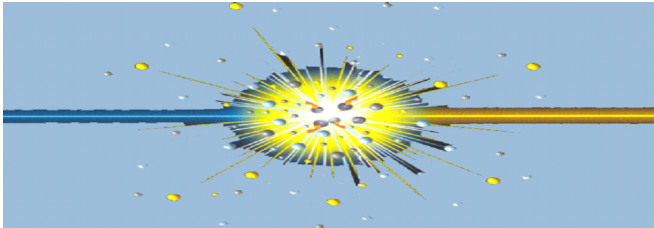


Introduzione alle particelle elementari



Andrea Bizzeti

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

Physics Masterclass, Sesto Fiorentino 08 e 22 marzo 2019

La materia nell'Universo: ordini di grandezza

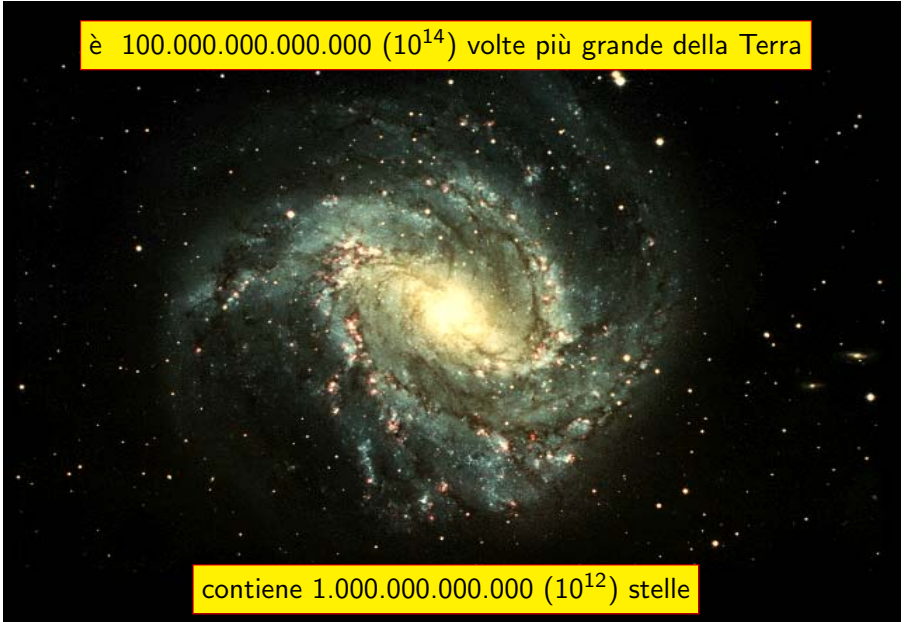


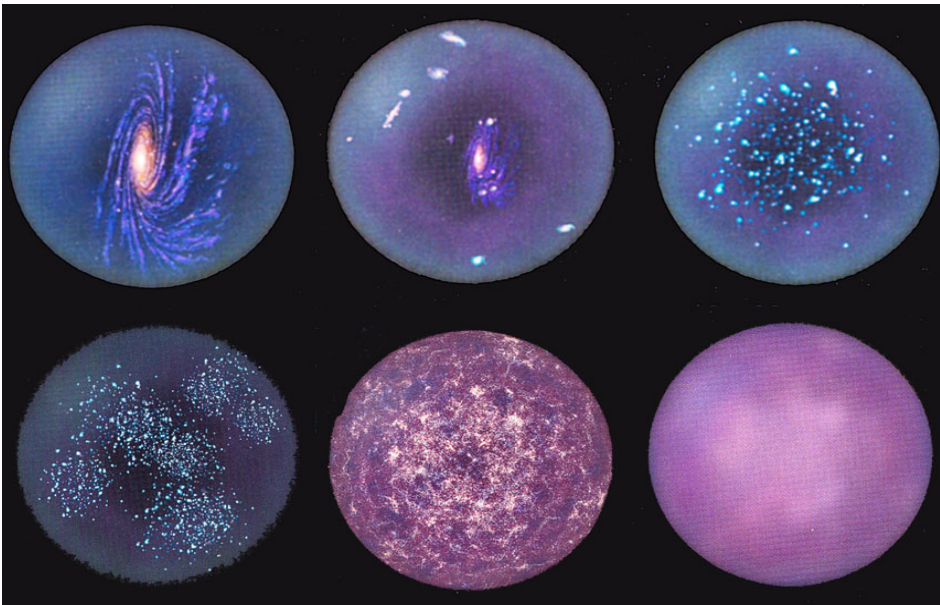
10^7 m

Una galassia

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

contiene 1.000.000.000.000 (10^{12}) stelle



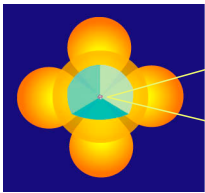


Nell'Universo ci sono 100.000.000.000 (10^{11}) galassie . . .

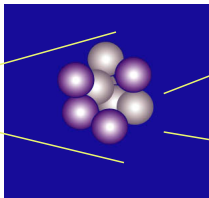
... per un totale di 10.000.000.000.000.000.000.000 (10^{22}) stelle



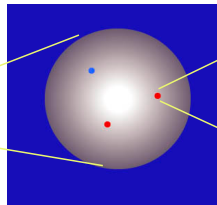
Tutte composte dagli stessi identici elementi di materia



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

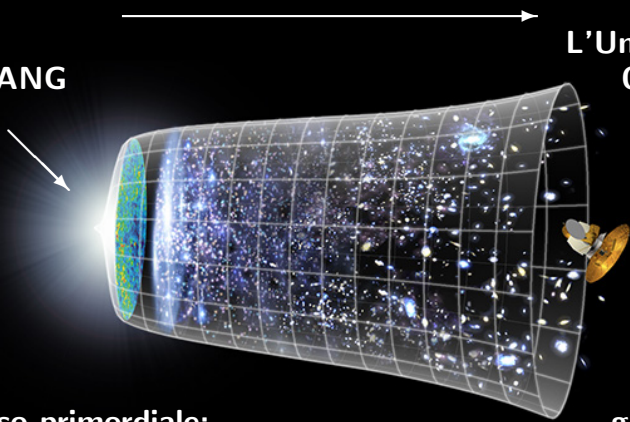
14 miliardi di anni

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

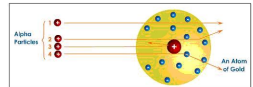
Scienza classica

Mendeleev

19° secolo

Tavola Periodica
~ 100 elementi: atomi

Meccanica Quantistica



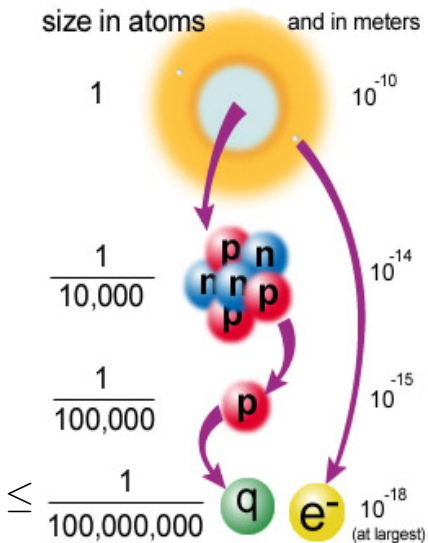
Rutherford, Bohr

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 

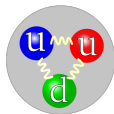
nucleo: interazione forte

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

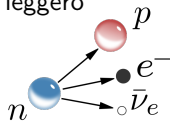
Ogni particella possiede una energia “di riposo” $E = m c^2$
(c = velocità della luce nel vuoto). Es.: $m_{\text{protone}} c^2 \approx 1 \text{ GeV} \sim 1\,000\,000\,000$



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

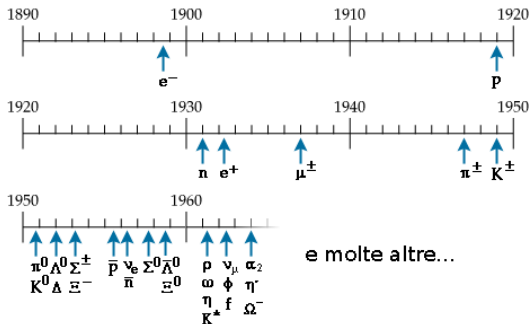


- ▶ il **muone** negativo (μ^-) **decade** trasformandosi in un neutrino (ν_μ), un elettrone (e^-) e un anti-neutrino ($\bar{\nu}_e$)

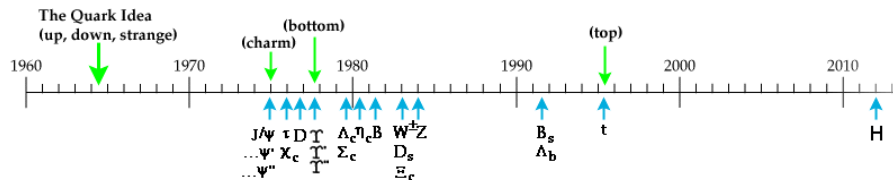


Le **particelle prodotte** non sono “pezzi” della particella iniziale.
Sono particelle completamente nuove, che **prima non esistevano**.

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

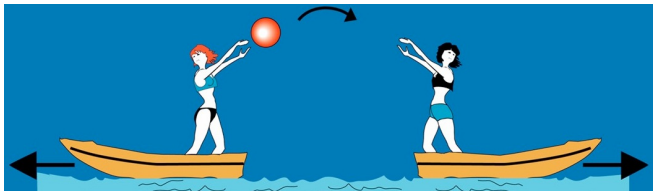


e quasi tutte composte da **quark**



Le quattro forze della Natura

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



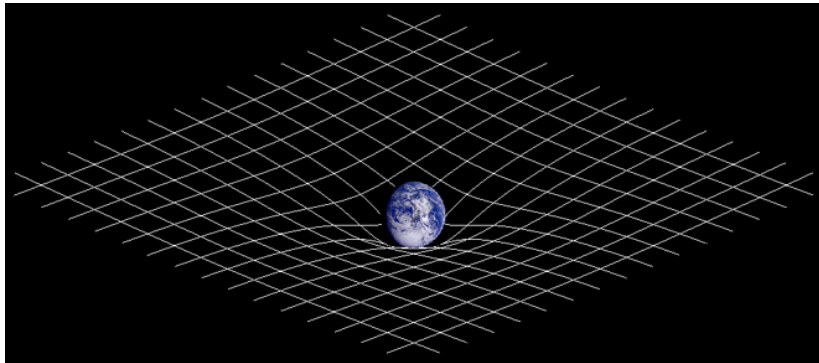
Lo scambio di particelle (pallone) è responsabile della forza

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**

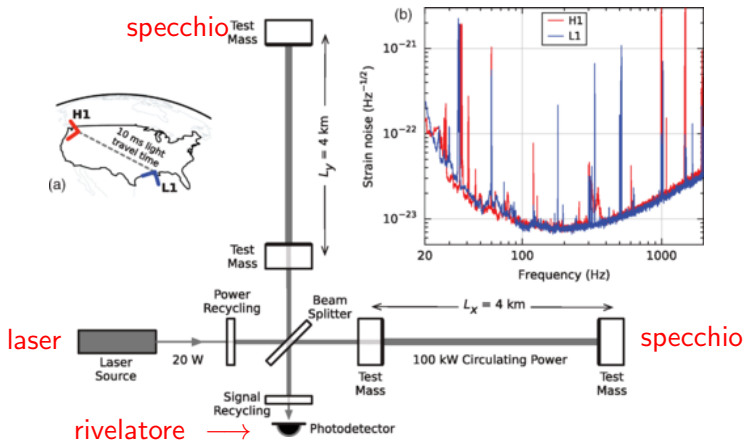


Masse in movimento possono produrre una deformazione dello spazio-tempo che si propaga come un'onda (Einstein 1916)

⇒ **onde gravitazionali**

Come rivelarle?

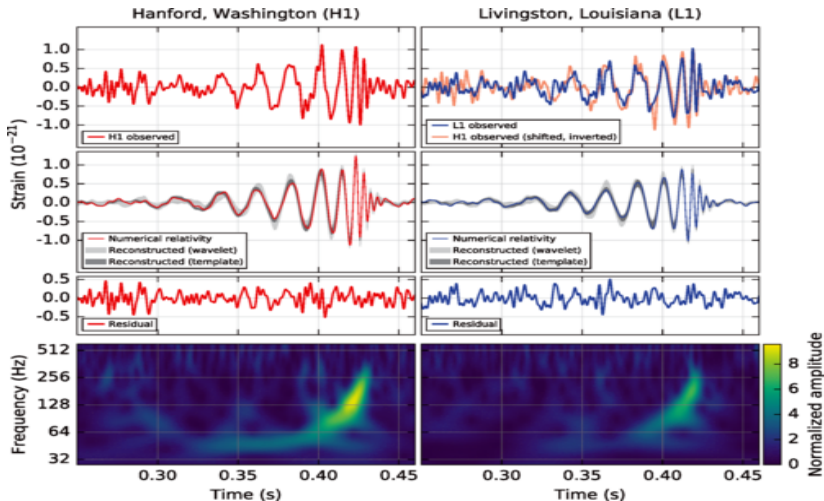
Rivelatori di onde gravitazionali



- 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)

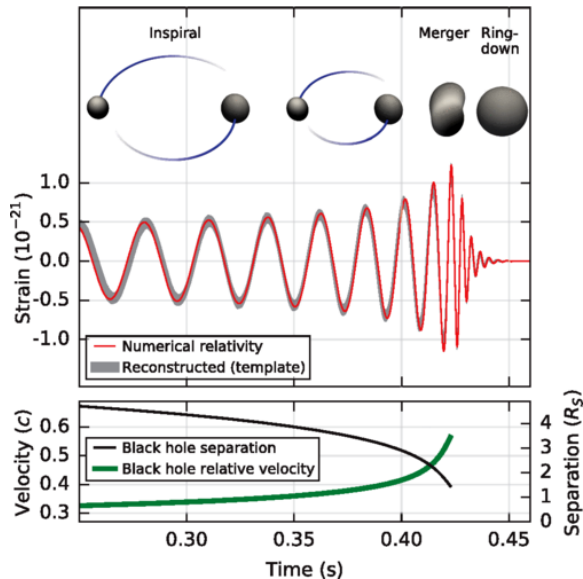
Segnale osservato quasi **simultaneamente** dai due interferometri



- 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:

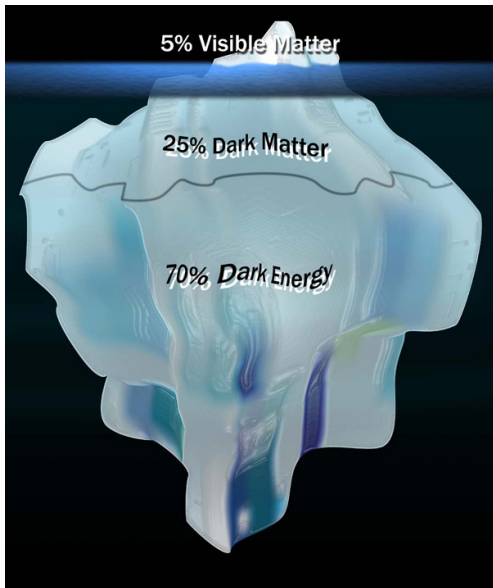
- quali sono i veri costituenti fondamentali della materia
 - ▶ I quark e i leptoni sono davvero puntiformi?
 - ▶ Esistono altre particelle elementari?
- quali sono le forze attraverso cui interagiscono
 - ▶ Esistono altre forze “superforti” o “superdeboli”?
- l'Universo e i suoi misteri
 - ▶ Come era 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

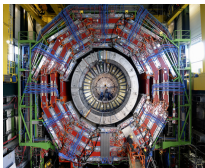
Materia visibile →

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

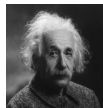
Sono microscopi potentissimi e ci permettono di guardare più a fondo nella Natura $\lambda \sim hc/E$



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

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

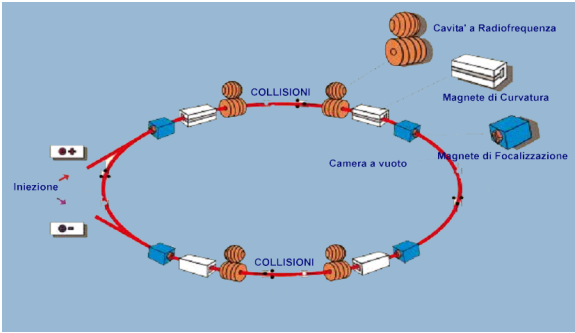
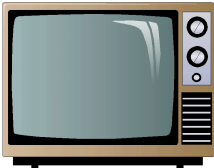


Campo magnetico

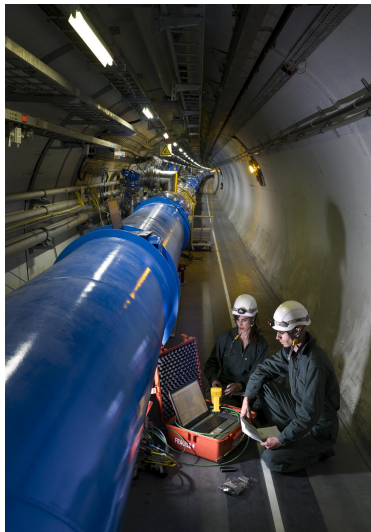
$$\vec{F} = q (\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



Lorentz



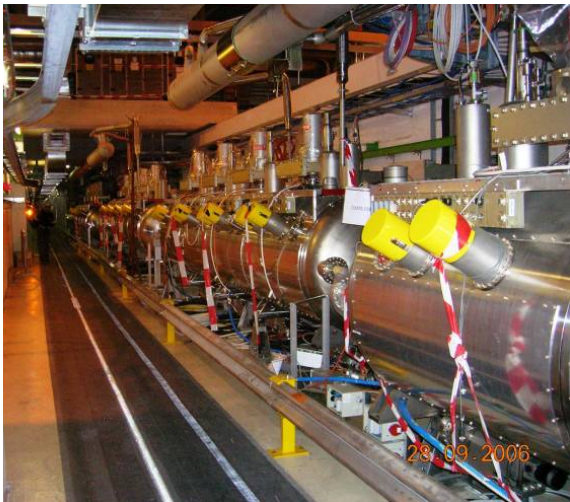
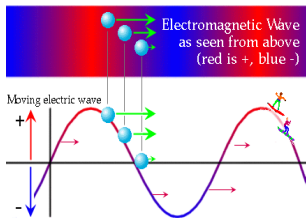
Il Large Hadron Collider



- ▶ 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 dello spazio interplanetario

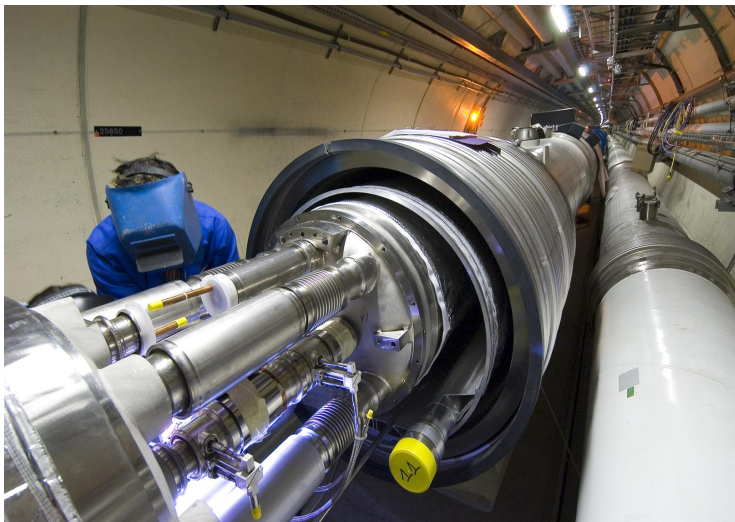
Campo elettrico per accelerare i protoni

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

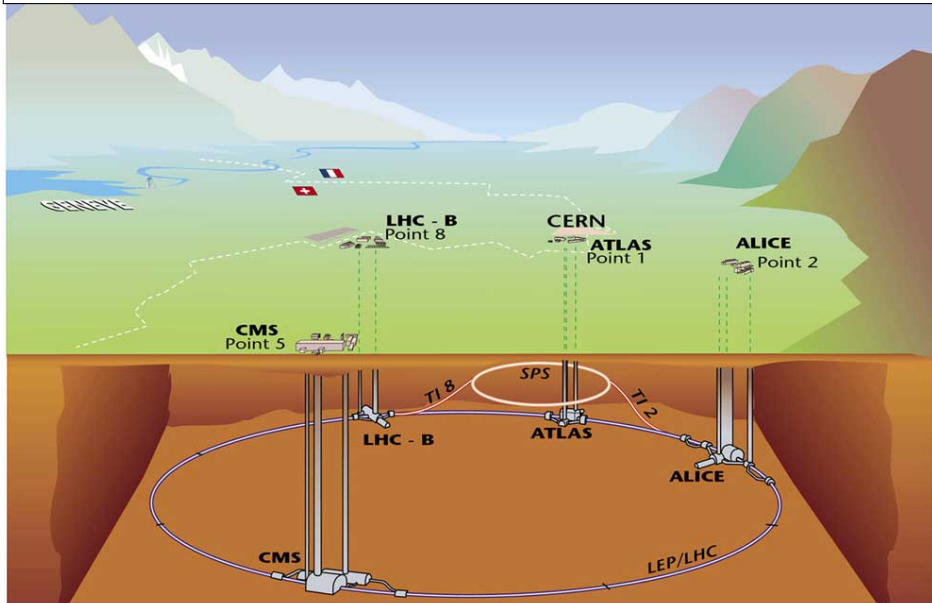


Campo magnetico per far curvare i protoni

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 ...

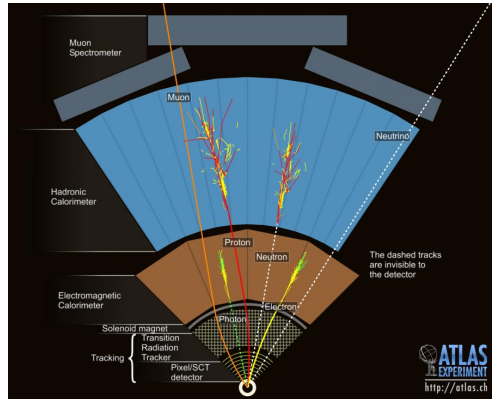
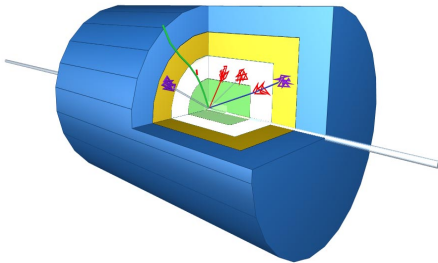


... e molto sofisticati

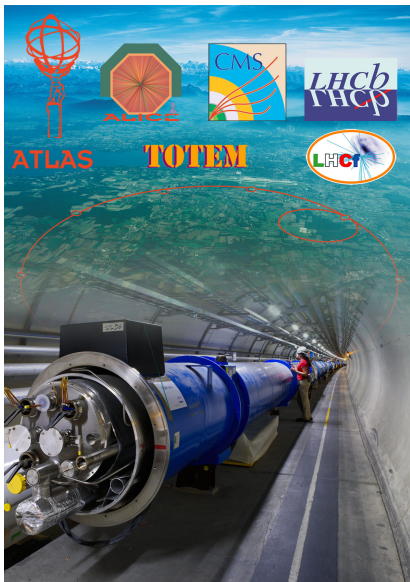
40 milioni di "foto" al secondo

I rivelatori di particelle

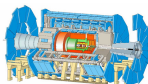
Più strati di “macchine fotografiche”
per misurare la direzione e l’energia
delle particelle prodotte nella collisione



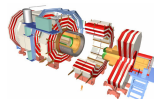
I rivelatori di particelle a LHC: 6 esperimenti



Ricerca del bosone di Higgs



ATLAS

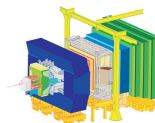


CMS

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



ALICE

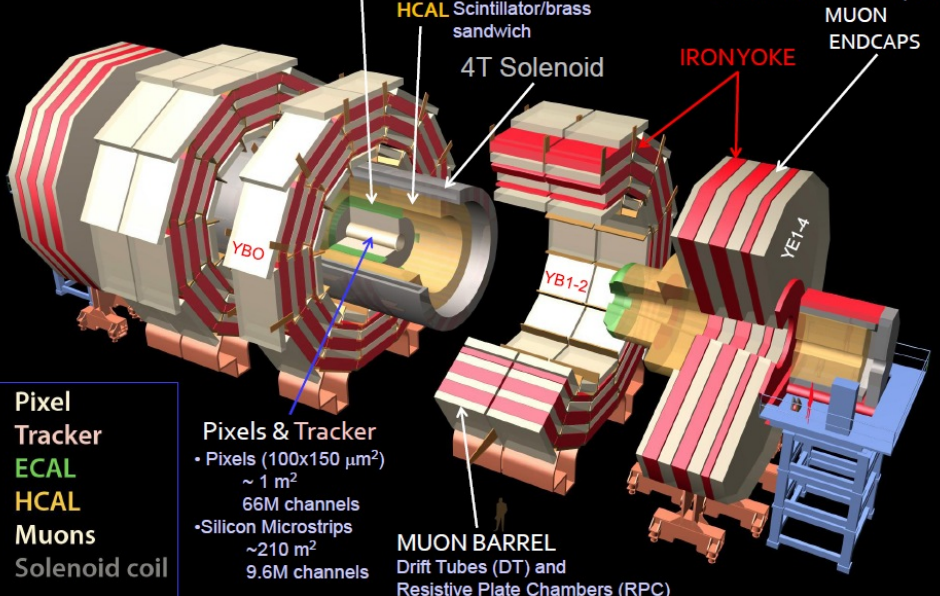


LHCb

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

IRONYOKE

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

MUON
ENDCAPS

YBO

YB1-2

YE1-4

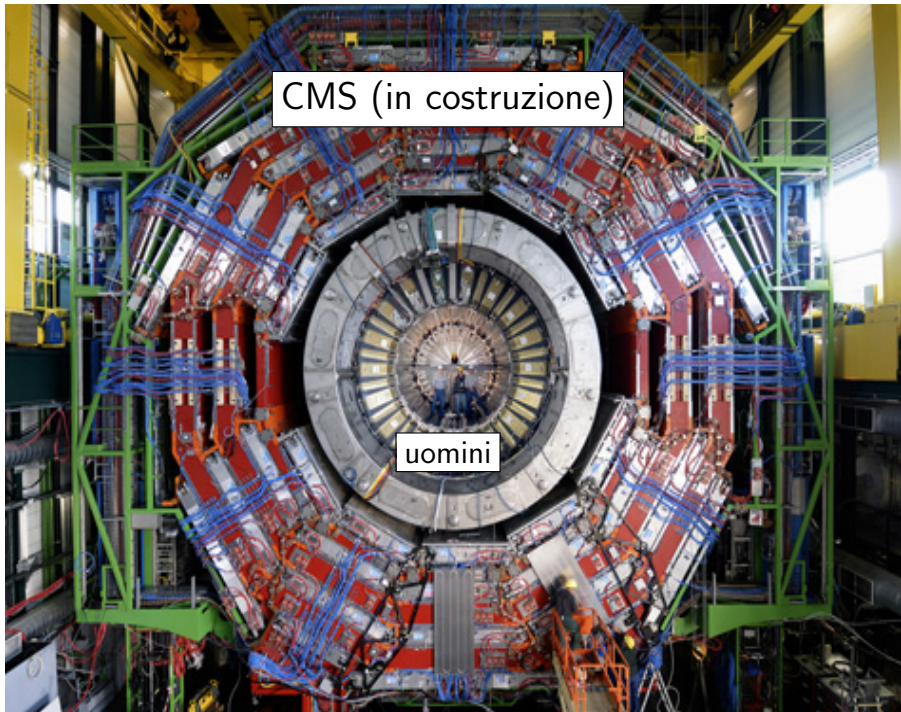
Pixel Tracker
ECAL
HCAL
Muons
Solenoid coil

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

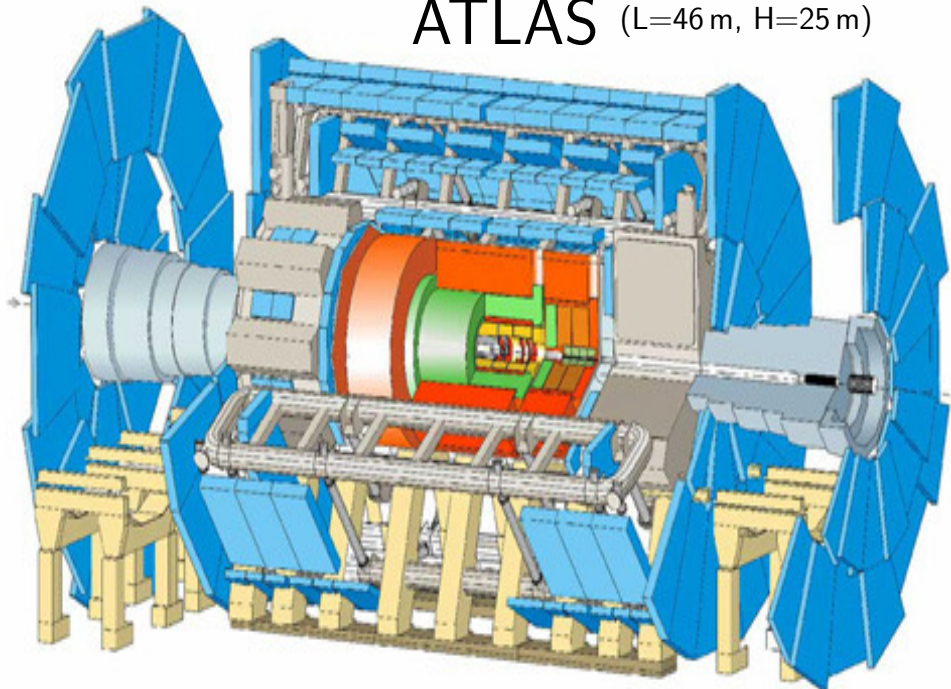
MUON BARREL
Drift Tubes (DT) and Resistive Plate Chambers (RPC)

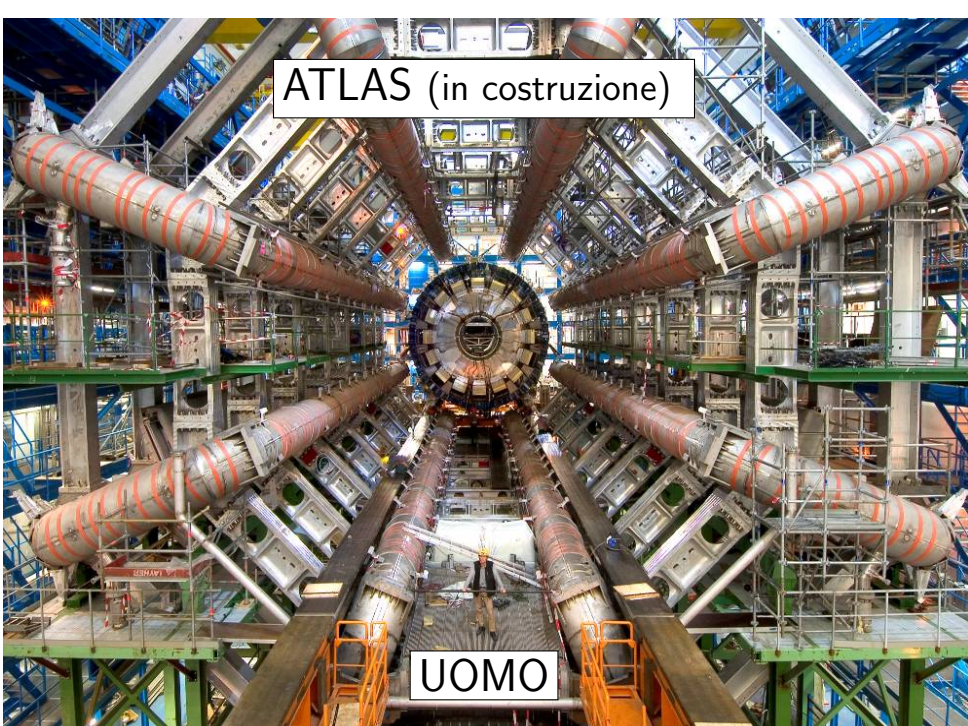
CMS (in costruzione)

uomini



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





ATLAS (in costruzione)

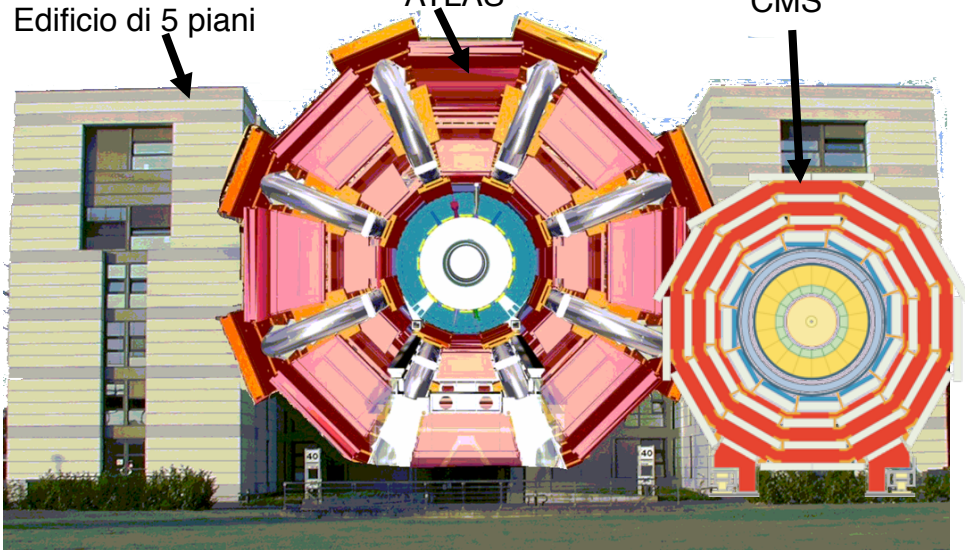
UOMO

Enormi rivelatori di particelle più precisi di un orologio svizzero

Edificio di 5 piani

ATLAS

CMS

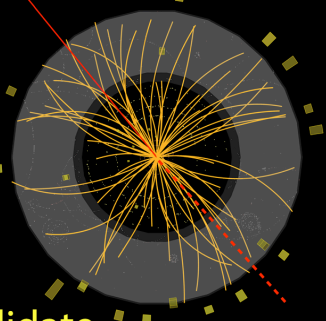
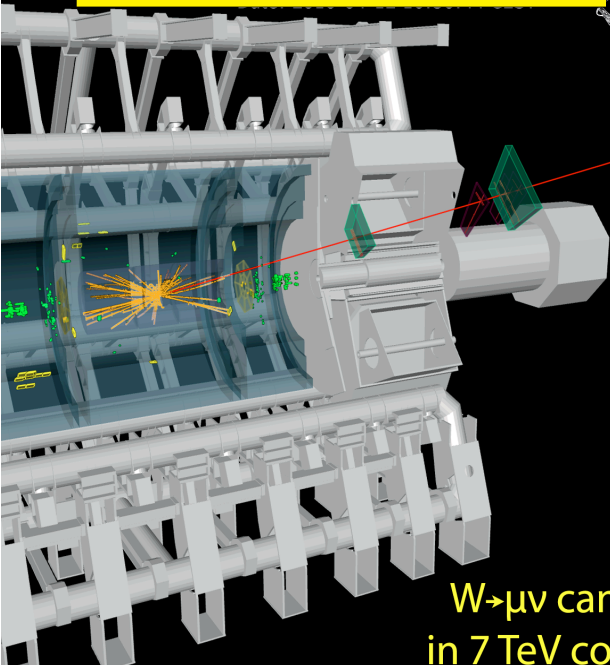


Fotografia di una collisione interessante



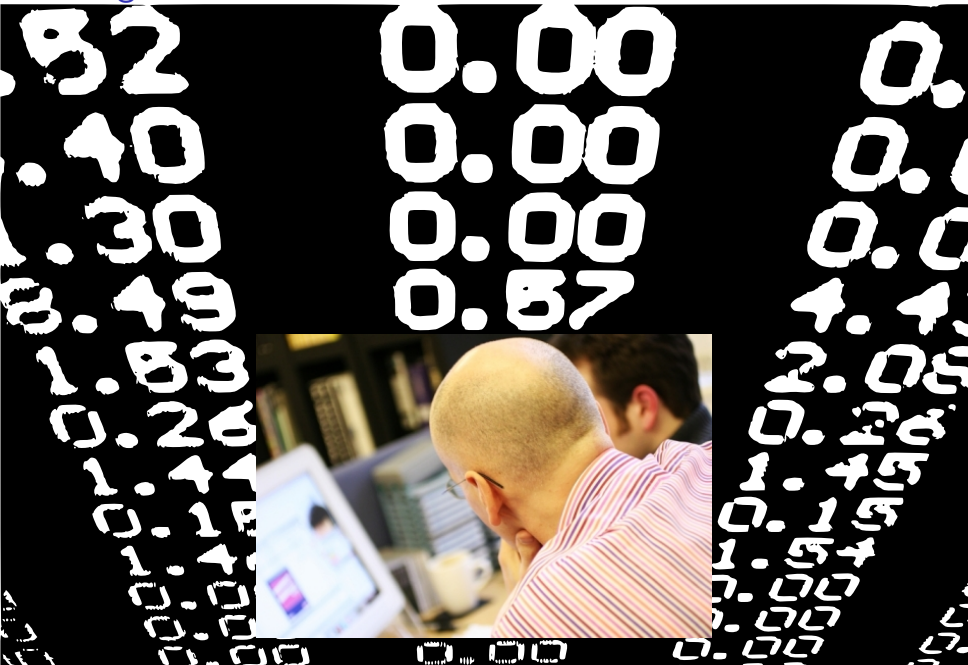
ATLAS EXPERIMENT

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



$W \rightarrow \mu\nu$ candidate
in 7 TeV collisions

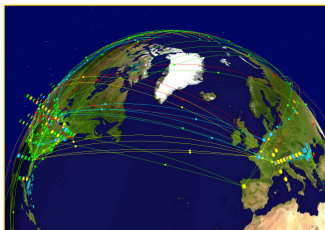
Raccogliere e analizzare i dati



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

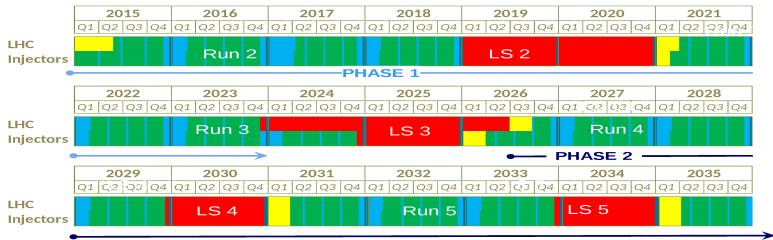
Presente e futuro di LHC

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**)
- ▶ 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.