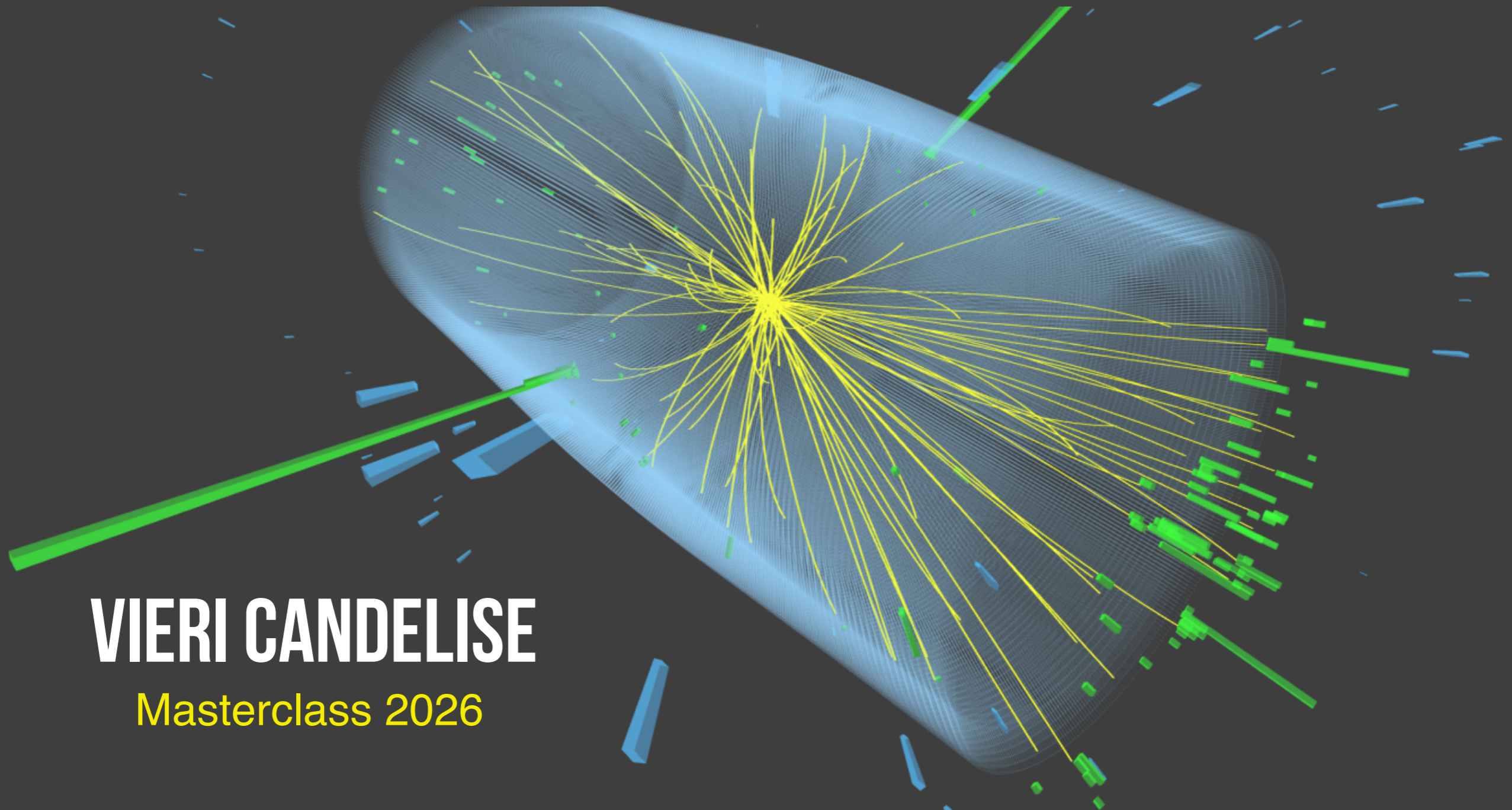


INTRODUZIONE ALLA FISICA DELLE PARTICELLE

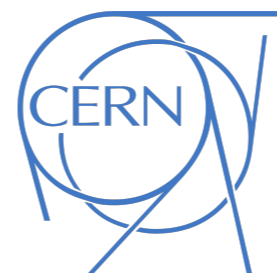
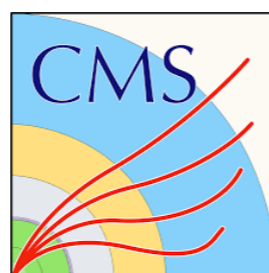


VIERI CANDELISE

Masterclass 2026



**UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI TRIESTE**



*Università degli
Studi di Trieste*

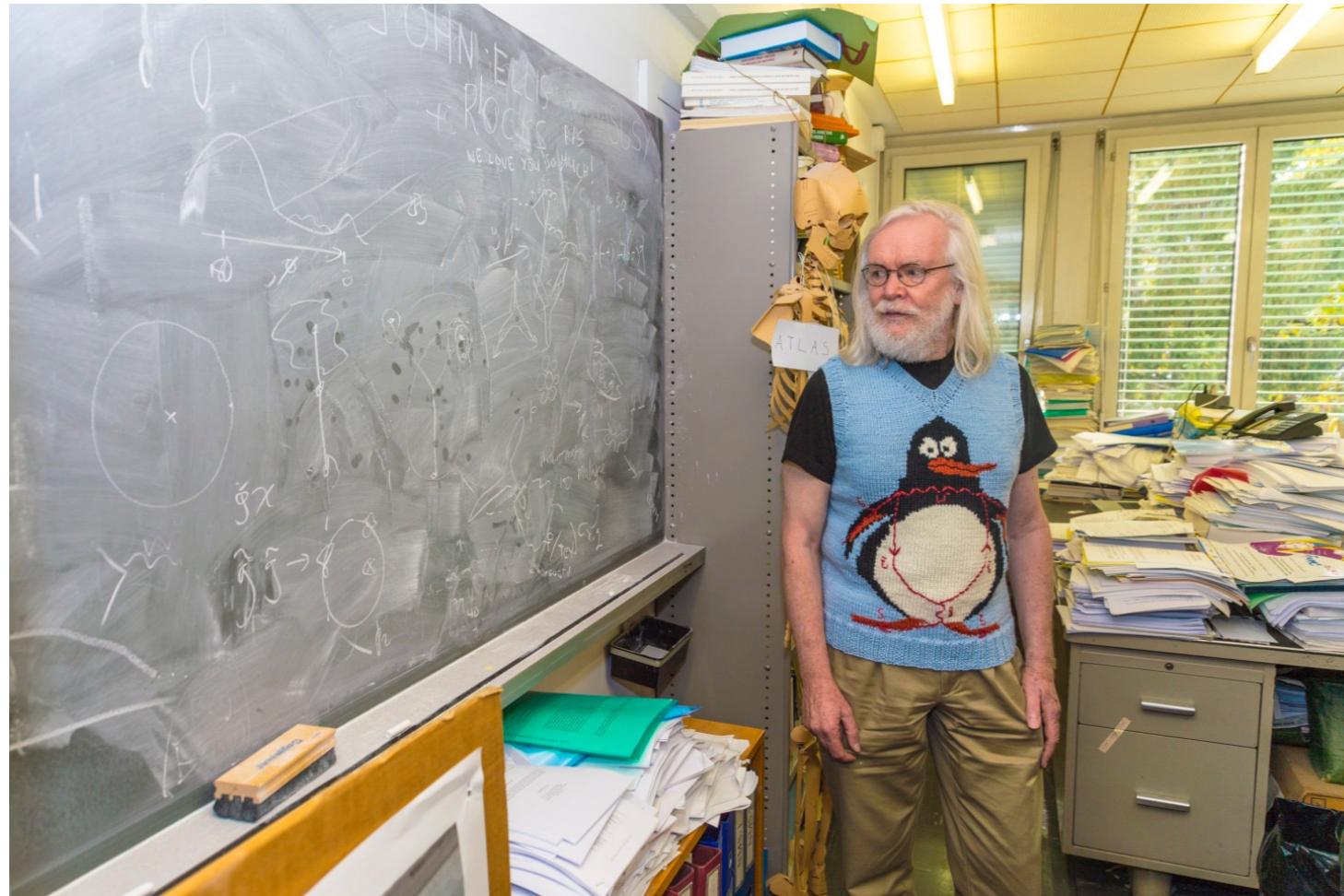
19/02/2026

IL MESTIERE DEL FISICO

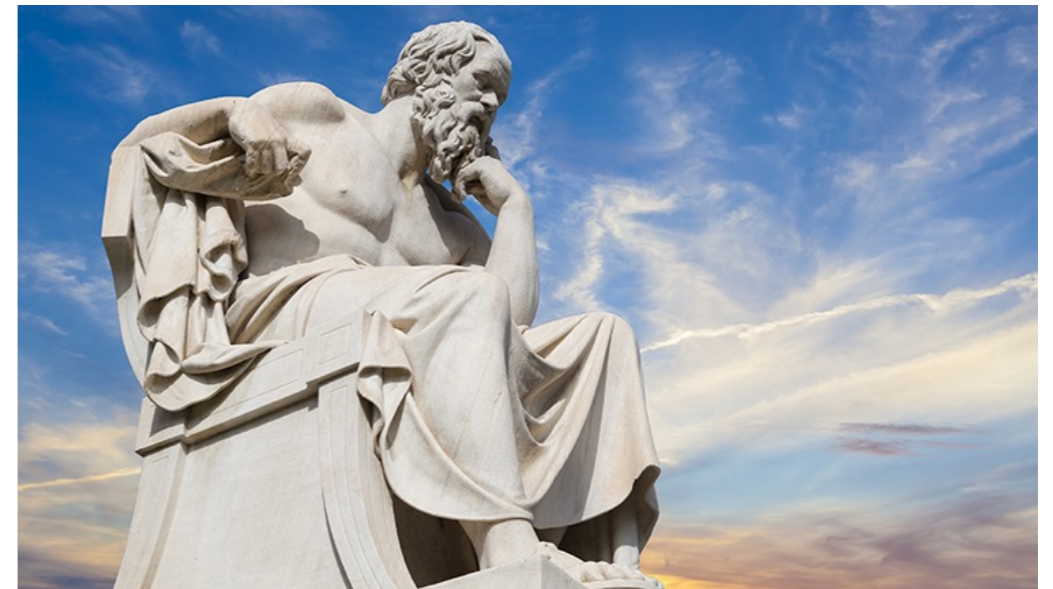


“ma quindi cosa fai esattamente?”

— *cit.* mia madre almeno una volta l'anno negli ultimi dieci anni



tipico fisico delle particelle col suo sobrio gilet raffigurante un diagramma a pinguino



di cosa sono fatte le cose?

o meglio

di cosa è fatto l'Universo?

da dove veniamo? (e quando?)

qual è il destino dell'Universo?

cosa esiste oltre la nostra percezione?

DI COSA SONO FATTE LE COSE?

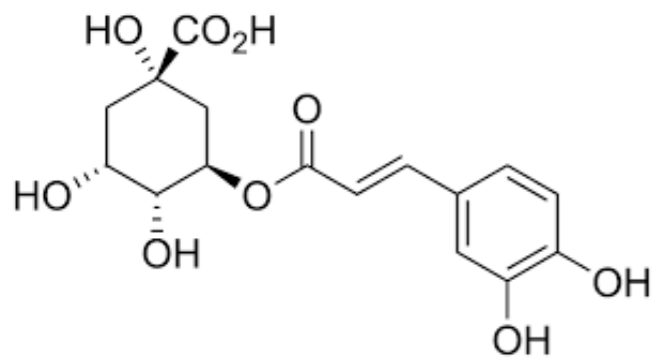
DI COSA SONO FATTE LE COSE?



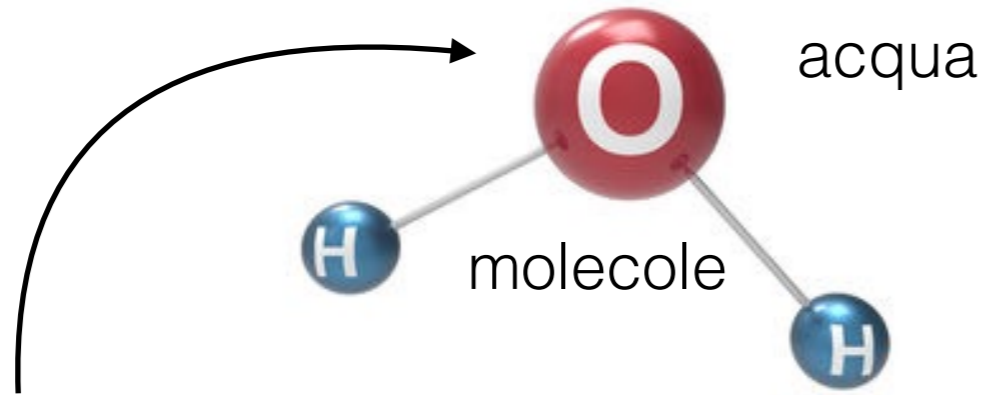
DI COSA SONO FATTE LE COSE?

UNA TAZZINA

99.96% acqua
0,04% caffeina



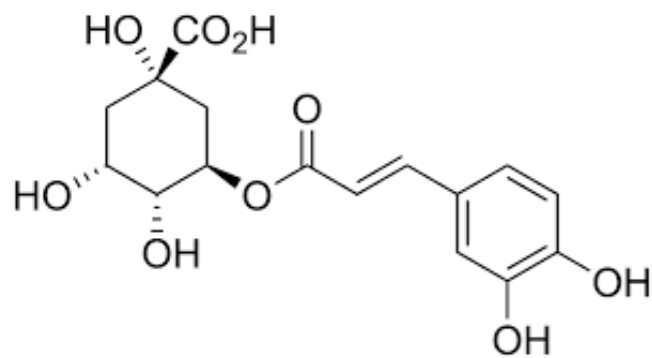
DI COSA SONO FATTE LE COSE?



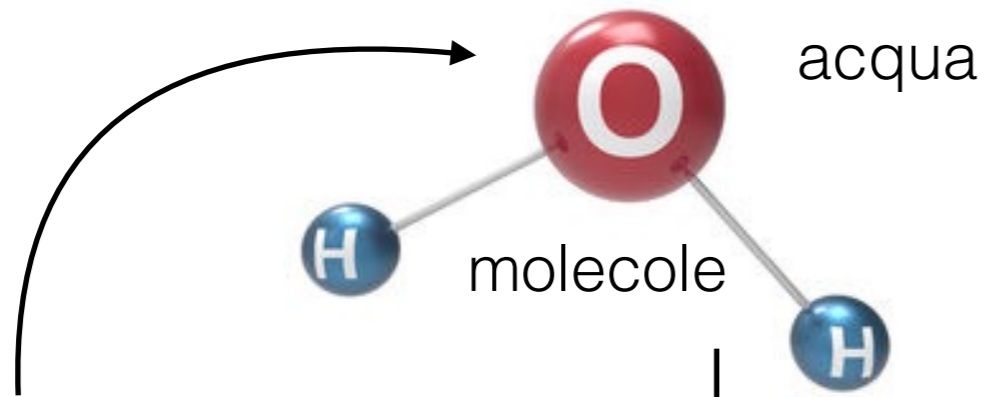
UNA TAZZINA

99.96% acqua

0,04% caffeina

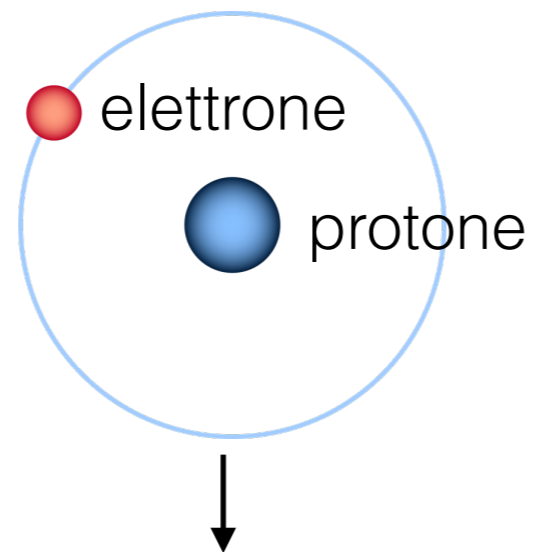


DI COSA SONO FATTE LE COSE?



UNA TAZZINA

99.96% acqua
0,04% caffeina

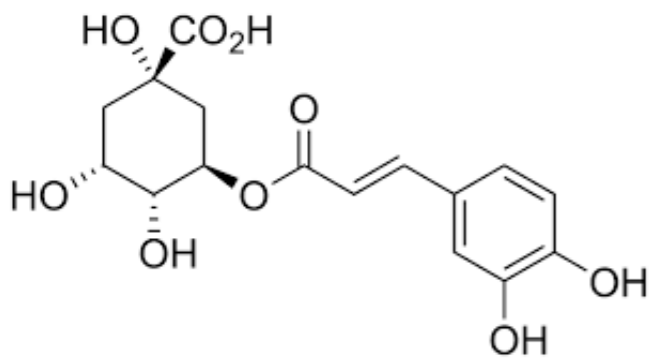


UN CAFFÈ MOLECOLARE

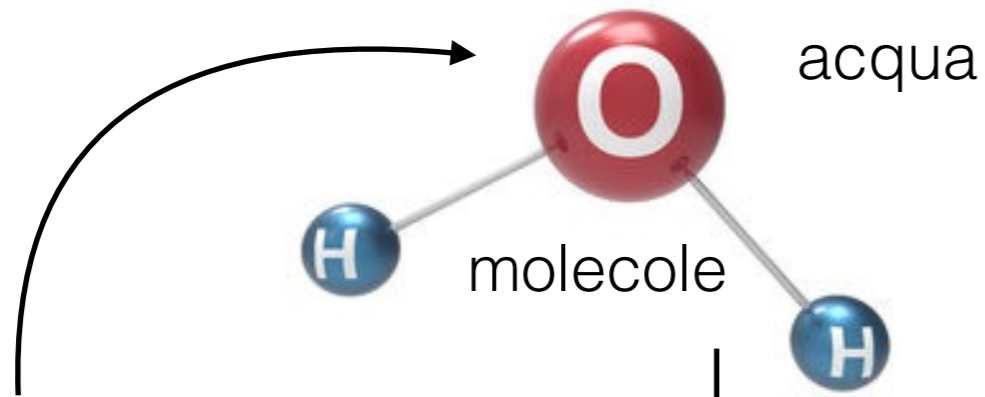
30000000000000000000000000000000 molecole

UN CAFFÈ ATOMICO

100000000000000000000000000000000 atomi
(10 milioni di milioni di miliardi)



DI COSA SONO FATTE LE COSE?

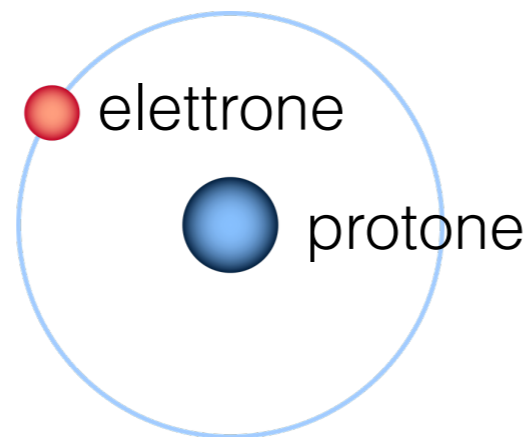


UNA TAZZINA

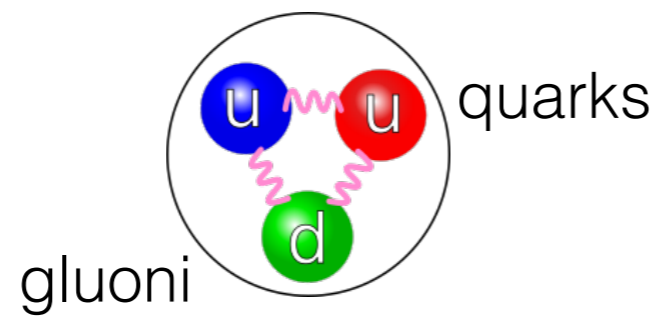
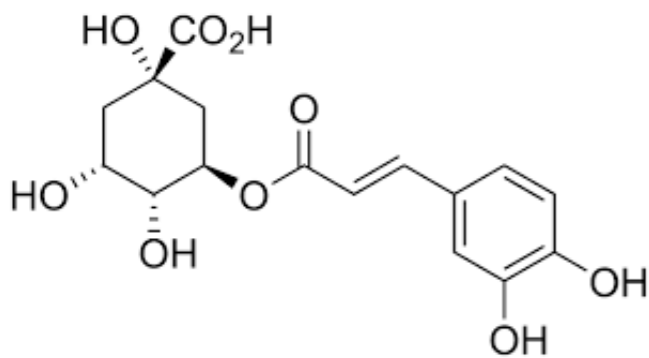
99.96% acqua
0,04% caffeina



(10 milioni di milioni di miliardi)



**sicuro di sapere
cosa stai
bevendo?**

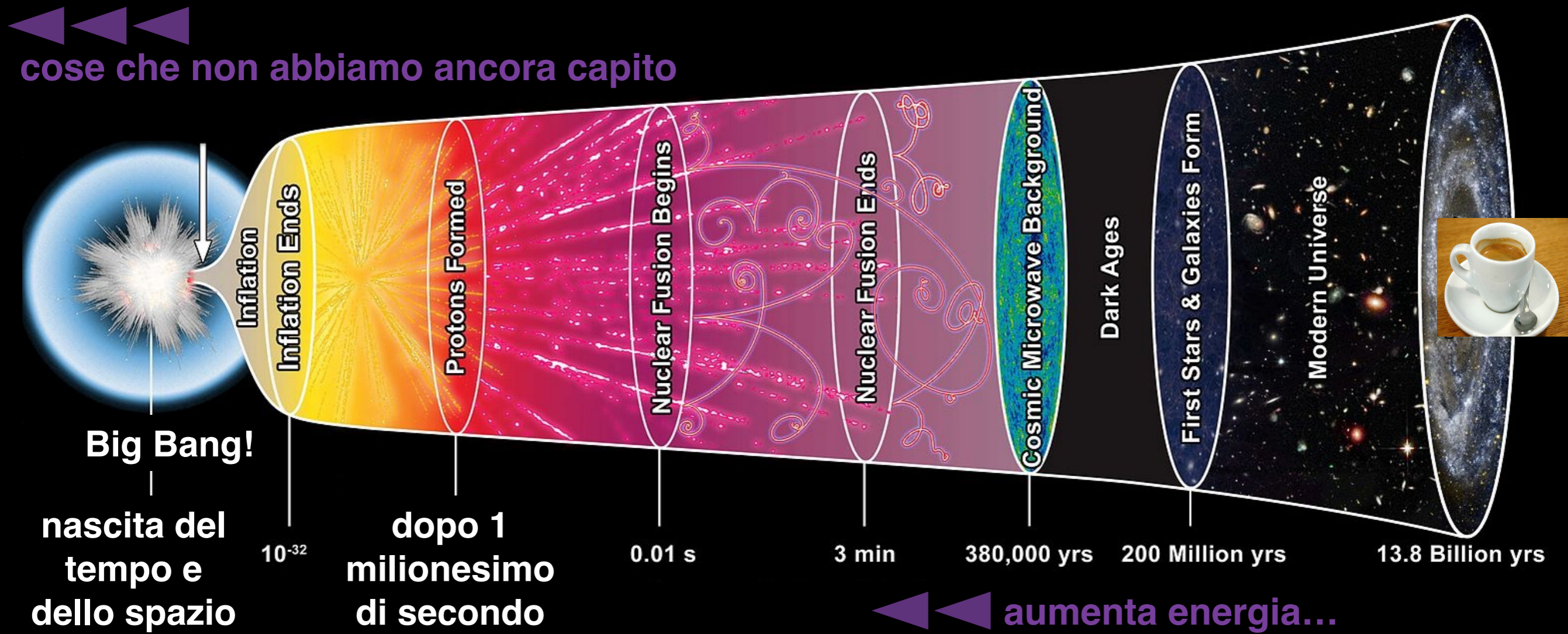


??



FRONTIERA DELL'ENERGIA

BREVE STORIA DELL'UNIVERSO



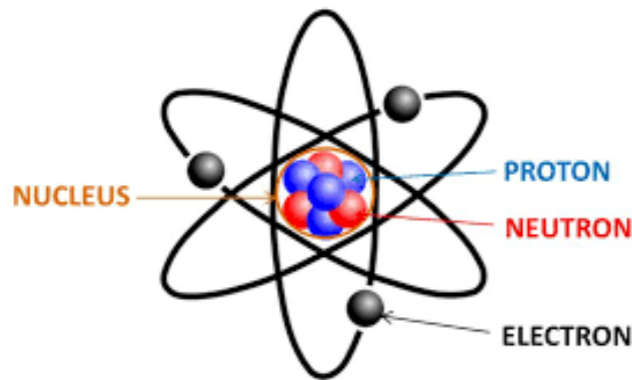
aumentare energia -> andare indietro nel tempo



UN MONDO DI PARTICELLE

Quante particelle ci sono?

Nella nostra vita terrestre abbiamo a che fare *quasi* solo con atomi e molecole: quindi elettroni, protoni e neutroni.



...ma è davvero tutto qui?

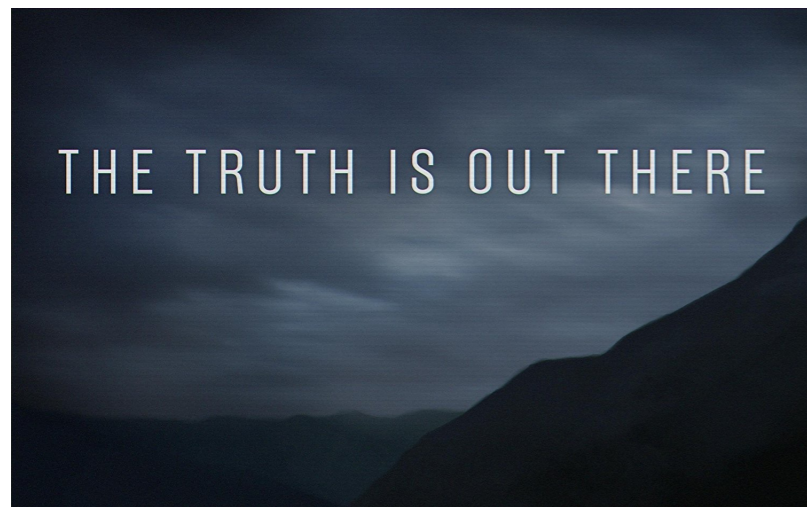


	1 st	2 nd	3 rd
Quarks	u up	C charm	t top
	d down	S strange	b beauty
Leptons	e electron	μ muon	τ tau
	ν_e neutrino electron	ν_μ neutrino muon	ν_τ neutrino tau

Particelle Elementari

Tre Famiglie
Tre Generazioni

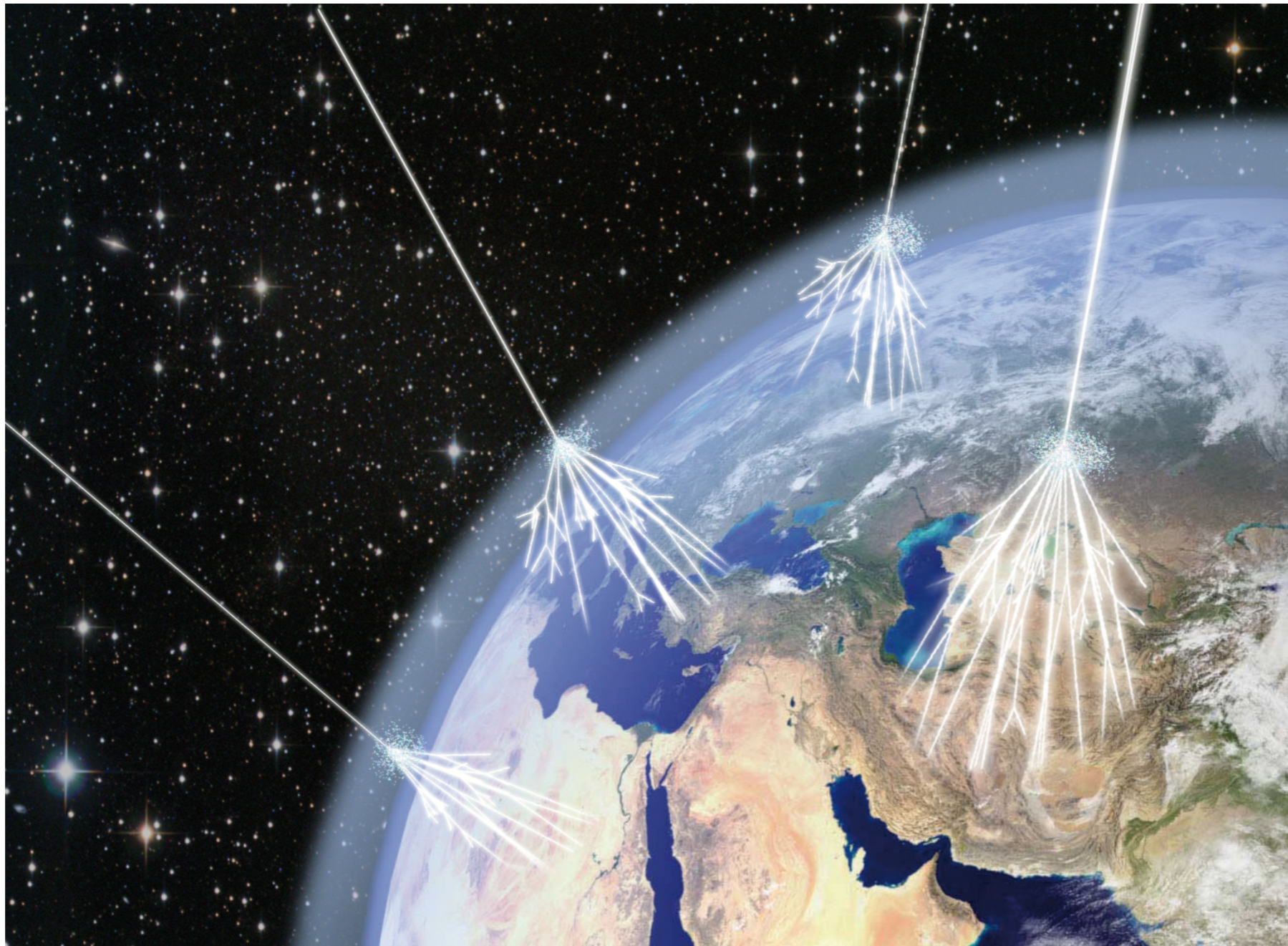
tutte queste particelle
sono state scoperte
dagli anni 60 ad oggi!



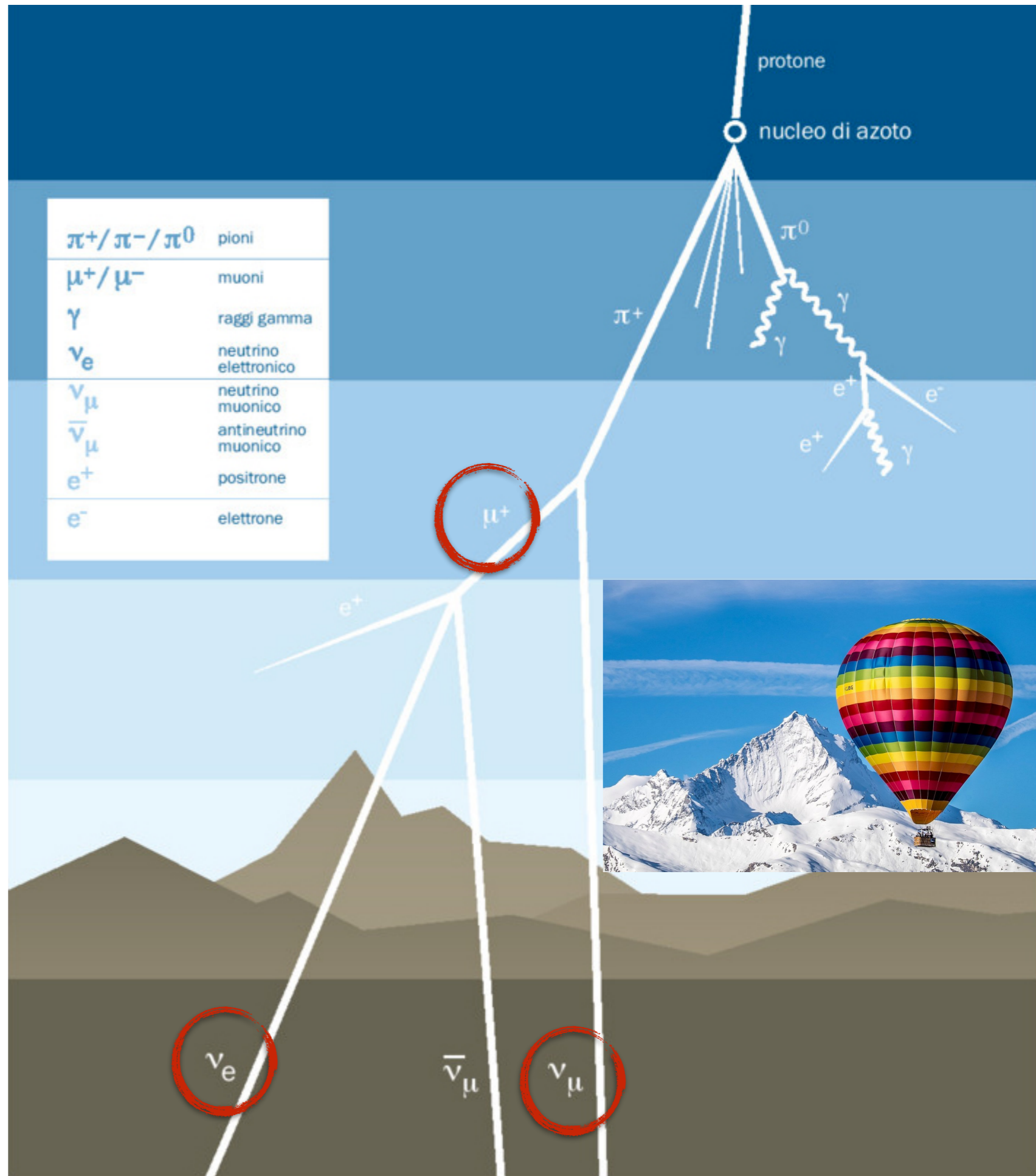
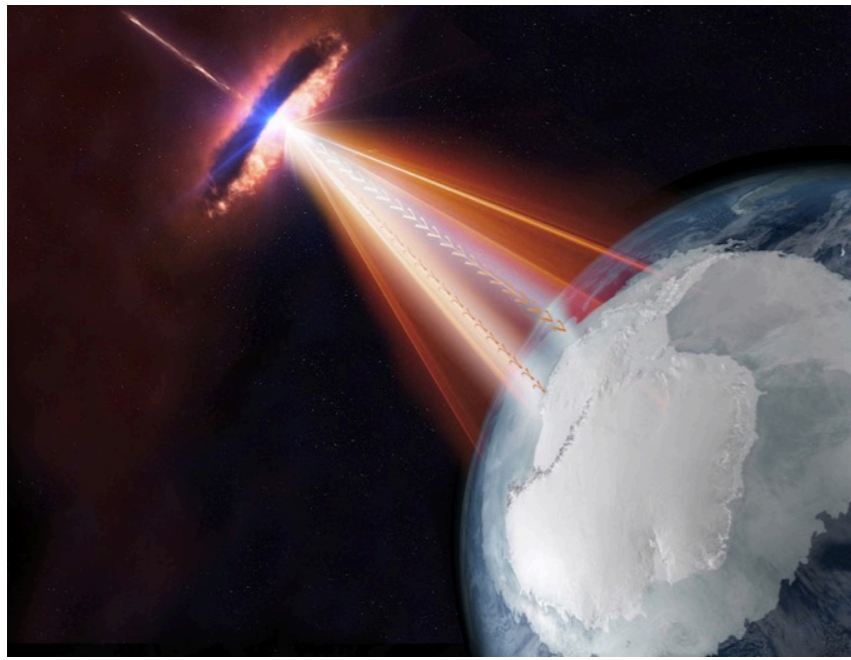
Là fuori, nell'Universo, è
pieno di particelle!

→ come facciamo a vederle noi terrestri? L'Universo ci viene incontro... →

I RAGGI COSMICI



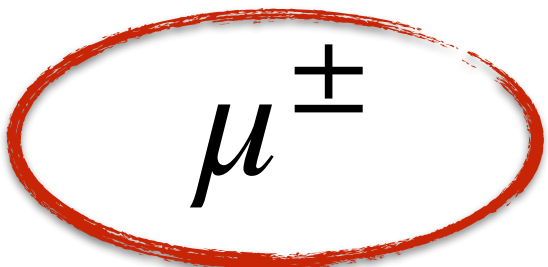
a livello del mare, ogni essere umano è attraversato da circa 30 particelle **cosmiche**, ognuna accompagnata da due altre particelle invisibili che attraversano tutto il pianeta uscendo fuori e tornando nello spazio



grazie a questi raggi abbiamo capito che esistono molte altre particelle oltre a quelle dell'atomo... alcune in grado di arrivare fino a terra!

MUONI E NEUTRINI

nello studio dei raggi cosmici osserviamo una nuova particella che è in grado di oltrepassare la materia e giungere fino a terra: i muoni



μ^{\pm}

esattamente come elettroni ma pesanti 200 volte di più a causa di questa “pesantezza” decadono in elettroni interagiscono debolmente con la materia rilasciando poca energia

elettroni e muoni sono spesso accompagnati da neutrini



ν_e, ν_{μ}

neutri, senza massa, estremamente elusivi!
possono attraversare tutto il pianeta indisturbati
sono invisibili alla materia e quindi agli esperimenti

LE ANTIPARTICELLE E L'ANTIMATERIA

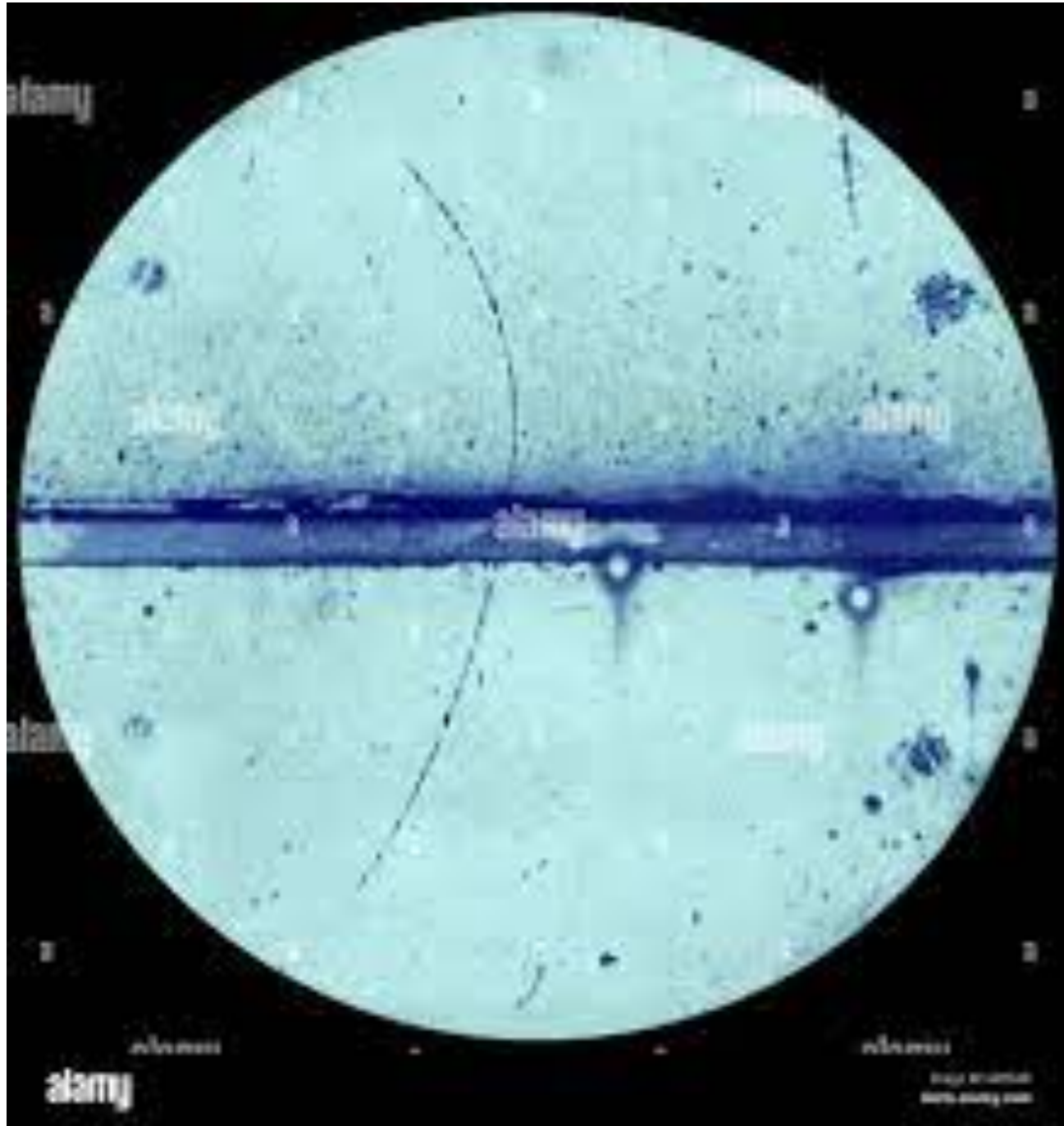
$$(i\partial - m) \psi = 0$$

Nel tentativo di costruire la teoria delle particelle, si arriva ad un punto bizzarro: esistono particelle identiche a quelle che conosciamo, con la stessa massa, ma con la carica elettrica (e tutti gli altri numeri quantici)

invertiti!

(questa equazione famosissima si chiama Equazione di Dirac)

LE ANTIPARTICELLE E L'ANTIMATERIA



Nel 1932 un fisico di nome Anderson conferma questa teoria misurando in laboratorio un elettrone positivo, ovvero un anti-elettrone, chiamato positrone

Da quel momento si osservano anti-particelle per tutte quelle conosciute: anti-protone, anti-muone, anti-neutrone ecc.

Le antiparticelle formano l'antimateria, che però non può vivere a contatto con la nostra materia perché istantaneamente si trasforma in luce!

COSA TIENE TUTTO INSIEME: LE FORZE

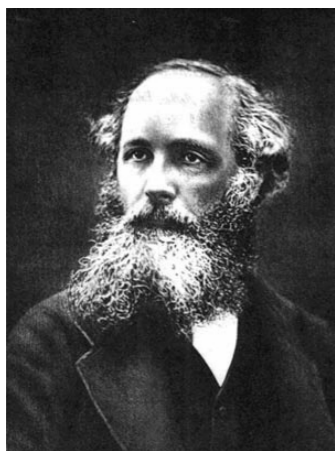
— o meglio: *Le 4 Forze Fondamentali dell'Universo*

THE FORCE IS
STRONG
WITH THIS ONE

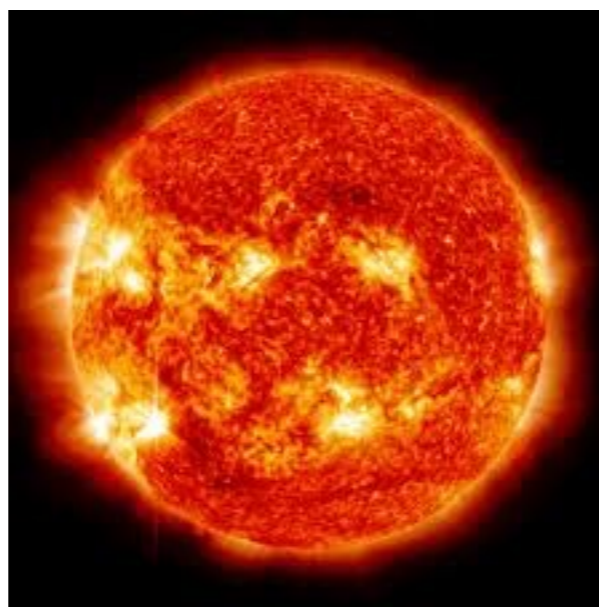
ELETTROMAGNETICA



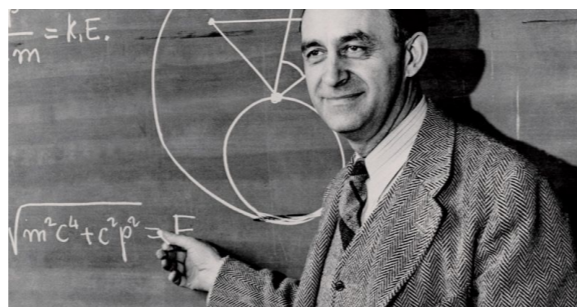
luce, radiazione,
elettromagnetismo



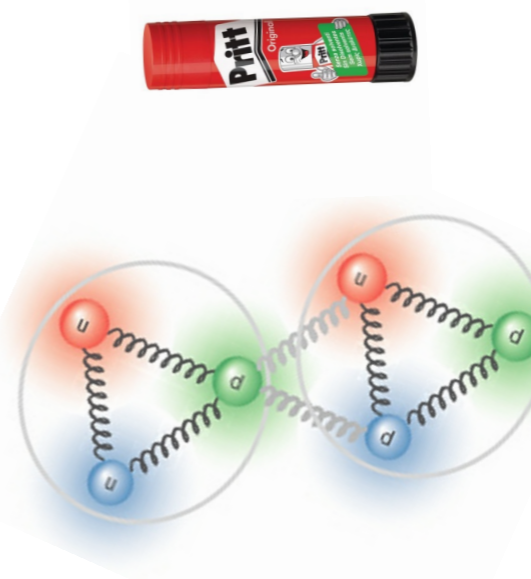
NUCLEARE DEBOLE



decadimenti,
trasformazioni,
radioattività



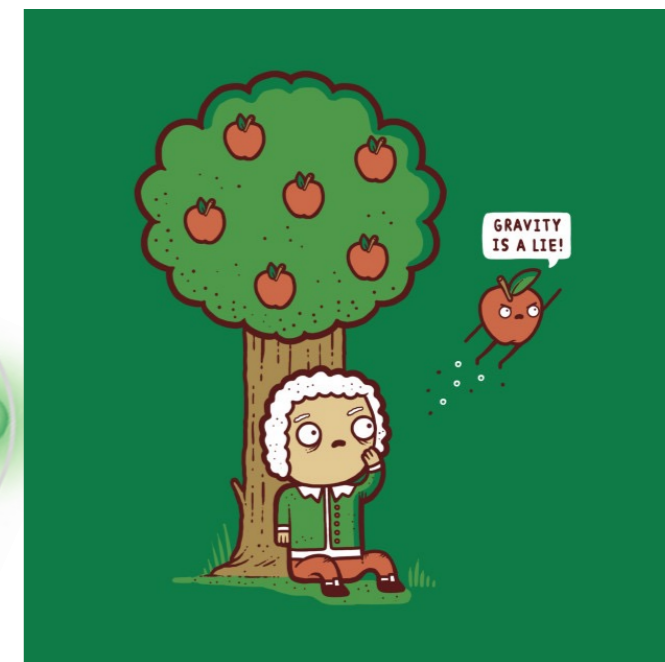
NUCLEARE FORTE



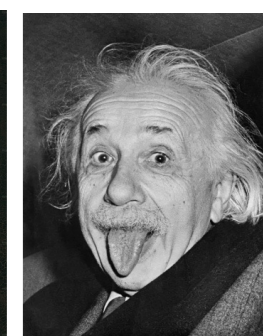
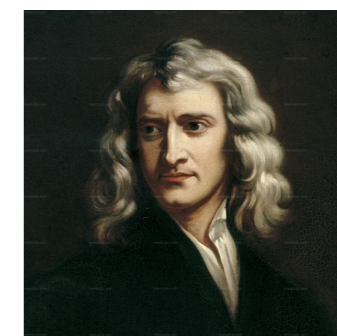
tiene insieme i quark
nei protoni e i neutroni
nel nucleo!



GRAVITÀ



agisce su tutto, ma
soprattutto sui pianeti,
le stelle e i corpi celesti!

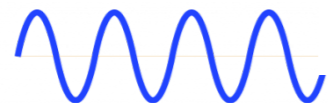


COSA TIENE TUTTO INSIEME: LE FORZE

— per ogni forza una particella: I Messaggeri delle Forze Fondamentali:

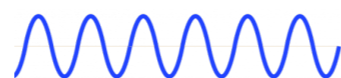
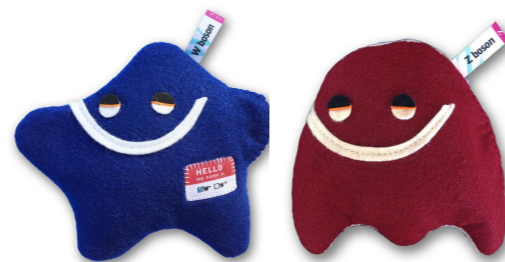
I BOSONI

ELETTROMAGNETICA



γ

NUCLEARE DEBOLE



$W e Z$

NUCLEARE FORTE



gluone

GRAVITÀ

Error 404 Not Found

Murder Palace x Darku J

December Twenty Third at Ten P.M. Upstairs at
The Fur Shop, 520 E 3rd St, Tulsa, OK

Get more Info at : <http://bit.ly/2BwUyfS>

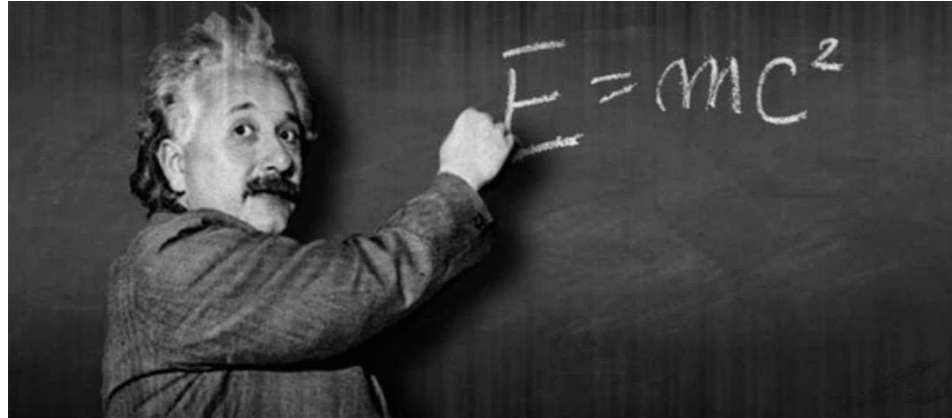
(ops!)

L'interazione di questi bosoni con tutte le altre particelle rende possibile l'Universo come lo conosciamo (e quindi la vita!)

... ma come facciamo a sapere tutto questo?

UNA TEORIA PER SPIEGARE (QUASI) TUTTO

1905 TEORIA DELLA RELATIVITÀ



studia la cinematica e la dinamica delle cose che vanno alla velocità della luce

$$c = 300000 \text{ km/s}$$

Niente può superare questo numero in tutto l'Universo!

Einstein predice che energia e massa sono connesse: $E = mc^2$

tanta massa significa tanta energia!

1927 MECCANICA QUANTISTICA

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$

studia le cose molto molto piccole

ci dice che l'energia per queste cose piccole appare a intervalli regolari

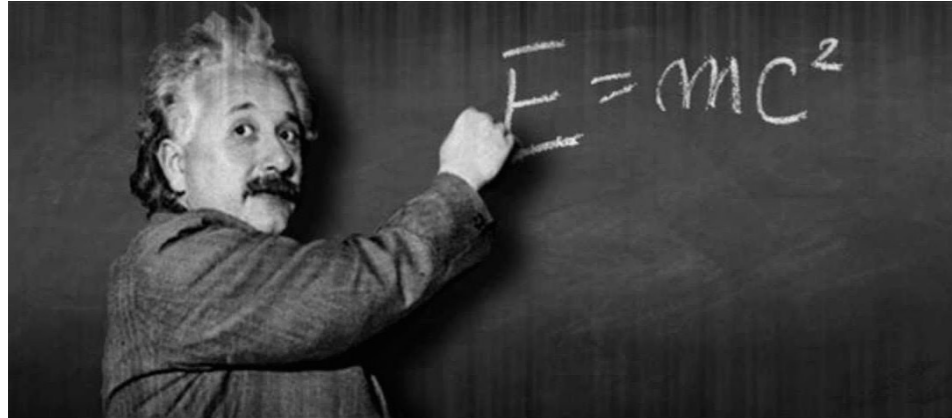
e che è pari alla frequenza, cioè le particelle si comportano come onde

$$E = \hbar\omega$$

ci dice che l'energia per queste cose piccole appare a intervalli regolari

UNA TEORIA PER SPIEGARE (QUASI) TUTTO

1905 TEORIA DELLA RELATIVITÀ



1927 MECCANICA QUANTISTICA

$$H(t) |\psi(t)\rangle = i\hbar \frac{d}{dt} |\psi(t)\rangle$$



Teoria *quantistica relativistica* della dinamica di particelle e delle forze fondamentali

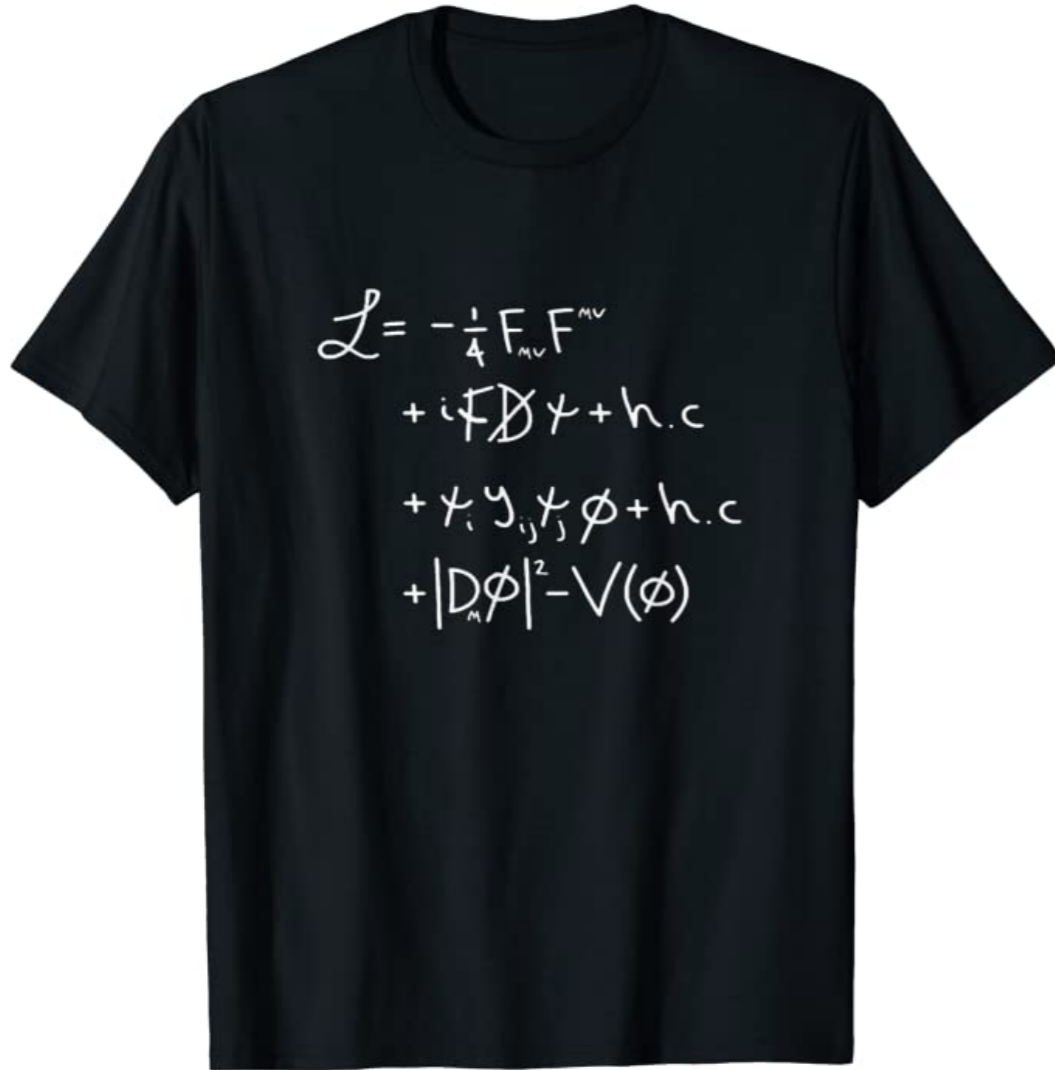
$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \chi_i y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |D_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

- ← elettromagnetismo
- ← quark e leptoni
- ← interazioni forti
- ← + un pezzo mancante....

IL MODELLO STANDARD



IL MODELLO STANDARD



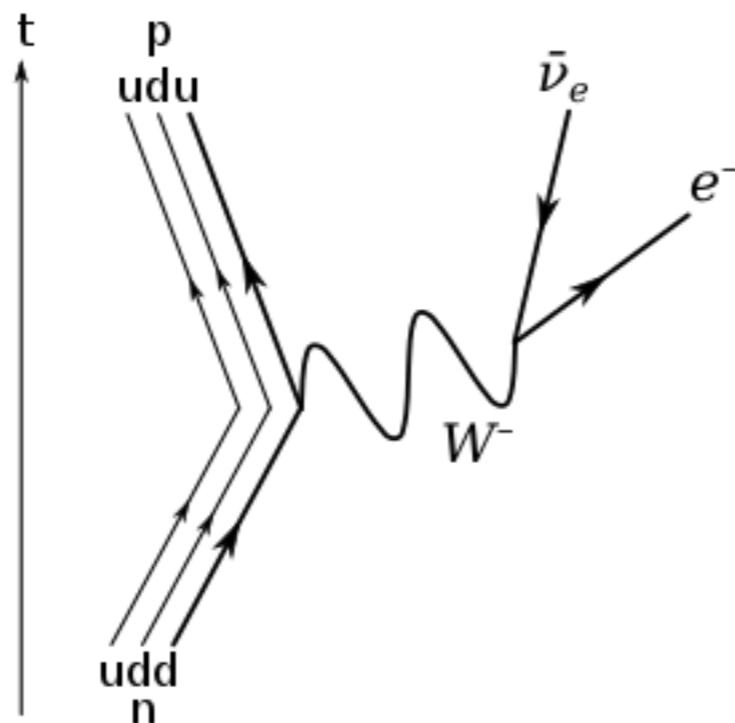
(si può comprare allo store del CERN)

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2} \partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4} g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2} \partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2} \partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2} g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2} \partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2} \partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2} (H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g \alpha_h M (H^3 + H \phi^0 \phi^0 + 2H \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8} g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & g M W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2} g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2} ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2} g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2} g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+)) - ig \frac{s_w^2}{c_w} M Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4} g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8} g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2} g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2} ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2} ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2} ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^\sigma \gamma^\mu q_j^\sigma) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma \partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma \partial + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma \partial + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma \partial + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3} (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3} (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep})_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep})_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep})_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep})_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep})_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep})_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_e^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \hat{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}) (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}) (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger) (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger) (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\nu^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2} g M (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} ig M (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} ig M (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + ig M s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2} ig M (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

I BOSONI W^\pm & Z

tra le quattro interazioni fondamentali troviamo le
interazioni deboli

grazie a queste interazioni regolano il meccanismo interno del
sole, permettono alle stelle di brillare e rendono possibili di
decadimenti radioattivi

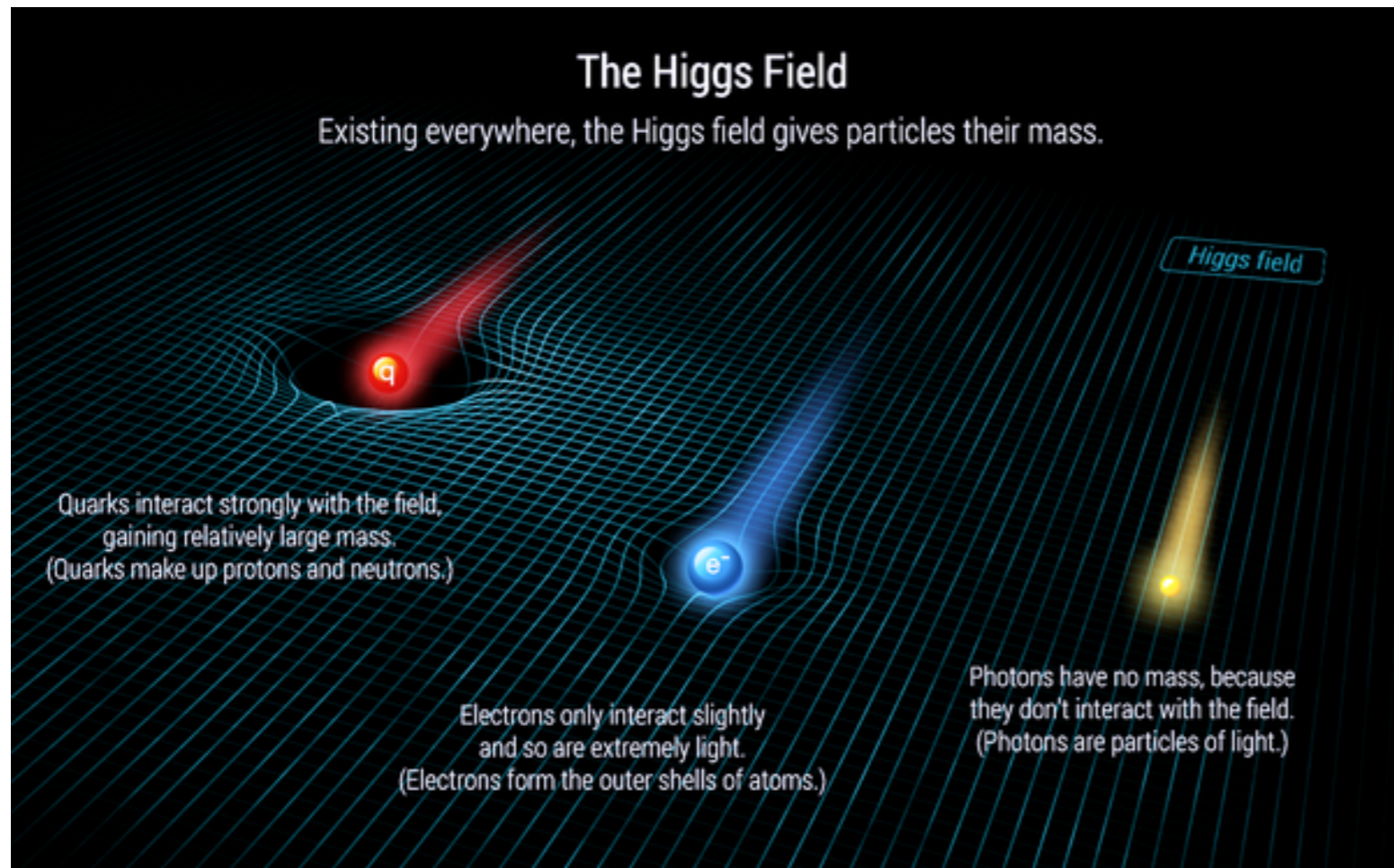


ogni trasformazione che avviene tramite interazione debole è *mediata* da queste
particelle, pesantissime, appena prodotte decadono in muoni, elettroni

IL PROBLEMA DELLA MASSA

Problema: il Modello Standard prevede un mondo fatto di
particelle senza massa!

invece noi osserviamo massa in tutte le cose...



Soluzione: l'Universo è permeato da un "campo" e tutto si muove attraverso esso **divenendo massivo.**

campo = forza = particella

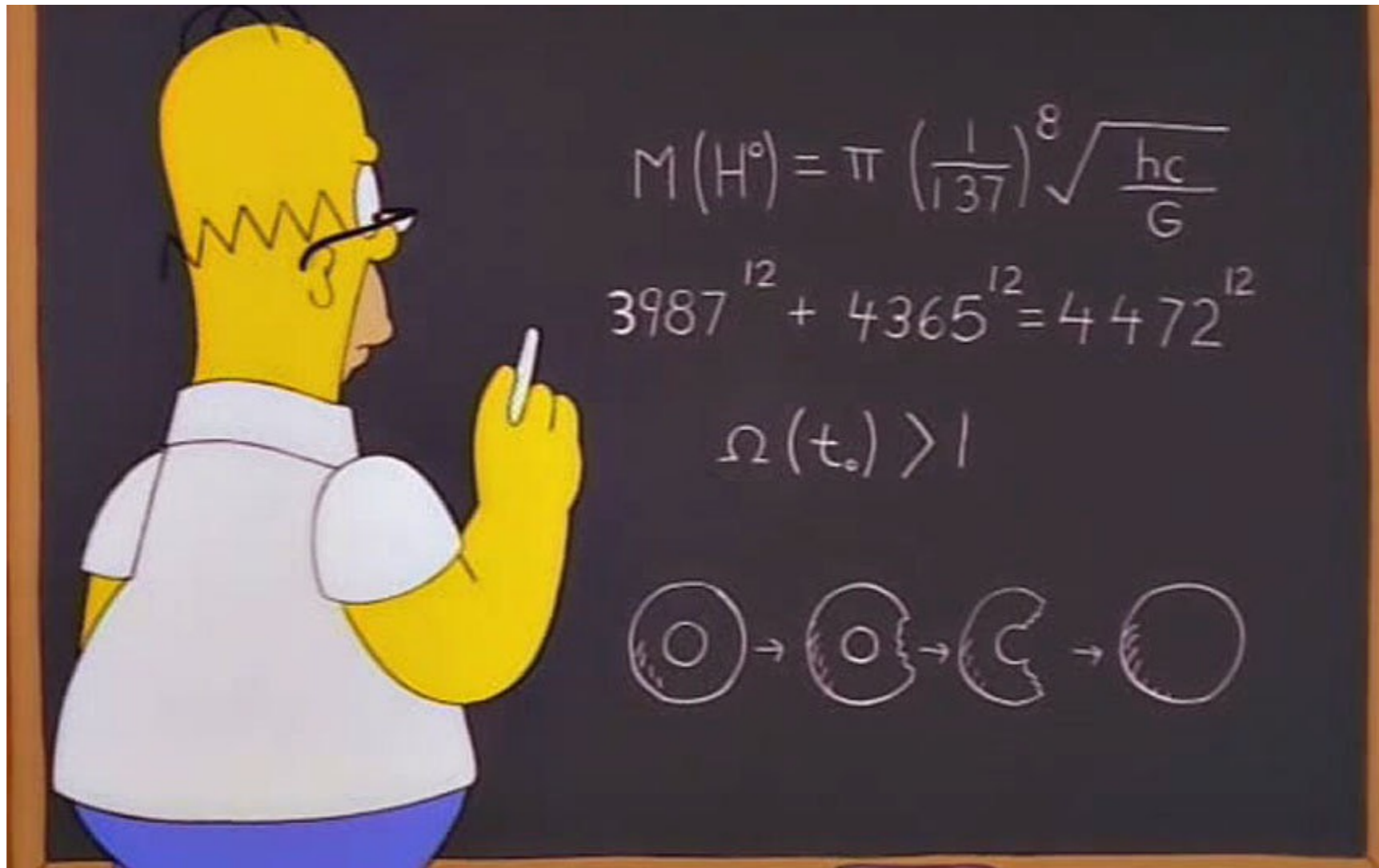
teorizzato negli anni 60 da Peter Higgs, fu scoperto solo nel 2012 al CERN dagli esperimenti ATLAS e CMS!



il bosone di Higgs!

IL BOSONE DI HIGGS

La caccia al bosone di Higgs è stata una delle maggiori sfide tecnologiche del secolo, durata oltre 20 anni... ha spinto la tecnologia a limiti inimmaginabili



(Homer predice la massa del bosone di Higgs in un episodio dei Simpsons del 1998 con 14 anni di anticipo)

<https://www.telegraph.co.uk/news/science/science-news/11444055/Homer-Simpson-discovered-the-Higgs-boson.html>

COME POSSO VEDERE TUTTE QUESTE PARTICELLE?

non ho il controllo sui raggi cosmici, e molte particelle sono instabili, decadono in frazioni di secondo...

inoltre molti processi sono *estremamente improbabili*

mi serve un modo per produrre “in casa” grandissime quantità di particelle, e mi serve un esperimento che le riconosca, ne misuri le proprietà, insomma un *laboratorio per le particelle*

L'ACCELERATORE PIÙ POTENTE DELLA TERRA AL CERN DI GINEVRA



Risposta: venite al **CERN**, a Ginevra! (*)
Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire

Fondato nel 1954 con l'idea di creare un
laboratorio di **pace e unione tra popoli**

20 stati membri, 133 nazionalità coinvolte
608 istituti/università (tra cui Trieste!)

Il CERN non è solo Fisica: dall'informatica
alla tecnologia, alla fisica medica e all'ingegneria,
centinaia di fisici, ingegneri, chimici e tecnici
da tutto il mondo lavorano insieme

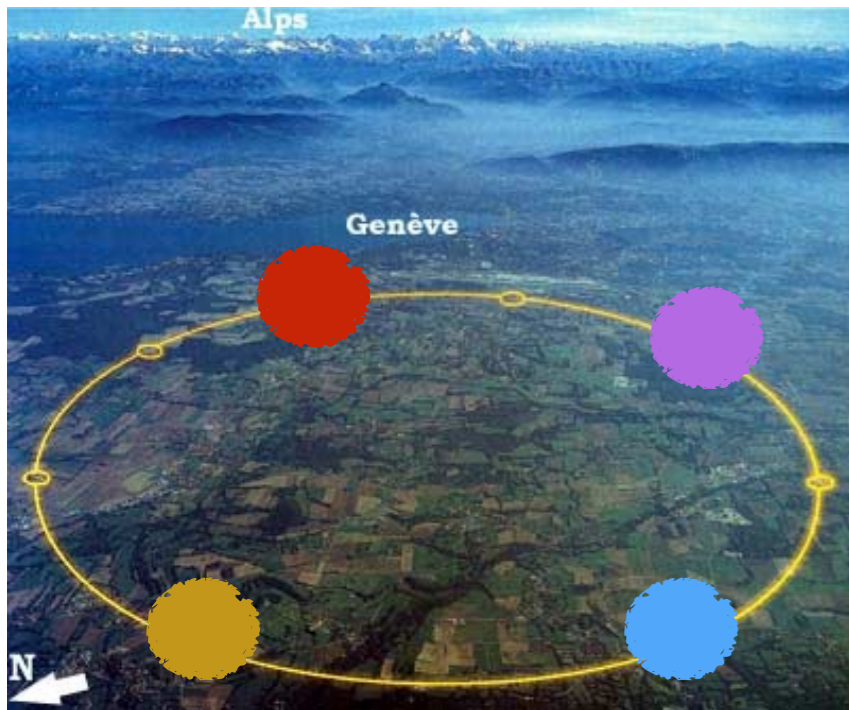


(*) davvero! <https://visit.cern/tours/guided-tours-individuals/27>

L'ACCELERATORE PIÙ POTENTE DELLA TERRA

L'ACCELERATORE DOV'È? ...175 metri sotto terra!

visto dall'alto...



un anello sotterraneo di 30 Km al confine tra Francia e Svizzera

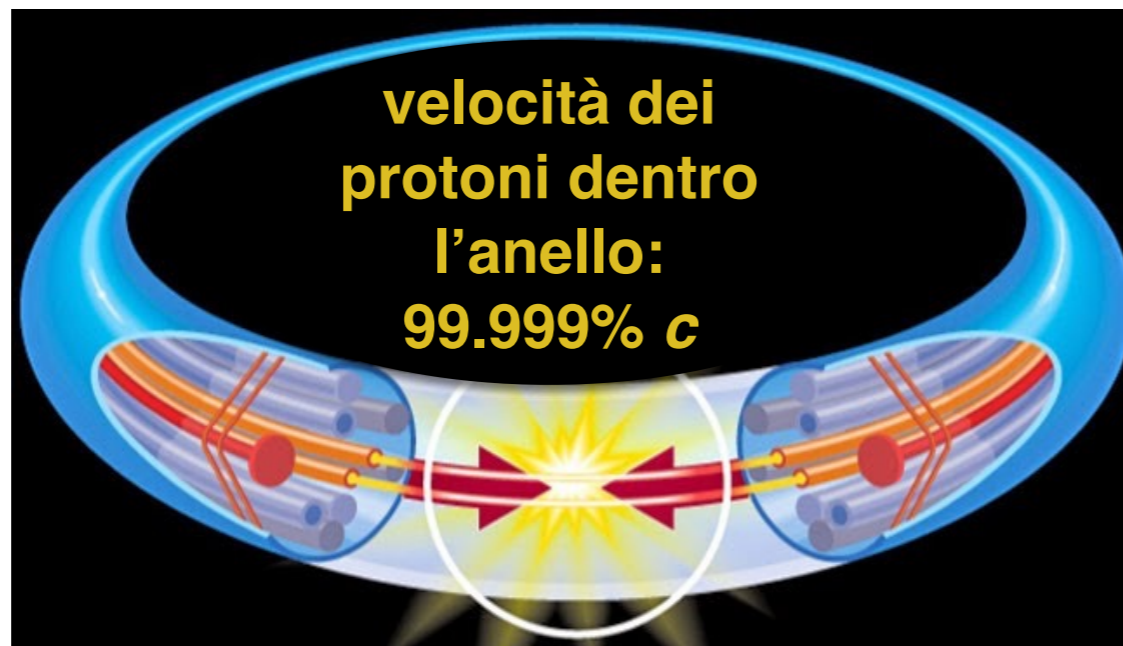
I fisici accelerano dentro questo anello due “fasci” di protoni usando magneti **super conduttori**

niobio e **titanio** e sono raffreddati alla temperatura di circa 2 K (circa -271 °C), utilizzando **elio** liquido.

visto dal “basso”

Energia più grande mai creata sulla terra: 13.4 Tera elettronVolt (TeV)

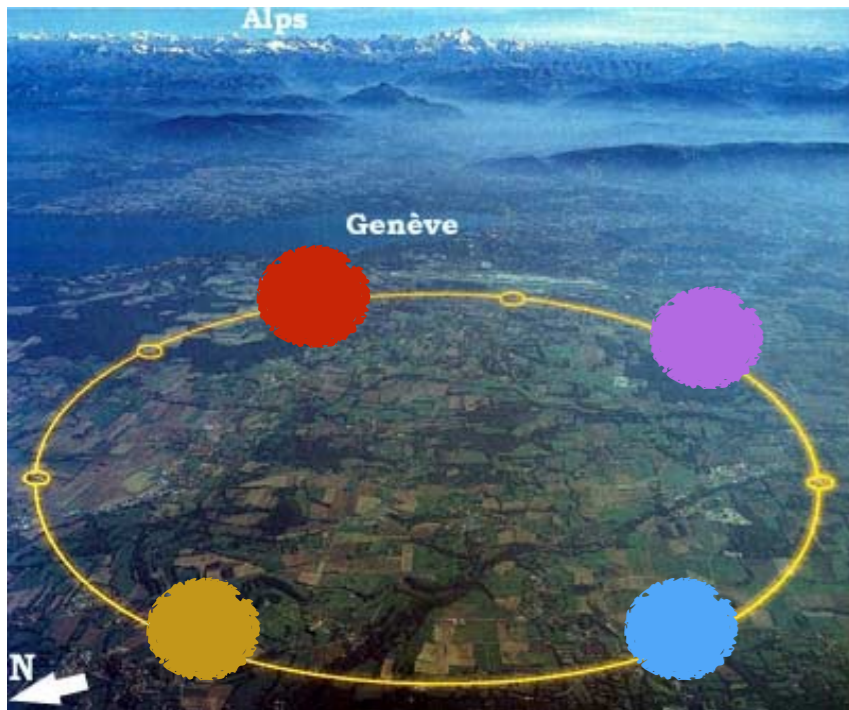
$$E = mc^2$$



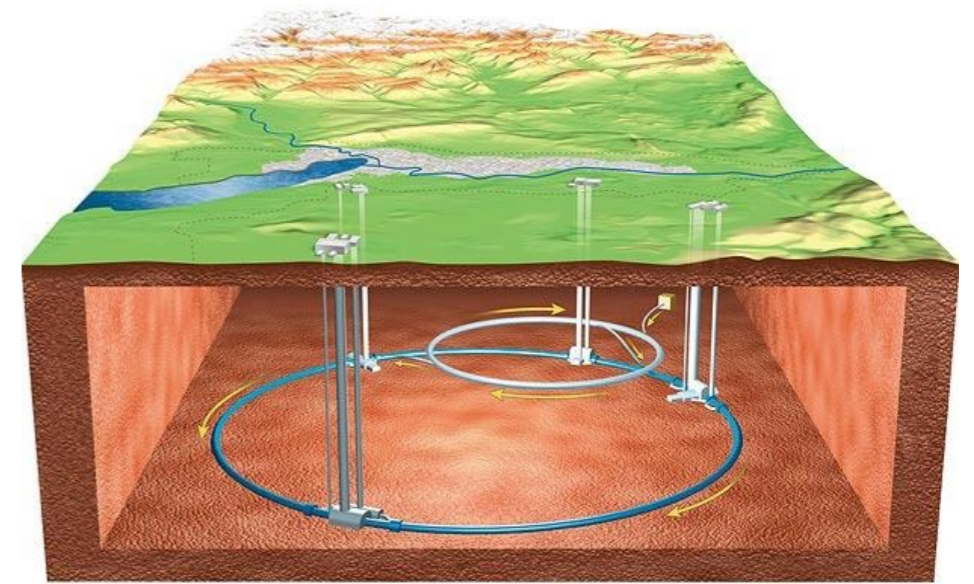
L'ACCELERATORE PIÙ POTENTE DELLA TERRA

L'ACCELERATORE DOV'È?

visto dall'alto...



I protoni si scontrano in corrispondenza dei **4 grandi esperimenti**



100.000 milioni di protoni
“impacchettati” in 64 μm
(64 milionesimi di metro,
pari allo spessore di un
capello umano!)

I pacchetti di protoni **si incrociano ogni 25 ns**
(1 miliardesimo di secondo)
...ci troviamo con
600 milioni di collisioni al secondo!

**come far scontrare l'intera popolazione degli USA
concentrata dentro un capello ogni secondo!**

L'ACCELERATORE PIÙ POTENTE DELLA TERRA

I TITANI SOTTERRANEI

Esperimento CMS



Compact Muon Solenoid

Alto **22 metri**, largo **15 metri**

Pesa **14 mila tonnellate**

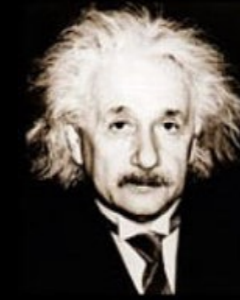
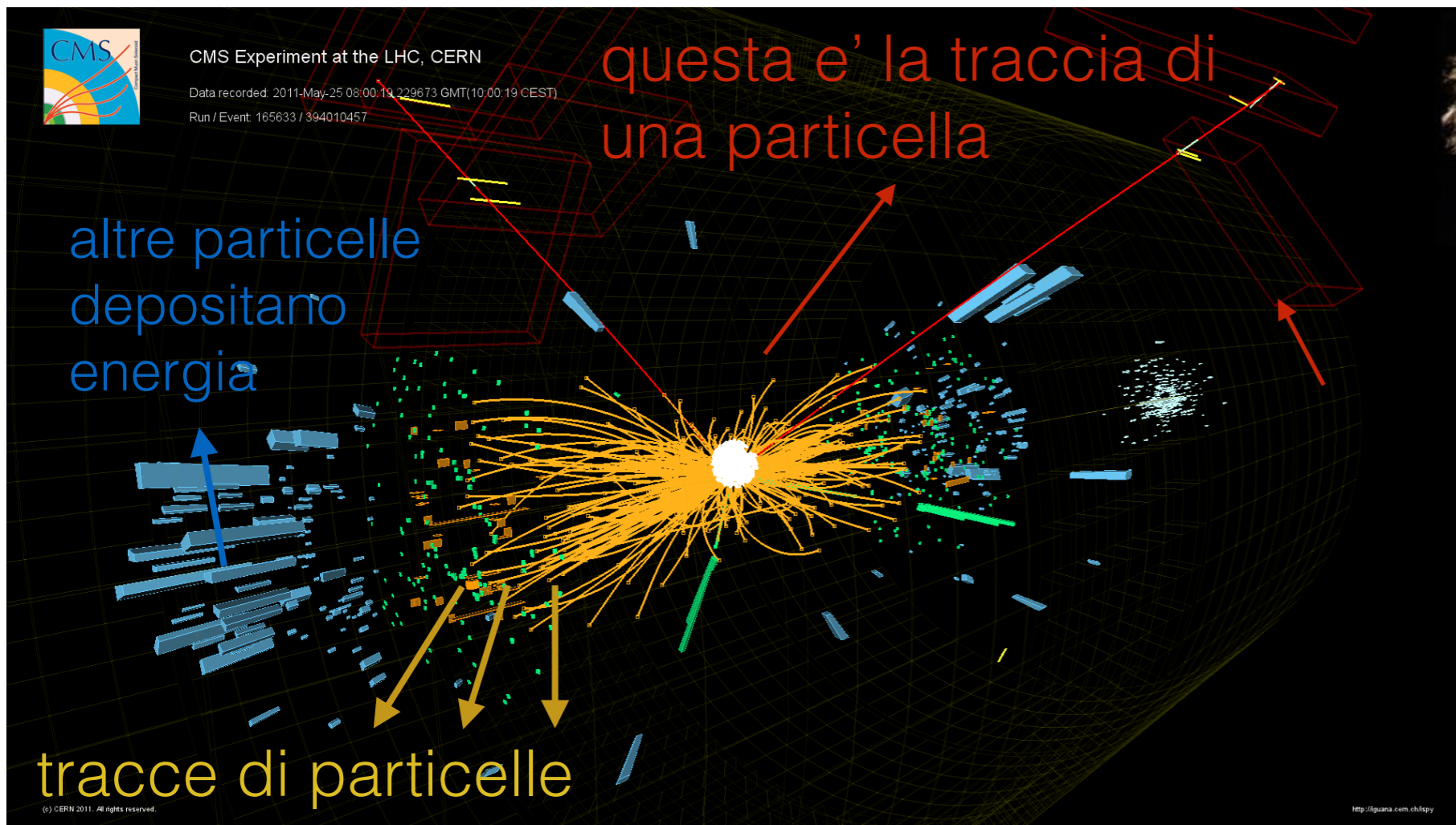
3800 persone coinvolte



Enormi “macchine fotografiche” catturano il risultato delle collisioni di LHC, e misurano le migliaia di particelle prodotte nella collisione

L'ACCELERATORE PIÙ POTENTE DELLA TERRA

GLI ESPERIMENTI



GOD DOESN'T PLAY DICE.

- ALBERT EINSTEIN

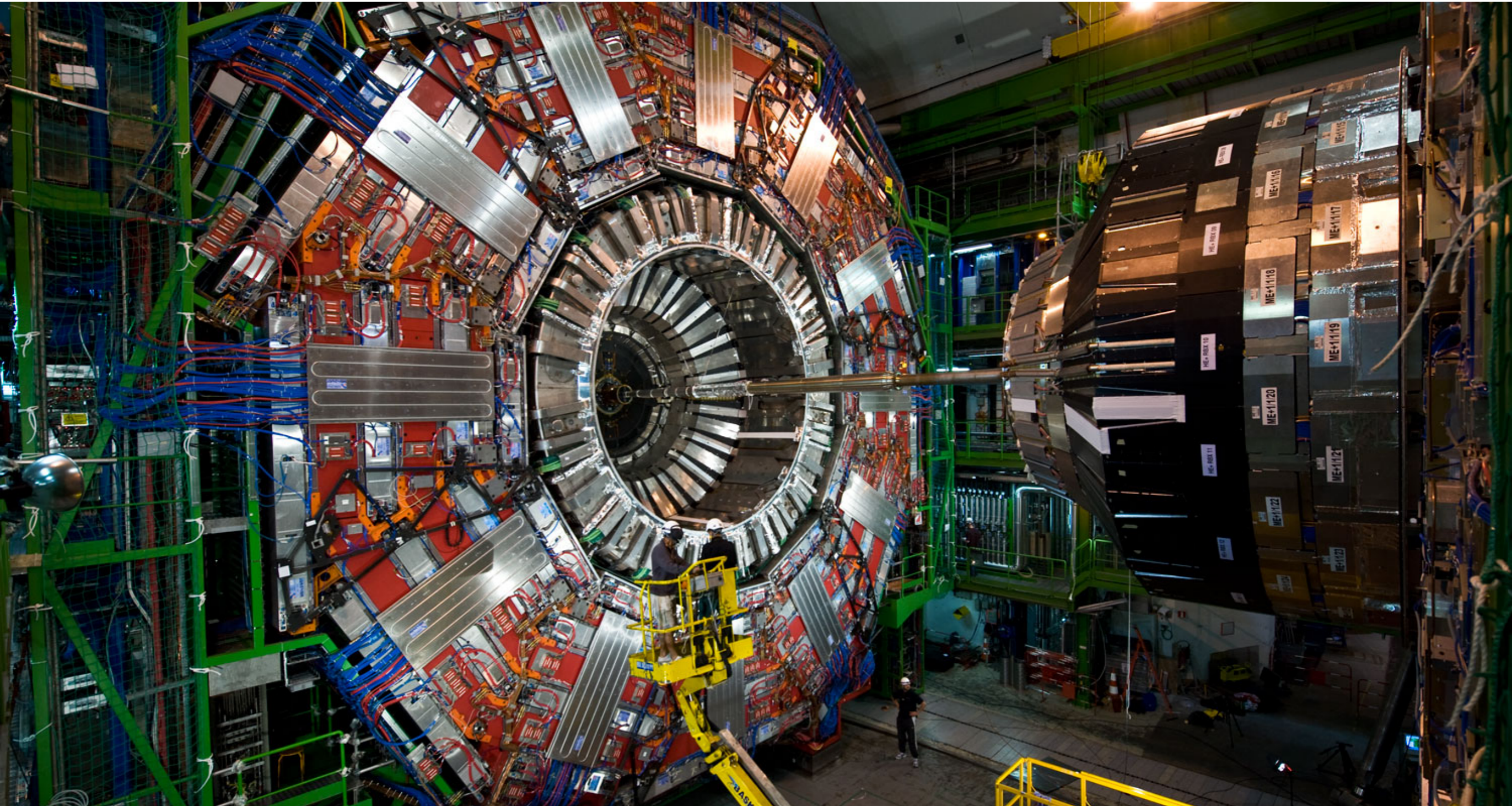
È proprio come giocare a dadi invece! l'esito delle collisioni è casuale, e fenomeni rari (nuove particelle?) sono *statisticamente* rari!

Centinaia di migliaia di “fotografie” vengono scattate ogni secondo... non sappiamo mai cosa ci farà vedere la Natura: siamo alla ricerca di fenomeni nuovi mai visti (quindi **molto improbabili!!**)

è un pò come giocare compulsivamente al gratta e vinci...

“Non è impossibile, solo estremamente improbabile”
— La Guida Galattica per Autostoppisti

COMPACT MUON SOLENOID



COMPACT MUON SOLENOID

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS
Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 1\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID
Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

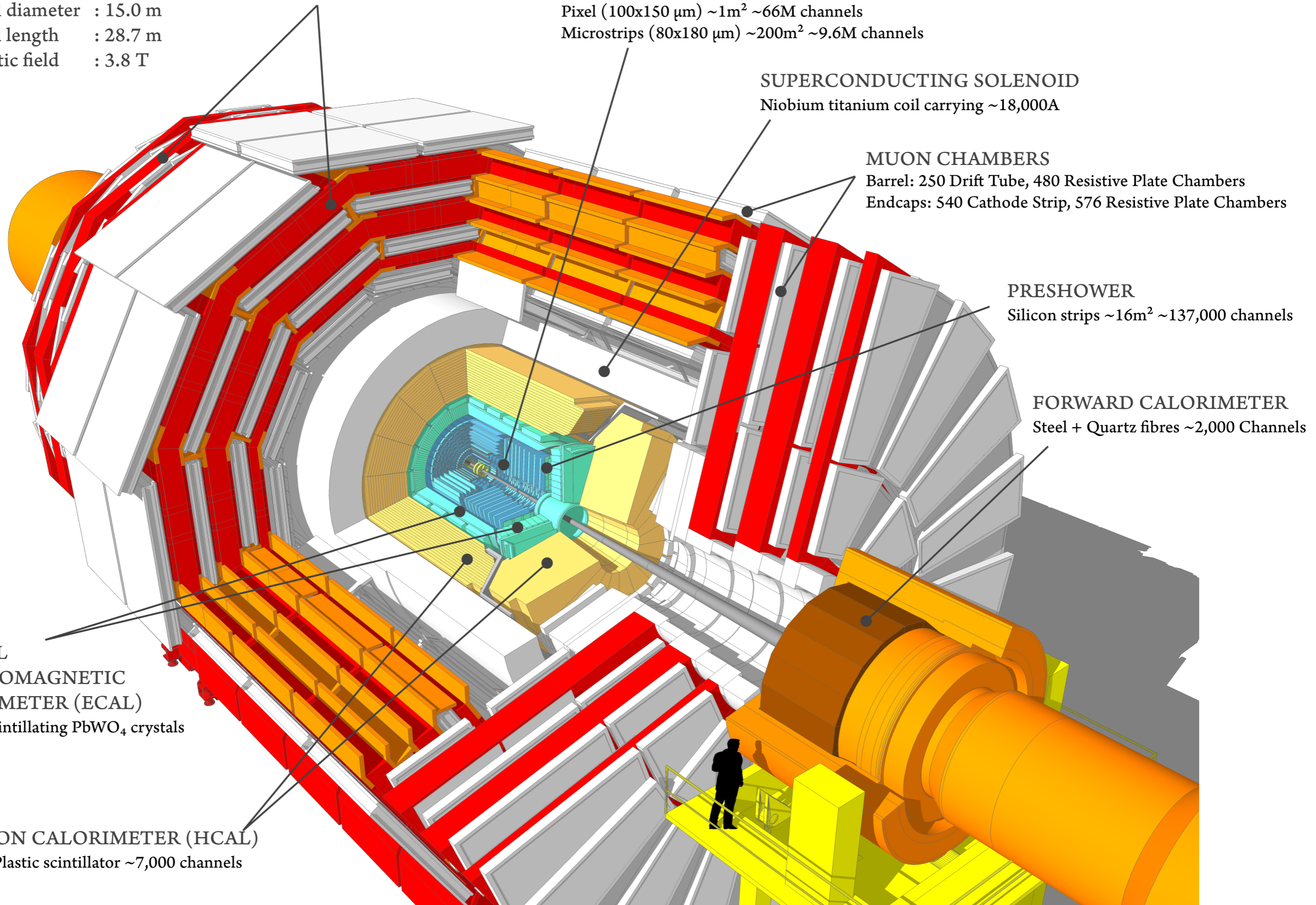
MUON CHAMBERS
Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 540 Cathode Strip, 576 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER
Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

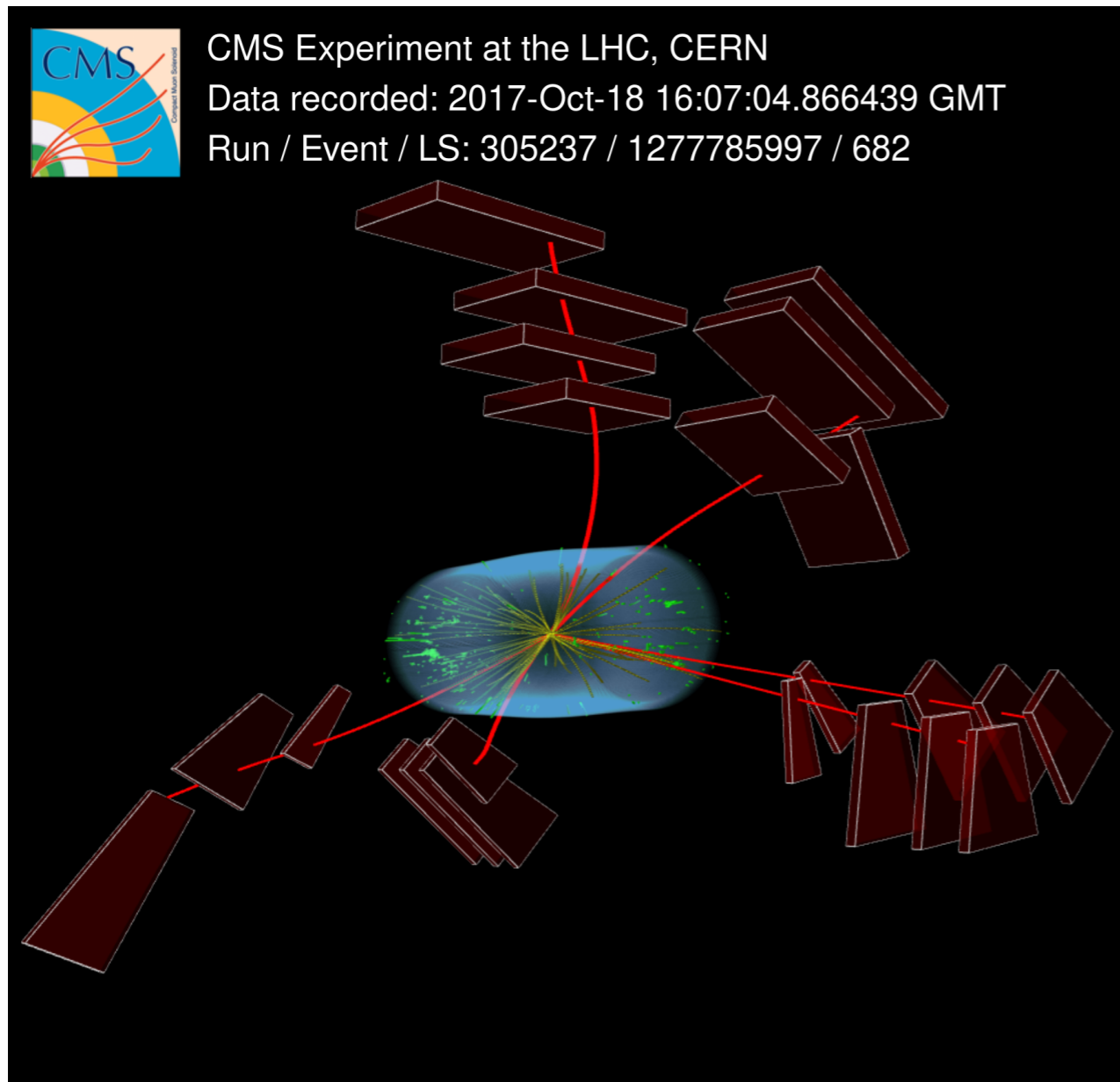
FORWARD CALORIMETER
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL
ELECTROMAGNETIC
CALORIMETER (ECAL)
 $\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



COMPACT MUON SOLENOID



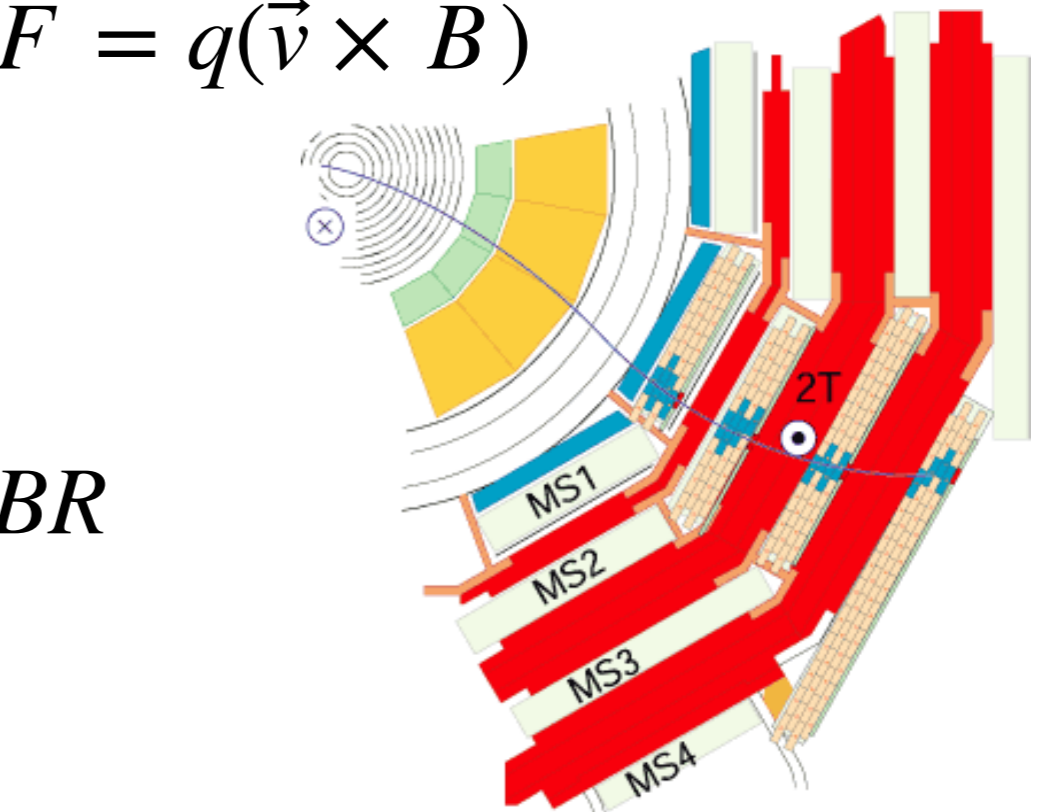
La chiave di CMS è il suo
campo magnetico solenoidale
 $B=4T$

*100000 volte piu' forte del campo
magnetico terrestre*

perché?

le particelle hanno carica
elettrica e curvano sotto l'effetto
della **forza di Lorentz**

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



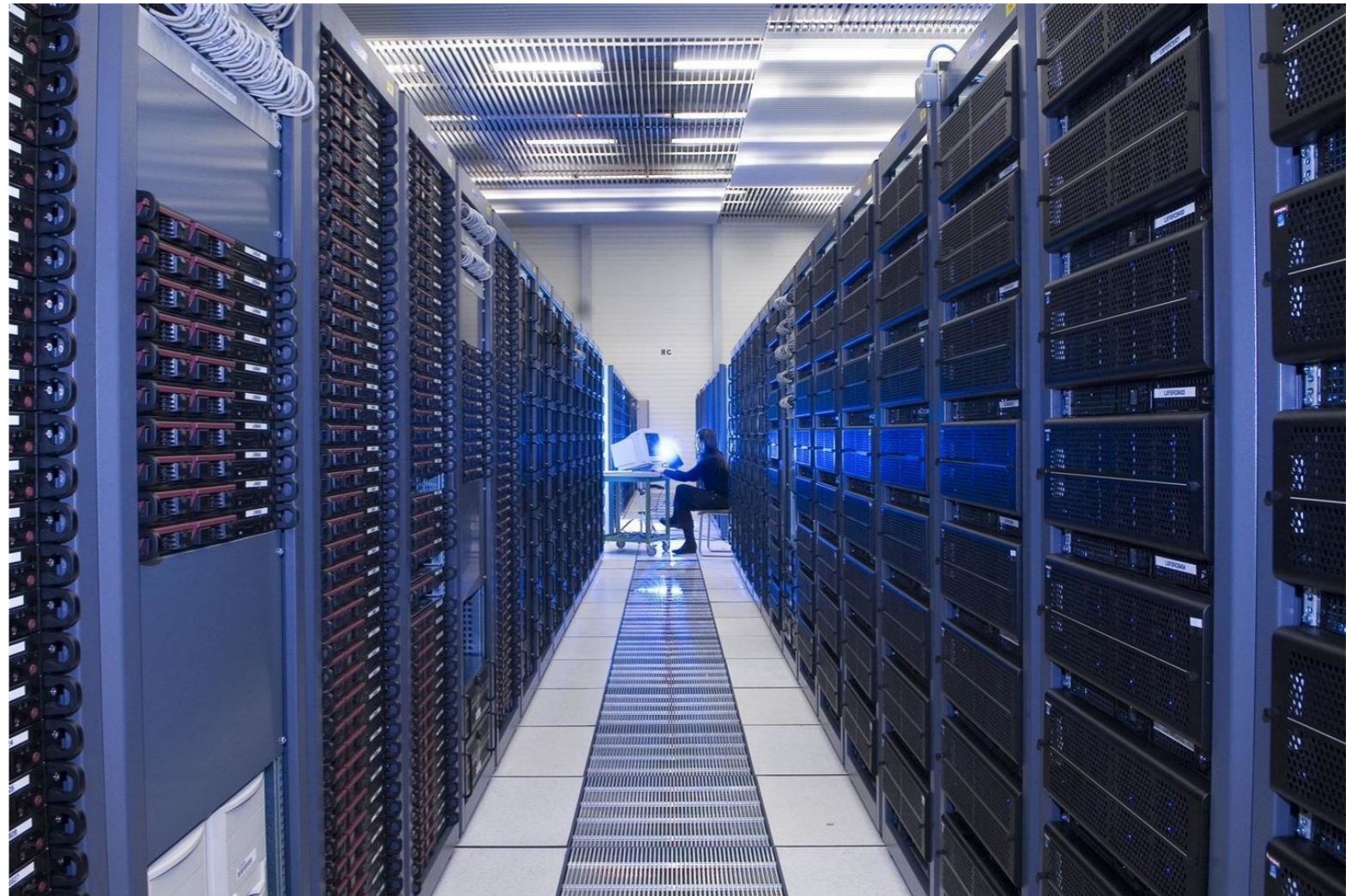
conoscendo B e osservando la
curvatura possiamo ricavare la
velocità (impulso) delle particelle
e **distinguerle!**

$$p \propto BR$$

VERY VERY BIG DATA

fino a 1 miliardo di collisioni arrivano nei nostri esperimenti

abbiamo ideato sofisticatissimi sistemi hardware e software per filtrare solo la parte più interessante di tutte queste collisioni, eventi, chiamato *trigger*

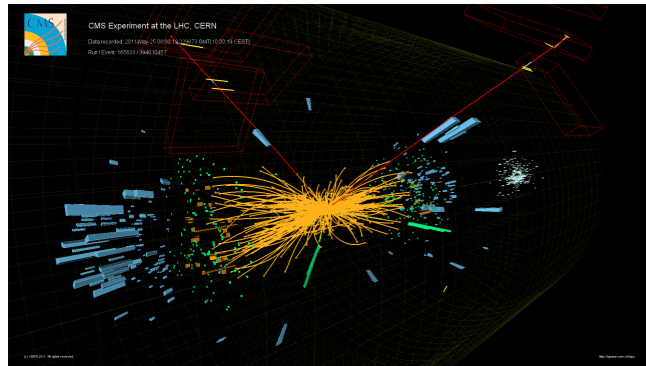


nonostante questo, nei data centre del CERN arriva in media **1 Petabyte di dati al giorno** (e arriveranno sempre di più)

nel Run 2 di LHC, appena concluso, abbiamo avuto 600 Pb di dati, pari a 20 mila anni di video full HD registrati 24 ore su 24

come fare l'analisi di fisica su enormi moli di dati? —>

UN COMPUTER GRANDE QUANTO LA TERRA COSA CI FACCIAMO CON TUTTI QUESTI DATI DI COLLISIONI?

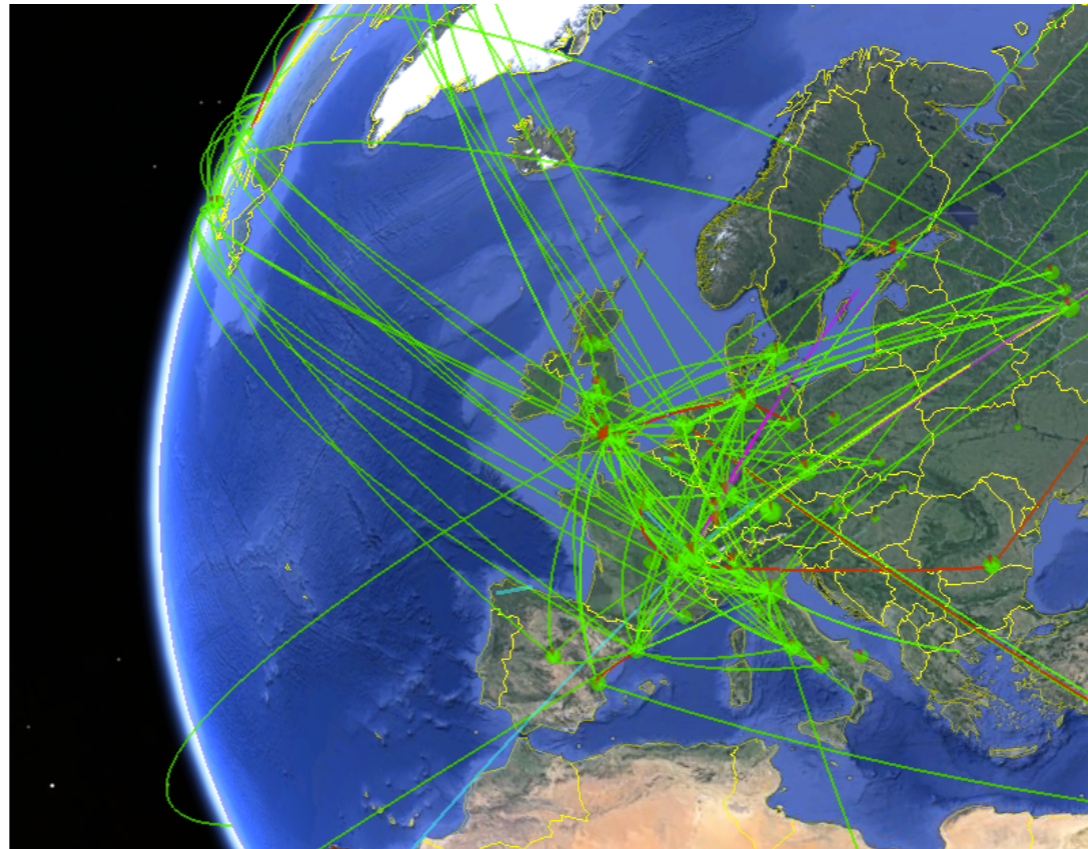


DATI

One year's data from LHC would fill a stack of CDs 20km high

Concorde (15 Km)

Mt. Blanc (4.8 Km)



PROCESSATI



ANALIZZATI



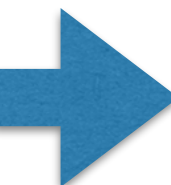
(tipico dottorando che lavora di notte)

LA GRID

Grid è una rete planetaria che utilizza contemporaneamente la potenza di calcolo e la memoria di decine di migliaia di differenti computer sparsi nel mondo



**A VOLTE
L'ANALISI
RICHIEDE ANNI...**

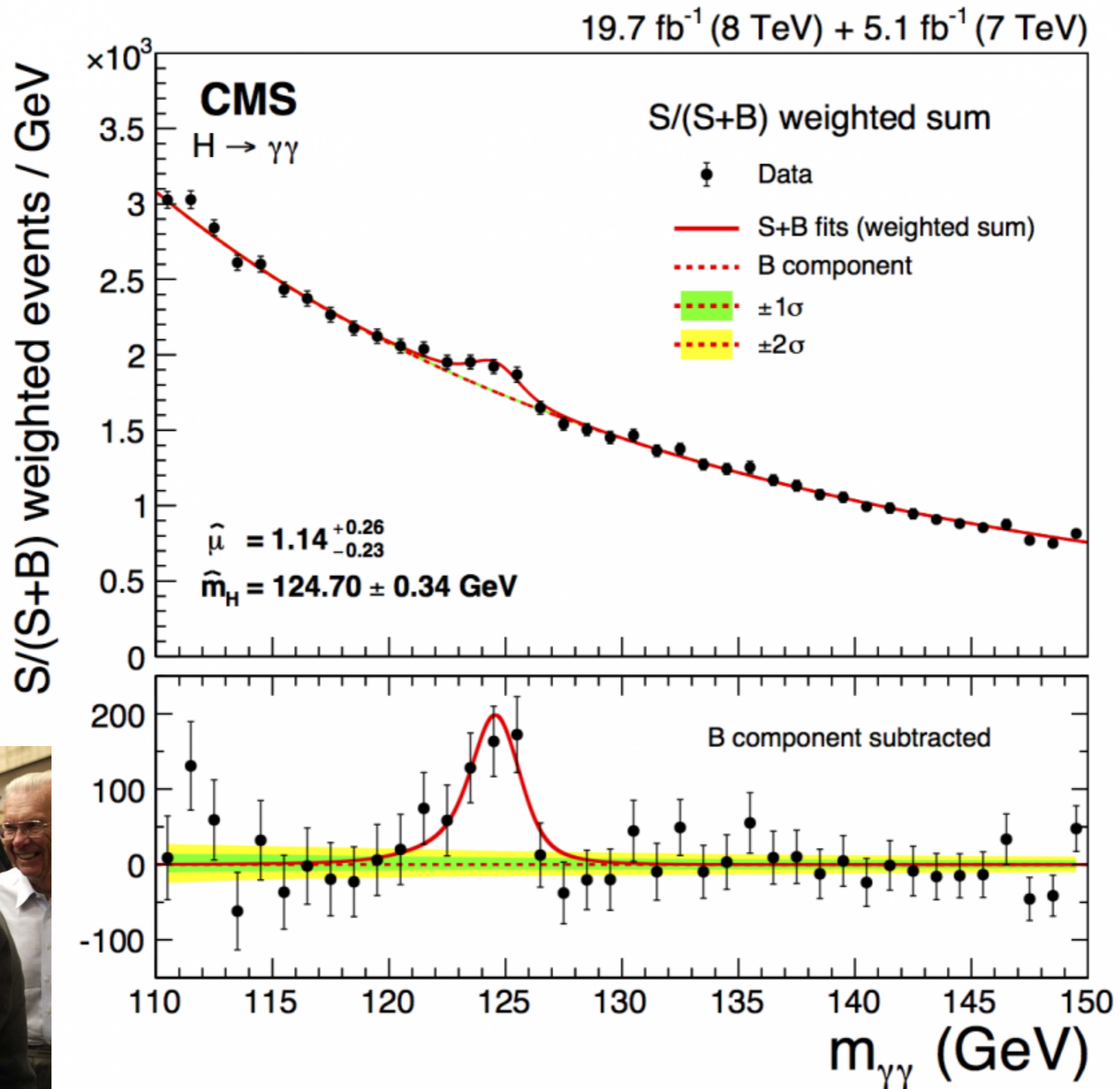




... IL RISULTATO FINALE:



nella prossima lezione imparerete a capire questo grafico, e poi ne farete uno voi con i dati di LHC!



2012

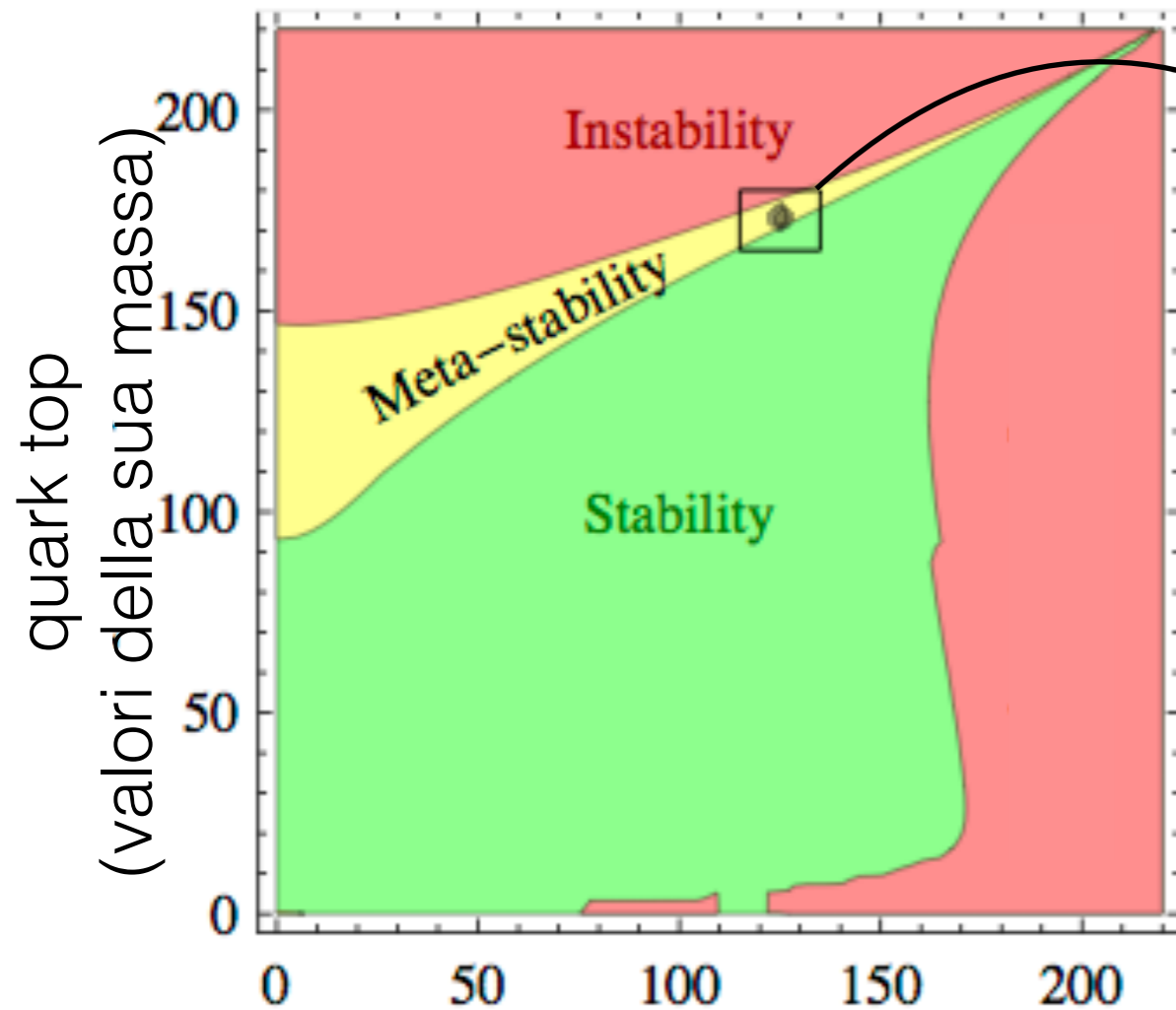


SCOPERTA DEL BOSONE DI HIGGS AL CERN



FINE ?

IL DESTINO DELL'UNIVERSO E IL BOSONE DI HIGGS



quark top
(valori della sua massa)

bosone di Higgs
(valori della sua massa)

questo punto siamo noi



una "fiammata quantistica" potrebbe modificare la massa dell'Higgs spostare questo punto...



where do we go now?

BLACKOUT COSMICO

LA MATERIA OSCURA

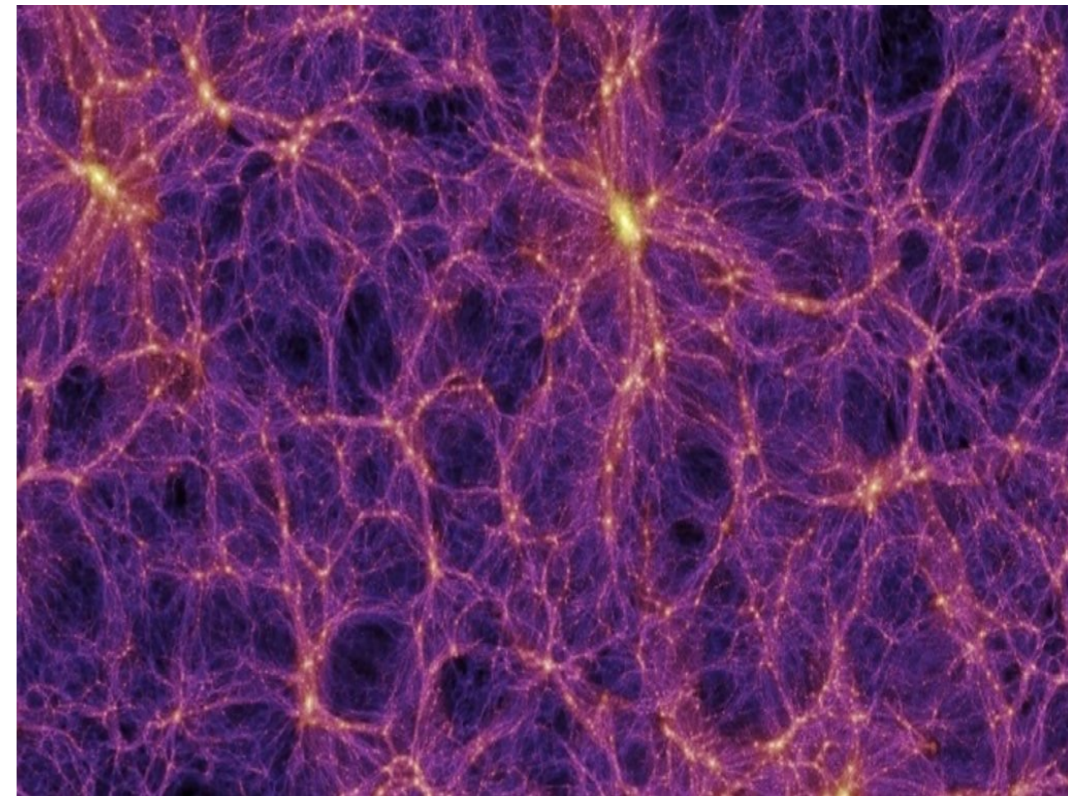
The Universe
is Made of...

74% DARK
ENERGY

4% NORMAL
MATTER

21% DARK
MATTER

ENERGY.GOV



Il nostro universo è dominato (90%!) da un tipo di materia di cui non **sappiamo niente**, invisibile e che non abbiamo mai “scoperto” direttamente!



Tanti modelli per spiegare la natura della materia oscura, e tanti esperimenti nel mondo dedicati, ma al momento siamo persi nel buio!

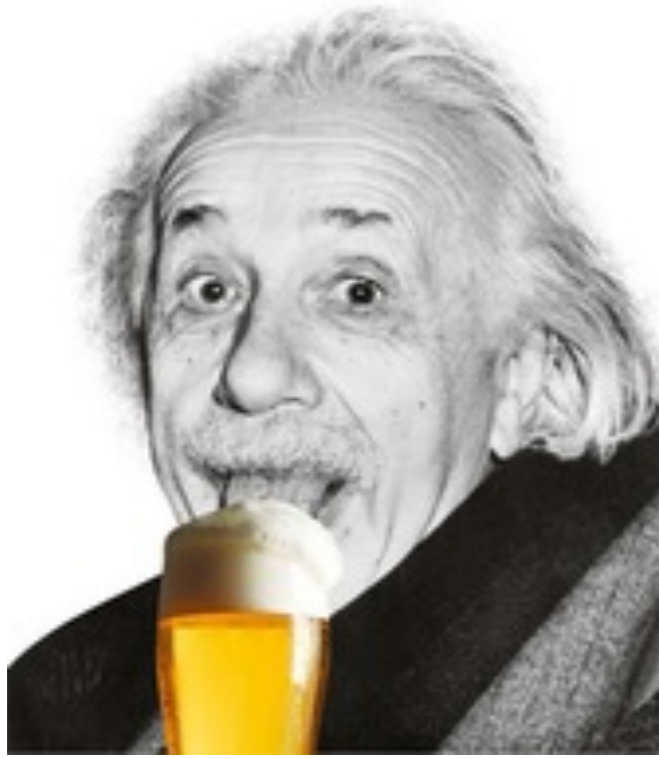
IL MONDO PERDUTO

L'ASIMMETRIA MATERIA/ANTIMATERIA



Dopo il Big Bang la materia e l'antimateria convivevano felicemente in un mondo di serena uguaglianza e rispetto... a un certo punto l'antimateria si è "estinta" lasciandoci in un mondo fatto prevalentemente di materia!

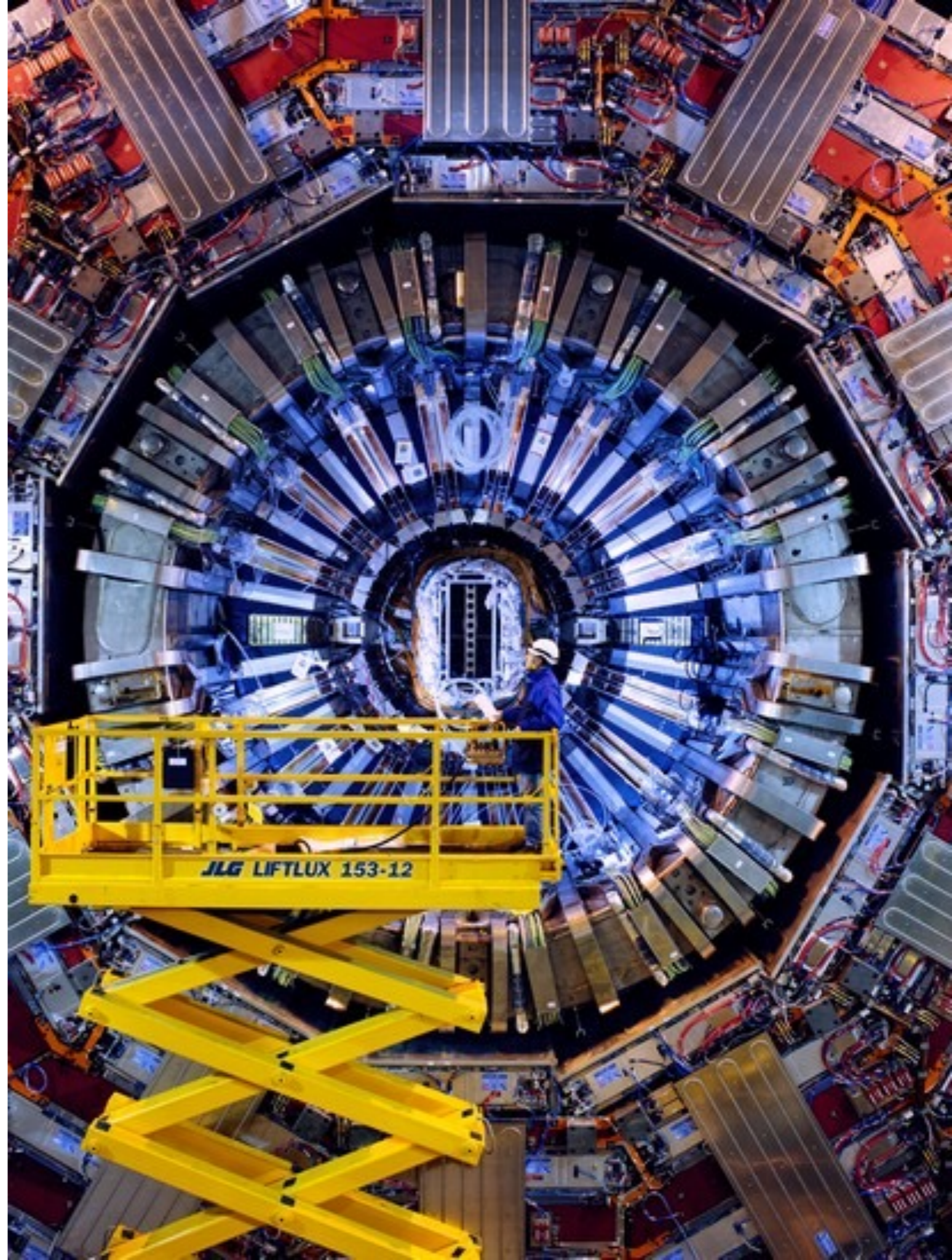
THE END



per domande, curiosità,
informazioni o se volete
queste slides...

vieri.candelize@gmail.com

<https://wwwusers.ts.infn.it/~candelis/Vieri/>



THE END

BACKUP

DOMANDA #1

SBRONZE STELLARI

Ci sono più atomi in una pinta
o stelle nella nostra Galassia?



RISPOSTA #1

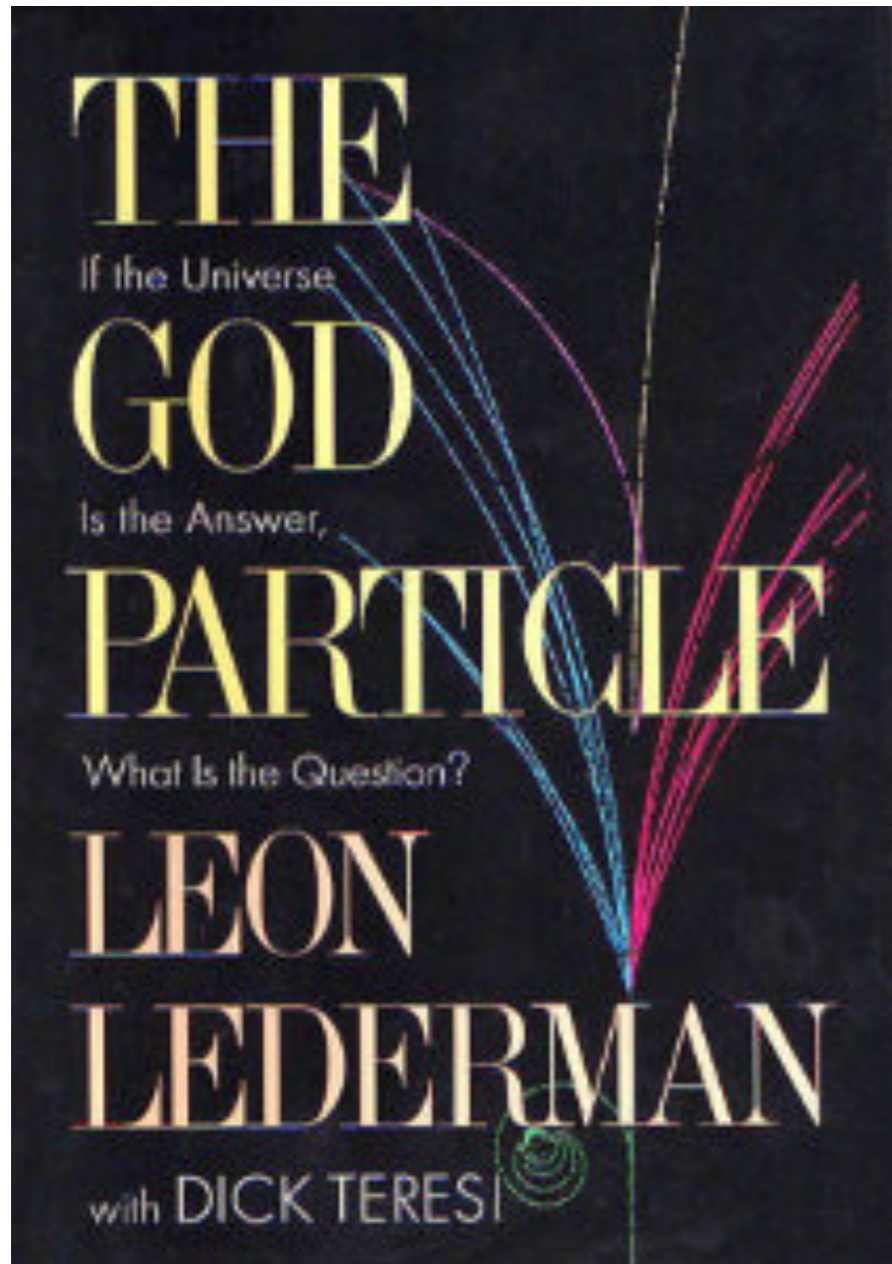
400 miliardi di stelle nella nostra Galassia, la Via Lattea...



... 65 milioni di miliardi di miliardi di atomi in una pinta:
infinitamente meno!

IL BOSONE DI HIGGS E DIO

La “Particella di Dio”? No!!



Nel 1993 il premio Nobel Leon Lederman pubblica il libro divulgativo “La particella di Dio”. Tuttavia...

L'editore non ci ha permesso di chiamarla "particella maledetta" (goddamn particle), anche se questo potrebbe essere un titolo più appropriato, data la sua natura perfida e i costi che sta causando

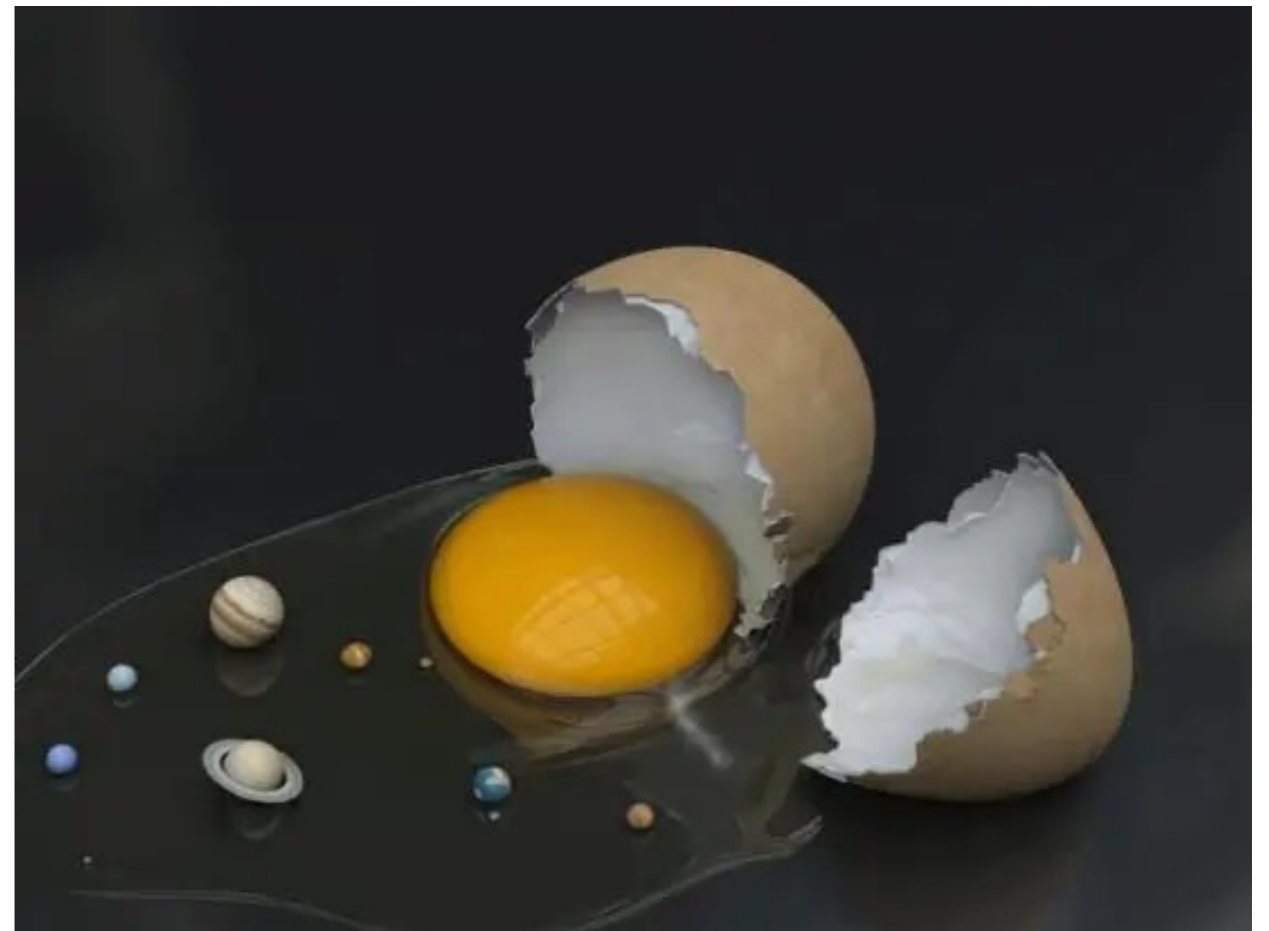
In italia Mondadori traduce ulteriormente male il titolo, trasformando “La particella-Dio” in “La particella *di* Dio”

DOMANDA #2

È NATO PRIMA L'UOVO (UNIVERSO) O LA GALLINA (DI HIGGS)

Se tutto esiste grazie
al bosone di Higgs...

lui quando è nato?



https://it.wikipedia.org/wiki/Uovo_cosmico

RISPOSTA #2

nei primissimi istanti dell'Universo tutto era troppo caldo perché il bosone di Higgs esistere.

Dopo un decimo di miliardesimo di secondo l'Universo si è raffreddato ed è comparso il bosone di Higgs, con il suo campo diffuso ovunque, e ha cambiato la simmetria del mondo. Sono nate le particelle con la loro massa!



https://it.wikipedia.org/wiki/Uovo_cosmico

DOMANDA #3

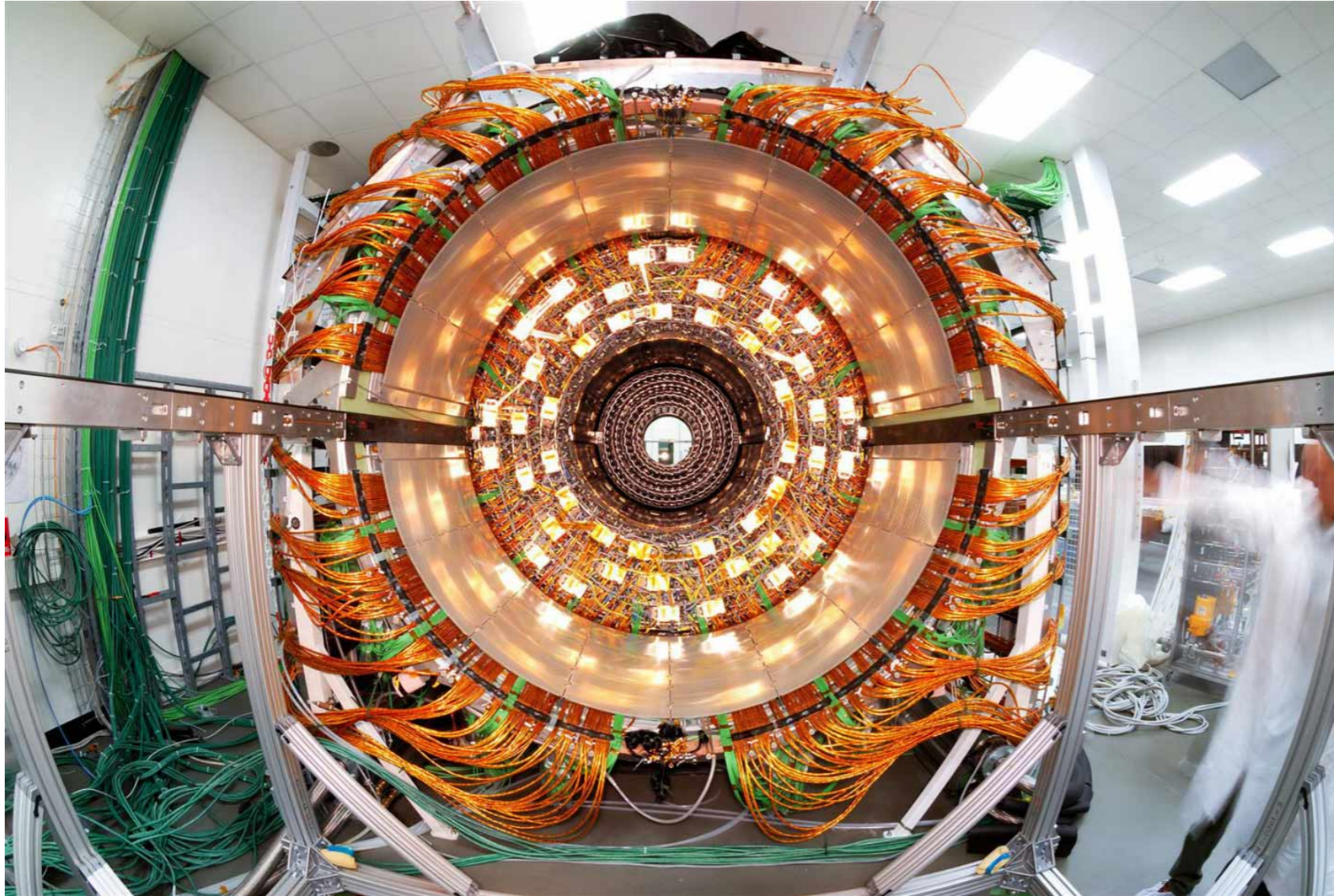
LE DIMENSIONI CONTANO (MA LA RISOLUZIONE DI PIÙ)

Ha più risoluzione CMS

o l'iPhone13?

DOMANDA #3

LE DIMENSIONI CONTANO (MA LA RISOLUZIONE DI PIÙ)

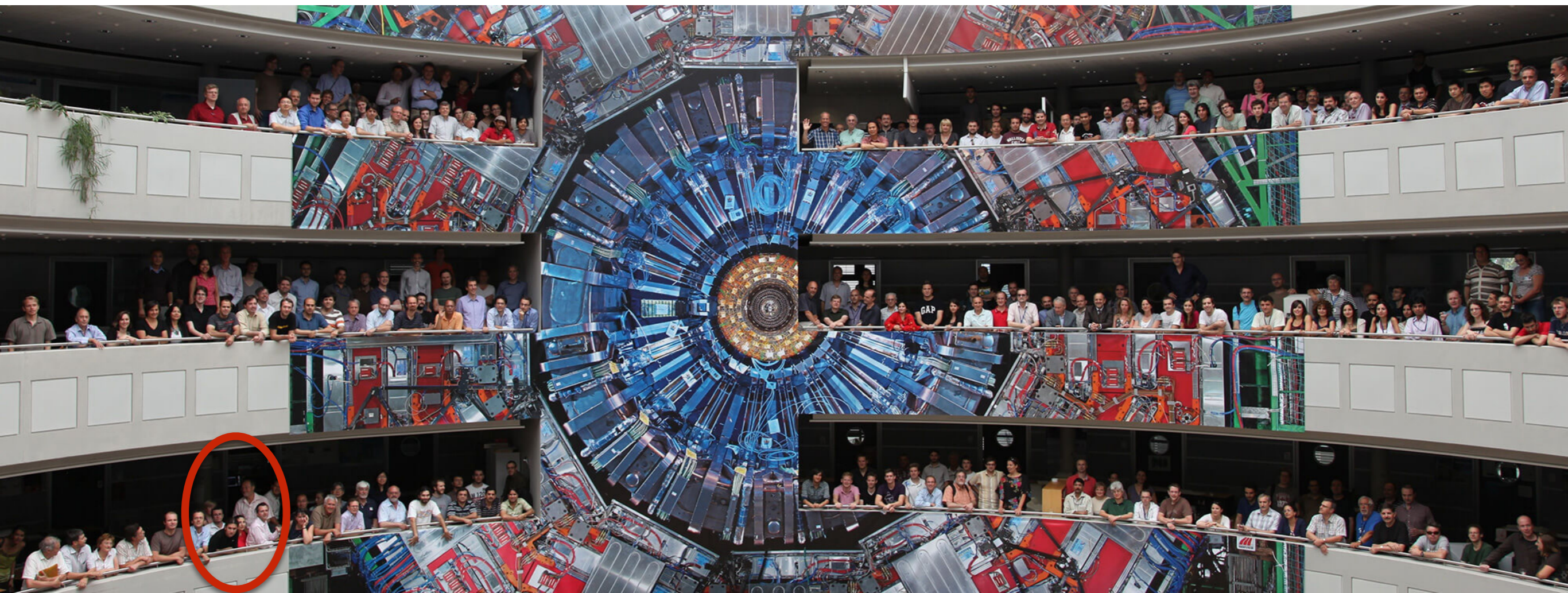


... l'iPhone13 ha 48 Megapixel... quasi!



CMS ha 60 milioni di pixel di silicio,
quindi 60 Megapixel

E QUINDI COSA FACCIAMO A TRIESTE?



Misura delle caratteristiche delle particelle elementari con gli esperimenti CMS e ATLAS usando i dati delle collisioni tra protoni dell'acceleratore LHC al CERN

Ricerca di nuove particelle, nuovi fenomeni, studio e test di nuovi rivelatori

cosa si impara praticamente?

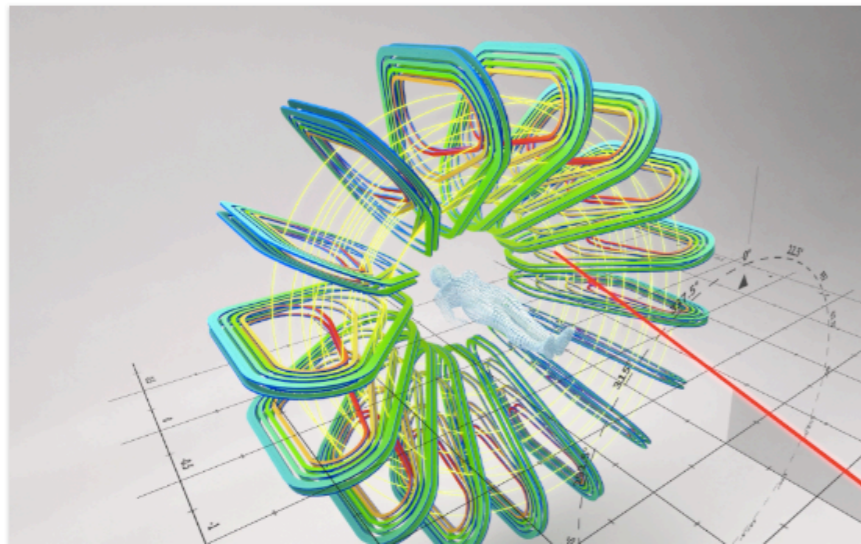
Analisi statistica dei dati avanzata, programmazione in C++ e python, hardware, modelli, teorie, test d'ipotesi, nuove tecnologie, machine learning, computing...

NON SOLO UNIVERSO E PARTICELLE

Using CERN magnet technology in innovative cancer treatment

A new “gantry” design using CERN magnet technology has the potential to revolutionise hadron therapy

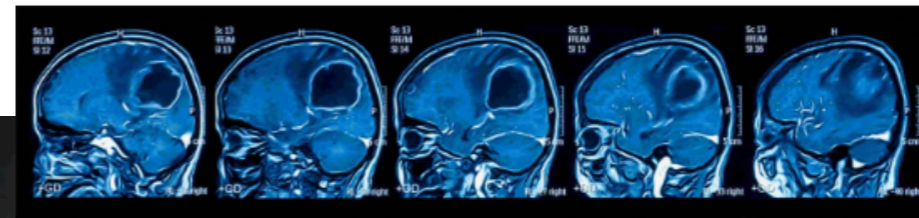
27 NOVEMBER, 2018 | By Linn Tvede & Giovanni Porcellana



How the LHC could help us peek inside the human brain

Superconducting technology developed for the HL-LHC and FCC could improve our understanding of the human brain

29 NOVEMBER, 2016 | By Anaïs Rassat



How does CERN help other areas of society?

CERN technologies and expertise are applied to a wide range of fields:

- Contributing to a better planet, with novel and more efficient technologies
- Industry 4.0, increasing automation and efficiency
- Cultural heritage through art restoration
- Developing technologies expected to have significant impact in the future



**ED ORA LO SPAZIO DEDICATO AD UNA FIGURA IMPORTANTE
DELLA NOSTRA SOCIETÀ**



L'ODIOSO COMPIOTTISTA
E LE SUE SCOMODE DOMANDE

DOMANDA #4: TUTTA QUESTA TECNOLOGIA... QUANTO MI COSTA??

Quanti soldi pubblici spende
ogni cittadino italiano
per gli esperimenti del CERN?

ESATTO 



RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri

totale = 6 miliardi



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

costo di LHC = costo di **3 bombardieri B-2**

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

costo di LHC = costo di 3 bombardieri B-2

costo di LHC = costo di 1 anno di serie A

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

costo di LHC = costo di **3 bombardieri B-2**

costo di LHC = costo di **1 anno di serie A**

costo di LHC = 1 miliardo meno di **un anno di auto blu**

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

costo di LHC = costo di **3 bombardieri B-2**

costo di LHC = costo di **1 anno di serie A**

costo di LHC = 1 miliardo meno di **un anno di auto blu**

costo F-35 in Italia: 18,3 miliardi di dollari (pari a **6 LHC**)

RICERCA FONDAMENTALE E COSTI

SI MA TUTTA QUESTA FANTASCIENZA INUTILE QUANTO CI COSTA??

LHC da solo: 3 miliardi di franchi svizzeri (1CHF~1EUR)

totale = 6 miliardi

costo totale dei 4 esperimenti: 3 miliardi di franchi svizzeri



chi paga tutto questo?

ogni stato membro paga una quota
proporzionale al suo PIL

L'Italia paga l'11%

(ovvero ~700 milioni di Euro, 70 per anno)

quanto e' costato al cittadino indignato?

= 700 milioni in 10 anni di costruzione / 60 milioni di italiani ~1 euro **all'anno**

costo di LHC = costo di **3 bombardieri B-2**

costo di LHC = costo di **1 anno di serie A**

costo di LHC = 1 miliardo meno di **un anno di auto blu**

costo F-35 in Italia: 18,3 miliardi di dollari (pari a **6 LHC**)

costo ponte sullo stretto di Messina: 18 miliardi (pari a **6 LHC**)

Physics is not
religion. If it were
we'd have a much
easier time raising
money. Leon
Lederman

#SuyQuotable

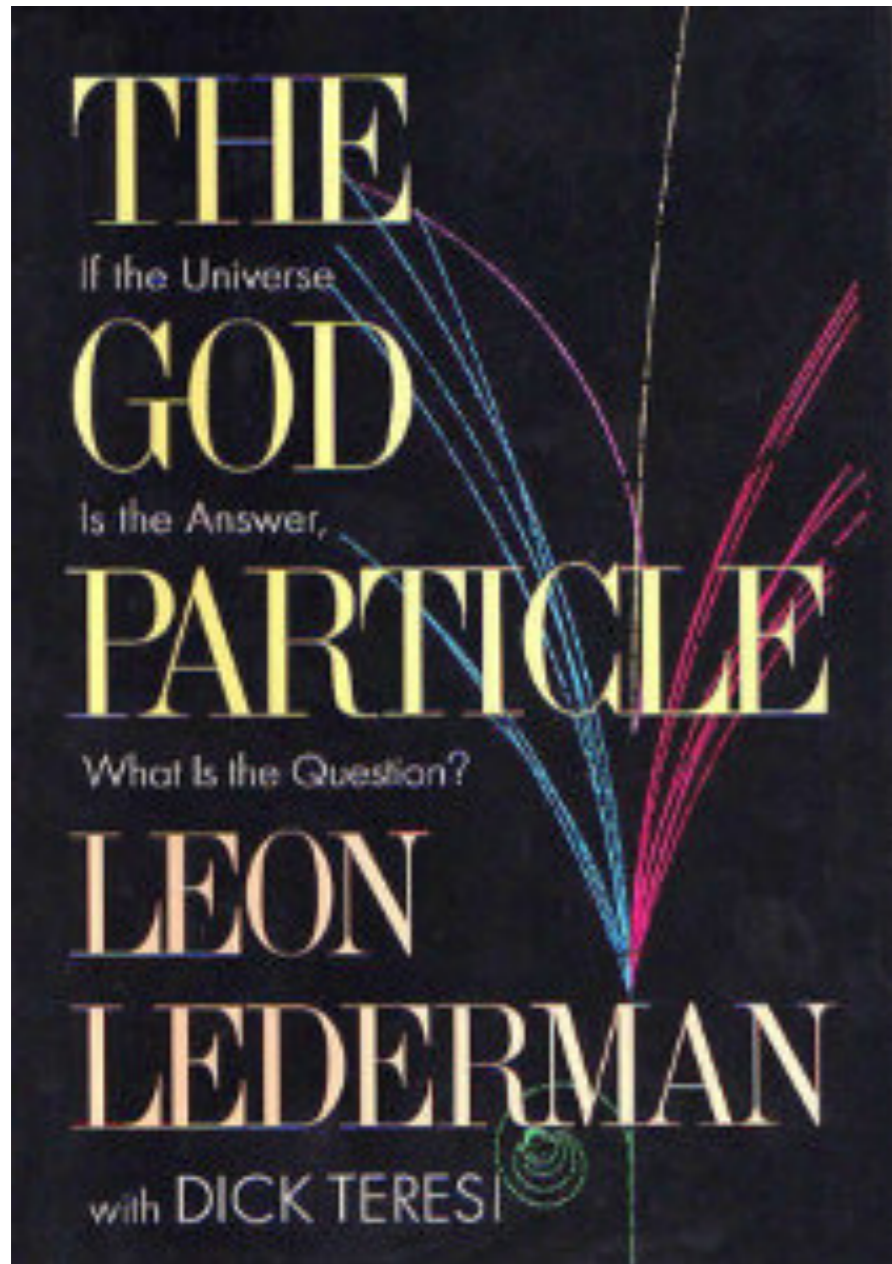
RICERCA FONDAMENTALE E PRIORITÀ SOCIALI

OK MA NON SAREBBE MEGLIO SPENDERE SOLDI PER PROBLEMI “VERI” COME CURARE LE MALATTIE, TROVARE FONTI PULITE DI ENERGIA, INVENTARE UN CELLULARE CHE PRENDE LINEA ANCHE A SAN GIUSTO



IL BOSONE DI HIGGS E DIO

La “Particella di Dio”? No!!



Nel 1993 il premio Nobel Leon Lederman pubblica il libro divulgativo “La particella di Dio”. Tuttavia...

*L'editore non ci ha permesso di chiamarla "particella maledetta" (**goddamn particle**), anche se questo potrebbe essere un titolo più appropriato, data la sua natura perfida e i costi che sta causando*

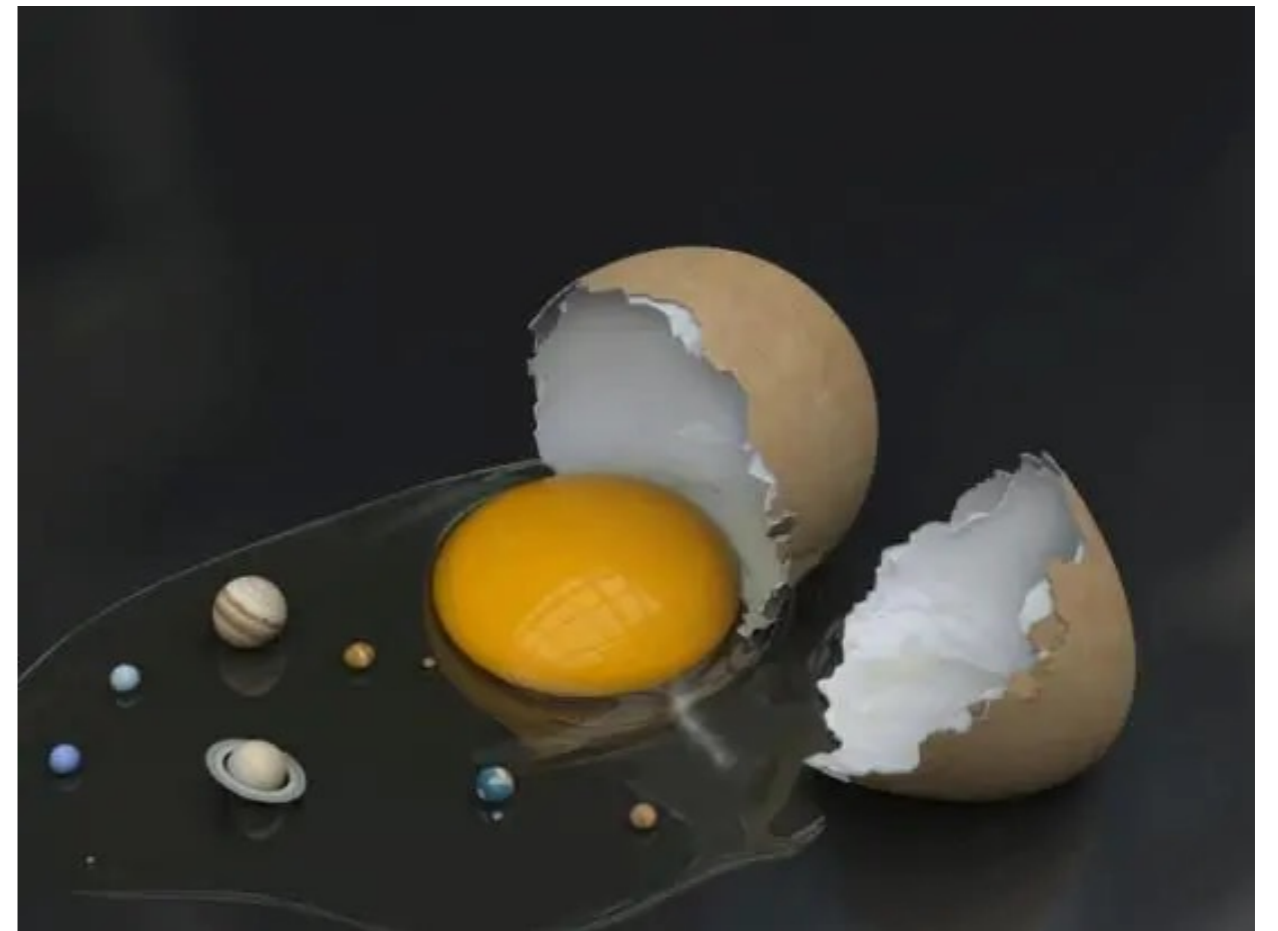
In italia Mondadori traduce ulteriormente male il titolo, trasformando “La particella-Dio” in “La particella *di* Dio”

DOMANDA #2

È NATO PRIMA L'UOVO (UNIVERSO) O LA GALLINA (DI HIGGS)

Se tutto esiste grazie
al bosone di Higgs...

lui quando è nato?



https://it.wikipedia.org/wiki/Uovo_cosmico

RISPOSTA #2

nei primissimi istanti dell'Universo tutto era troppo caldo perché il bosone di Higgs esistere.

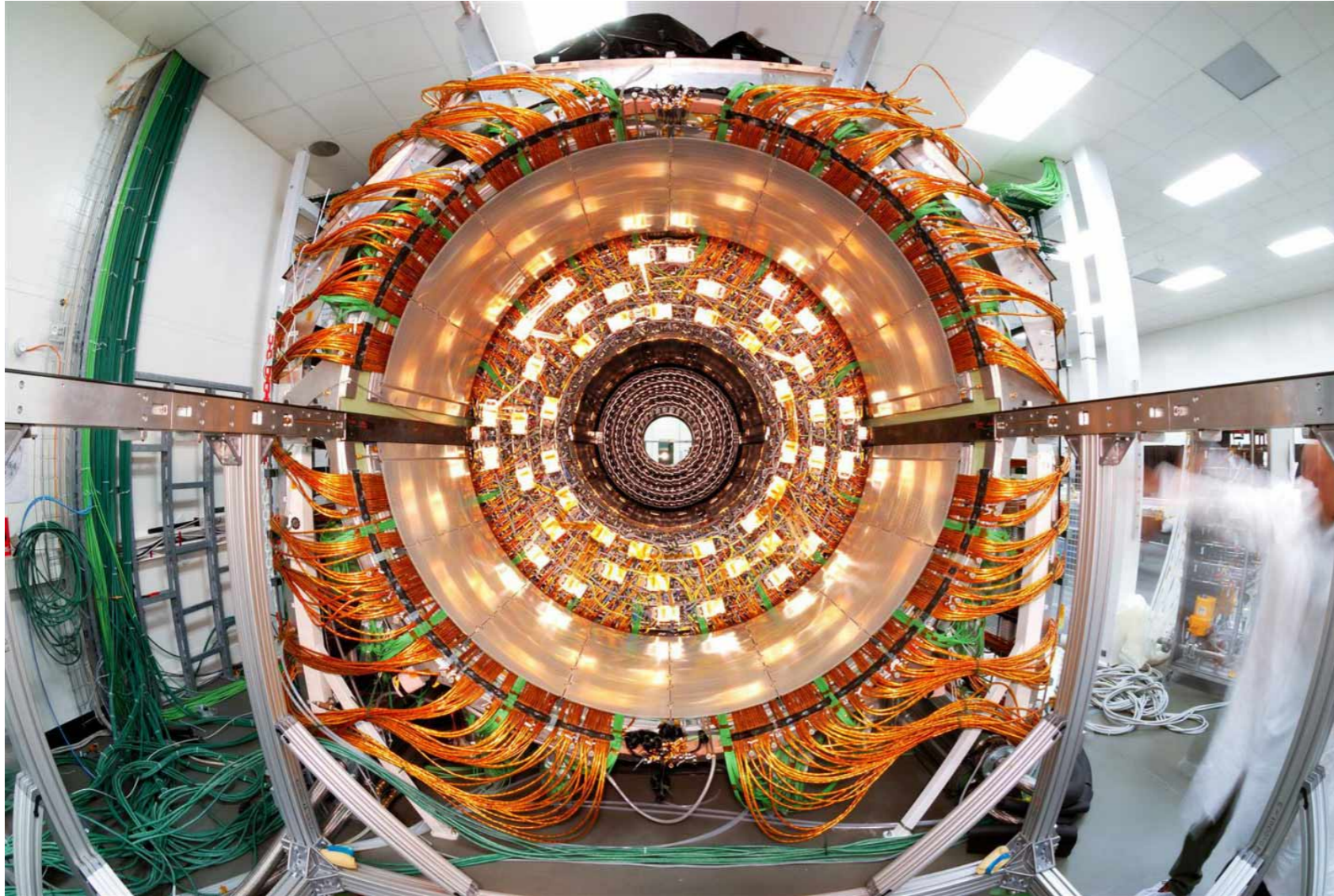
Dopo un decimo di miliardesimo di secondo l'Universo si è raffreddato ed è comparso il bosone di Higgs, con il suo campo diffuso ovunque, e ha cambiato la simmetria del mondo. Sono nate le particelle con la loro massa!



https://it.wikipedia.org/wiki/Uovo_cosmico

DOMANDA #3

LE DIMENSIONI CONTANO (MA LA RISOLUZIONE DI PIÙ)



... l'iPhone13 ha 48 Megapixel... quasi!



CMS ha 60 milioni di pixel di silicio,
quindi 60 Megapixel

LA GRAVITÀ (DELLA SITUAZIONE)

la gravità non si riesce ad inserire nel modello standard!

GRAVITONI?

**DIMENSIONI
AGGIUNTIVE?**



QUANTUM GRAVITY?

**GRAVITÀ
MODIFICATA?**

manca una teoria che descriva la gravità a livello microscopico

ATLAS

