrone	e^+	$+e$
quark	u	$+\frac{2}{3}e$	antiquark	\bar{u}	$-\frac{2}{3}e$
quark	d	$-\frac{1}{3}e$	antiquark	\bar{d}	$+\frac{1}{3}e$
protone	$p = uud$	$+e$	antiprotone	$\bar{p} = \bar{u}\bar{u}\bar{d}$	$-e$
neutrone	$n = udd$	0	antineutrone	$\bar{n} = \bar{u}\bar{d}\bar{d}$	0
mesone π^+	$\pi^+ = u\bar{d}$	$+e$	mesone π^-	$\pi^- = d\bar{u}$	$-e$

Materia

e

anti-materia

Leptoni

carica
elettrica

Anti-leptoni

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\mu \\ \mu^- \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \nu_\tau \\ \tau^- \end{pmatrix} \quad \begin{array}{c|c} 0 & +1 \\ -1 & 0 \end{array} \quad \begin{pmatrix} e^+ \\ \bar{\nu}_e \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \mu^+ \\ \bar{\nu}_\mu \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \tau^+ \\ \bar{\nu}_\tau \end{pmatrix}$$

Quark

carica
elettrica

Anti-quark

$$\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix} \quad \begin{array}{c|c} +\frac{2}{3} & +\frac{1}{3} \\ -\frac{1}{3} & -\frac{2}{3} \end{array} \quad \begin{pmatrix} \bar{d} \\ \bar{u} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{s} \\ \bar{c} \end{pmatrix} \quad \begin{pmatrix} \bar{b} \\ \bar{t} \end{pmatrix}$$

↑
negli **atomi**

Coppie particella-antiparticella possono essere **create** o **distrutte**

Esempio: $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$, $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma$

LHC ci permette di ricreare particelle fondamentali
non più viste da 10^{-12} s dopo il Big Bang

Rimangono molte domande:

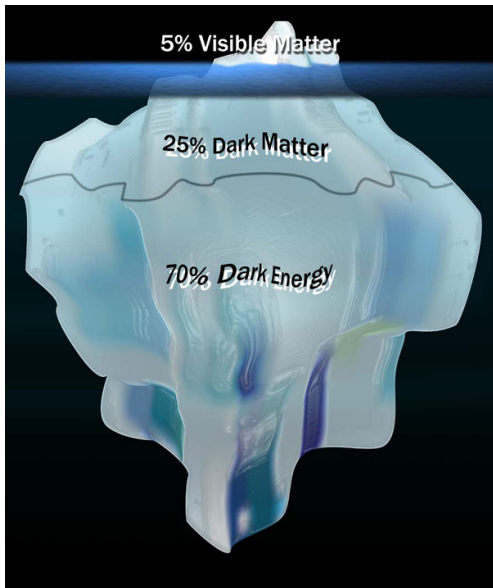
- quali sono i veri costituenti fondamentali della materia
 - ▶ I quark e i leptoni sono davvero puntiformi?
 - ▶ Esistono altre particelle elementari?
- quali sono le forze attraverso cui interagiscono
 - ▶ Esistono altre forze “superforti” o “superdeboli”?
- l'Universo e i suoi misteri
 - ▶ Come era l'Universo subito dopo il **Big Bang**?
 - ▶ Cosa è successo all'**anti-materia**? → LHCb
subito dopo il Big Bang ce ne era in abbondanza
 - ▶ Da cosa è composta “**materia oscura**”?
non si vede, ma influisce sul moto delle stelle
 - ▶ Qual è la natura dell’ “**energia oscura**”
che accelera l'espansione dell'Universo?

Composizione dell'Universo

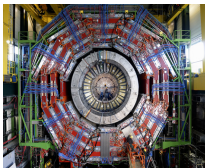
Materia visibile →

Materia oscura →
(attrazione gravitazionale)

Energia oscura →
(accelera espansione)



Per cercare nuove particelle servono:



1. **Acceleratore**: una macchina potente per accelerare i protoni e farli scontrare
2. **Rivelatori**: giganteschi strumenti che registrano le particelle prodotte nella collisione tra protoni
3. **Supercomputing**: per raccogliere, conservare, distribuire e analizzare l'enorme quantità di dati prodotti dai rivelatori
4. **Scienza collaborativa** su scala mondiale: migliaia di scienziati e ingegneri per progettare, costruire e operare queste macchine molto complesse

Acceleratori di Particelle come LHC

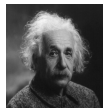
Sono microscopi potentissimi e ci permettono di guardare più a fondo nella Natura $\lambda \sim hc/E$



$\times 1\,000\,000\,000\,000$

De Broglie

Possono produrre particelle di massa molto grande $E = mc^2$



$\times 10\,000$

Einstein

Ci permettono di studiare l'Universo quando era giovanissimo e caldissimo $E = kT$

$0,000\,000\,000\,001\text{ s}$
 10^{17} K



Boltzmann

Rivisitiamo i primissimi istanti dell'Universo per osservare particelle e fenomeni che oggi non avvengono più

Come è fatto un acceleratore?



Bombola di idrogeno



Campo elettrico

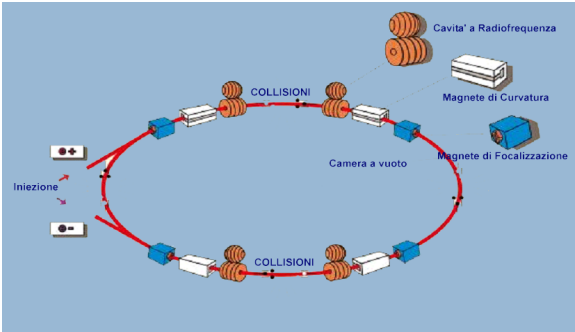
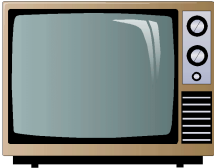


Campo magnetico

$$\vec{F} = q \left(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B} \right)$$



Lorentz



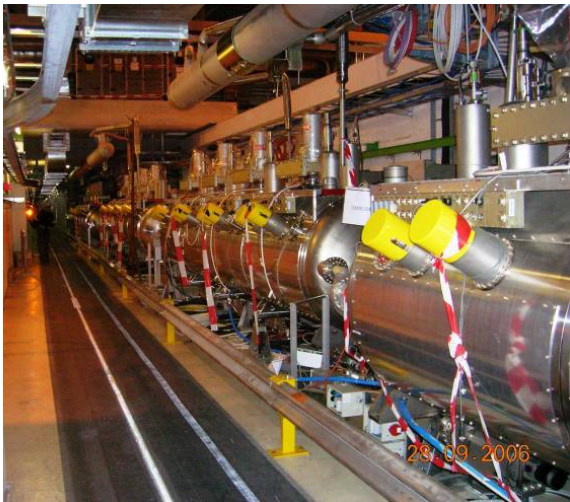
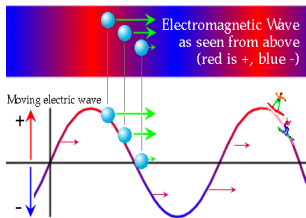
Il Large Hadron Collider



- ▶ I protoni sono accelerati da potenti **campi elettrici** fino a velocità prossime a quella della luce
- ▶ Sono guidati lungo le loro traiettorie da potenti **magneti superconduttori**
- ▶ Il loro campo magnetico raggiunge **8.3 Tesla** (200 000 volte quello terrestre)
- ▶ I magneti lavorano a **1.9 K** (-271°C) in **elio superfluido**
- ▶ I protoni viaggiano in un tubo che è a **vuoto** spinto e a temperatura più bassa che lo spazio interplanetario

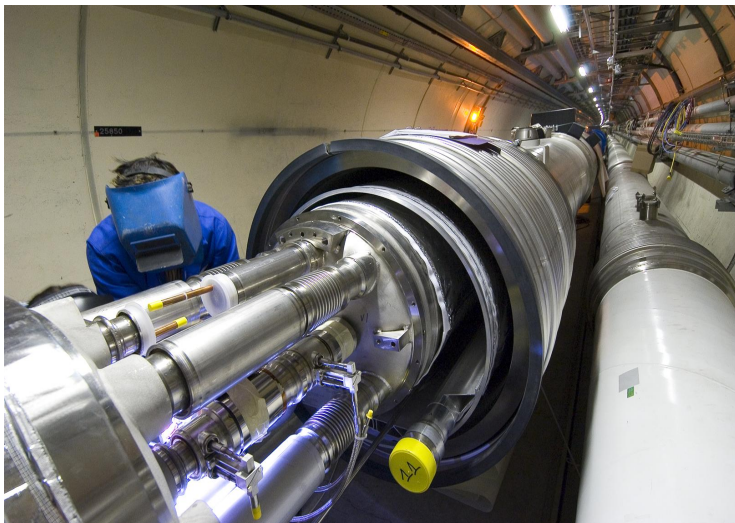
Campo elettrico per accelerare i protoni

Cavità superconduttrici ad alta frequenza
I protoni “cavalcano” le onde elettromagnetiche

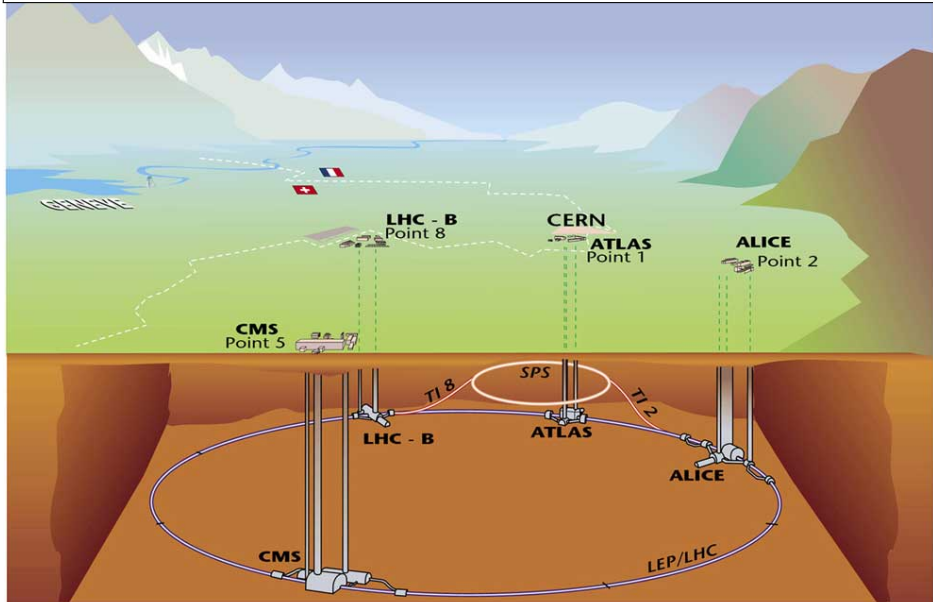


Campo magnetico per far curvare i protoni

I magneti superconduttori mantengono i protoni su traiettorie circolari



Il tunnel di LHC: 100 metri sotto terra, lungo 27 km



I rivelatori di particelle

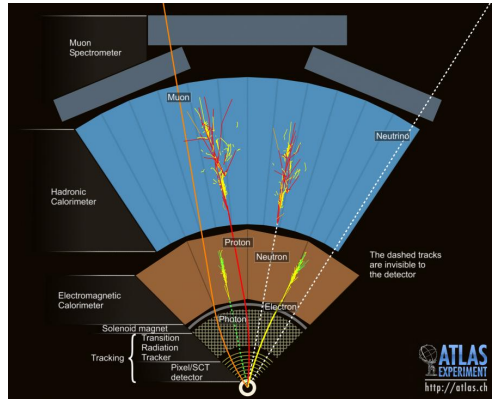
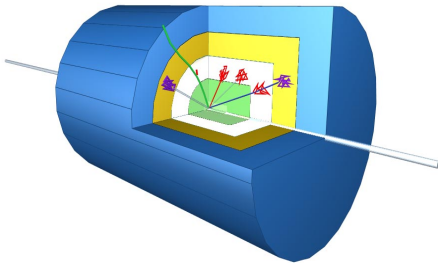
Apparecchi fotografici velocissimi ...



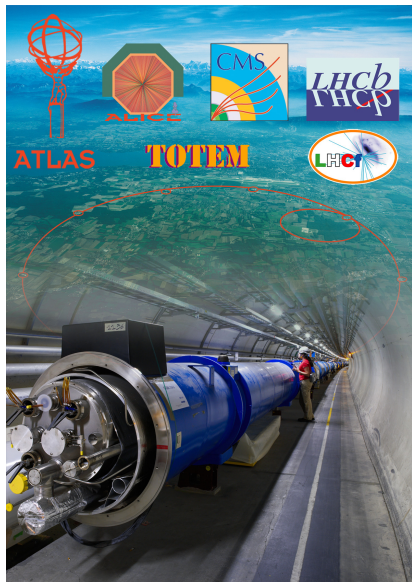
... e molto sofisticati

I rivelatori di particelle

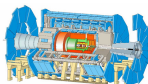
Più strati di “macchine fotografiche”
per misurare la direzione e l’energia
delle particelle prodotte nella collisione



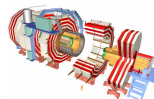
I rivelatori di particelle a LHC: 6 esperimenti



Ricerca del bosone di Higgs



ATLAS

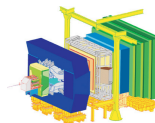


CMS

Collisioni tra nuclei,
quark-gluon plasma: ALICE
Materia e anti-materia: LHCb



ALICE

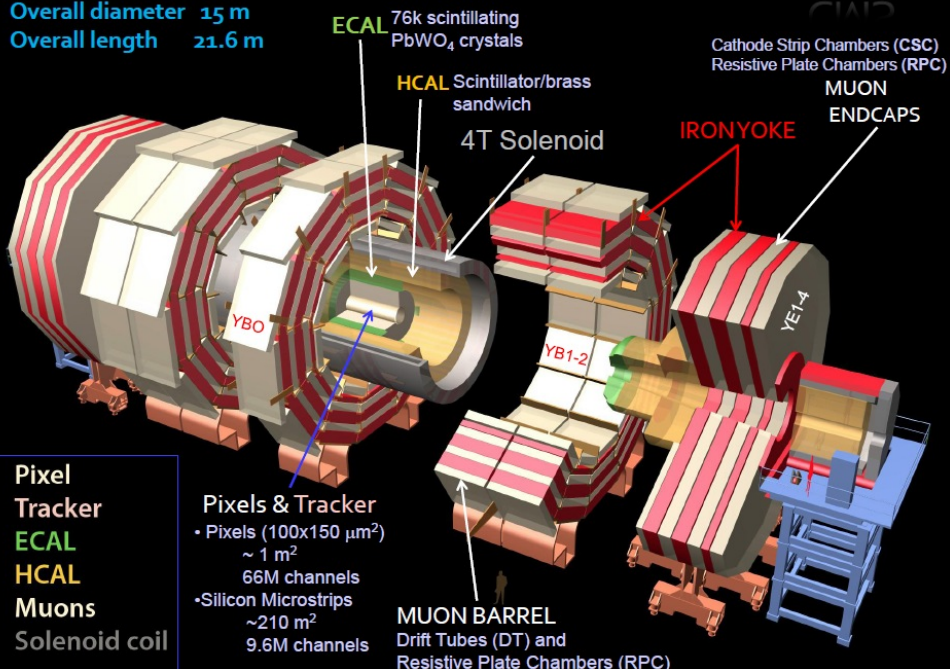


LHCb

Misure "in avanti":

LHCf e TOTEM

Total weight 12500 t
 Overall diameter 15 m
 Overall length 21.6 m



ECAL 76k scintillating PbWO₄ crystals

HCAL Scintillator/brass sandwich

4T Solenoid

Cathode Strip Chambers (CSC)
 Resistive Plate Chambers (RPC)

MUON
 ENDCAPS

IRONYOKE

YB0

YB1-2

YE1-4

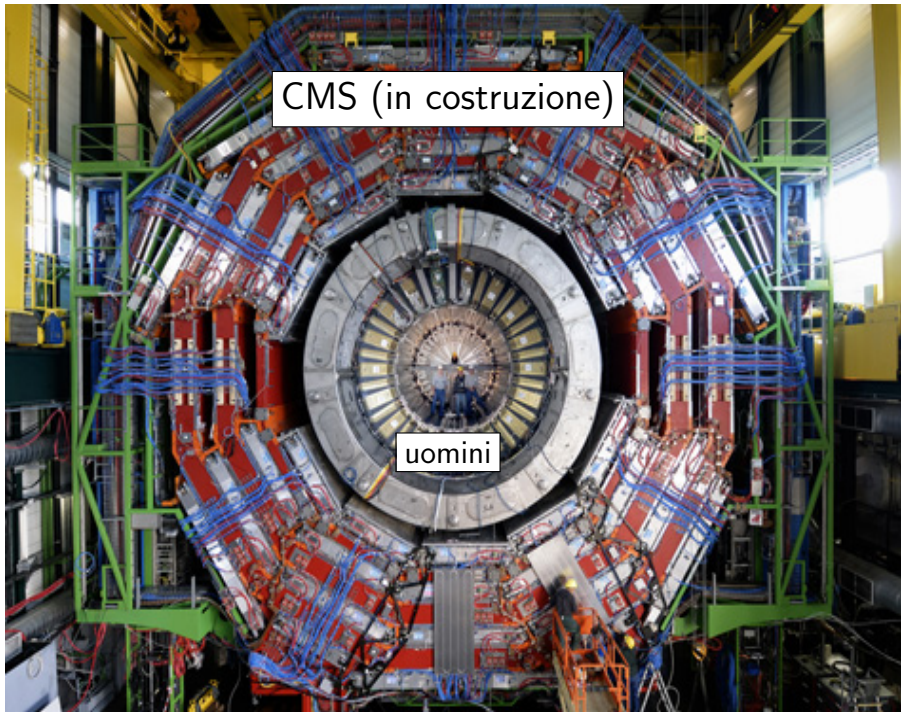
Pixel
 Tracker
ECAL
HCAL
 Muons
 Solenoid coil

Pixels & Tracker
 • Pixels (100x150 μm²)
 ~ 1 m²
 66M channels
 • Silicon Microstrips
 ~210 m²
 9.6M channels

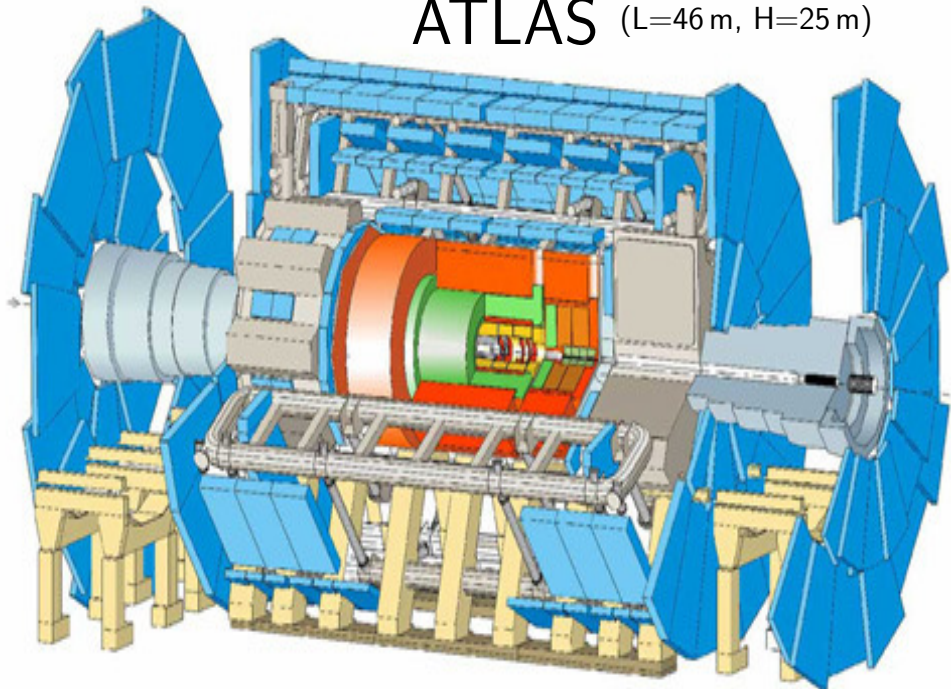
MUON BARREL
 Drift Tubes (DT) and
 Resistive Plate Chambers (RPC)

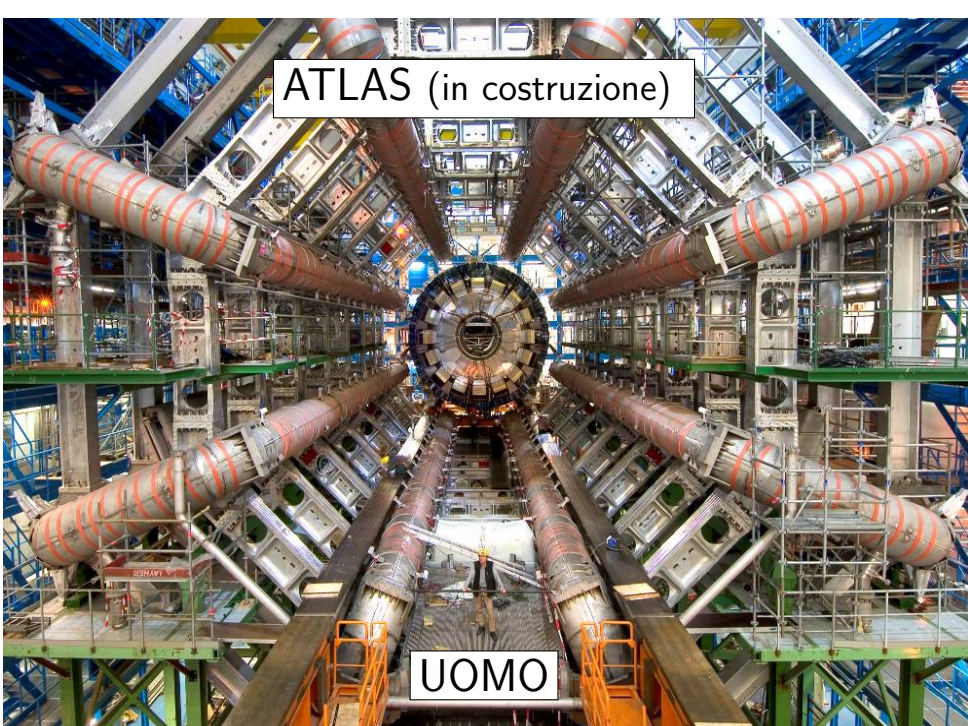
CMS (in costruzione)

uomini



ATLAS (L=46 m, H=25 m)





ATLAS (in costruzione)

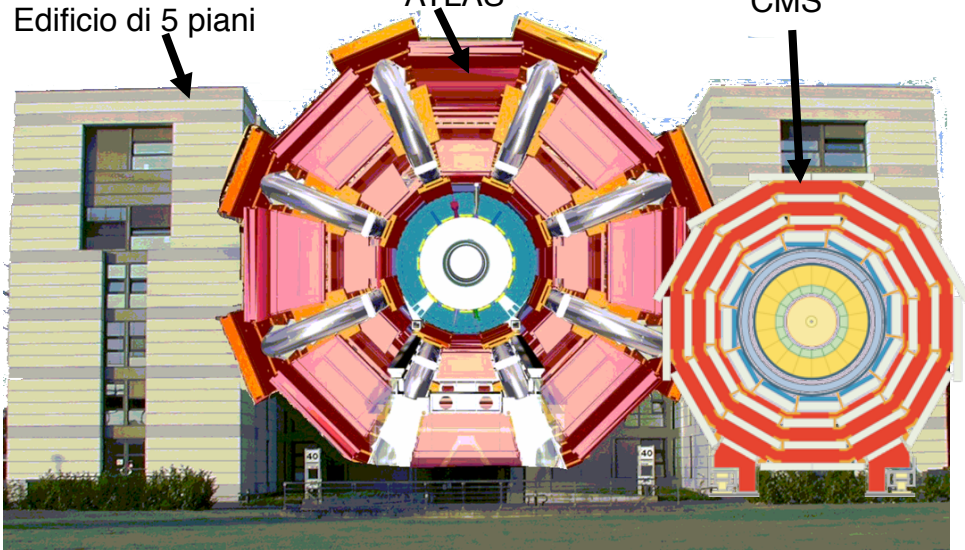
UOMO

Enormi rivelatori di particelle più precisi di un orologio svizzero

Edificio di 5 piani

ATLAS

CMS

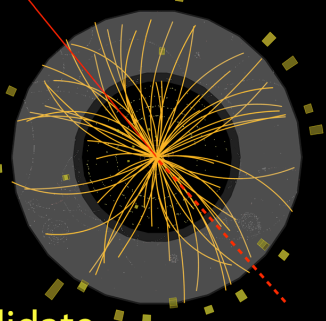
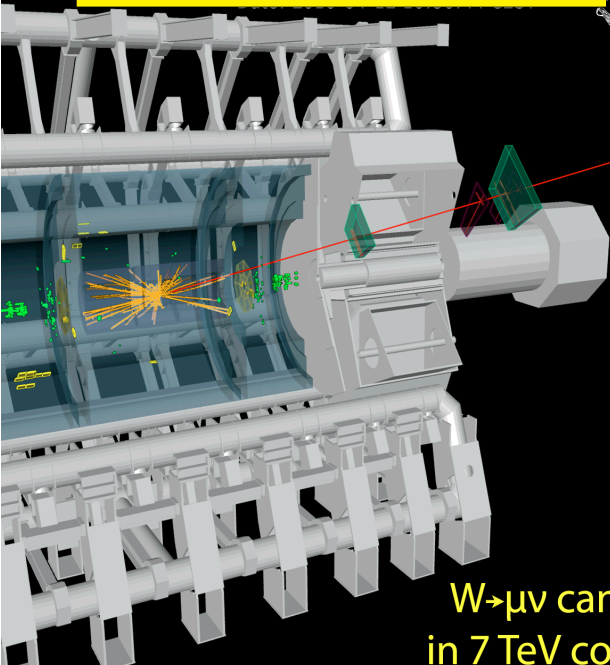


Fotografia di una collisione interessante



ATLAS EXPERIMENT

$$\begin{aligned} p_T(\mu^-) &= 40 \text{ GeV} \\ \eta(\mu^-) &= 2.0 \\ E_T^{\text{miss}} &= 41 \text{ GeV} \\ M_T &= 83 \text{ GeV} \end{aligned}$$

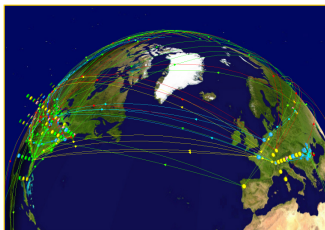


**W → μν candidate
in 7 TeV collisions**

Una GRID per una collaborazione mondiale

Migliaia di scienziati, da centinaia di Università e Laboratori in decine di Paesi collaborano a questi esperimenti

La **Grid** è una infrastruttura che permette l'accesso trasparente alla potenza di calcolo e ai dati distribuiti in tutto il mondo



Collega **100 000 computer** in 34 paesi con linee di trasmissione dati ultraveloci

In un anno **milioni di Gigabyte** di dati viaggiano attorno al mondo

Presente e futuro di LHC

LHC roadmap: according to MTP 2016-2020 V1

LS2 starting in 2019

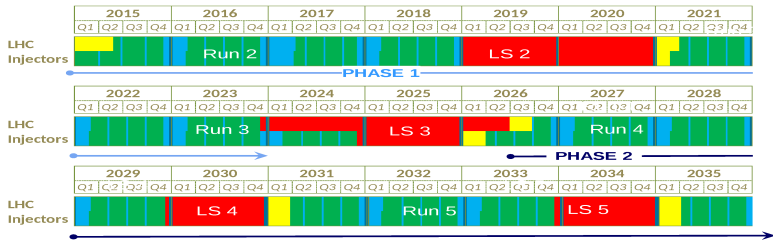
=> 24 months + 3 months BC

LS3 LHC: starting in 2024

=> 30 months + 3 months BC

Injectors: in 2025

=> 13 months + 3 months BC



- ▶ Run 1 (2010–2013, energia delle collisioni 7 000–8 000 GeV): scoperta del **bosone di Higgs**
- ▶ Run 2 (2015–2018, energia delle collisioni **13 000 GeV**) in corso
- ▶ Run 3 (2021–2023) e successivi: con LHC e rivelatori potenziati si raccoglierà una enorme quantità di dati da analizzare per capire di più su come siamo fatti e sui primissimi istanti dell'Universo.