Il Modello Standard e gli esperimenti a scopo generale: ATLAS e CMS

Ksenia de Leo

Trieste, 10 febbraio 2025

CMS Compact Muon Solenoid

CERN

ICSC Centro Nazionale di Ricerca in HPC, Big Data and Quantum Computing

INFN

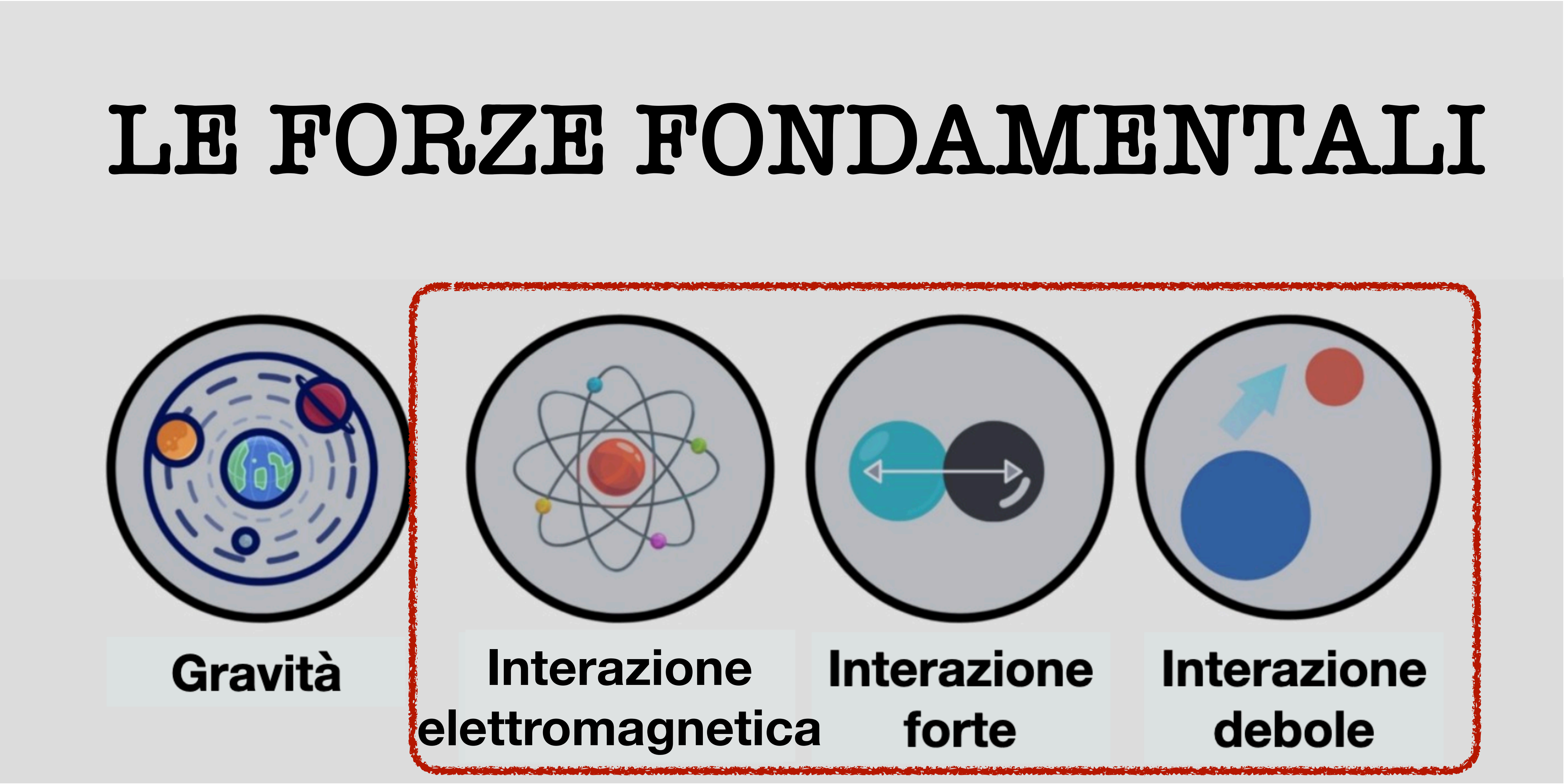
UNIVERSITAS STUDIORUM TERGESTINA MCMXXIV

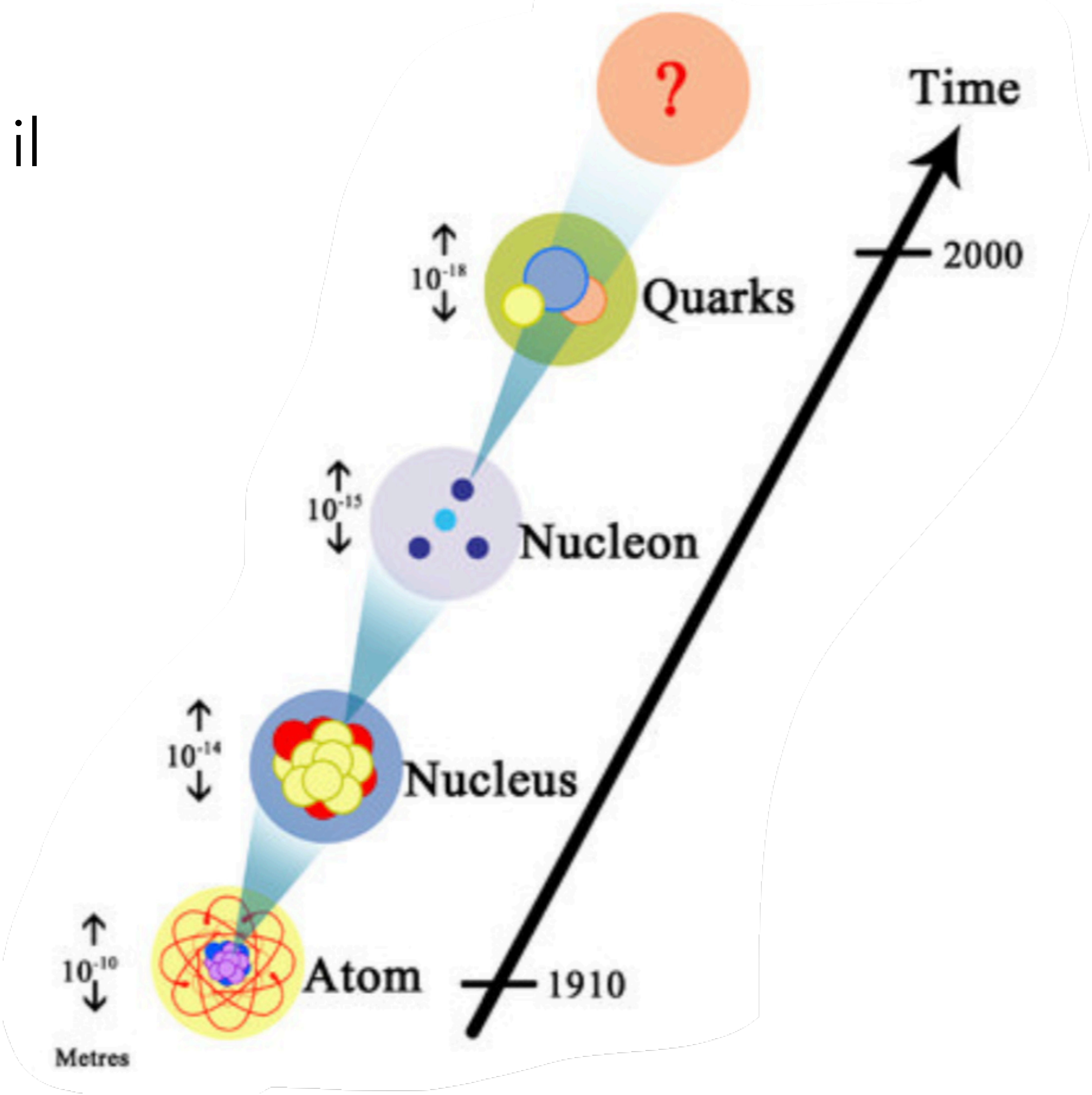
Il Modello Standard

Il Modello Standard

Il Modello Standard descrive:

- le **particelle elementari** che compongono il nostro Universo
- come **interagiscono** tra di loro

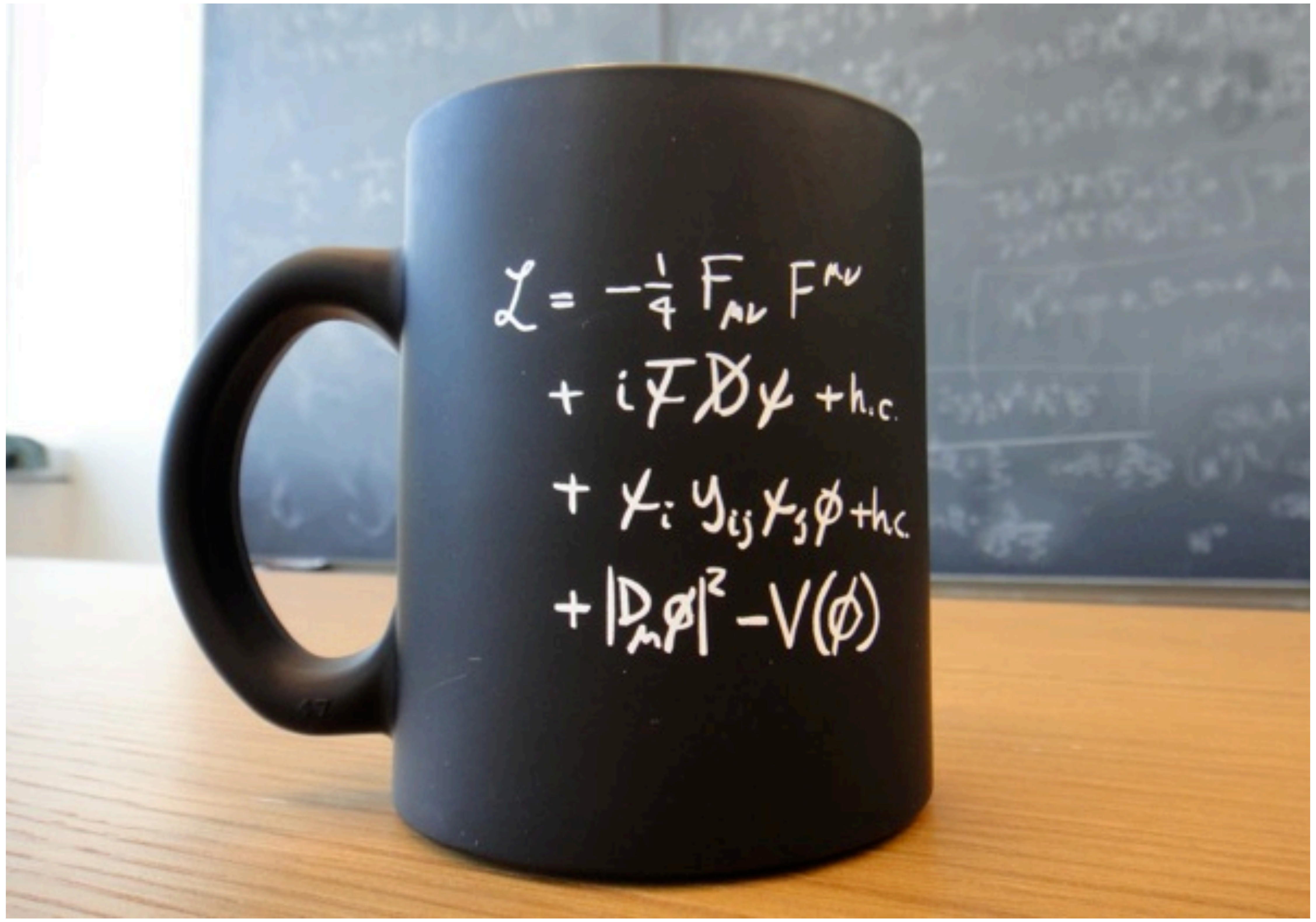




Il Modello Standard

meccanica quantistica + relatività speciale + teoria dei campi =

teoria quantistica dei campi

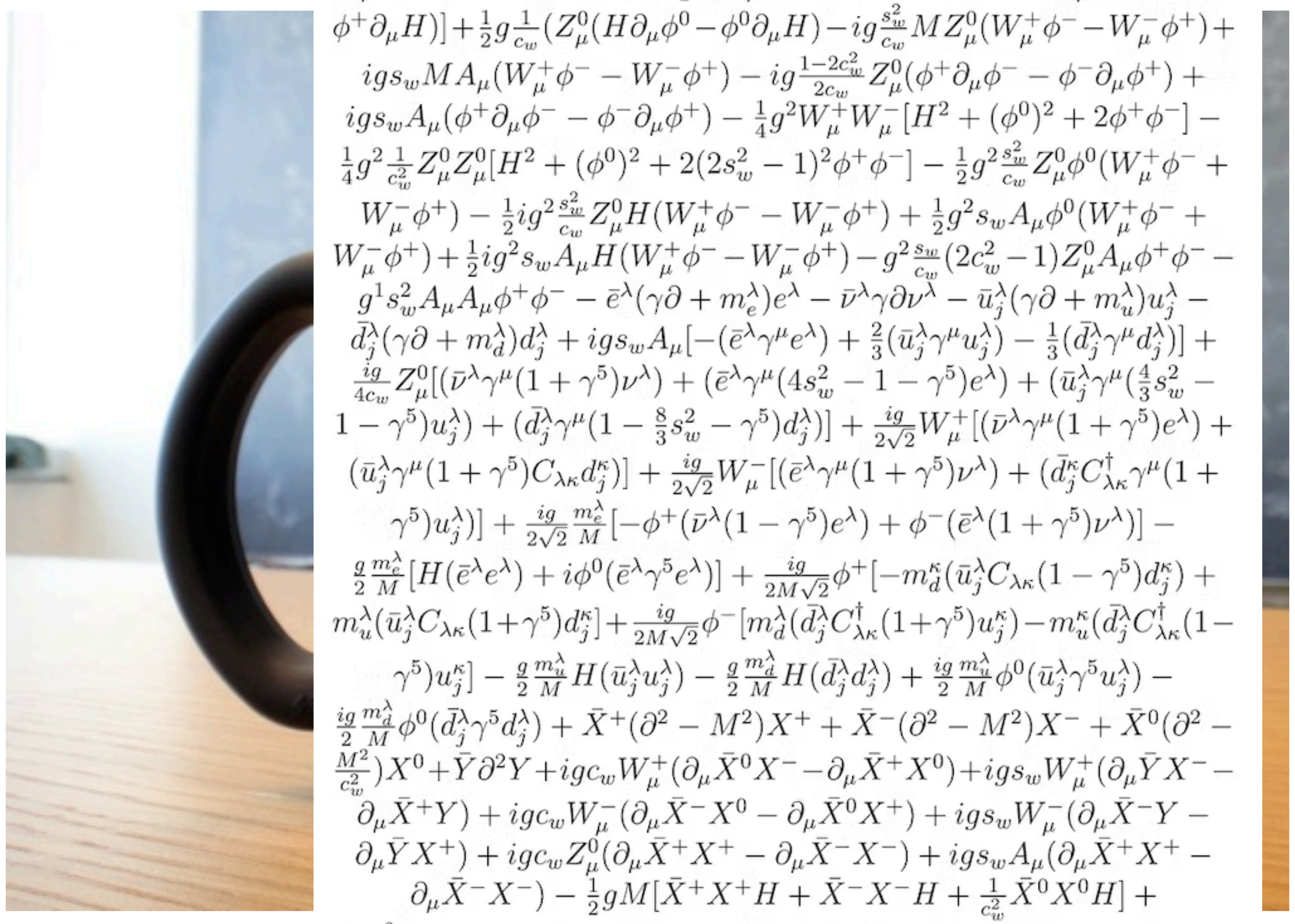


La Lagrangiana del Modello Standard

lo Standard

r tività speciale + teoria dei campi =

ntistica dei campi



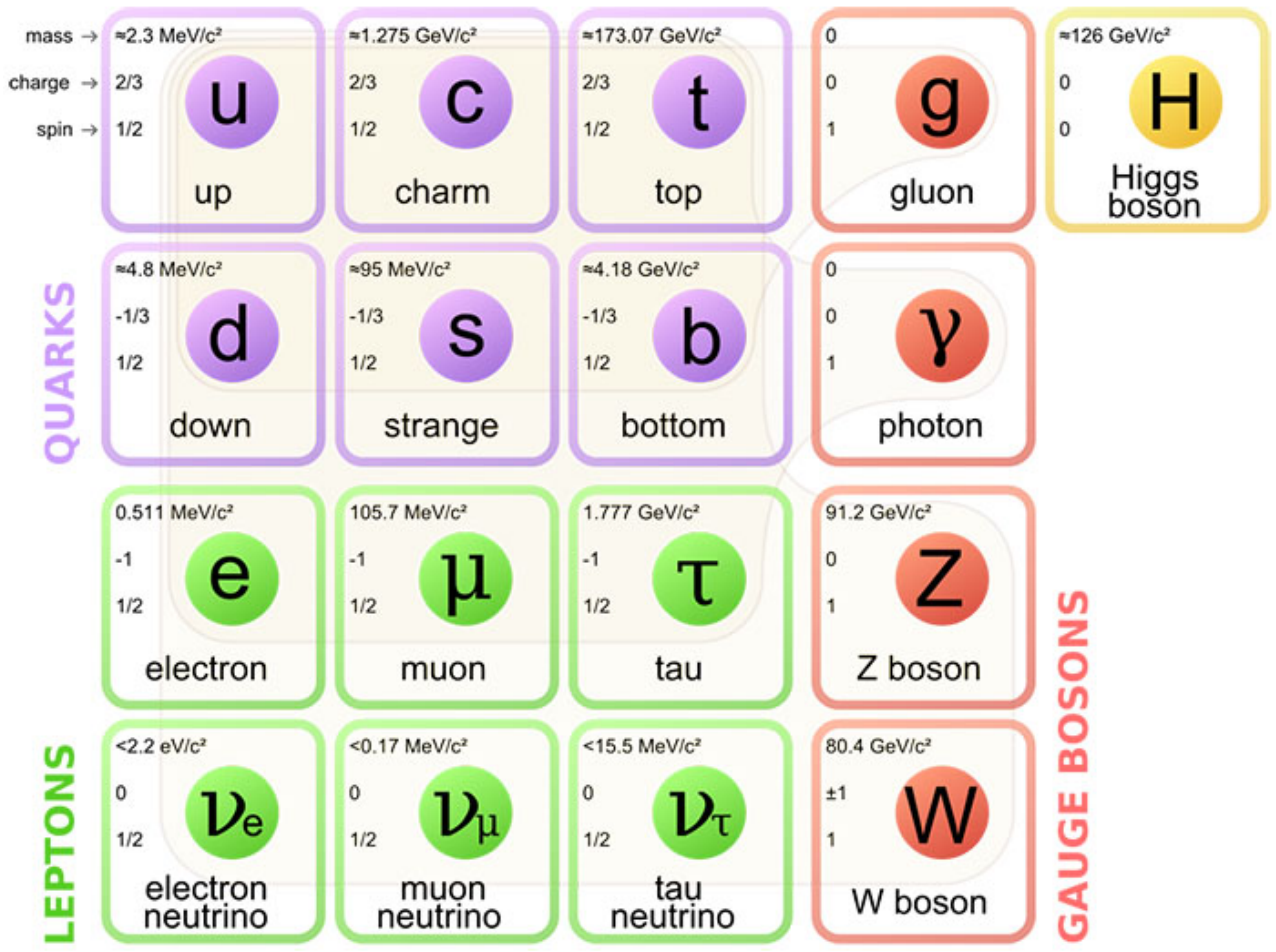
$$
\begin{aligned}
&\mathcal{L}_{\mathrm{StandardModel}} = \\
&-\tfrac{1}{2}\partial_\nu g^a_\mu \partial_\nu g^a_\mu - g_s f^{abc}\partial_\mu g^a_\nu g^b_\mu g^c_\nu - \tfrac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g^b_\mu g^c_\nu g^d_\mu g^e_\nu + \\
&\tfrac{1}{2} i g_s^2 (\bar{q}^\sigma_i \gamma^\mu q^\sigma_j) g^a_\mu + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc}\partial_\mu \bar{G}^a G^b g^c_\mu - \partial_\nu W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - \\
&M^2 W^+_\mu W^-_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\nu Z^0_\mu \partial_\nu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2c_w^2} M^2 Z^0_\mu Z^0_\mu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - \tfrac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - \\
&\tfrac{1}{2} m_h^2 H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - M^2 \phi^+ \phi^- - \tfrac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \tfrac{1}{2c_w^2} M \phi^0 \phi^0 - \beta_h \left[\tfrac{2M^2}{g^2} + \right. \\
&\left. \tfrac{2M}{g} H + \tfrac{1}{2}(H^2 + \phi^0\phi^0 + 2\phi^+\phi^-)\right] + \tfrac{2M^4}{g^2}\alpha_h - i g c_w [\partial_\nu Z^0_\mu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - Z^0_\nu (W^+_\mu \partial_\nu W^-_\mu - W^-_\mu \partial_\nu W^+_\mu) + Z^0_\mu (W^+_\nu \partial_\nu W^-_\mu - \\
&W^-_\nu \partial_\nu W^+_\mu)] - i g 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)] - \tfrac{1}{2} g^2 W^+_\mu W^-_\mu W^+_\nu W^-_\nu + \\
&\tfrac{1}{2} g^2 W^+_\mu W^-_\nu W^+_\mu W^-_\nu + g^2 c_w^2 (Z^0_\mu W^+_\mu Z^0_\nu W^-_\nu - Z^0_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + \\
&g^2 s_w^2 (A_\mu W^+_\mu A_\nu W^-_\nu - A_\mu A_\mu W^+_\nu W^-_\nu) + g^2 s_w c_w [A_\mu Z^0_\nu (W^+_\mu W^-_\nu - \\
&W^+_\nu W^-_\mu) - 2 A_\mu Z^0_\mu W^+_\nu W^-_\nu] - g\alpha [H^3 + H\phi^0\phi^0 + 2H\phi^+\phi^-] - \\
&\tfrac{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 - \tfrac{1}{2} g \tfrac{M}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu H - \tfrac{1}{2} i g [W^+_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - \\
&W^-_\mu (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)] + \tfrac{1}{2} g [W^+_\mu (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) - W^-_\mu (H \partial_\mu \phi^+ - \\
&\phi^+ \partial_\mu H)] + \tfrac{1}{2} g \tfrac{1}{c_w} (Z^0_\mu (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) - i g \tfrac{s_w^2}{c_w} M Z^0_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \\
&i g s_w M A_\mu (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - i g \tfrac{1-2c_w^2}{2c_w} Z^0_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + \\
&i g s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \tfrac{1}{4} g^2 W^+_\mu W^-_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+\phi^-] - \\
&\tfrac{1}{4} g^2 \tfrac{1}{c_w^2} Z^0_\mu Z^0_\mu [H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+\phi^-] - \tfrac{1}{2} g^2 \tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + \\
&W^-_\mu \phi^+) - \tfrac{1}{2} i g^2 \tfrac{s_w^2}{c_w} Z^0_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2} g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W^+_\mu \phi^- + \\
&W^-_\mu \phi^+) + \tfrac{1}{2} i g^2 s_w A_\mu H (W^+_\mu \phi^- - W^-_\mu \phi^+) - g^2 \tfrac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z^0_\mu A_\mu \phi^+\phi^- - \\
&g^1 s_w^2 A_\mu A_\mu \phi^+\phi^- - \bar{e}^\lambda (\gamma\partial + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda \gamma\partial \nu^\lambda - \bar{u}^\lambda_j (\gamma\partial + m_u^\lambda) u^\lambda_j - \\
&\bar{d}^\lambda_j (\gamma\partial + m_d^\lambda) d^\lambda_j + i g s_w A_\mu [-(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda) + \tfrac{2}{3}(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu u^\lambda_j) - \tfrac{1}{3}(\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu d^\lambda_j)] + \\
&\tfrac{ig}{4c_w} Z^0_\mu [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (\tfrac{4}{3}s_w^2 - \\
&1 - \gamma^5) u^\lambda_j) + (\bar{d}^\lambda_j \gamma^\mu (1 - \tfrac{8}{3}s_w^2 - \gamma^5) d^\lambda_j)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^+_\mu [(\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) e^\lambda) + \\
&(\bar{u}^\lambda_j \gamma^\mu (1+\gamma^5) C_{\lambda\kappa} d^\kappa_j)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} W^-_\mu [(\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (1+\gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}^\kappa_j C^\dagger_{\lambda\kappa} \gamma^\mu (1 + \\
&\gamma^5) u^\lambda_j)] + \tfrac{ig}{2\sqrt{2}} \tfrac{m_e^\lambda}{M} [-\phi^+ (\bar{\nu}^\lambda (1-\gamma^5) e^\lambda) + \phi^- (\bar{e}^\lambda (1+\gamma^5) \nu^\lambda)] - \\
&\tfrac{g}{2} \tfrac{m_e^\lambda}{M} [H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + i\phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda)] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ [-m_d^\kappa (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1-\gamma^5) d^\kappa_j) + \\
&m_u^\lambda (\bar{u}^\lambda_j C_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) d^\kappa_j] + \tfrac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- [m_d^\lambda (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1+\gamma^5) u^\kappa_j) - m_u^\kappa (\bar{d}^\lambda_j C^\dagger_{\lambda\kappa} (1 - \\
&\gamma^5) u^\kappa_j] - \tfrac{g}{2} \tfrac{m_u^\lambda}{M} H (\bar{u}^\lambda_j u^\lambda_j) - \tfrac{g}{2} \tfrac{m_d^\lambda}{M} H (\bar{d}^\lambda_j d^\lambda_j) + \tfrac{ig}{2} \tfrac{m_u^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{u}^\lambda_j \gamma^5 u^\lambda_j) - \\
&\tfrac{ig}{2} \tfrac{m_d^\lambda}{M} \phi^0 (\bar{d}^\lambda_j \gamma^5 d^\lambda_j) + \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \\
&\tfrac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + i g c_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + i g s_w W^+_\mu (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \\
&\partial_\mu \bar{X}^+ Y) + i g c_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + i g s_w W^-_\mu (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \\
&\partial_\mu \bar{Y} X^+) + i g c_w Z^0_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + i g s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
&\partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \tfrac{1}{2} g M [\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \tfrac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H] + \\
&\tfrac{1-2c_w^2}{2c_w} i g M [\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-] + \tfrac{1}{2c_w} i g M [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \\
&i g M s_w [\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-] + \tfrac{1}{2} i g M [\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0].
\end{aligned}
$$

La Lagrangiana del

Modello Standard

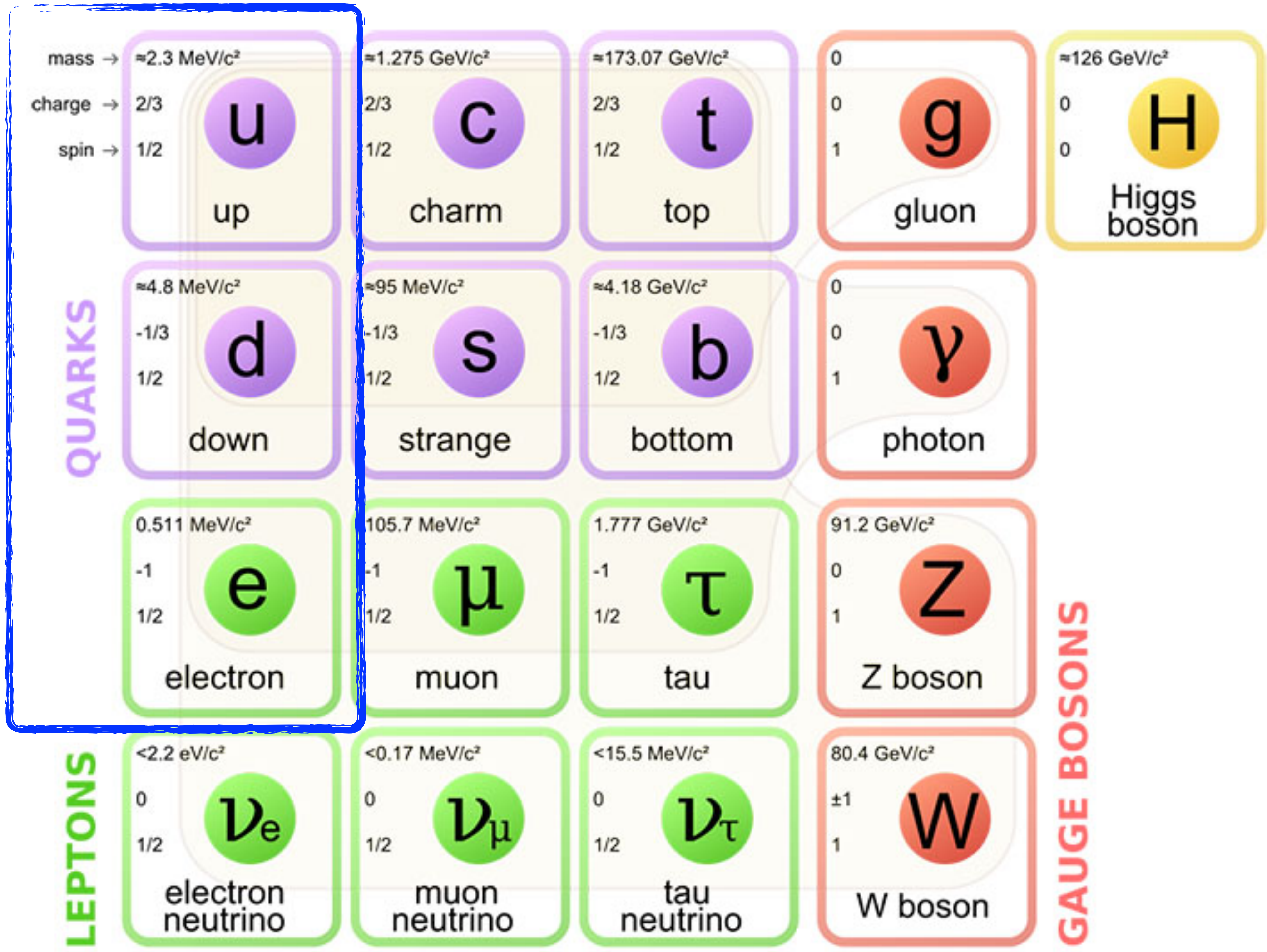
Le particelle elementari

descritte dal Modello Standard



Le particelle elementari

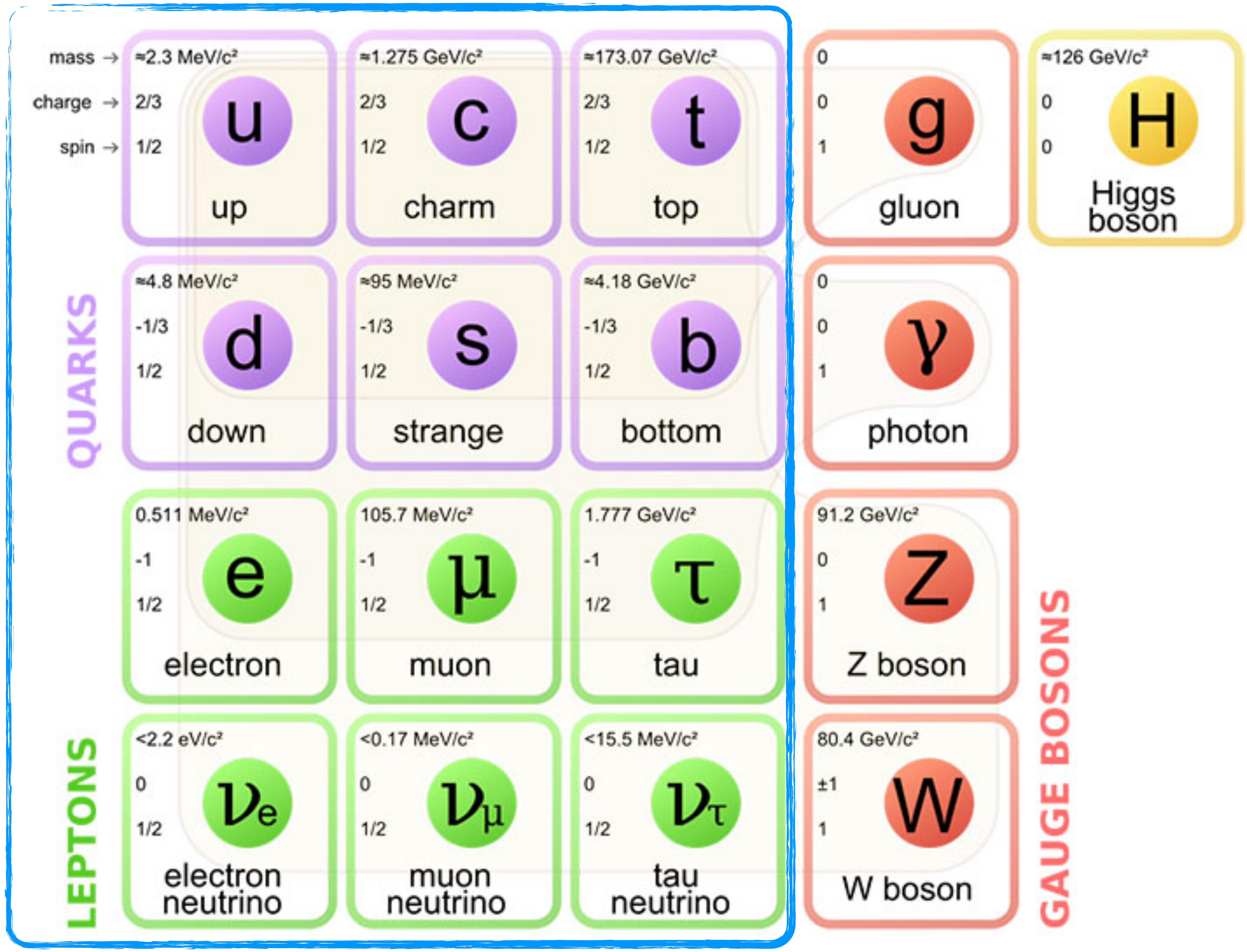
I quark *u* e *d* formano i protoni e i neutroni del nucleo dell'atomo



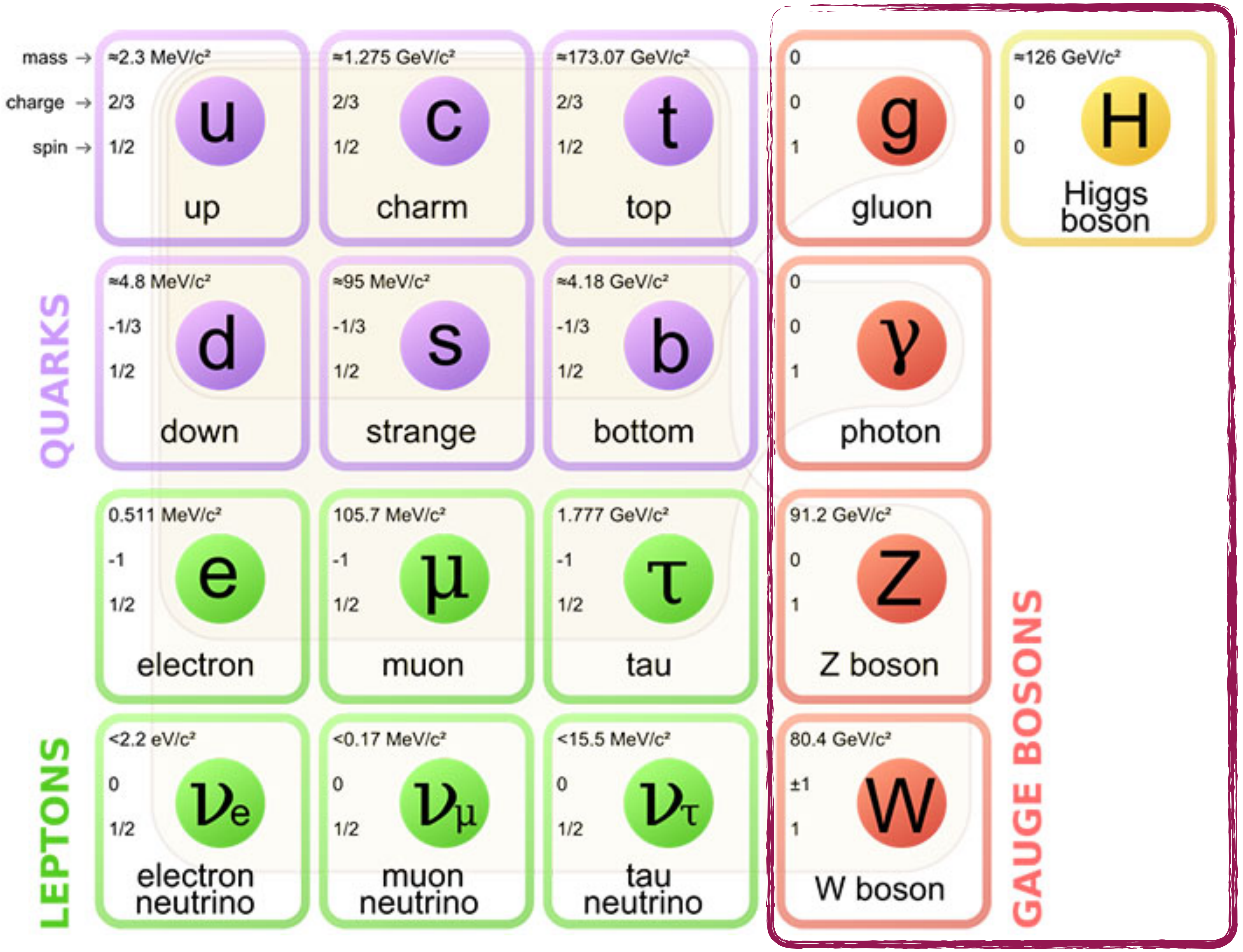
Gli *elettroni* gli girano intorno

Le particelle elementari

Costituenti della materia
(con relative antiparticelle)



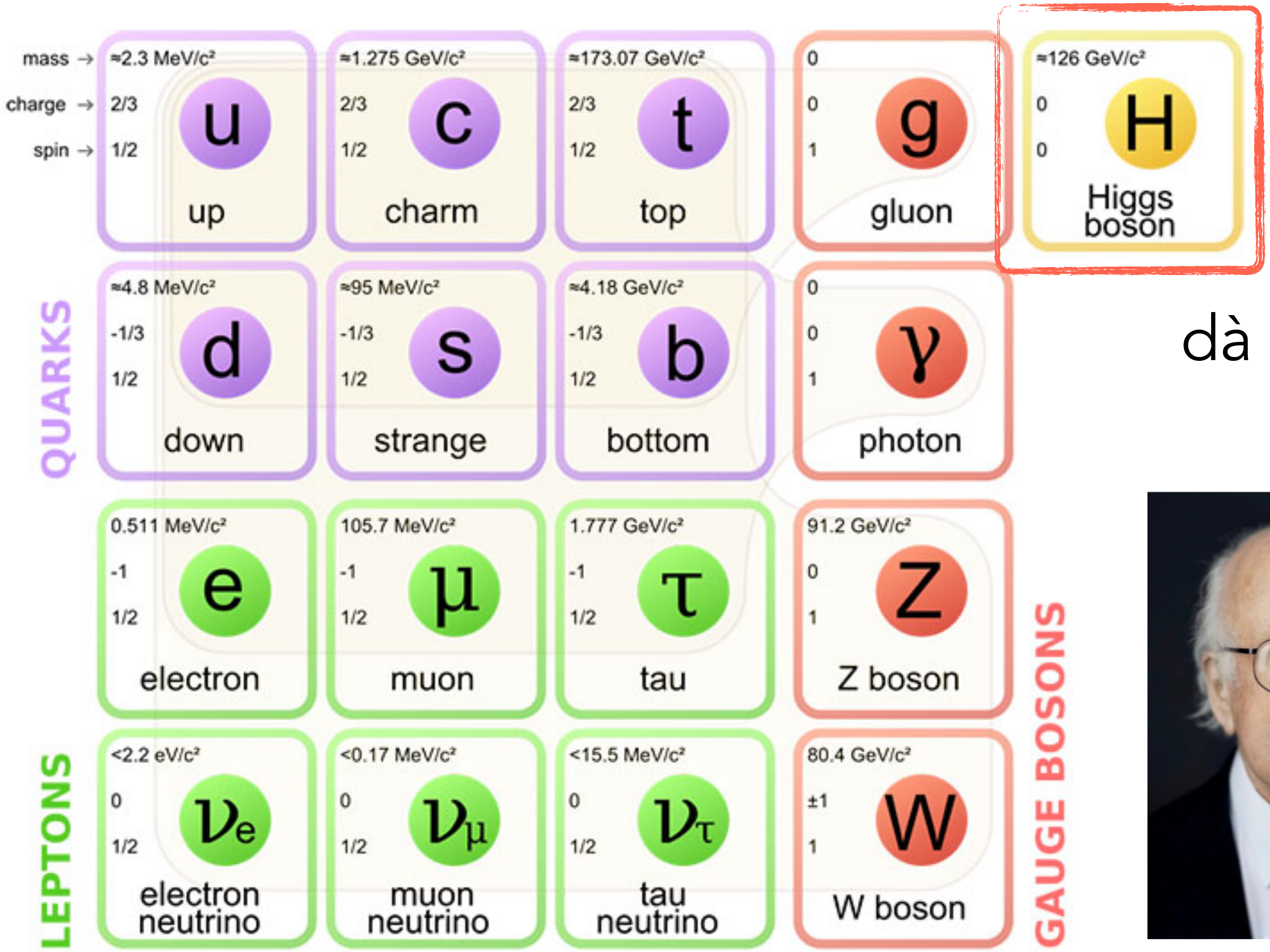
Le particelle elementari



I mediatori delle interazioni

Le particelle elementari

Bosone di Higgs



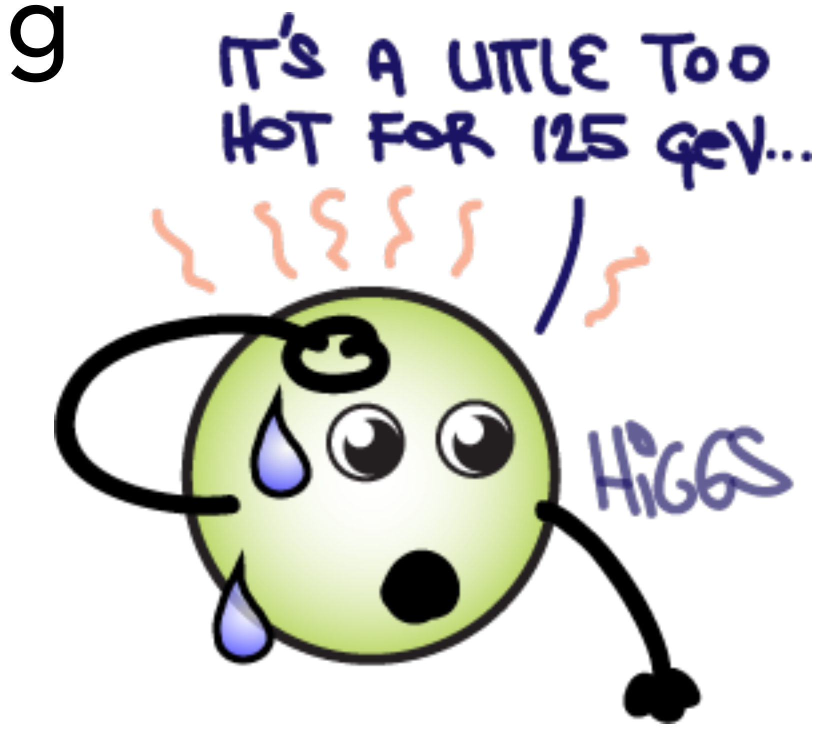
dà massa a tutte le particelle

Oltre il Modello Standard

La gravità

Oltre il Modello Standard

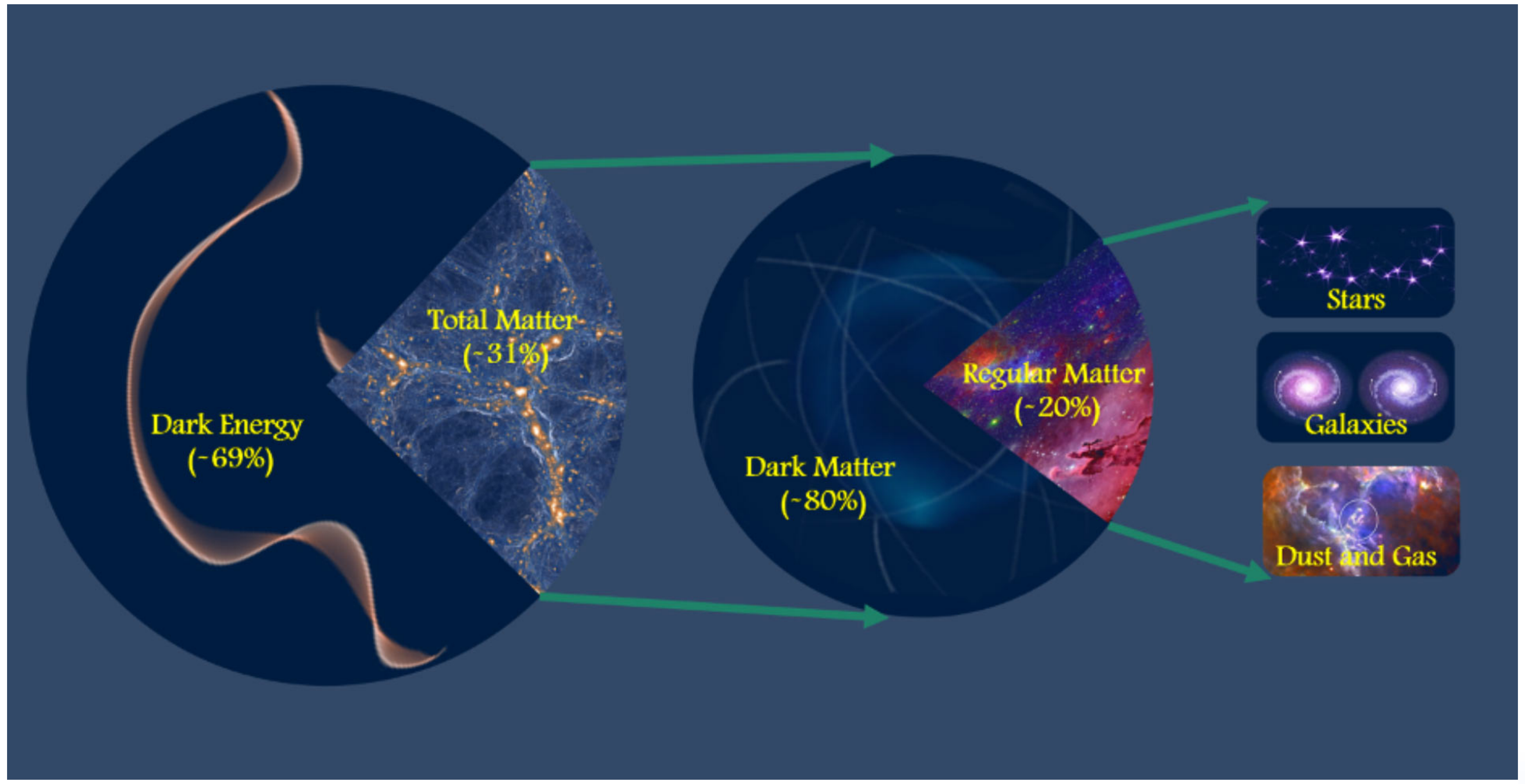
Problema della gerarchia e fine tuning



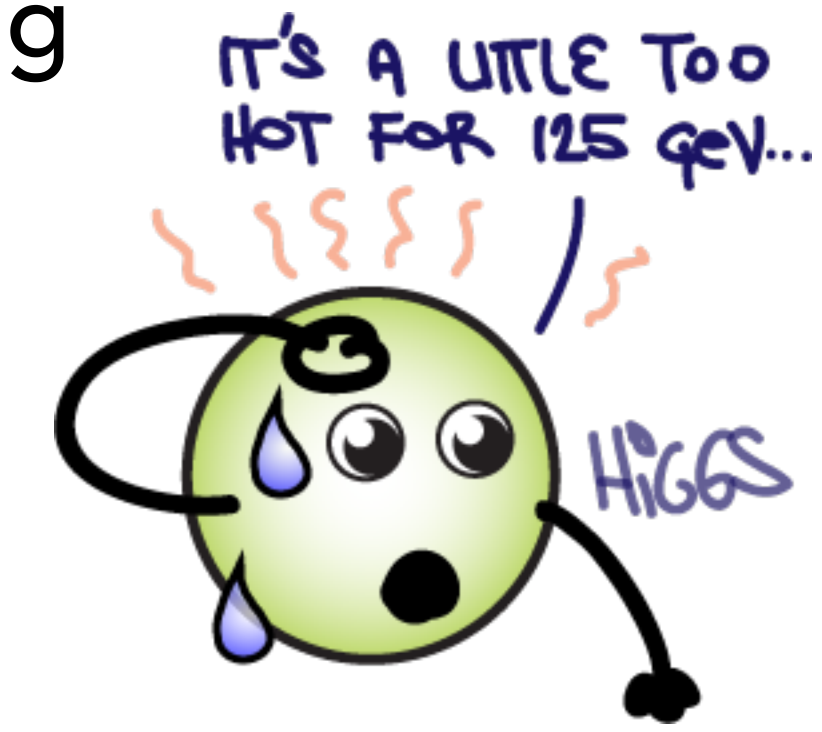
La gravità

Oltre il Modello Standard

Materia oscura ed energia oscura



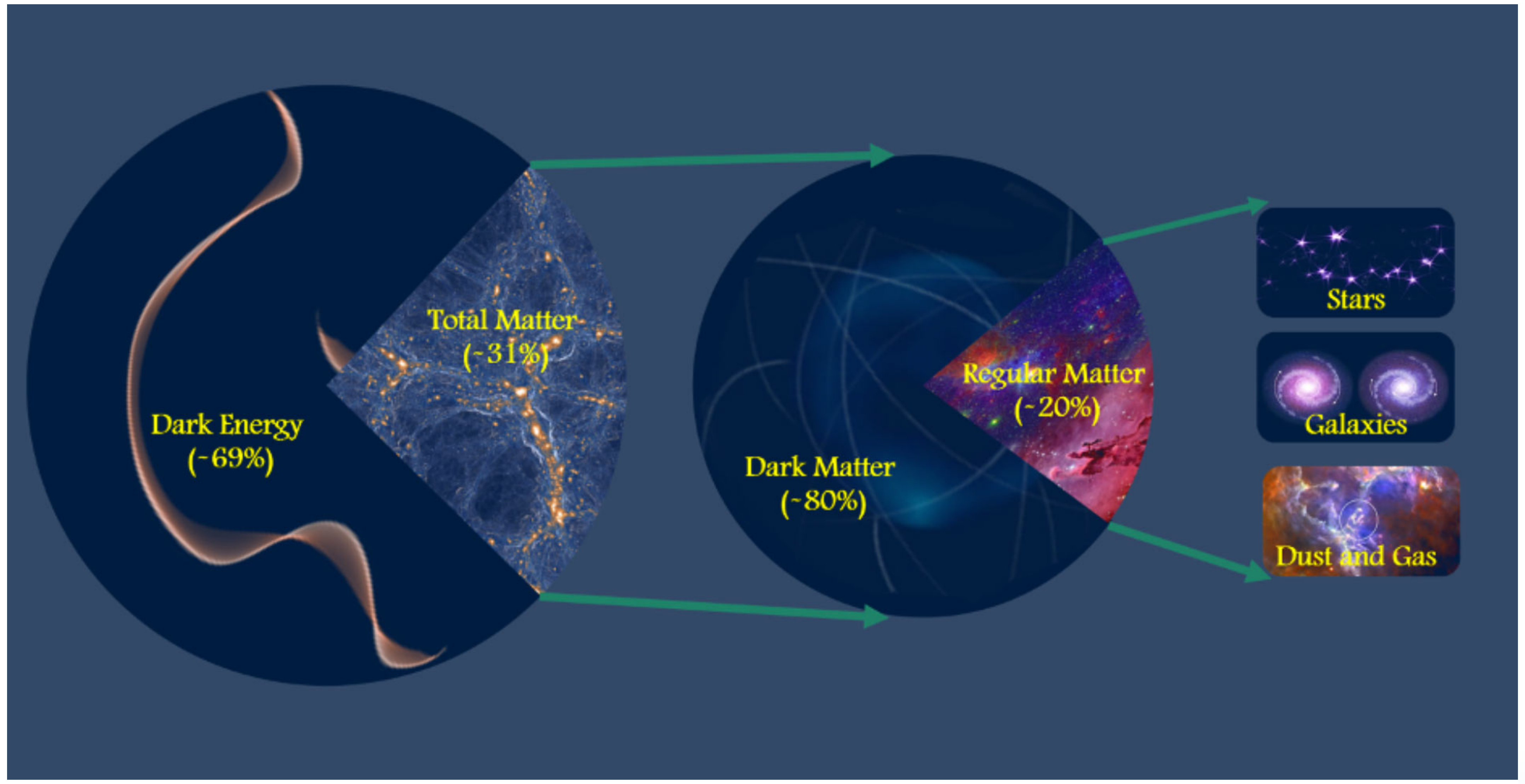
Problema della gerarchia e fine tuning



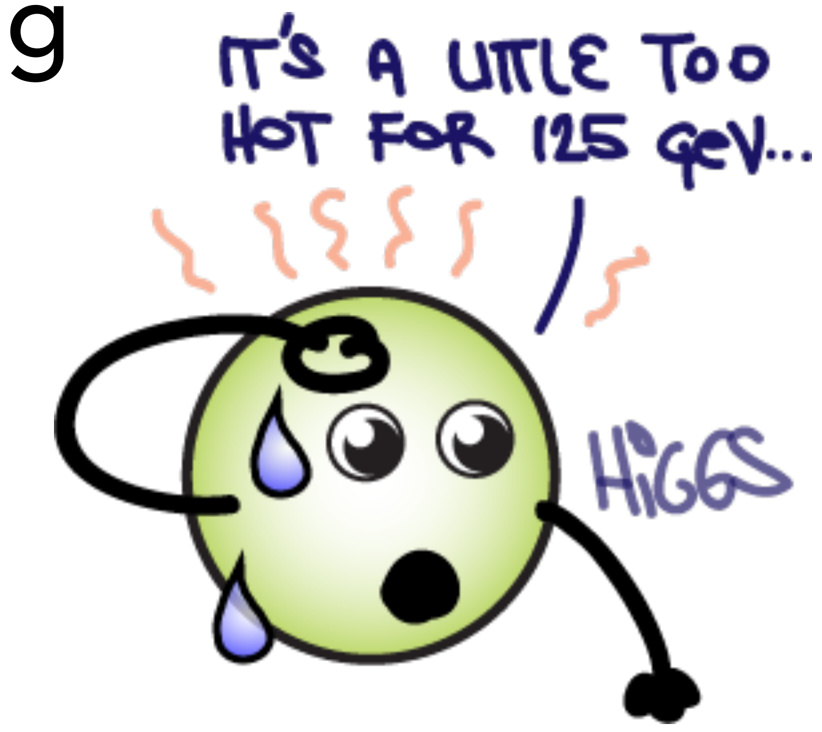
La gravità

Oltre il Modello Standard

Materia oscura ed energia oscura



Problema della gerarchia e fine tuning

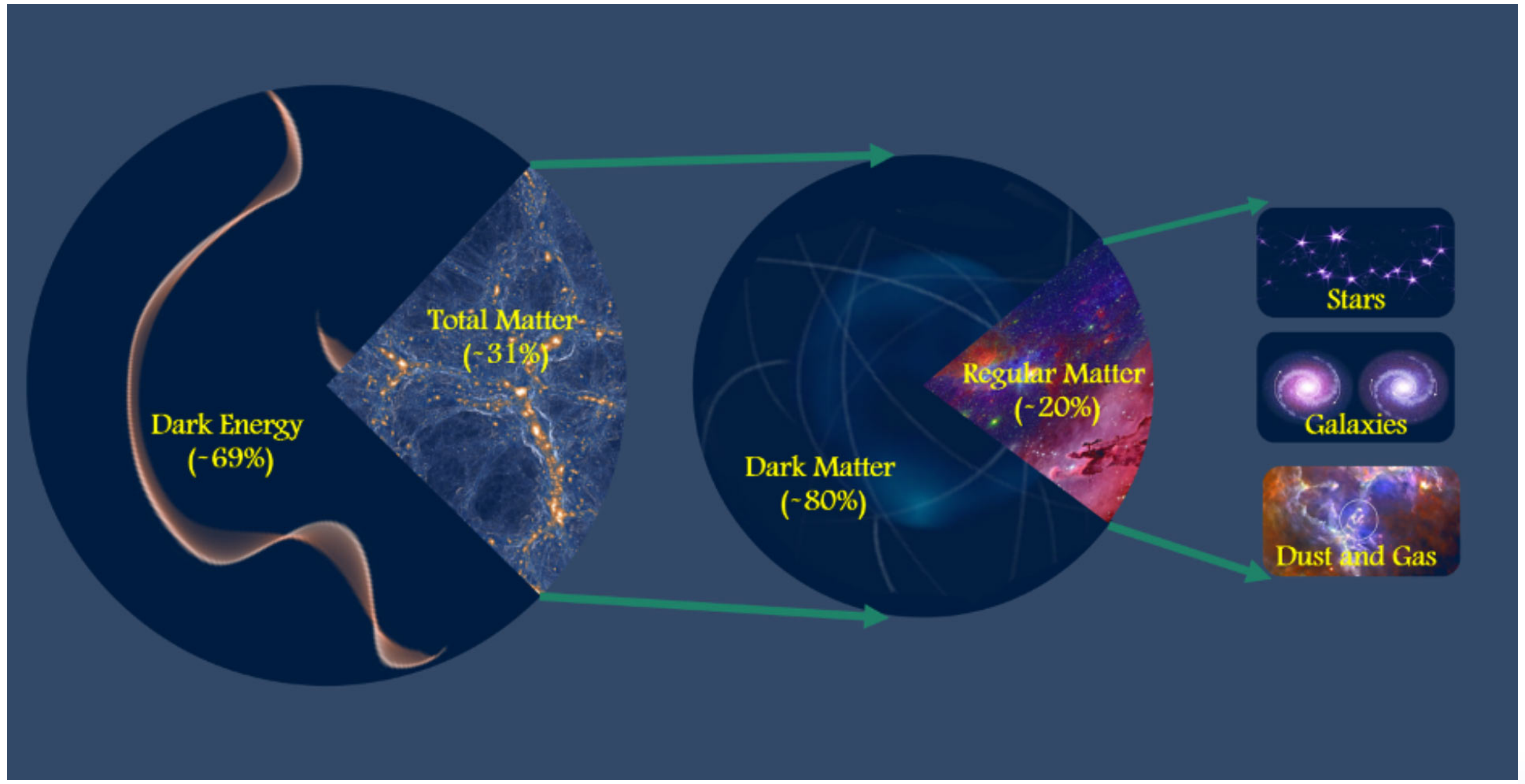


La massa dei neutrini

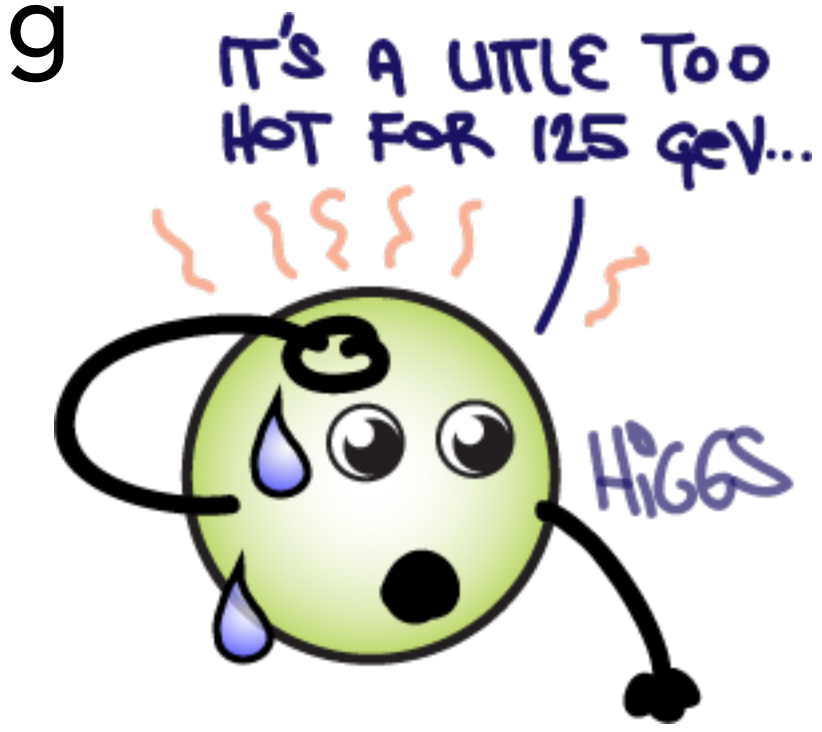
La gravità

Oltre il Modello Standard

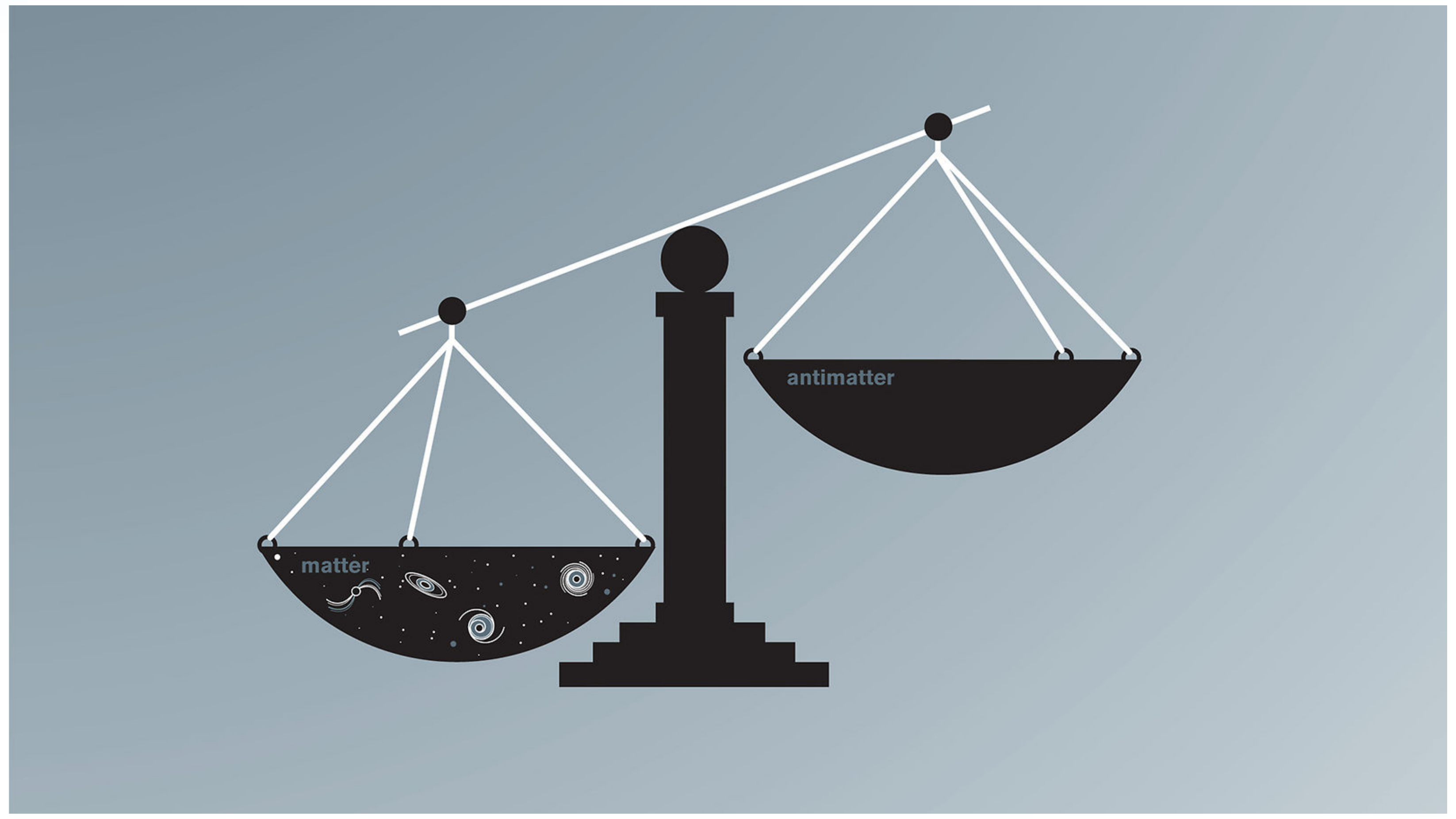
Materia oscura ed energia oscura



Problema della gerarchia e fine tuning



Asimmetria materia-antimateria



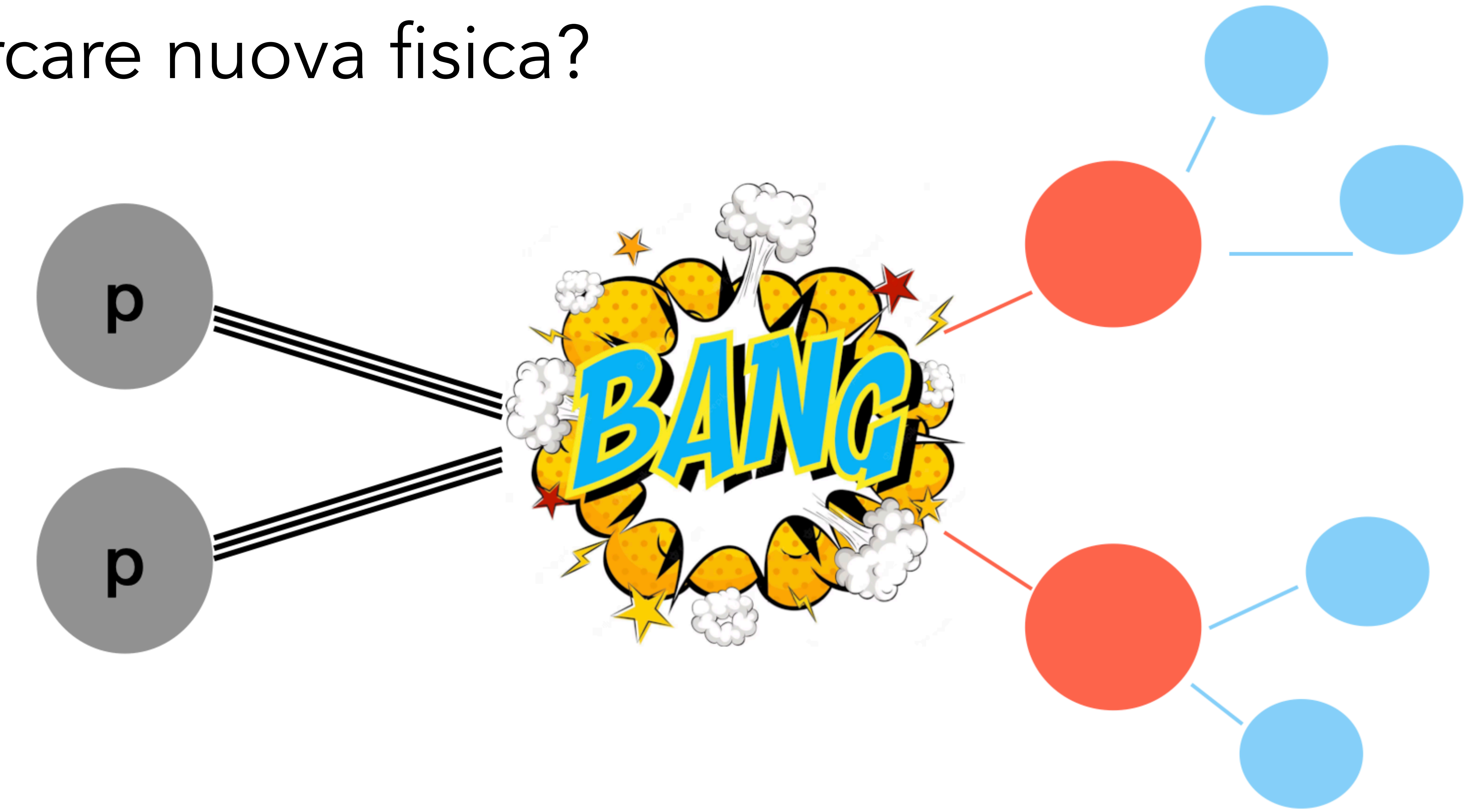
La massa dei neutrini

La gravità

Dalla teoria agli esperimenti:
LHC e gli esperimenti

Le collisioni a LHC

- Come possiamo misurare i parametri del Modello Standard?
- Come possiamo cercare nuova fisica?



- Facciamo collidere fasci di protoni ad energia altissima ➜ LHC @ CERN
- A ogni collisione si creano altre particelle elementari
- Più è alta **l'energia** di collisione, maggiore è la probabilità di vedere **fenomeni rari** o **nuova fisica**

Il CERN

- **CERN** (***Conseil européen pour la recherche nucléaire***) a Ginevra
- Fondato nel 1954 con l'idea di creare un laboratorio di pace e unione tra popoli
- 24 stati membri, più di 600 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

Large Hadron Collider

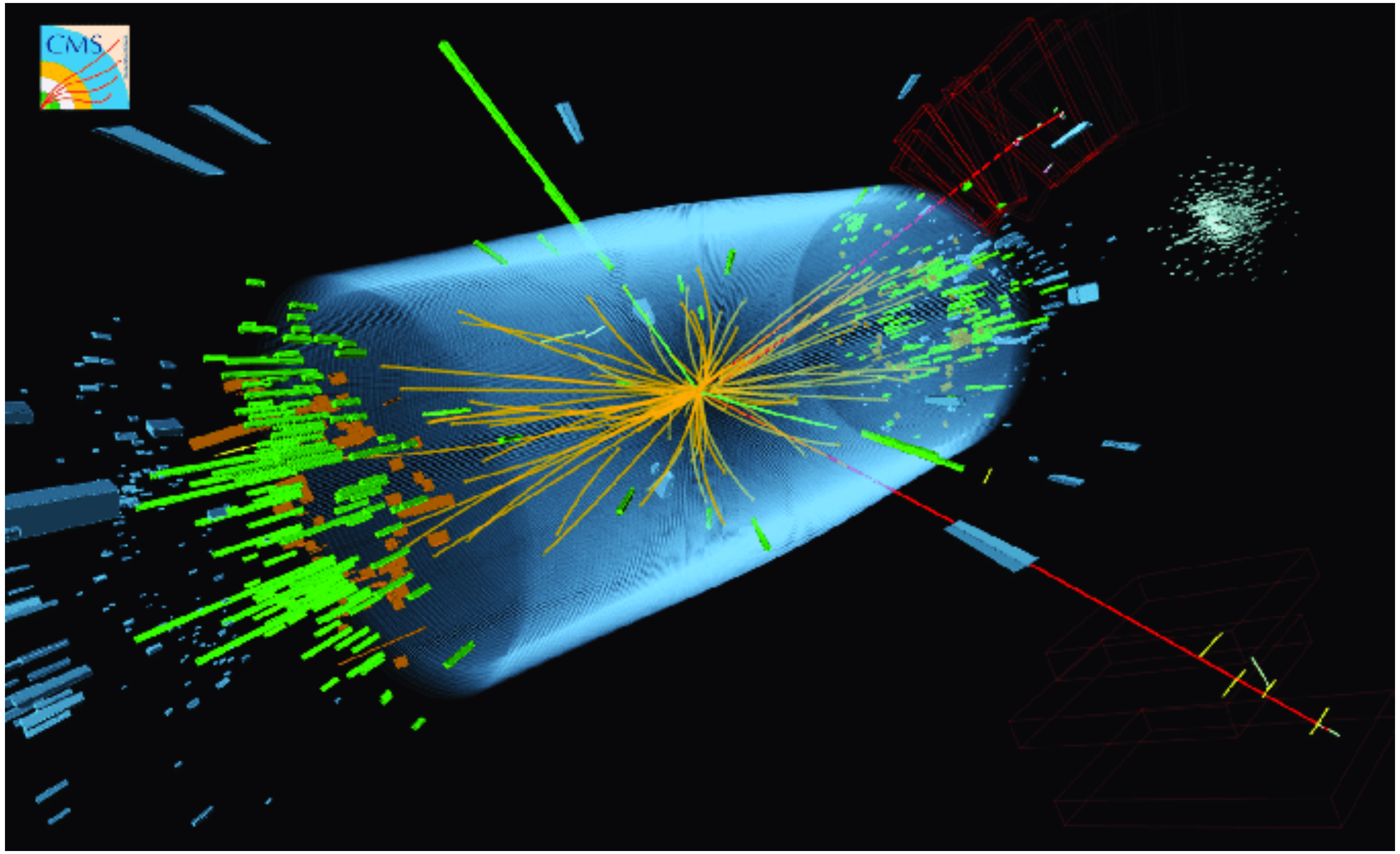
Large Hadron Collider (LHC) @ CERN

- Acceleratore di 27 km di circonferenza, ~170 m sotto terra al confine tra Svizzera e Francia
- Due fasci di protoni/ioni collidono in 4 punti, dove sono locati i 4 esperimenti principali: CMS, ATLAS, ALICE e LHCb

- I protoni viaggiano alla velocità di 99.999% *c*
- Pacchetti di ~100 000 milioni protoni si scontrano ogni **25 ns** → 600 milioni di collisioni al secondo
- L'energia al centro di massa è **13.6 TeV**

Gli esperimenti

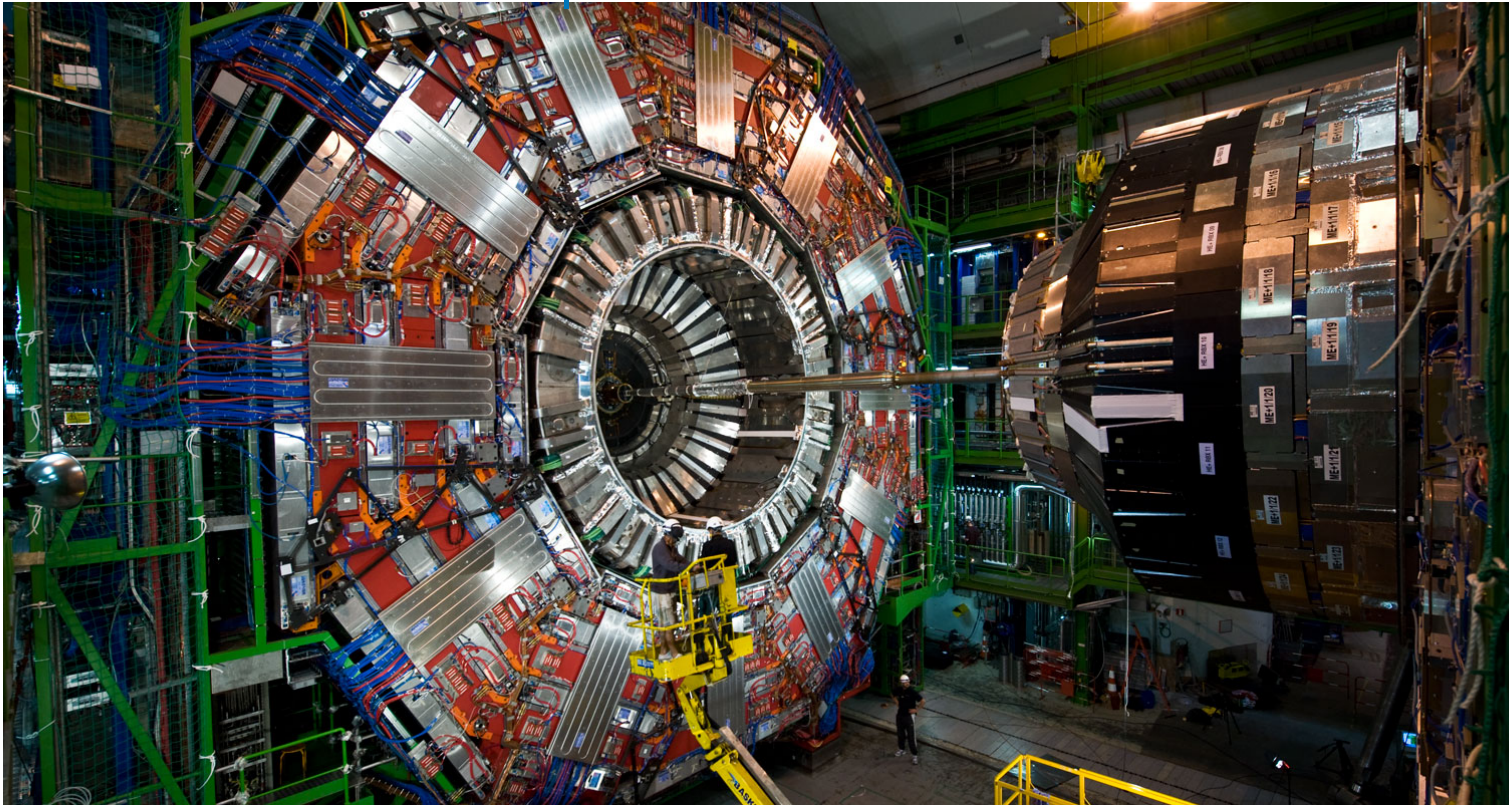
Enormi "macchine fotografiche" catturano il risultato delle collisioni di LHC e misurano le migliaia di particelle prodotte nella collisione.



Esperimenti a scopo generale:

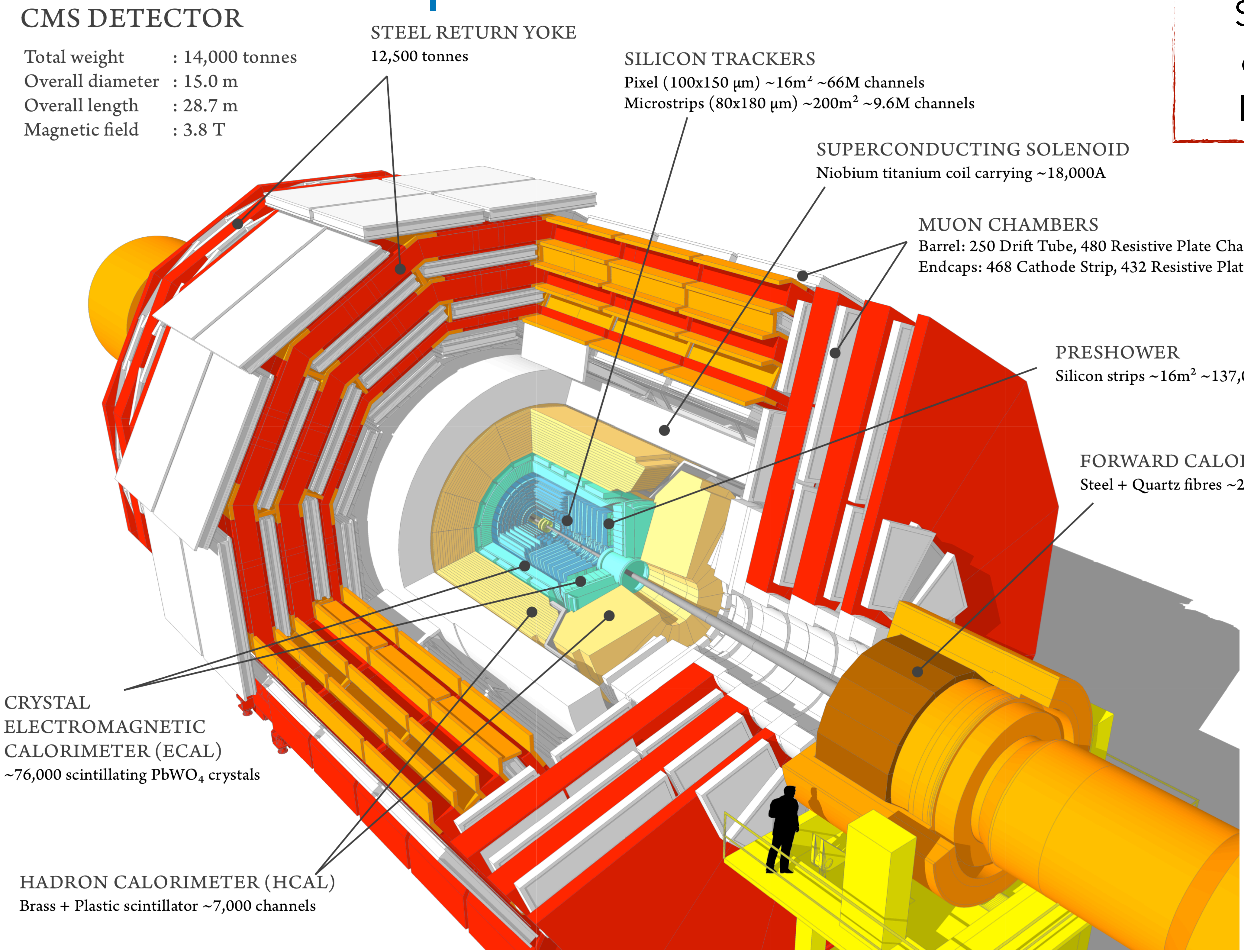
- **CMS**:
  Compact Muon Solenoid
- **ATLAS**:
  A Toroidal LHC ApparatuS

L'esperimento CMS

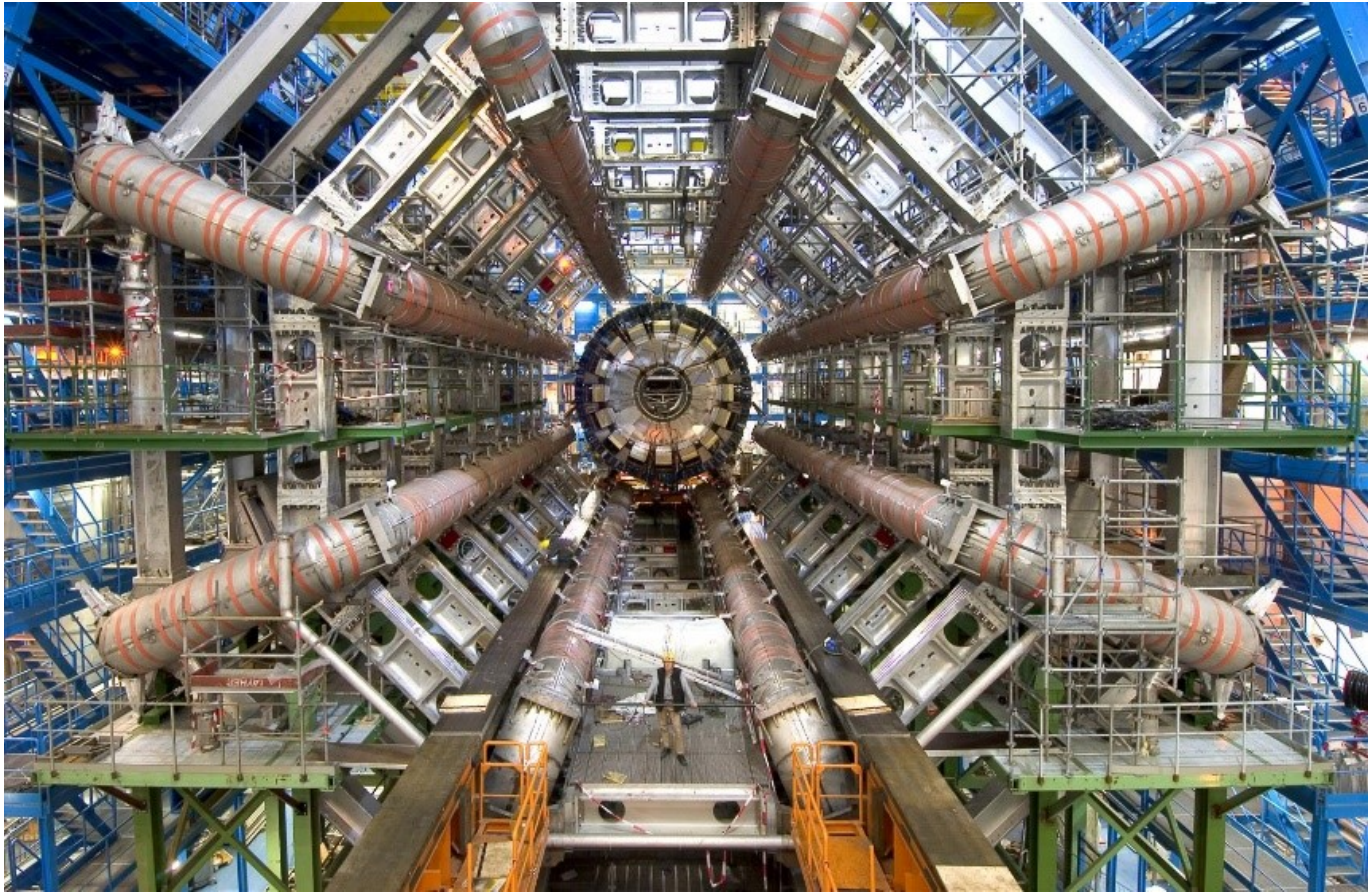


L'esperimento CMS

Solenoide di 3.8 T
diametro = 15 m,
lunghezza = 28 m

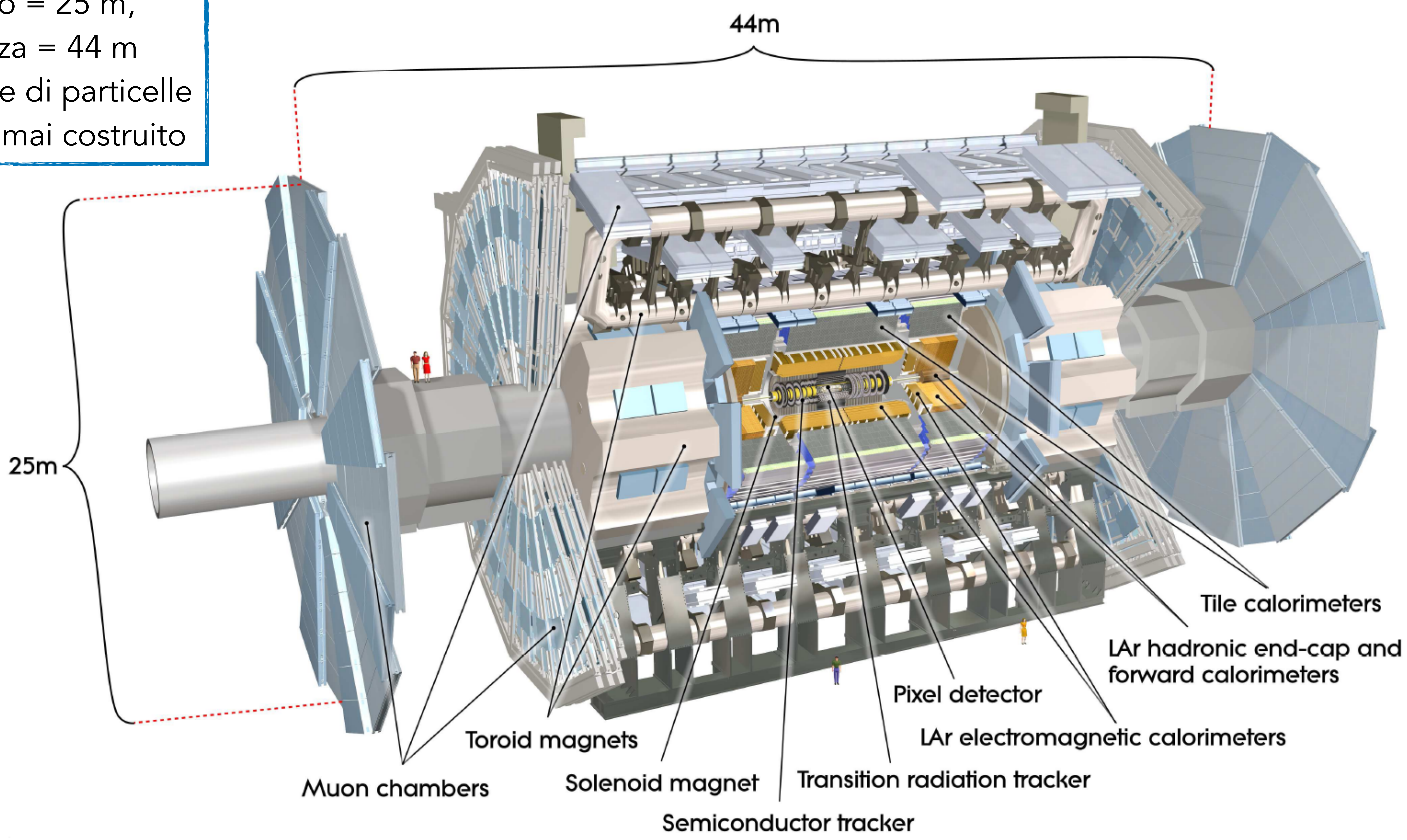


L’esperimento ATLAS



L’esperimento ATLAS

diametro = 25 m,
lunghezza = 44 m
È il rivelatore di particelle più grande mai costruito



Big Data

- Fino a 1 miliardo di collisioni arrivano nei nostri esperimenti
- Abbiamo ideato sofisticati 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 3 di LHC (ancora in corso) si avranno più di 600 petabytes di dati, equivalenti a più di 20 000 anni di video full HD registrati 24/7

Obbiettivi di ricerca

- Misure di precisione del Modello Standard
- Ricerca di nuove particelle
- Rivelatori
- Software e computing