

QUARK, BOSONI E ALTRE ESOTICHE CREATURE

Lorenzo Magnea

Università di Torino - INFN Torino

SeralMente, ITI Majorana, 11/12/14

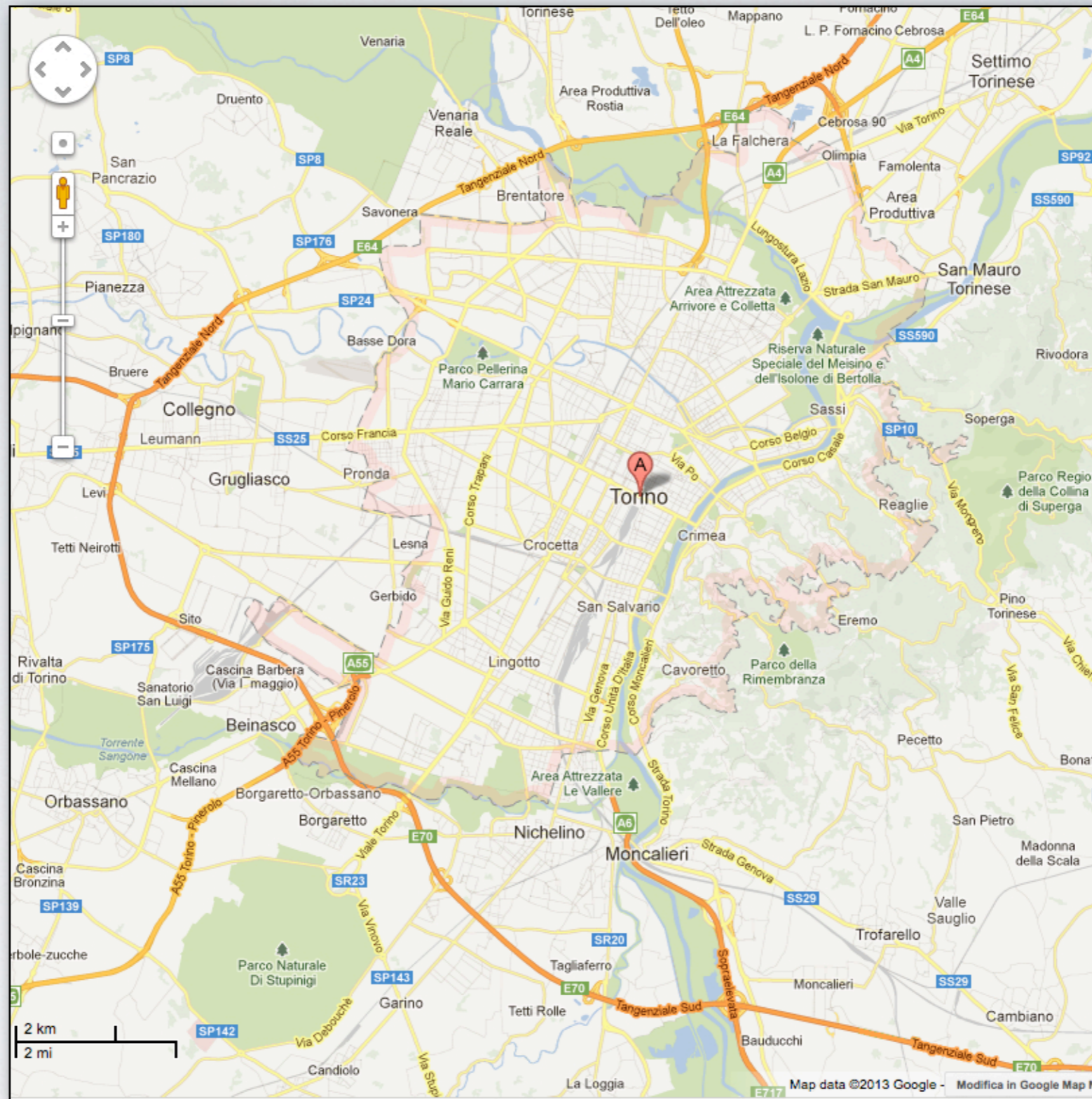


Sommario

- Le dimensioni delle cose
- Il Modello Standard delle particelle elementari
- I disegni di Feynman
- Collision: the Movie
- La fabbrica dei Bosoni di Higgs

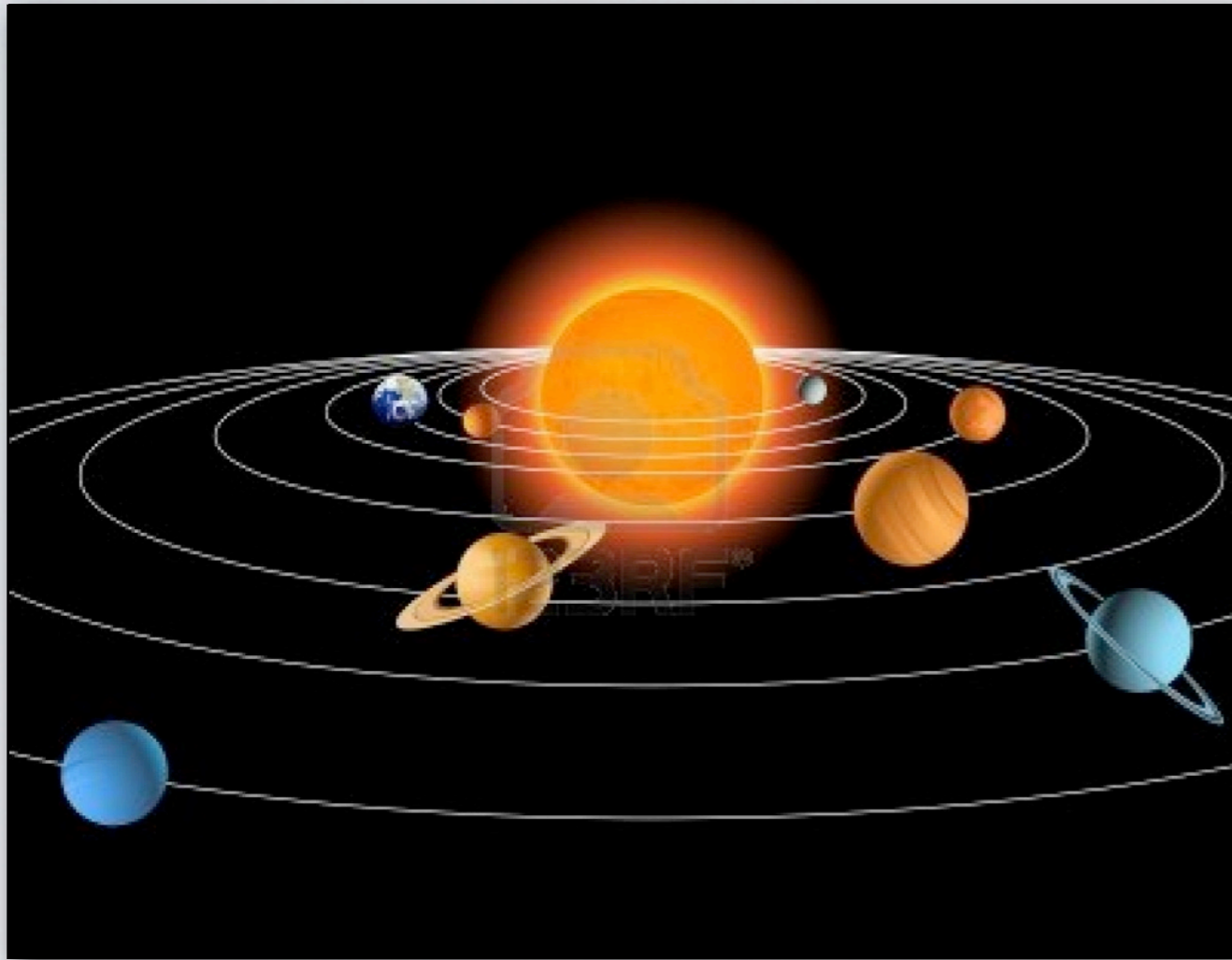
LE DIMENSIONI DELLE COSE



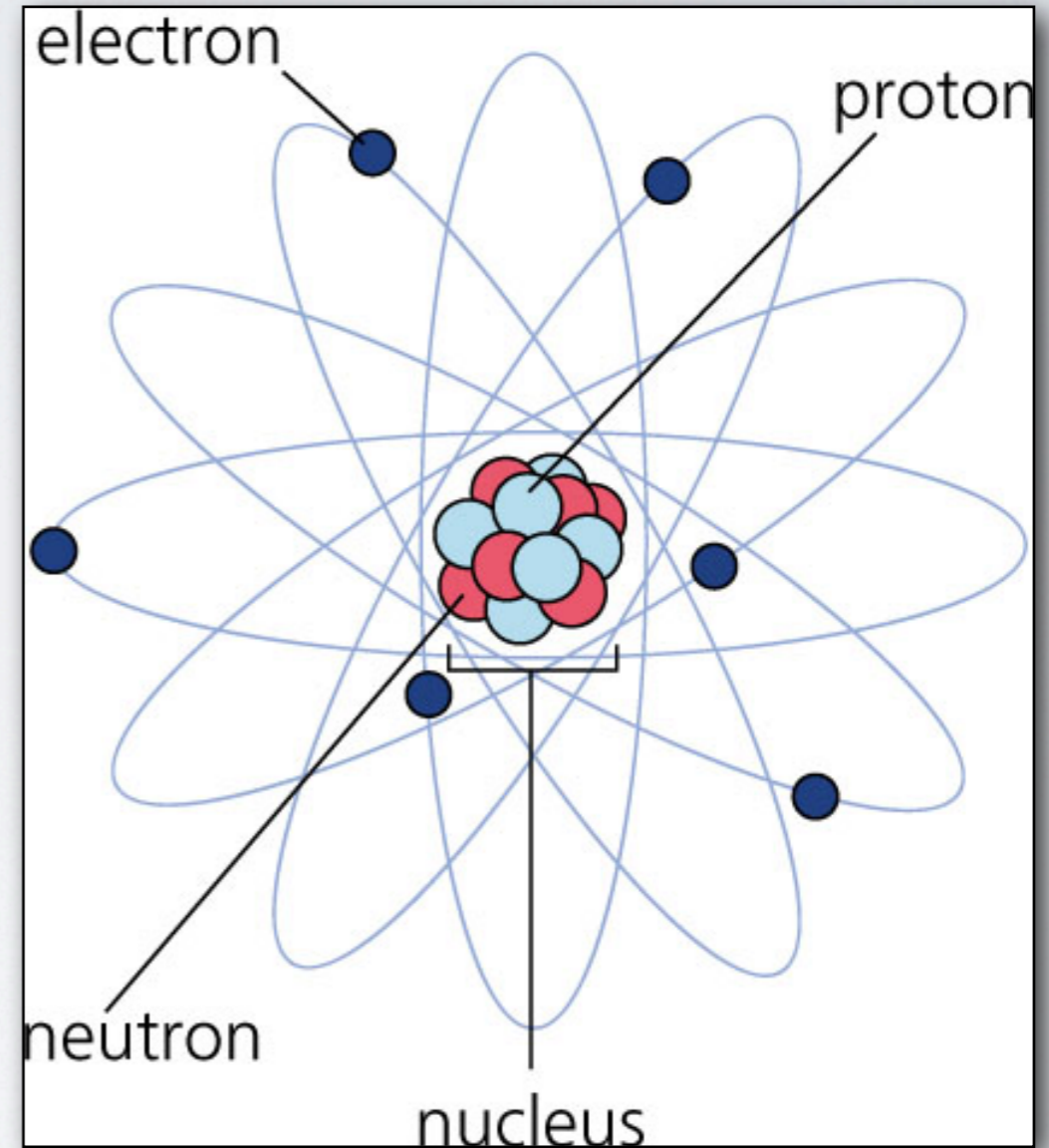


Una buona cartina rispetta i rapporti tra le grandezze

Cartine meno buone distorcono i rapporti tra le grandezze



Il Sistema Solare?



Un atomo?



Il Pianeta Terra

Il mondo in scala 1:10000000000

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri
- Raggio medio dell'orbita di Giove: 780 metri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri
- Raggio medio dell'orbita di Giove: 780 metri
- Diametro di Giove: 14 centimetri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri
- Raggio medio dell'orbita di Giove: 780 metri
- Diametro di Giove: 14 centimetri
- Raggio medio dell'orbita di Plutone: 5,9 chilometri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri
- Raggio medio dell'orbita di Giove: 780 metri
- Diametro di Giove: 14 centimetri
- Raggio medio dell'orbita di Plutone: 5,9 chilometri
- Diametro di Plutone: 2,3 millimetri

Il mondo in scala 1:10000000000

- Diametro della Terra: 1,2 centimetri
- Distanza media Terra-Luna: 38 centimetri
- Diametro della Luna: 3,4 millimetri
- Distanza Terra-Sole: 150 metri
- Diametro del Sole: 1,4 metri
- Raggio medio dell'orbita di Giove: 780 metri
- Diametro di Giove: 14 centimetri
- Raggio medio dell'orbita di Plutone: 5,9 chilometri
- Diametro di Plutone: 2,3 millimetri
- Distanza di Alpha Centauri: 41300 chilometri

Il mondo in scala 1:10000000000

La velocità della luce

(se non modifichiamo la scala dei tempi!)

Il mondo in scala 1:10000000000

La velocità della luce

(se non modifichiamo la scala dei tempi!)

30 centimetri al secondo

(circa otto minuti per percorrere 150 metri ...)

Il mondo in scala 100000000000000:1

Il mondo in scala 10000000000000000:1

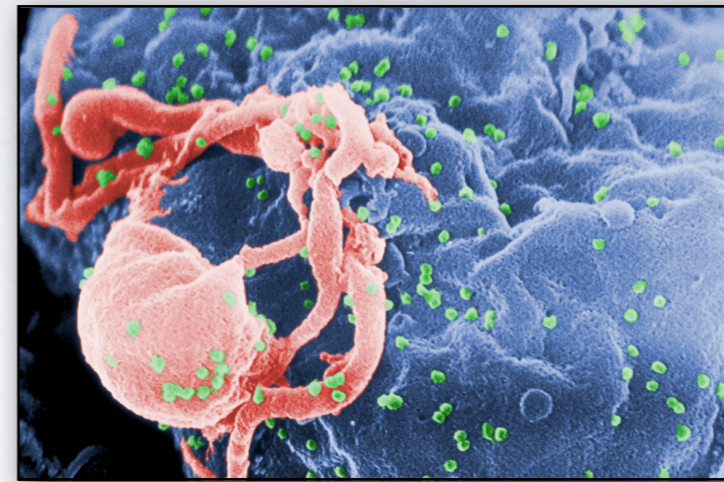
- Raggio del protone: 8 millimetri

Il mondo in scala 10000000000000000:1

- Raggio del protone: 8 millimetri
- Raggio dell'atomo di idrogeno: 500 metri

Il mondo in scala 10000000000000000000:1

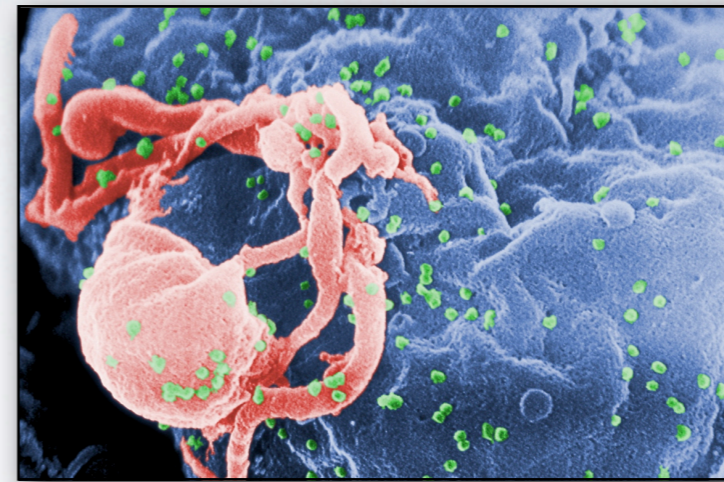
- Raggio del protone: 8 millimetri
- Raggio dell'atomo di idrogeno: 500 metri
- Dimensioni tipiche di un virus:
10 chilometri



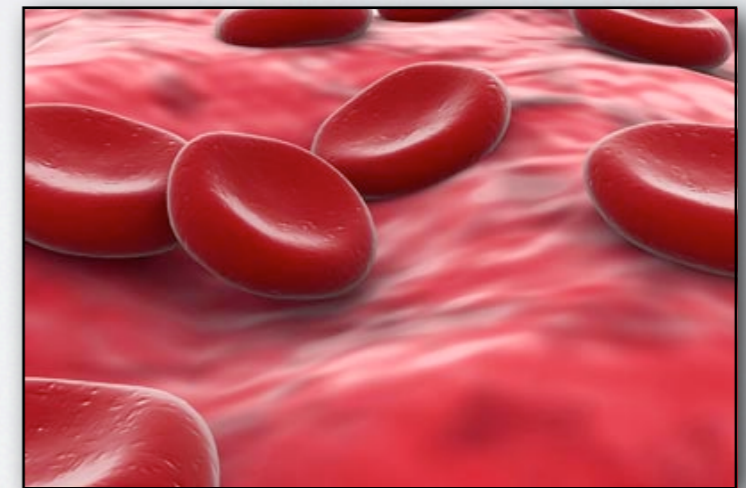
Il mondo in scala 10000000000000000000:1

- Raggio del protone: 8 millimetri
- Raggio dell'atomo di idrogeno: 500 metri

- Dimensioni tipiche di un virus:
10 chilometri



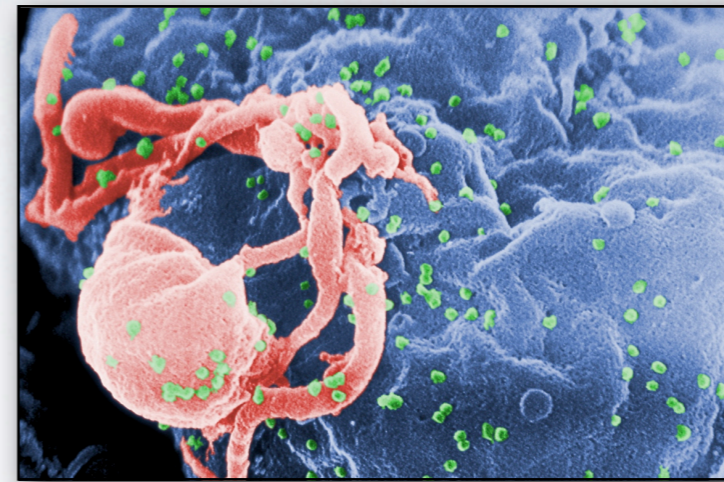
- Diametro di un globulo rosso umano:
700 chilometri



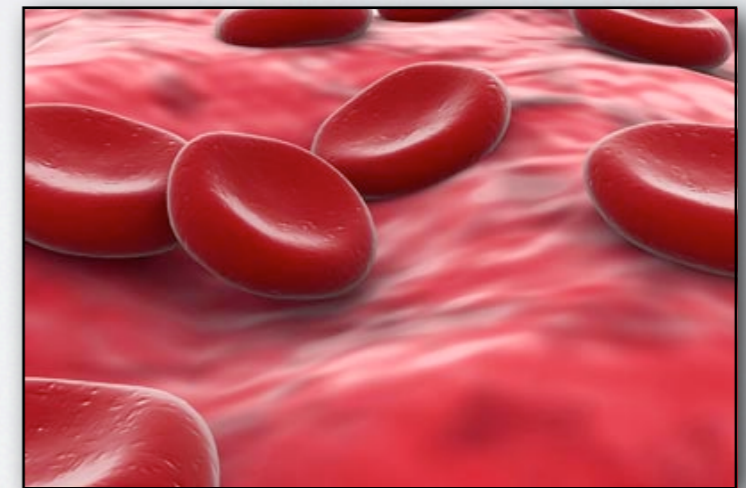
Il mondo in scala 10000000000000000000:1

- Raggio del protone: 8 millimetri
- Raggio dell'atomo di idrogeno: 500 metri

- Dimensioni tipiche di un virus:
10 chilometri



- Diametro di un globulo rosso umano:
700 chilometri

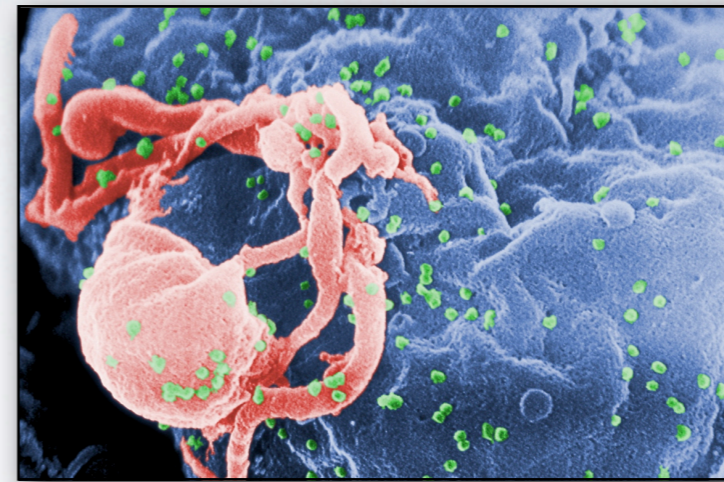


- Un metro: 10 miliardi di chilometri

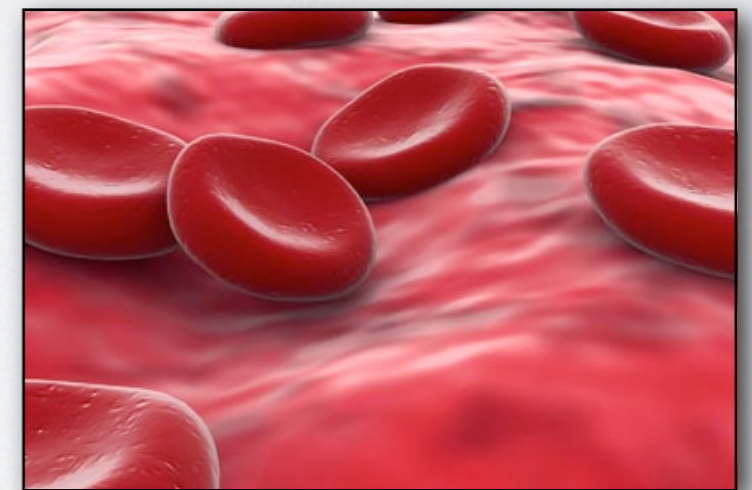
Il mondo in scala 10000000000000000000:1

- Raggio del protone: 8 millimetri
- Raggio dell'atomo di idrogeno: 500 metri

- Dimensioni tipiche di un virus:
10 chilometri



- Diametro di un globulo rosso umano:
700 chilometri



- Un metro: 10 miliardi di chilometri
- Un chilometro: 1 anno-luce

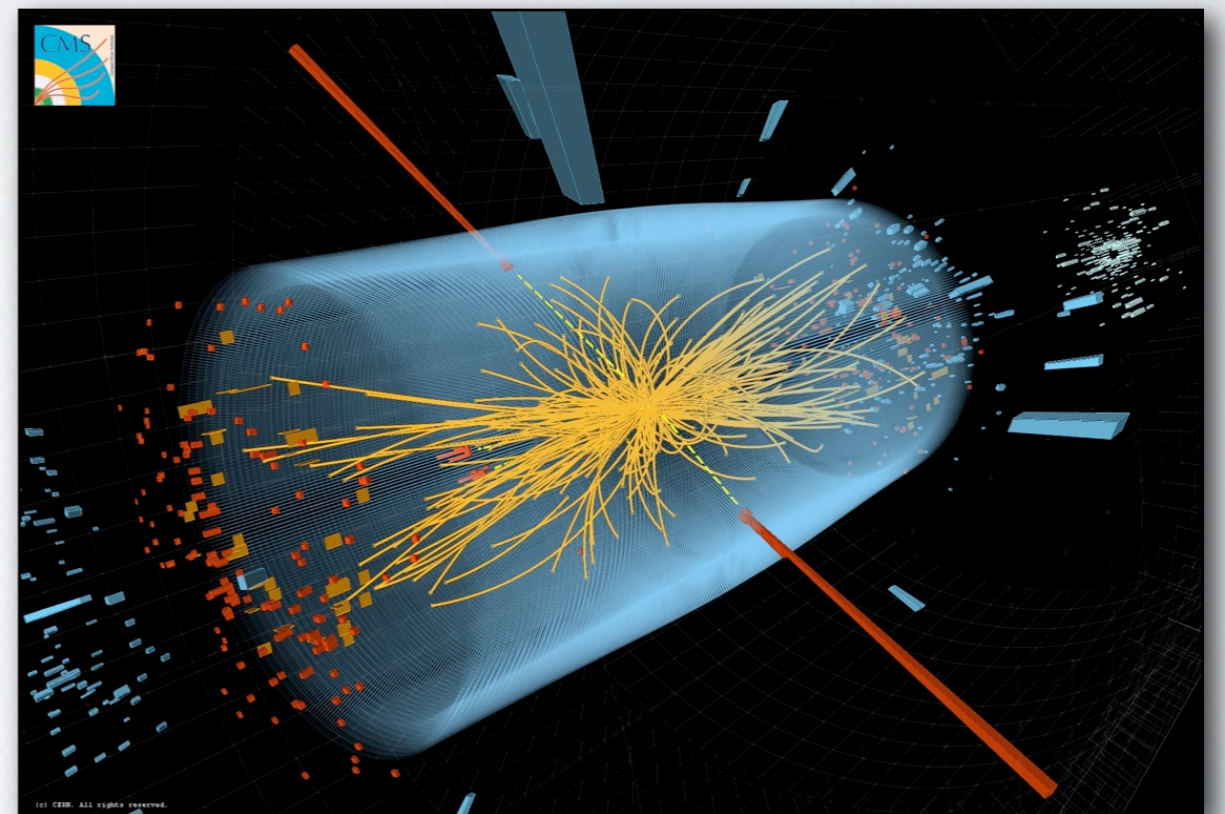
L'universo conosciuto



Hubble Deep Field

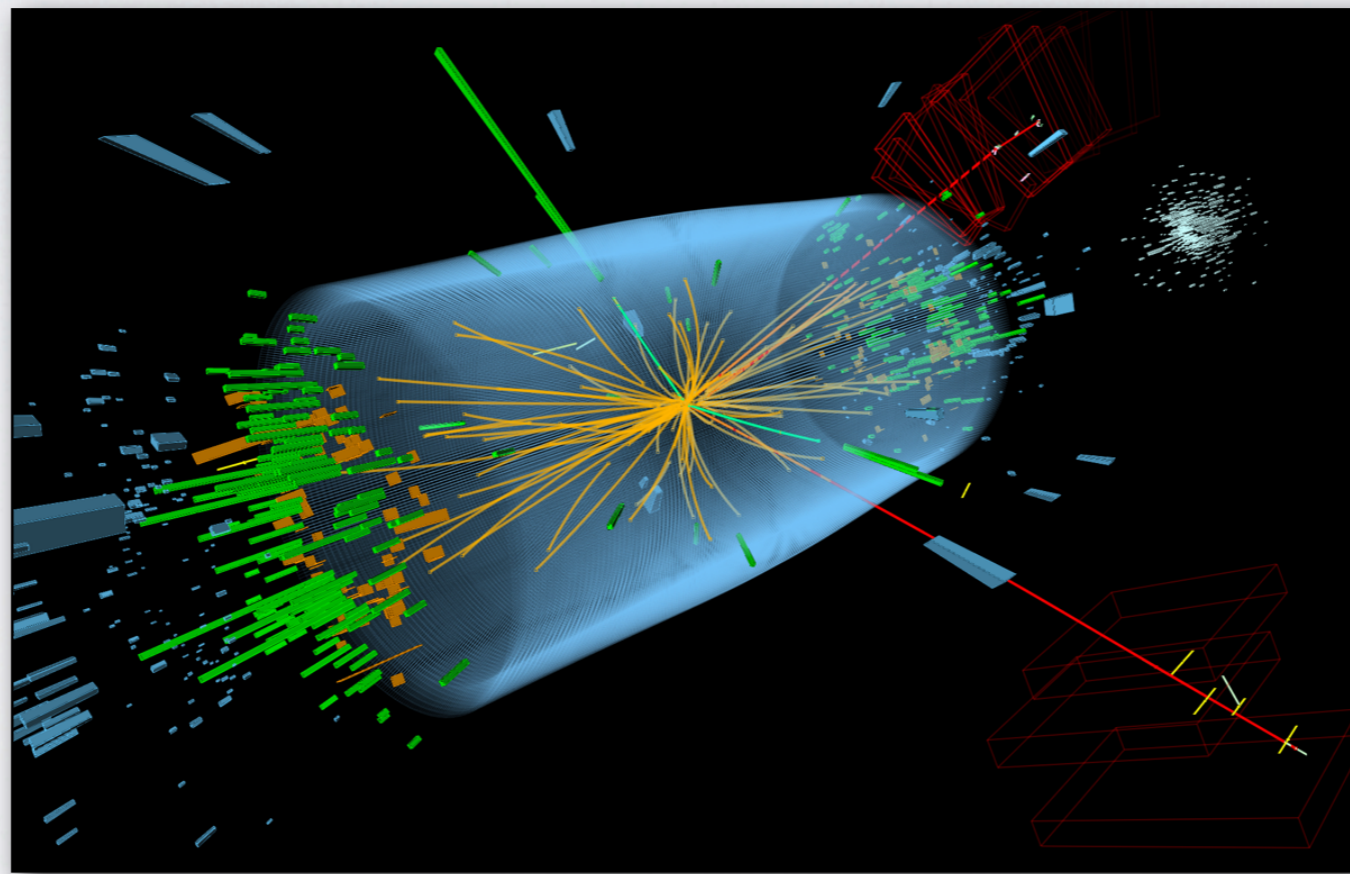
10^{26} metri

10^{-19} metri

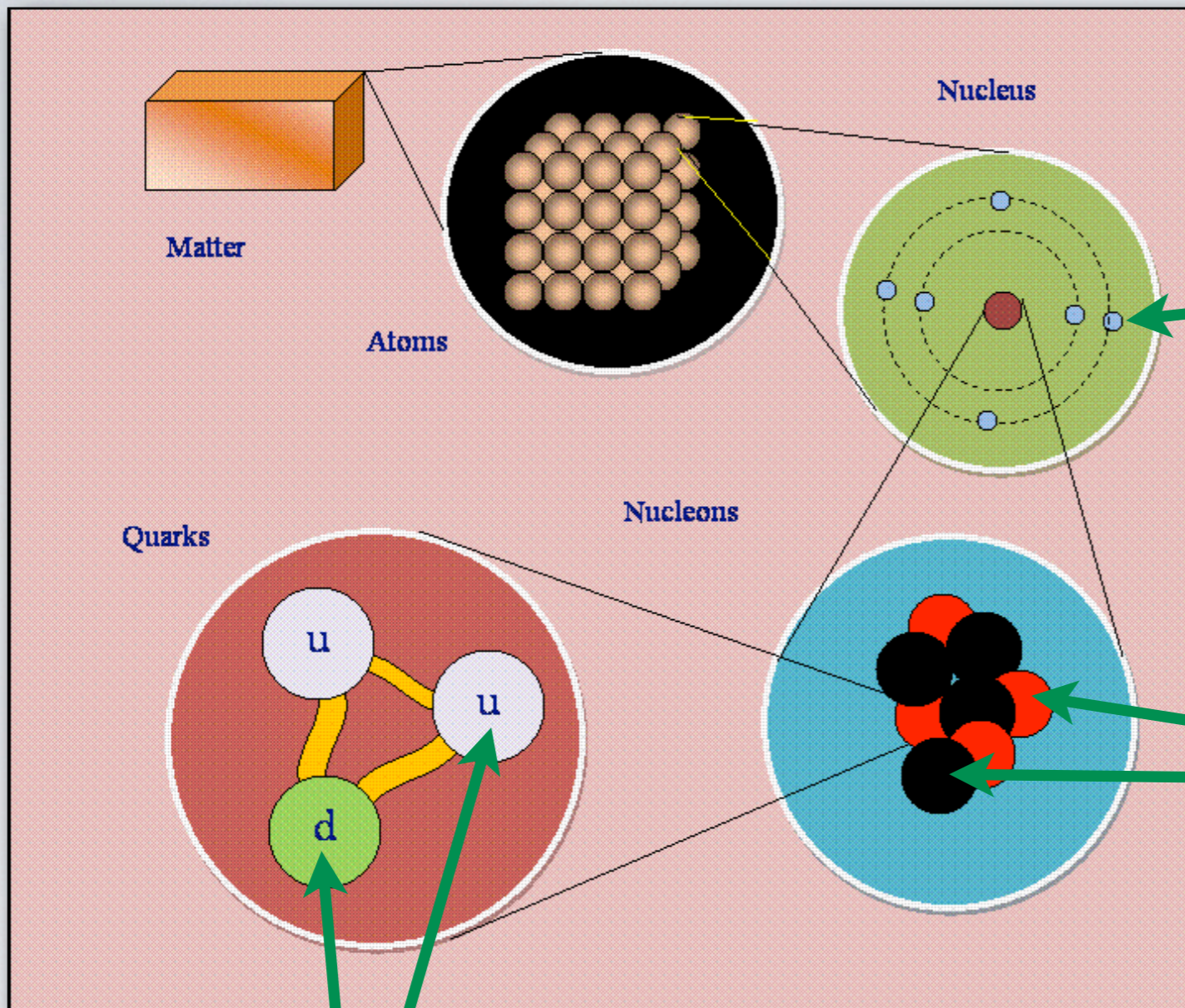


Un evento a LHC

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



Questa NON è una buona cartina!



elettroni

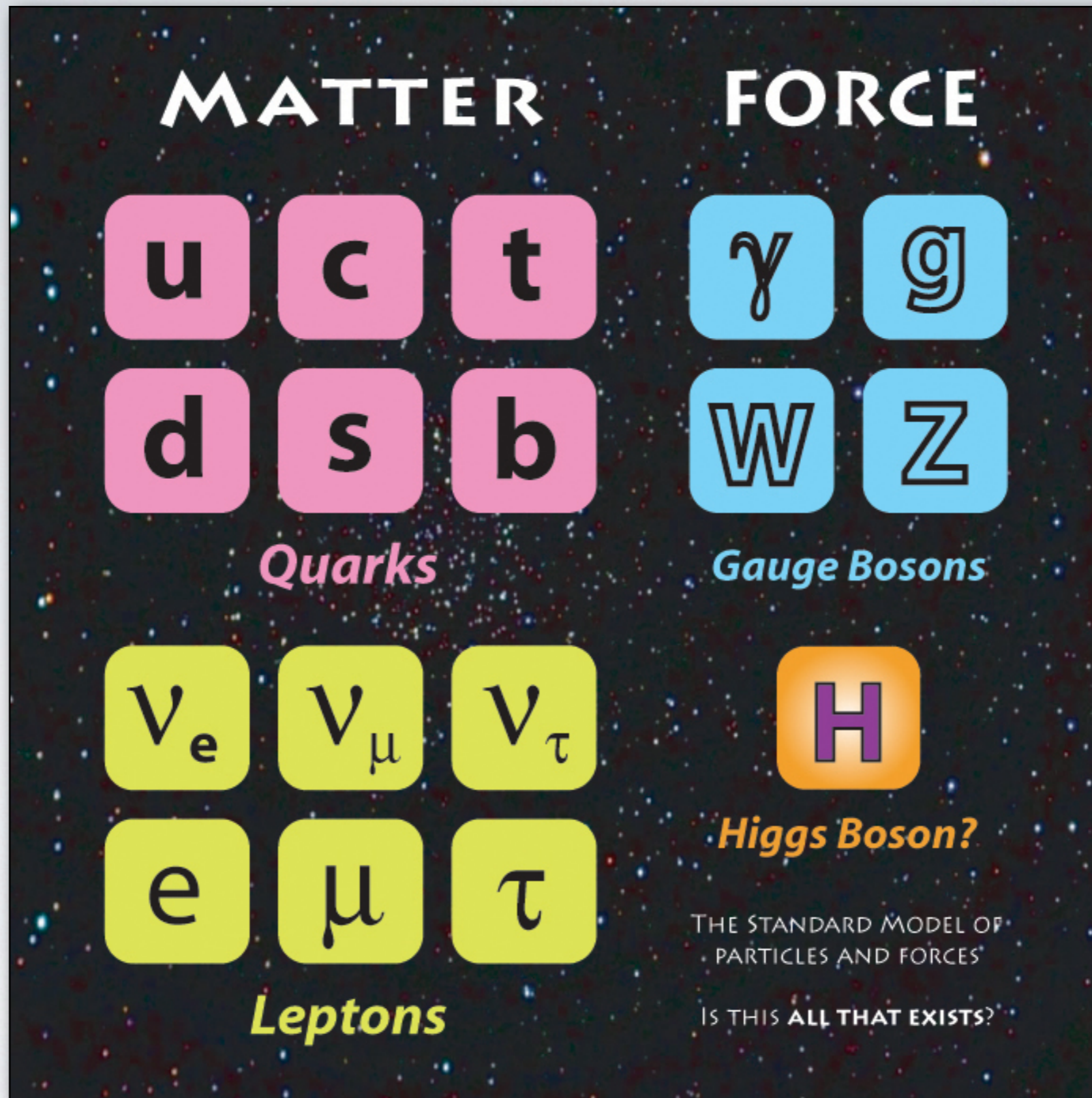
La carica dell'elettrone è scelta convenzionalmente come negativa: $e = -|e|$

protoni e neutroni

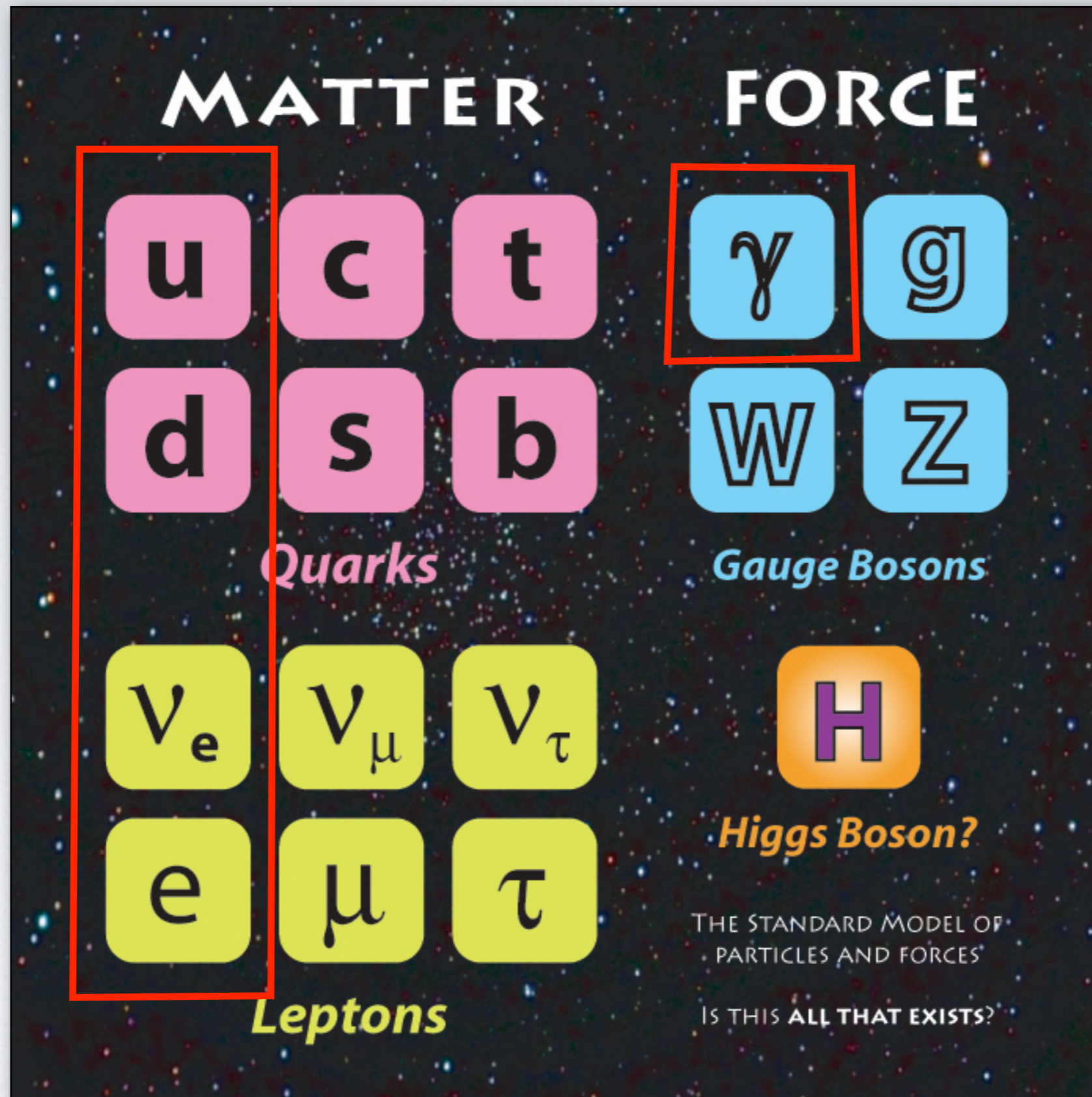
quark nel protone

I quark non esistono allo stato libero, sono permanentemente CONFINATI all'interno dei nucleoni

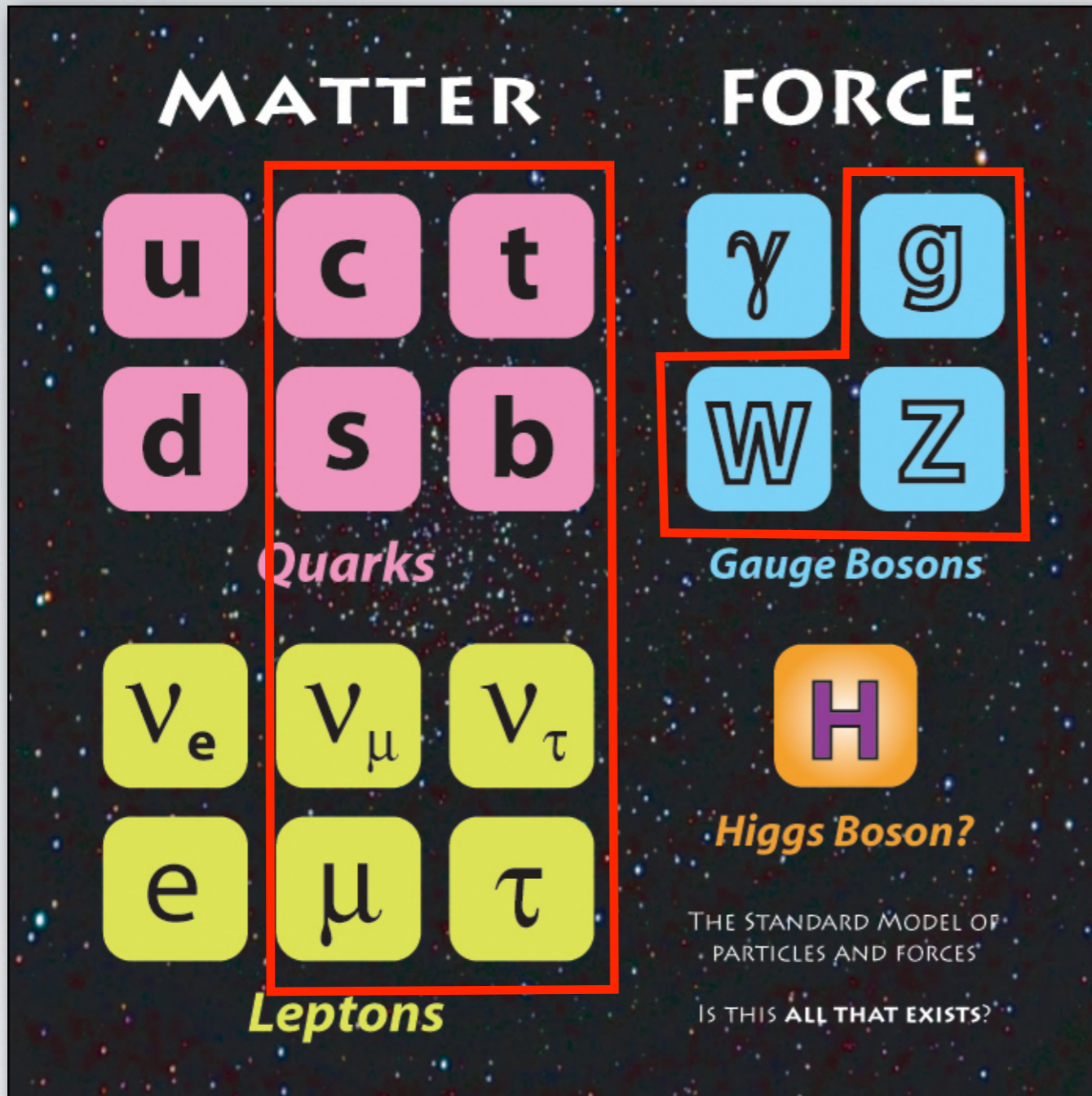
In unità di $|e|$, il quark UP ha carica elettrica $+2/3$, il quark DOWN ha carica elettrica $-1/3$, il protone ha carica $+1$



Tutte le particelle elementari del Modello Standard

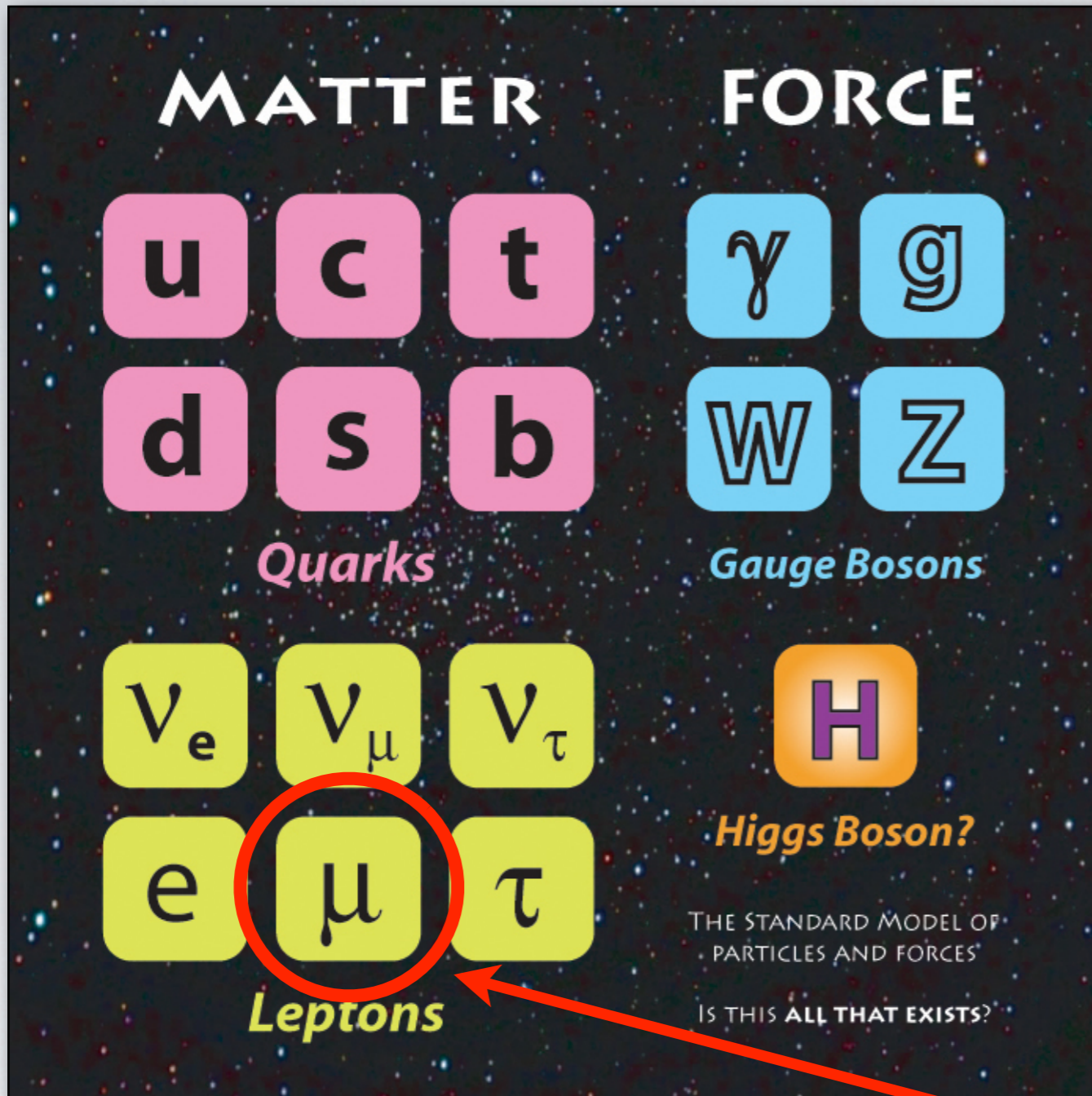


La materia ordinaria contiene solo alcune delle particelle note!



Gli altri "bosoni di gauge", che mediano le interazioni deboli (**W, Z**) e forti (i "gluoni" **g**) agiscono solo a distanze piccolissime, dell'ordine del raggio del protone

Esistono due copie ("seconda e terza generazione") delle particelle che compongono la materia ordinaria ("prima generazione"). Le "copie" hanno le stesse cariche e interazioni degli "originali", ma una massa più grande.



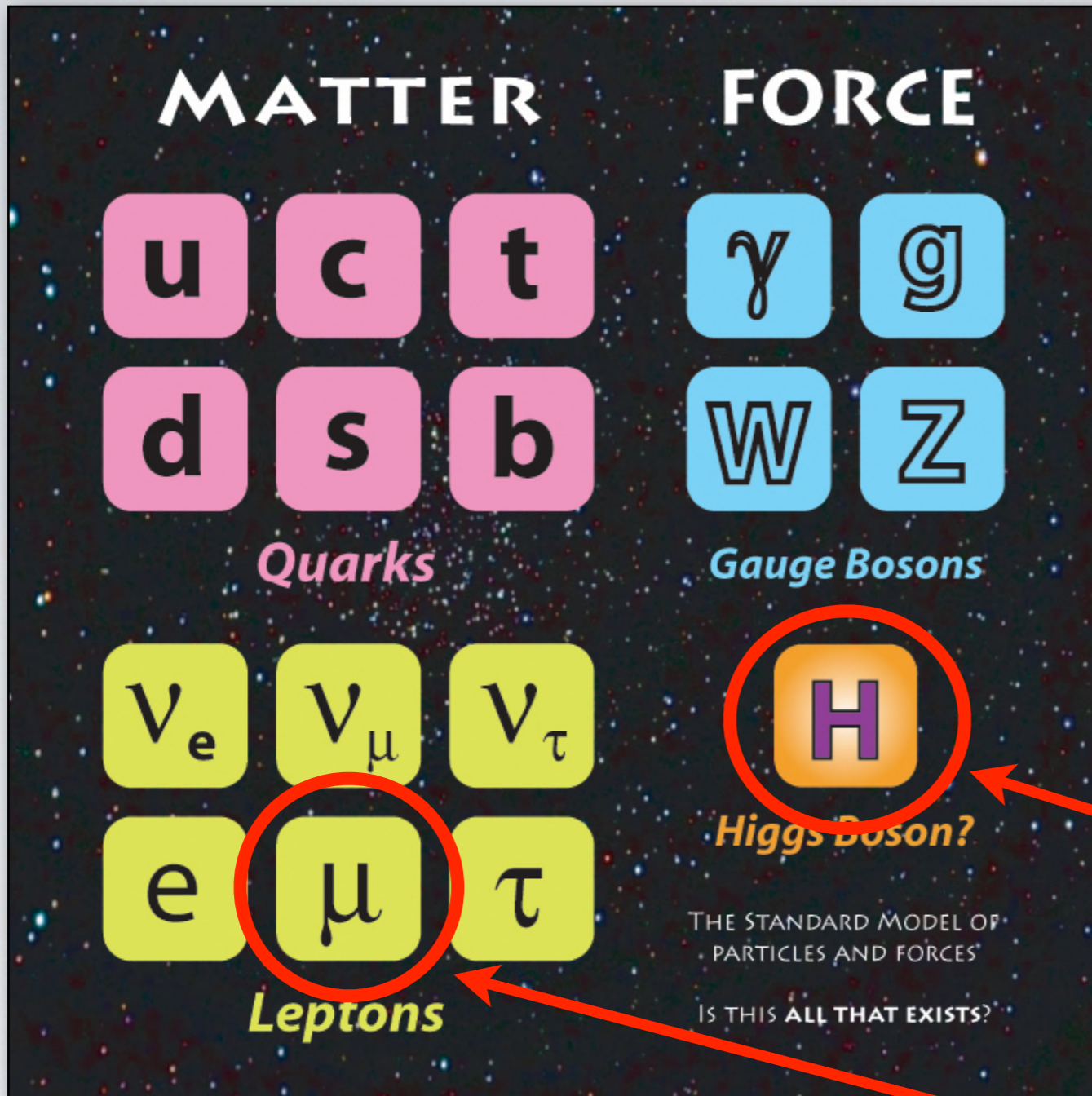
Gli altri "bosoni di gauge", che mediano le interazioni deboli (**W, Z**) e forti (i "gluoni" **g**) agiscono solo a distanze piccolissime, dell'ordine del raggio del protone

Esistono due copie ("seconda e terza generazione") delle particelle che compongono la materia ordinaria ("prima generazione"). Le "copie" hanno le stesse cariche e interazioni degli "originali", ma una massa più grande.

Who ordered that?



Isaac Rabi



Gli altri "bosoni di gauge", che mediano le interazioni deboli (**W, Z**) e forti (i "gluoni" **g**) agiscono solo a distanze piccolissime, dell'ordine del raggio del protone



Peter Higgs

It's about time!

Who ordered that?



Isaac Rabi

Esistono due copie ("seconda e terza generazione") delle particelle che compongono la materia ordinaria ("prima generazione"). Le "copie" hanno le stesse cariche e interazioni degli "originali", ma una massa più grande.

Il carattere delle particelle



Massa

- Massa del **protone**, m_p : circa $1 \text{ GeV}/c^2$...
... ovvero circa $1,7 \cdot 10^{-24}$ grammi.
- La massa del **protone** è quasi tutta dovuta all'**energia di legame** delle interazioni forti, le masse dei quark contribuiscono circa l'uno per cento ($E = m c^2$...).
- Massa dell'**elettrone**: circa duemila volte più piccola ...
... $9,1 \cdot 10^{-28}$ grammi.
- I **quark** hanno masse **molto diverse**: da 5-10 volte la massa dell'**elettrone** (per i quark **up** e **down**) fino a quasi 200 volte la massa del **protone** (il quark **top**).
- I **neutrini** hanno masse molto **piccole** (ma **non nulle!**). Sono stimate a circa **un milionesimo** della massa dell'**elettrone**.
- Le masse delle particelle elementari sono dunque **estremamente diverse** (un fattore 10^{11} !). Un problema **aperto!**

Il carattere delle particelle



Carica

- Le particelle elementari possono avere **diversi tipi di carica**:
elettrica, **debole**, **forte**.
- Le particelle con carica **elettrica** possono interagire tra loro scambiandosi **fotoni**.
Tutte le particelle del Modello Standard hanno carica **elettrica** tranne neutrini, **fotoni**, gluoni e il bosone di Higgs.
- Le particelle con carica **debole** possono interagire scambiandosi bosoni **W** e **Z**.
Tutte le particelle del Modello Standard hanno carica **debole** tranne fotoni e gluoni.
- Le particelle con carica **forte** possono interagire scambiandosi **gluoni**.
Solo i **quark** e i **gluoni** hanno carica **forte**.
- **Tutte** le particelle hanno interazioni **gravitazionali**.
Queste sono tuttavia **estremamente più deboli** di tutte le altre!

Il carattere delle particelle



Spin

- Le particelle elementari si comportano in modo simile a trottole ... ma il loro momento angolare (**spin**) è quantizzato.

$$\mathbf{S} = s \hbar , \quad s = 0, 1/2, 1, 3/2, 2, \dots$$

- Si tratta **solo di una analogia!** Matematicamente, le particelle di spin s sono descritte da quantità simili a **vettori**, ma con $(2s + 1)$ componenti invece di 3 come i **comuni vettori**.
- Invece di distinguere le particelle tra “**materia**” e “**forza**”, è molto più **significativo** distinguerle secondo lo **spin**.
 - * Le particelle che **trasmettono le interazioni** hanno **spin intero** e sono chiamate **bosoni**.
 - * Le particelle che chiamiamo “**materia**” hanno **spin semi-intero** e sono chiamate **fermioni**.
- Tutte le particelle hanno una **sorella gemella**: una **anti-particella** con **uguale massa e spin**, ma tutte le **cariche cambiate di segno**.

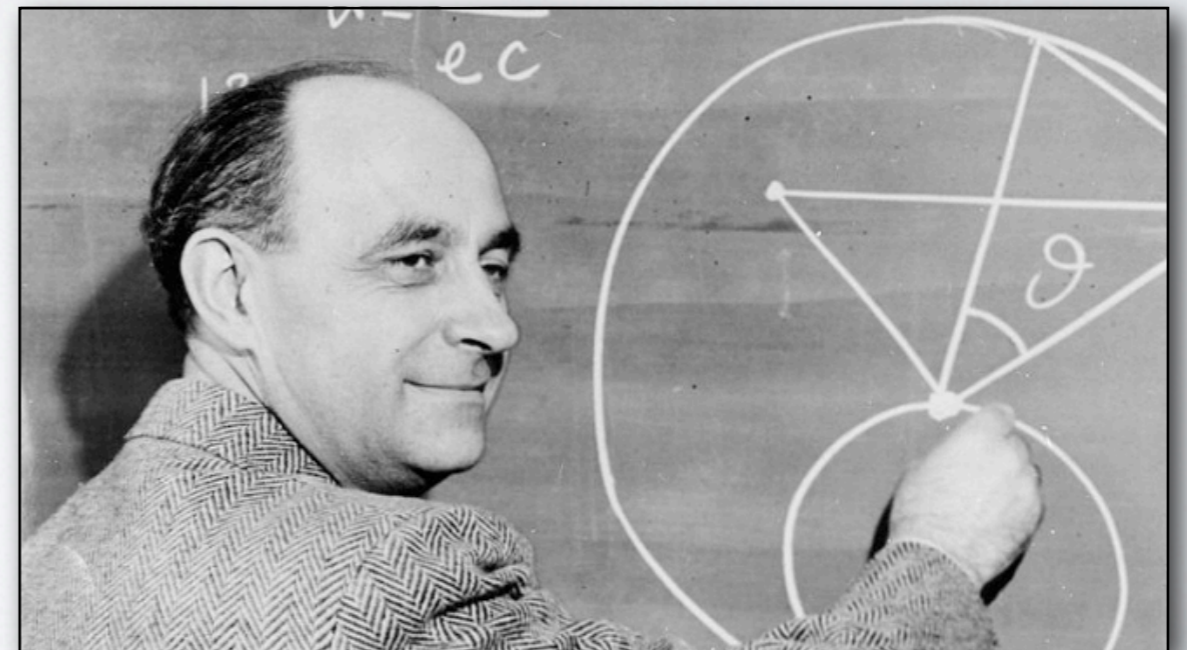
Bosoni e Fermioni



Satyendra Bose

- I **bosoni** hanno spin **intero**.
- Un **insieme di bosoni** si dispone preferenzialmente in modo che **tutte le particelle** siano nello **stesso stato**.
- I **fotoni** sono **bosoni** (hanno spin $s = 1$).
- La preferenza dei fotoni per l'occupazione multipla di uno stesso stato è alla base del funzionamento dei **raggi laser** (luce composta da fotoni che hanno la stessa frequenza e polarizzazione).

- I **fermioni** hanno spin **semi-intero**.
- **Due fermioni** interagenti **non possono** occupare lo **stesso stato**.
- Gli **elettroni** sono **fermioni** (hanno spin $s = 1/2$).
- Il fatto che gli elettroni siano fermioni sta alla base della **struttura atomica** e della **chimica**.



Enrico Fermi

Bosoni e Fermioni



Bosoni

Bosoni e Fermioni

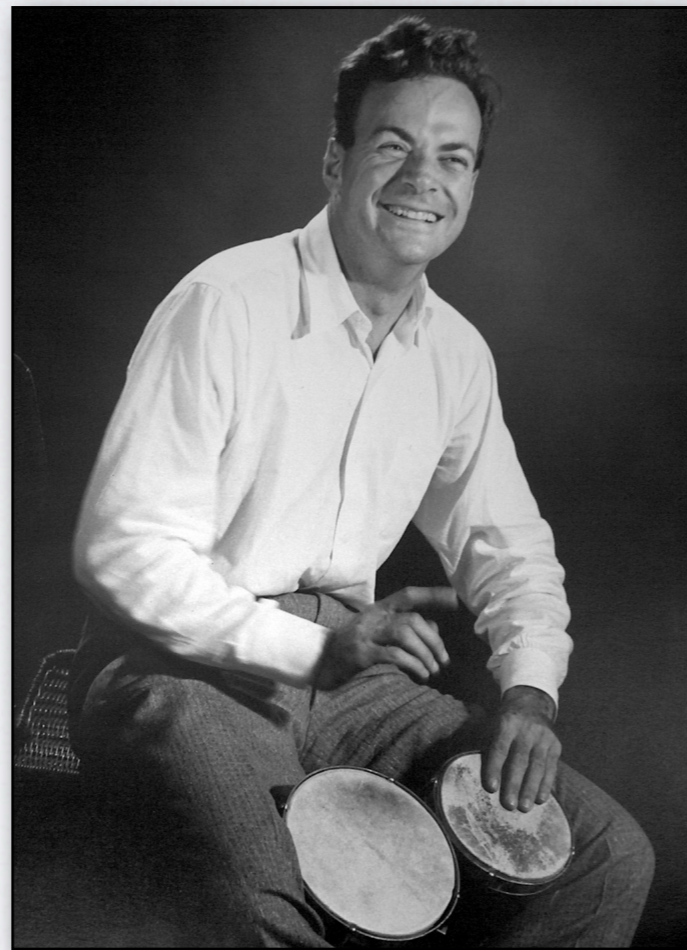


Bosoni

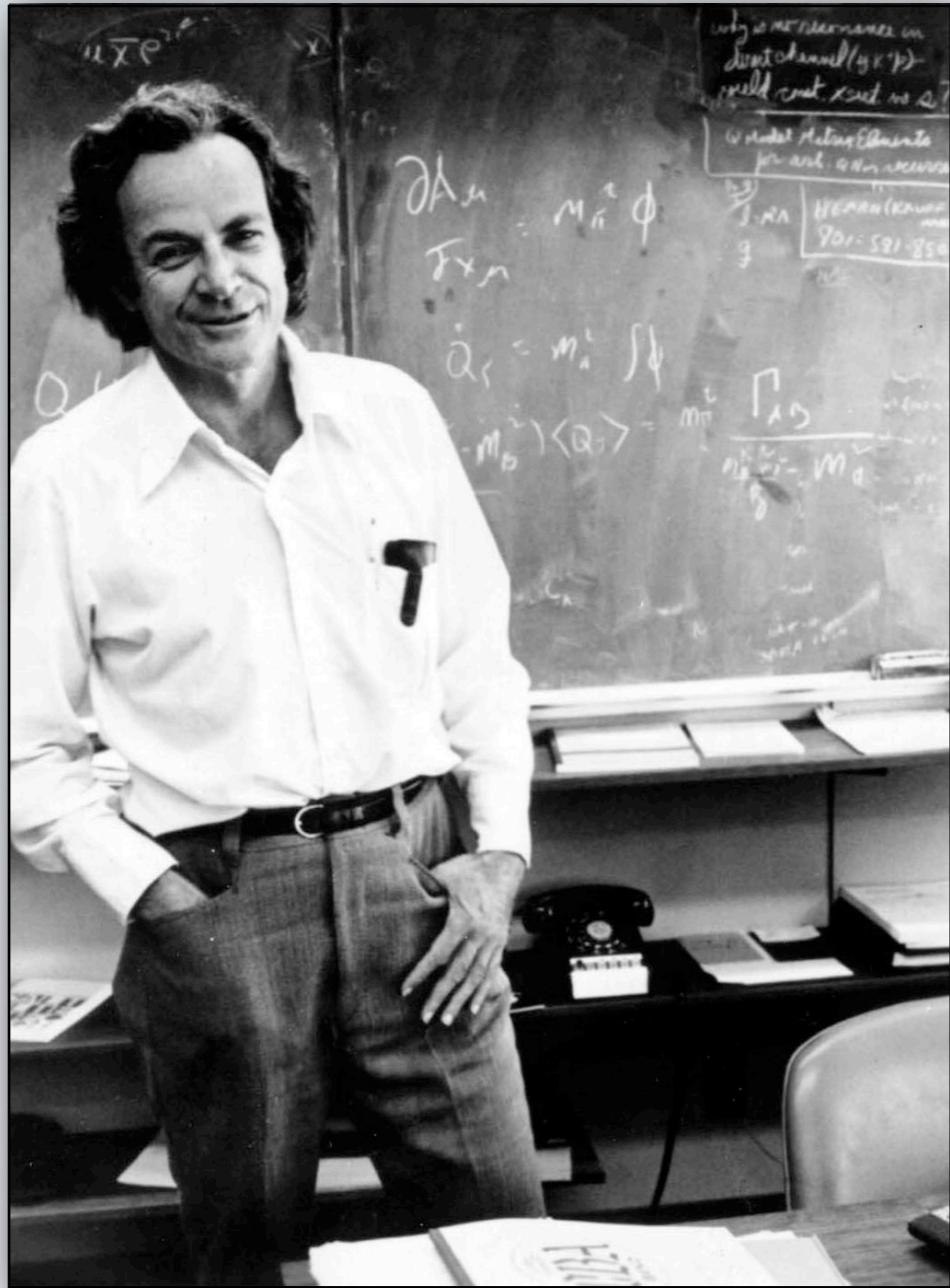
Fermione



I DISEGNI DI FEYNMAN

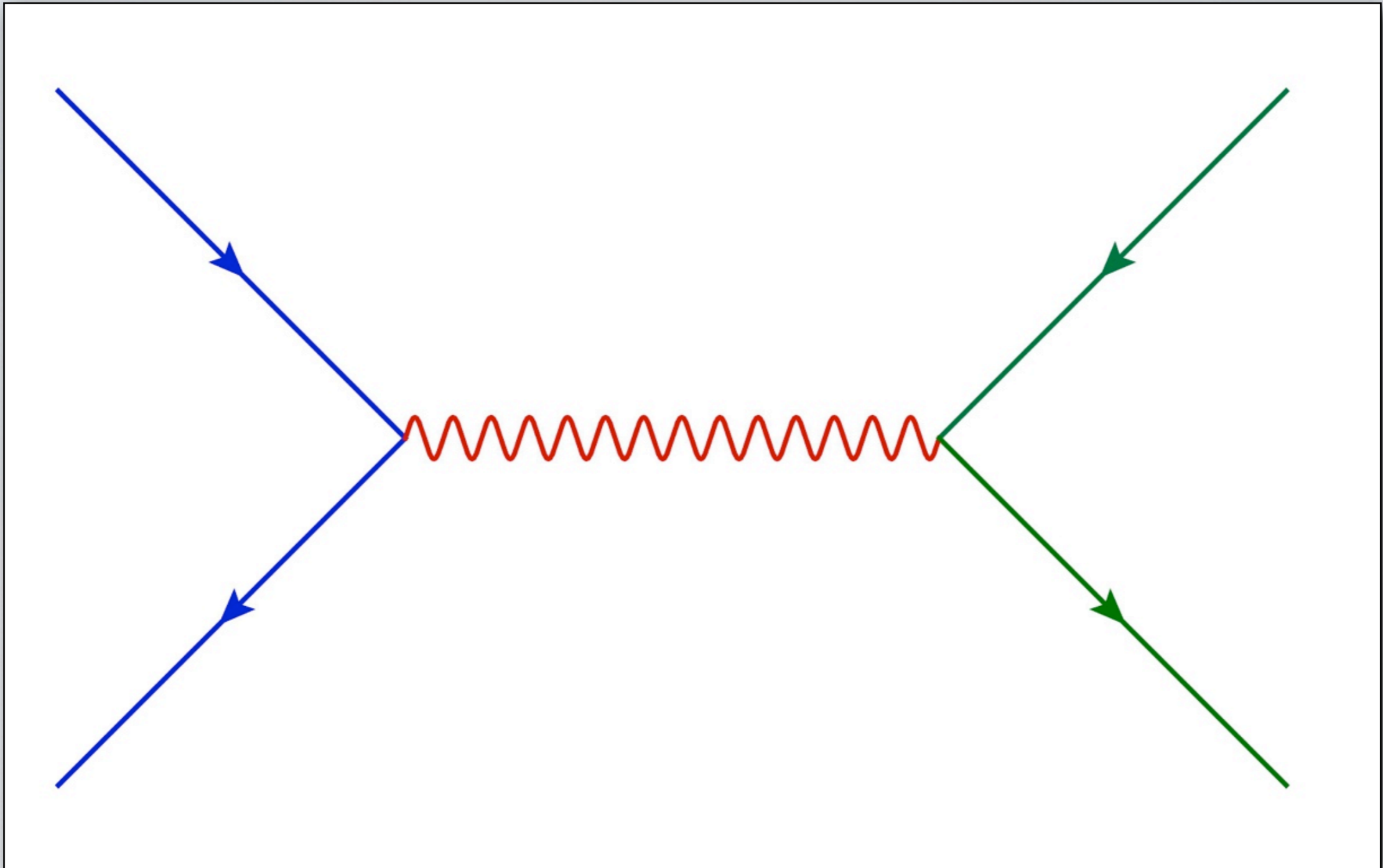


Richard Feynman

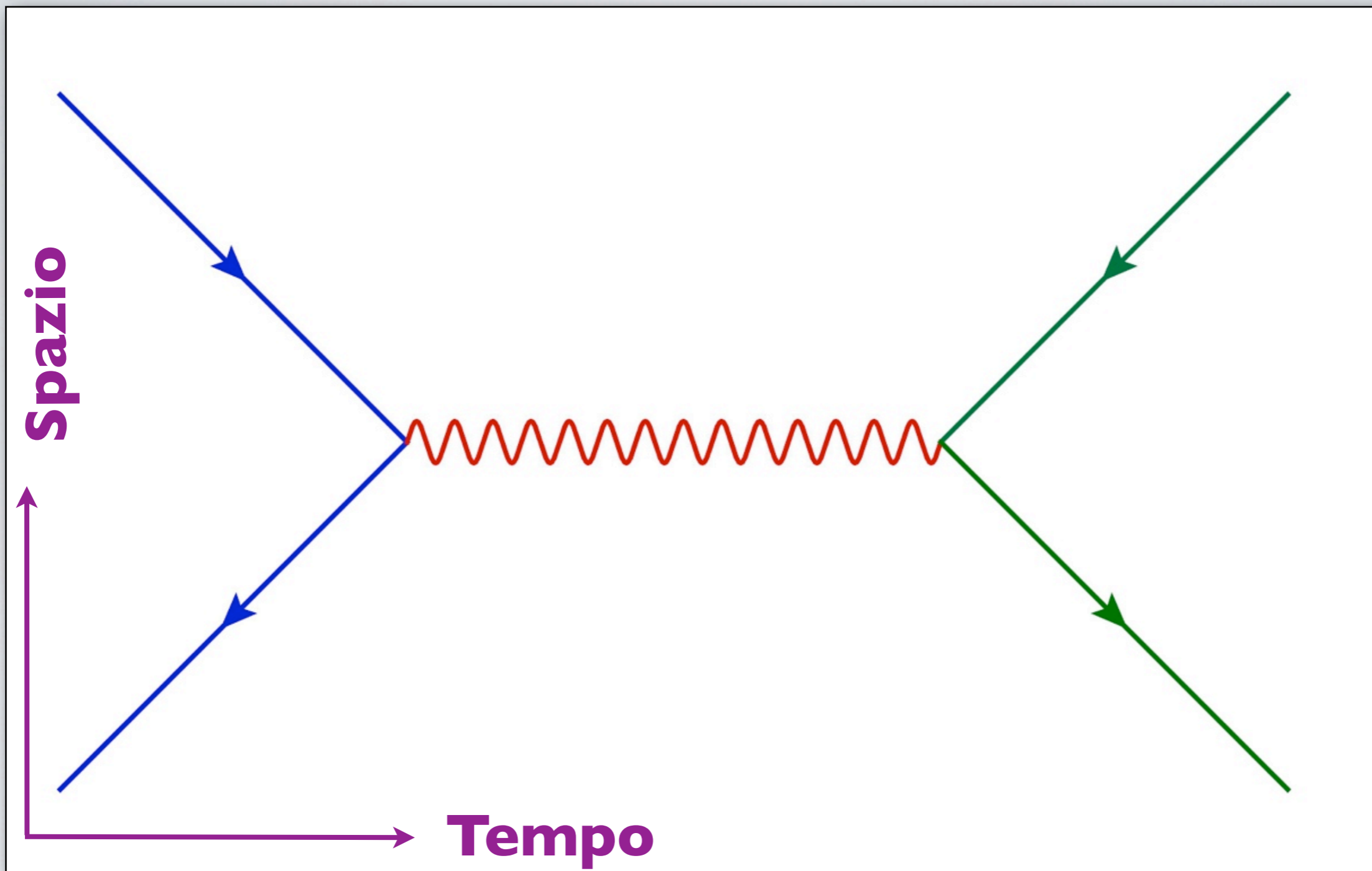


Richard Feynman (1918-1988)

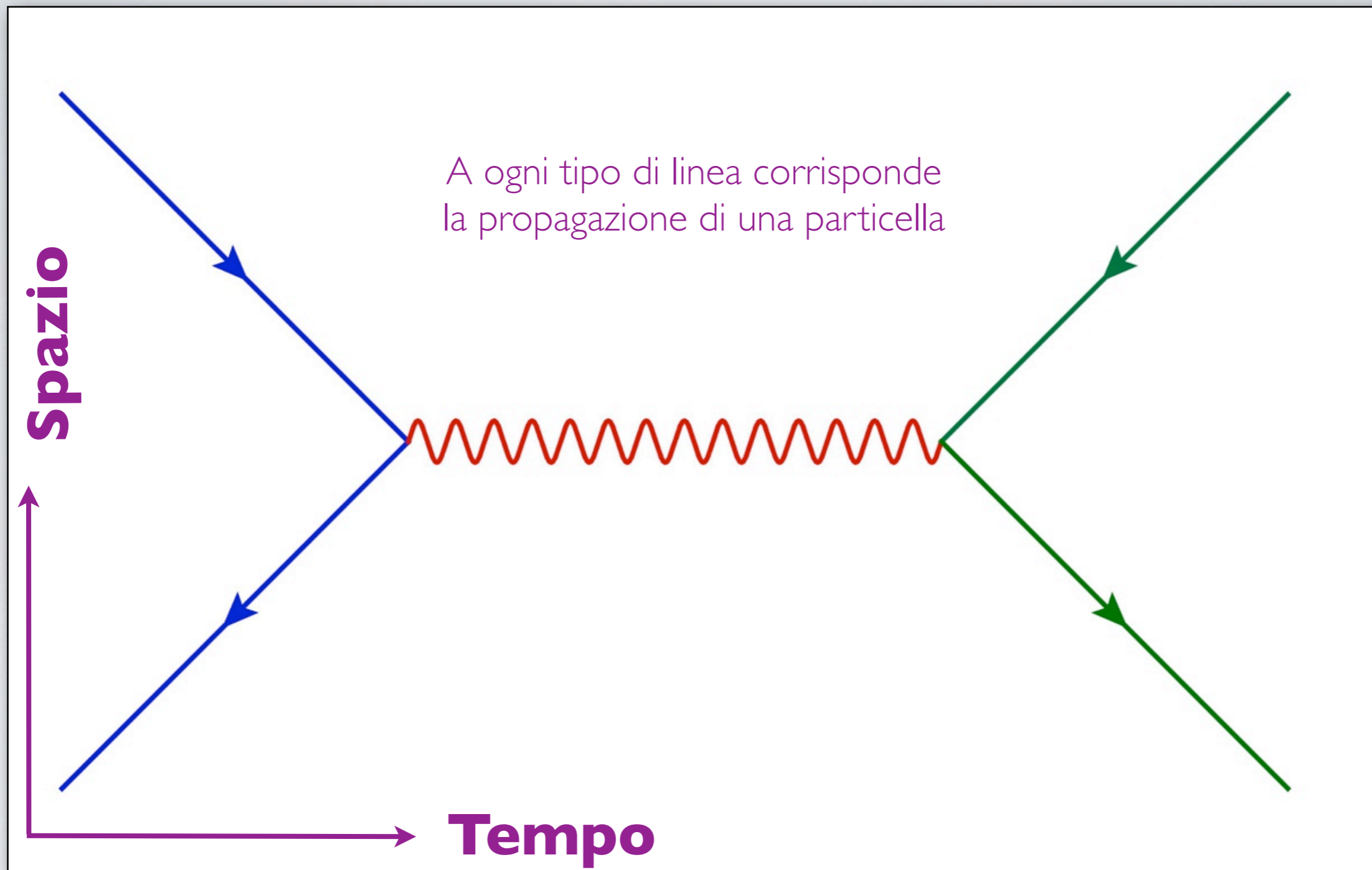
- Grande **educatore**, discreto **percussionista**, **scassinatore** a tempo perso,
- Premio **Nobel** per la Fisica 1965.
- Tra i protagonisti del **Progetto Manhattan**.
- Feynman fu tra gli sviluppatori della **prima teoria di campo quantistica**: l'elettrodinamica quantistica (**QED**), una delle basi del Modello Standard.
- Feynman inventò un metodo **grafico** elegante e intuitivo per **rappresentare i calcoli** della teoria quantistica dei campi.
- Il metodo è applicabile in tutti i casi in cui le **interazioni** tra particelle **non** siano **troppo forti**. In tal caso è del tutto generale ed è **alla base** anche **dei calcoli attuali** per le collisioni tra particelle a **LHC**.



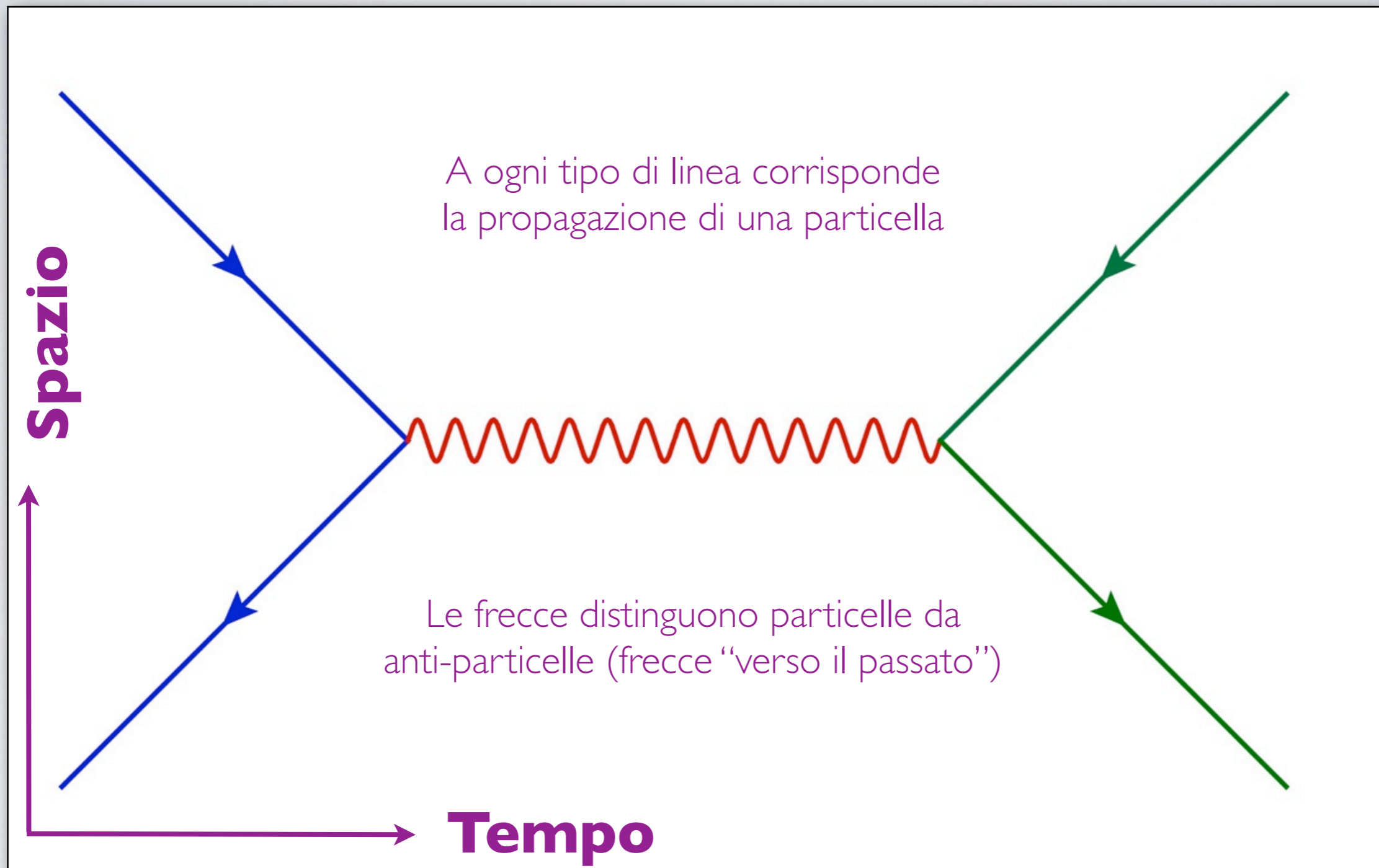
Un diagramma di Feynman per il processo $(\text{elettrone} + \text{positrone}) \Rightarrow (\text{muone} + \text{antimuone})$



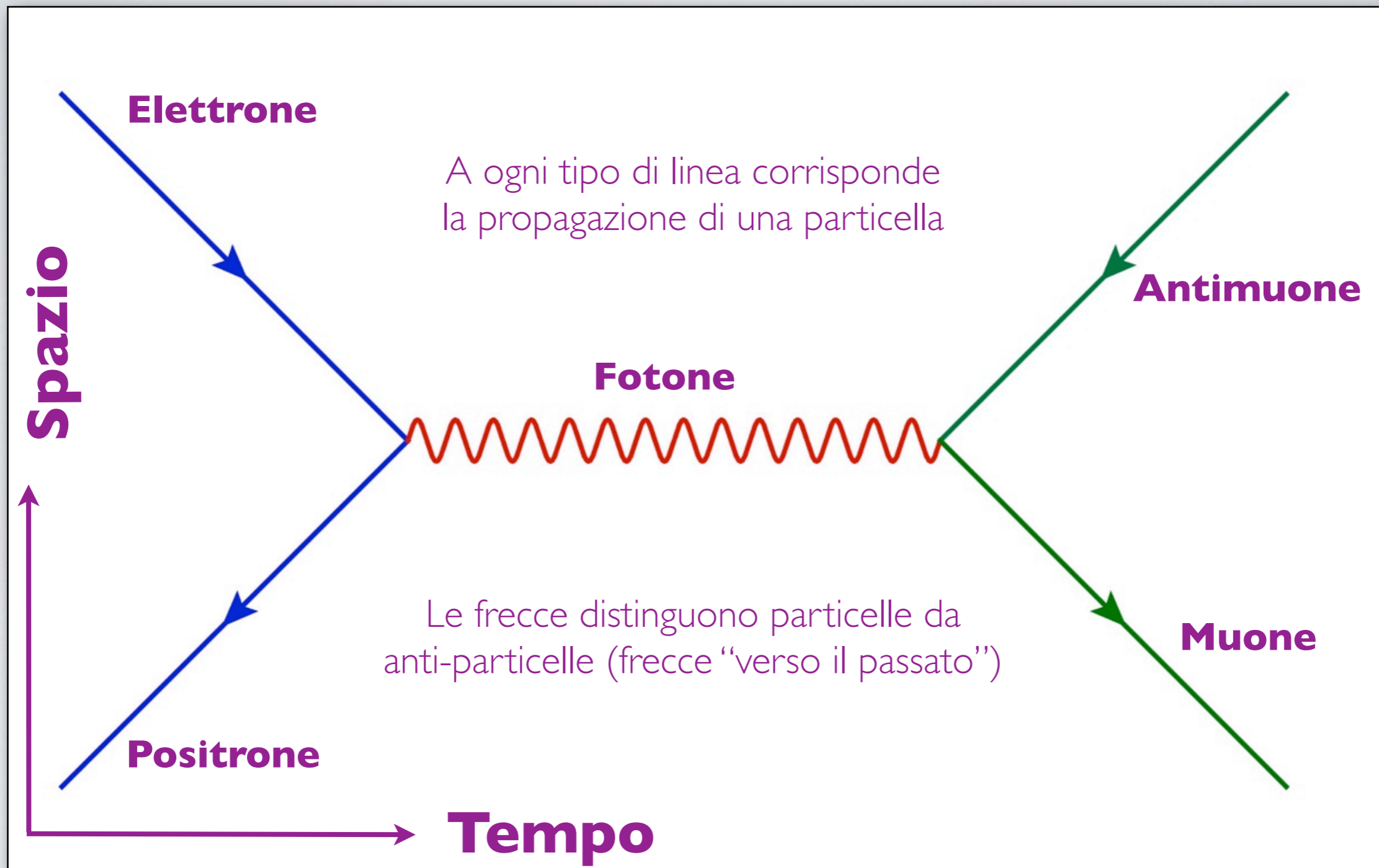
Un diagramma di Feynman per il processo $(\text{elettrone} + \text{positrone}) \Rightarrow (\text{muone} + \text{antimuone})$



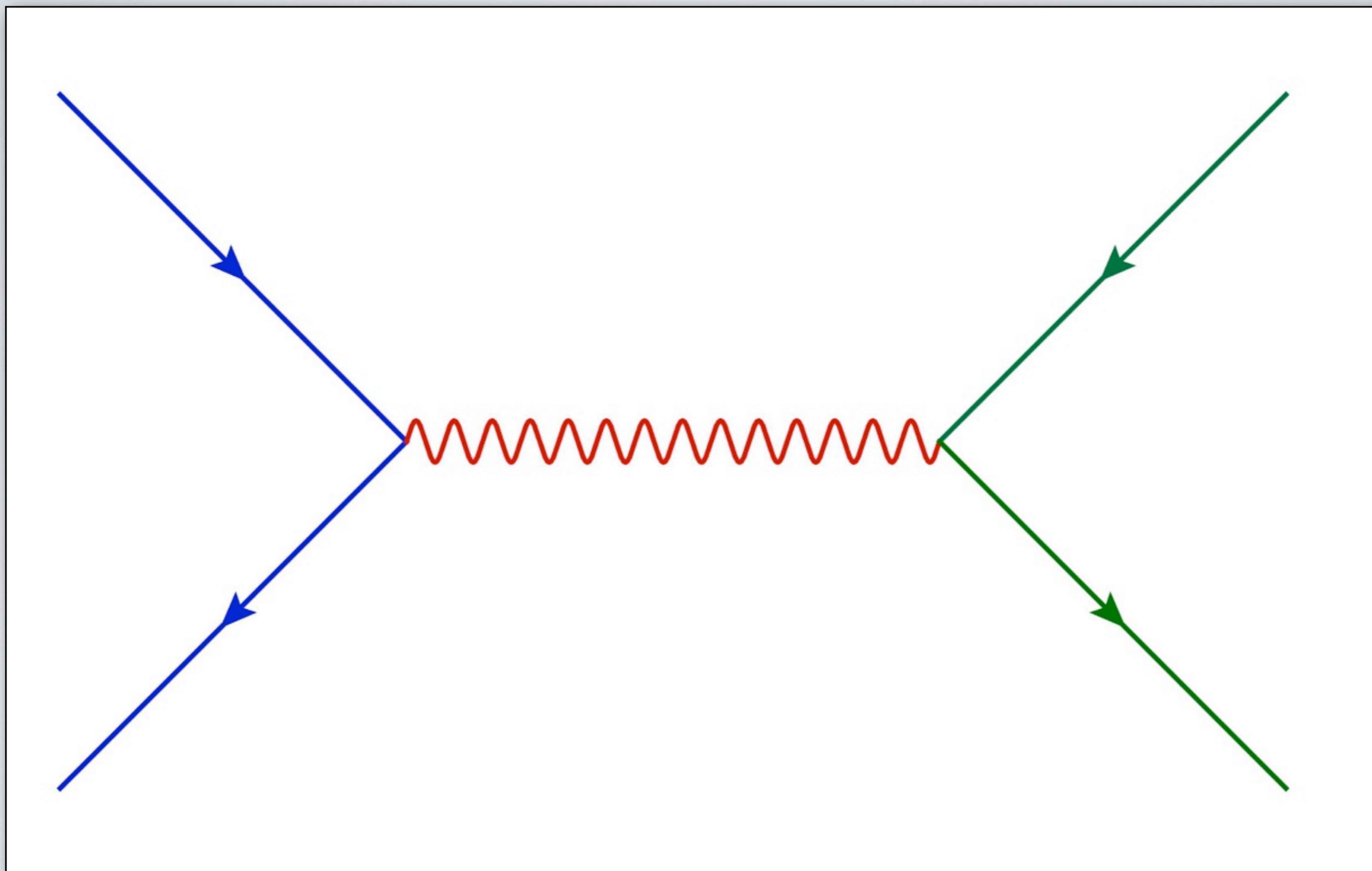
Un diagramma di Feynman per il processo $(\text{elettrone} + \text{positrone}) \Rightarrow (\text{muone} + \text{antimuone})$



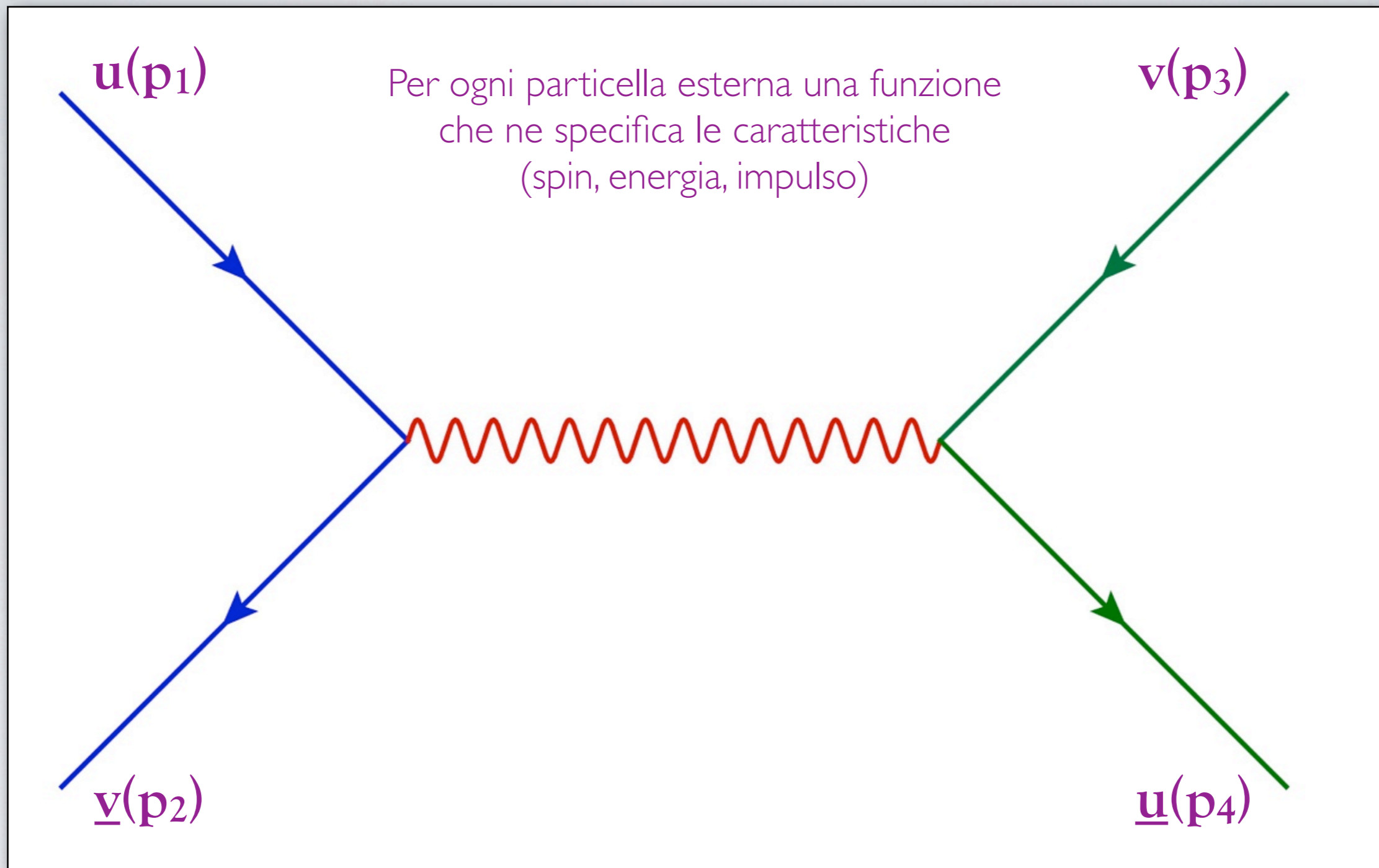
Un diagramma di Feynman per il processo $(e^- + e^+) \Rightarrow (\mu^- + \mu^+)$



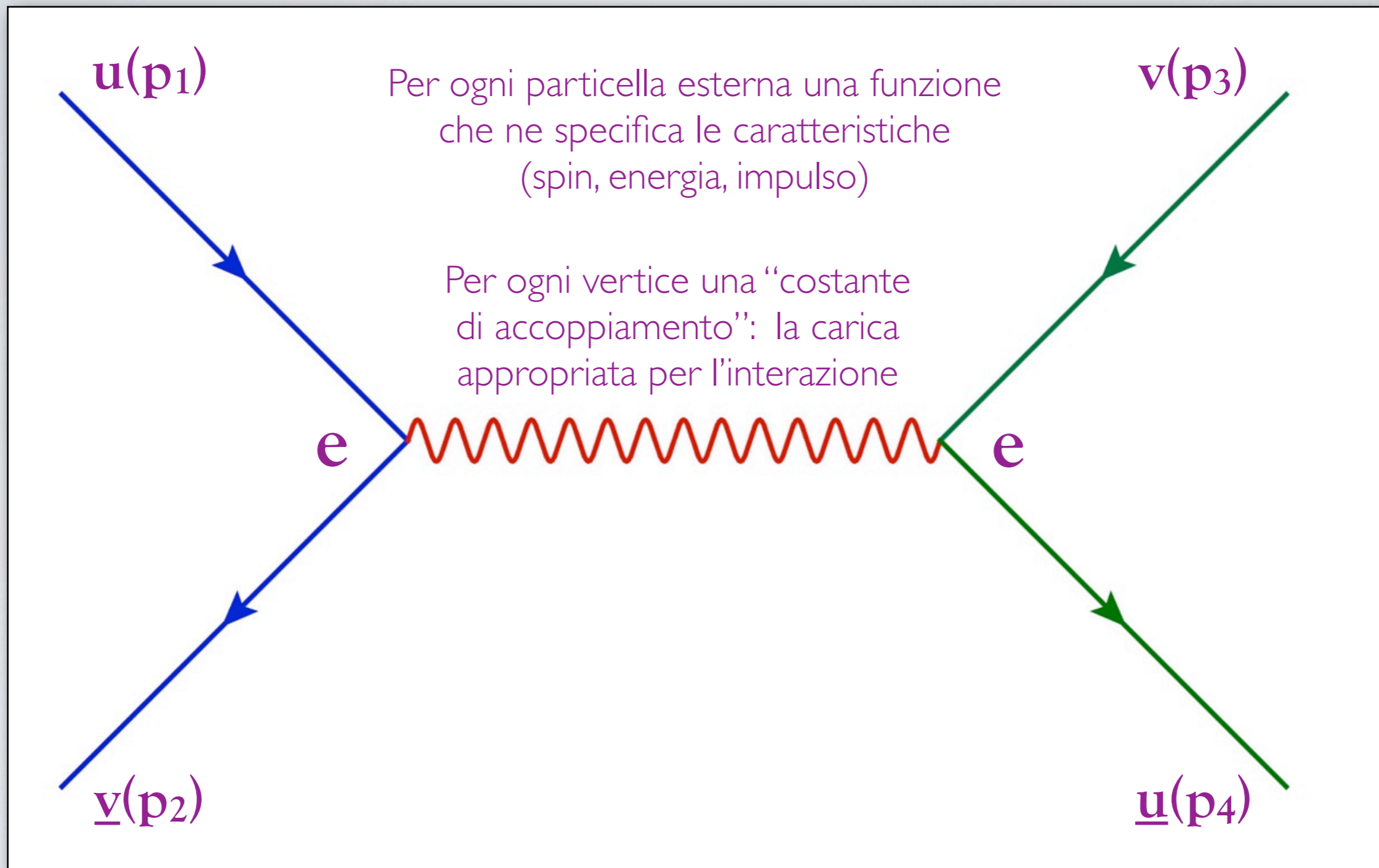
Un diagramma di Feynman per il processo $(\text{elettrone} + \text{positrone}) \Rightarrow (\text{muone} + \text{antimuone})$



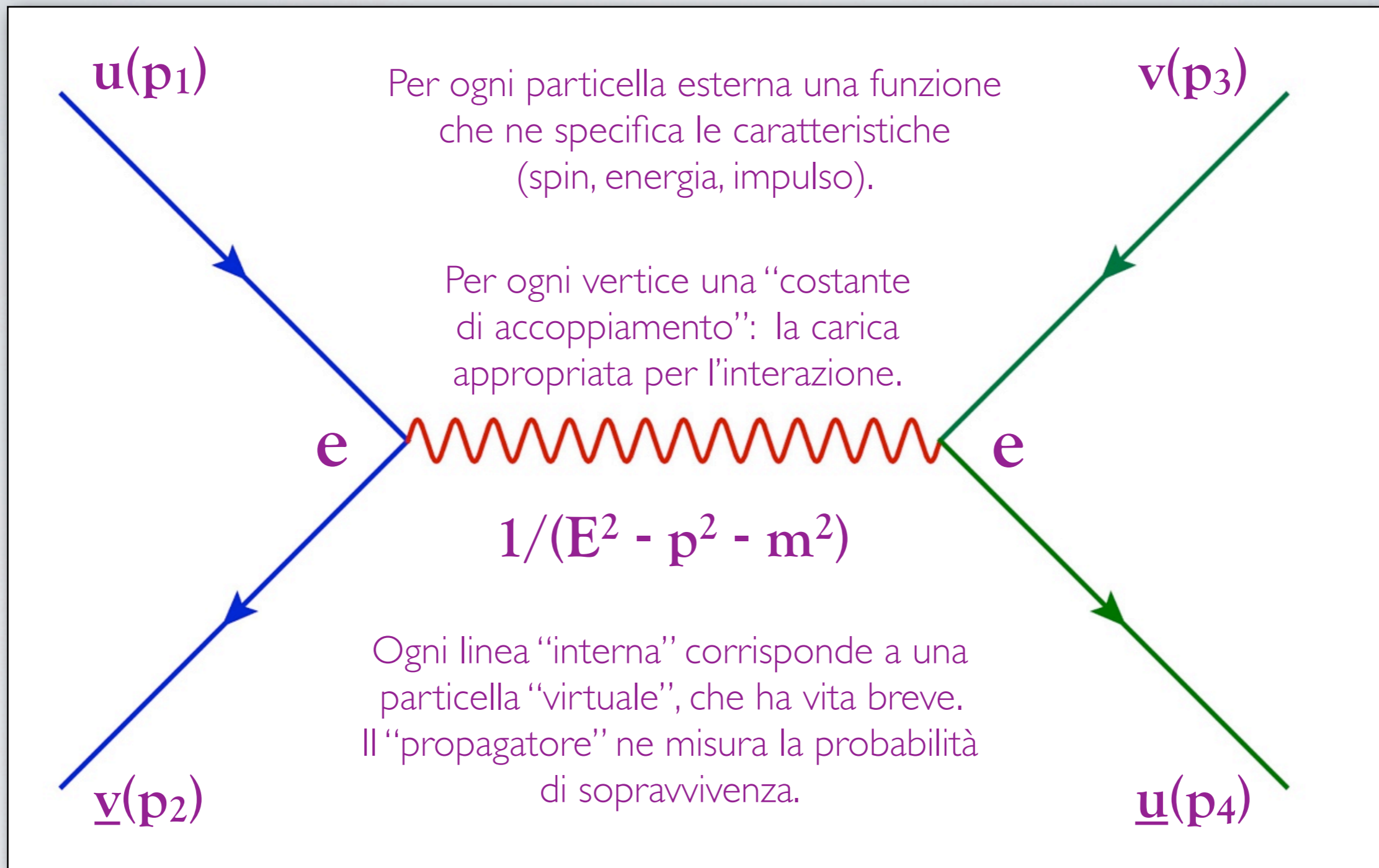
A ogni elemento grafico corrisponde una precisa espressione matematica!



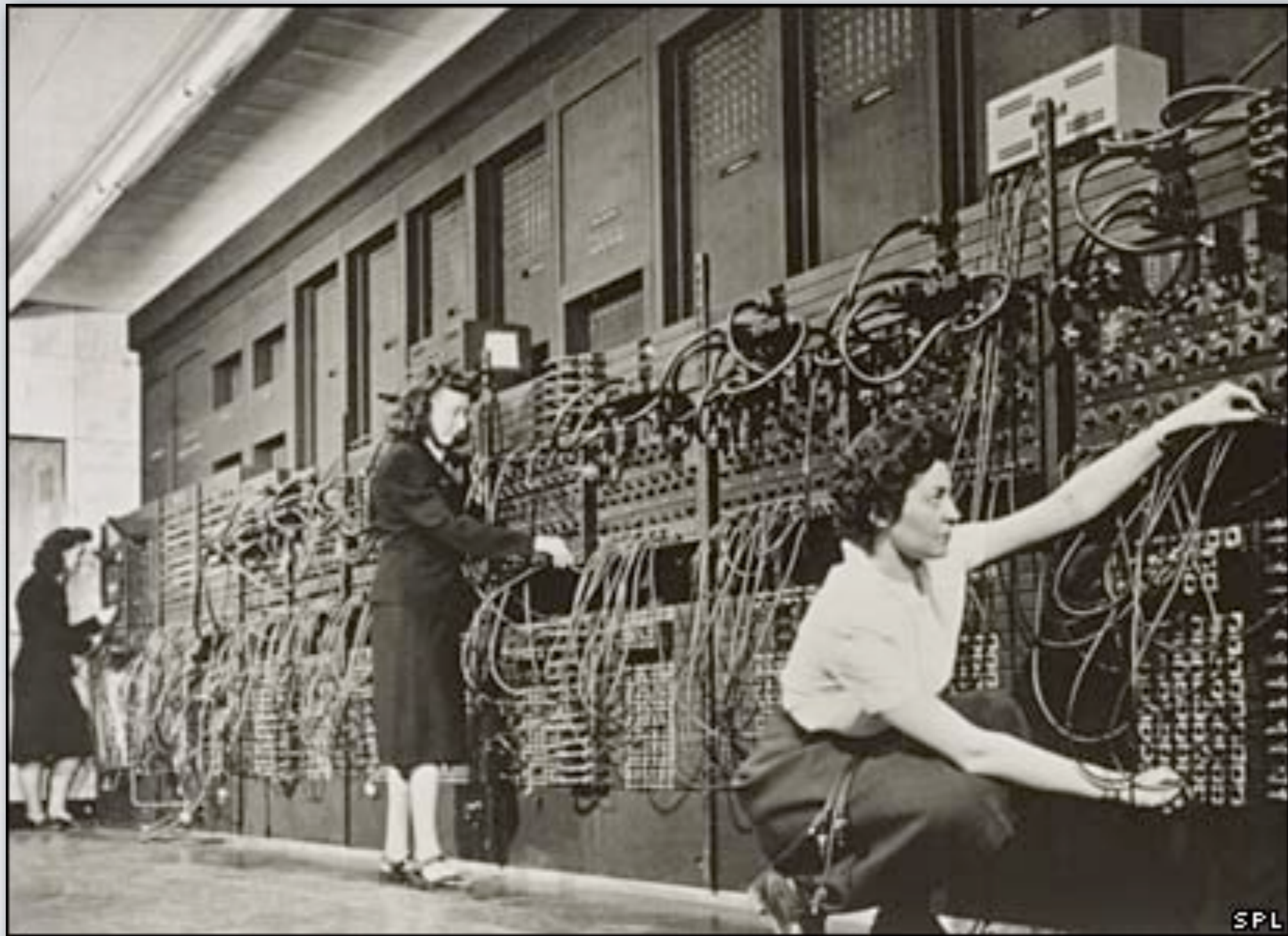
A ogni elemento grafico corrisponde una precisa espressione matematica!



A ogni elemento grafico corrisponde una precisa espressione matematica!



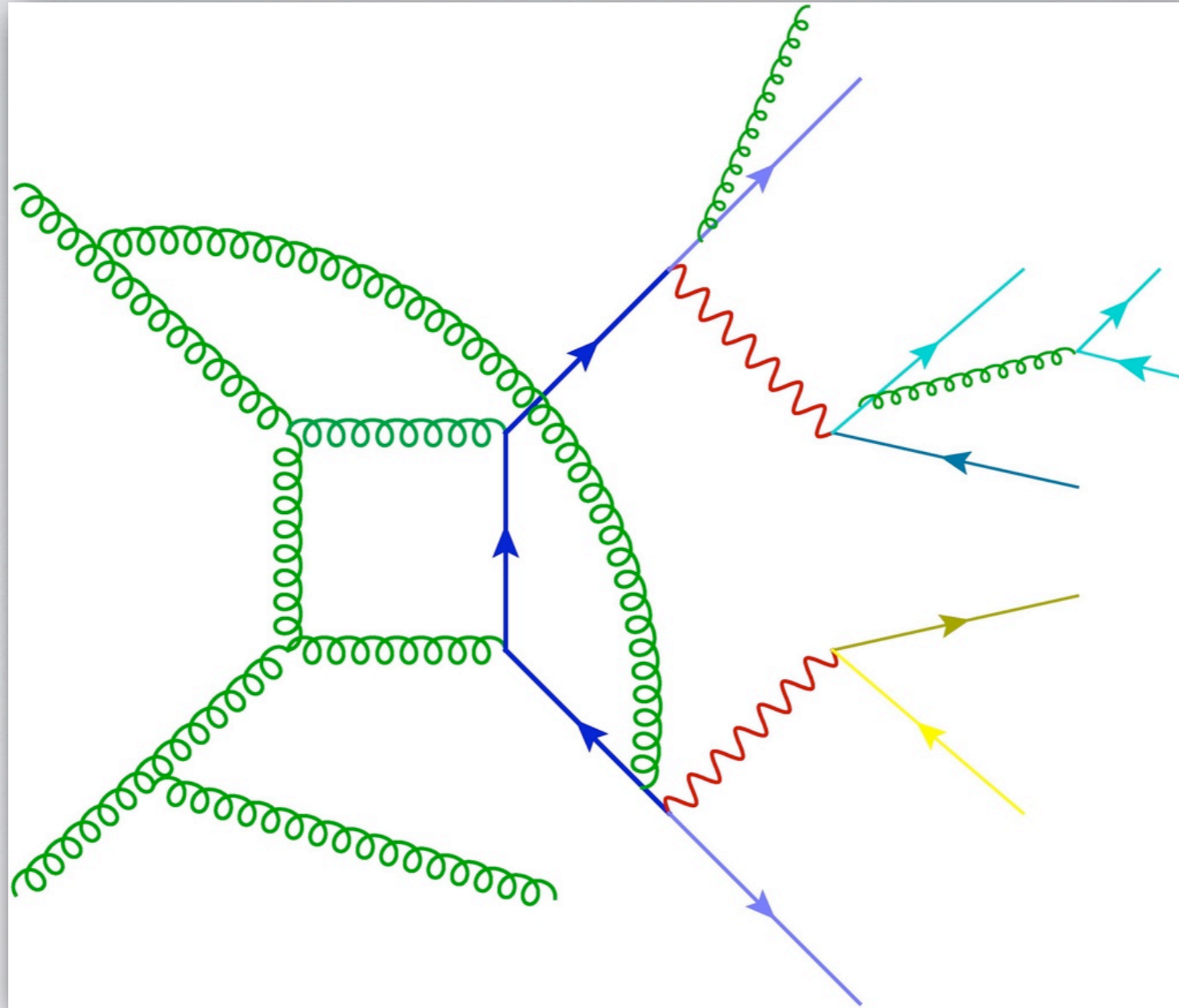
A ogni elemento grafico corrisponde una precisa espressione matematica!



Per ogni processo il calcolo può essere affidato a un computer ...

È davvero così facile?

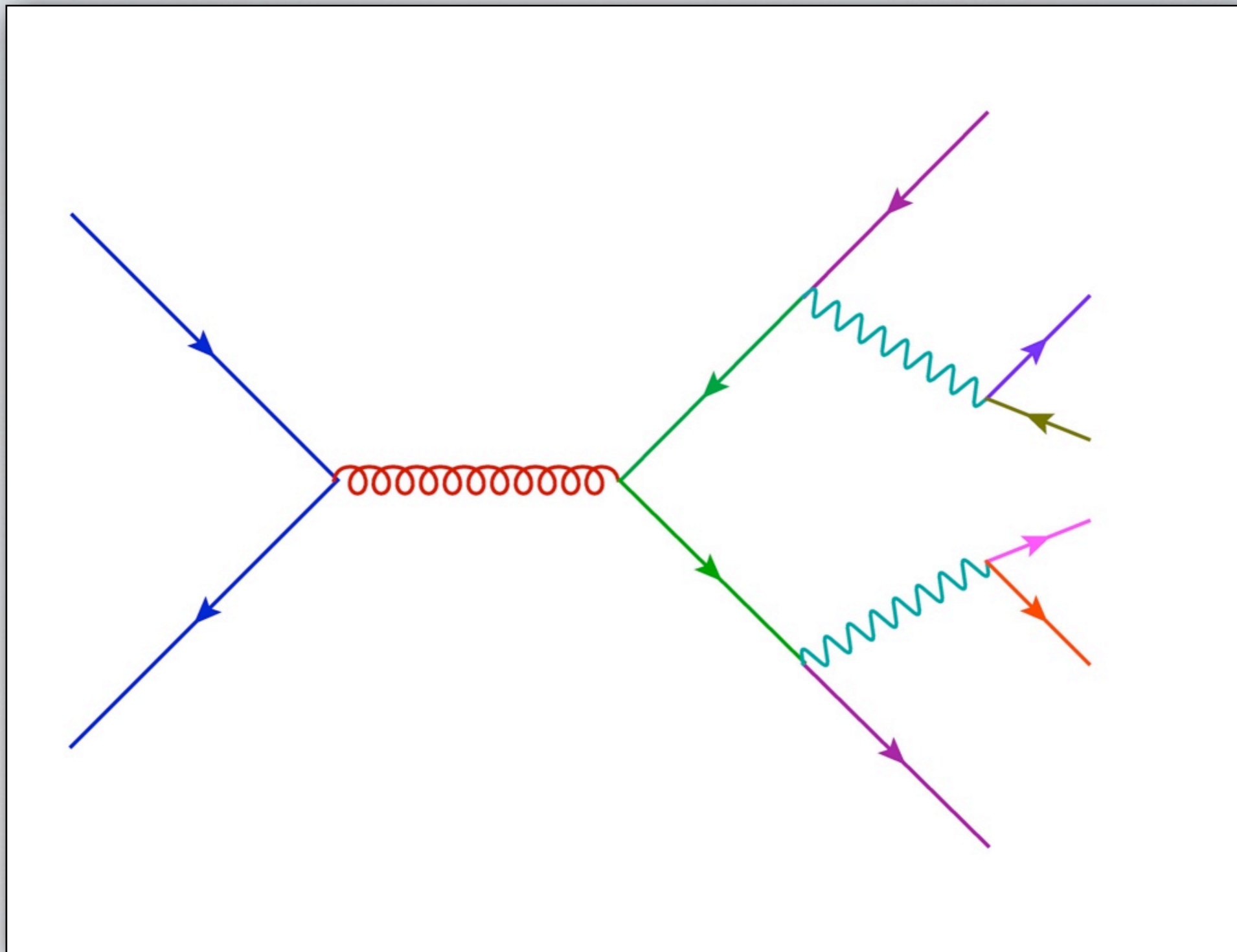
È davvero così facile?



No.

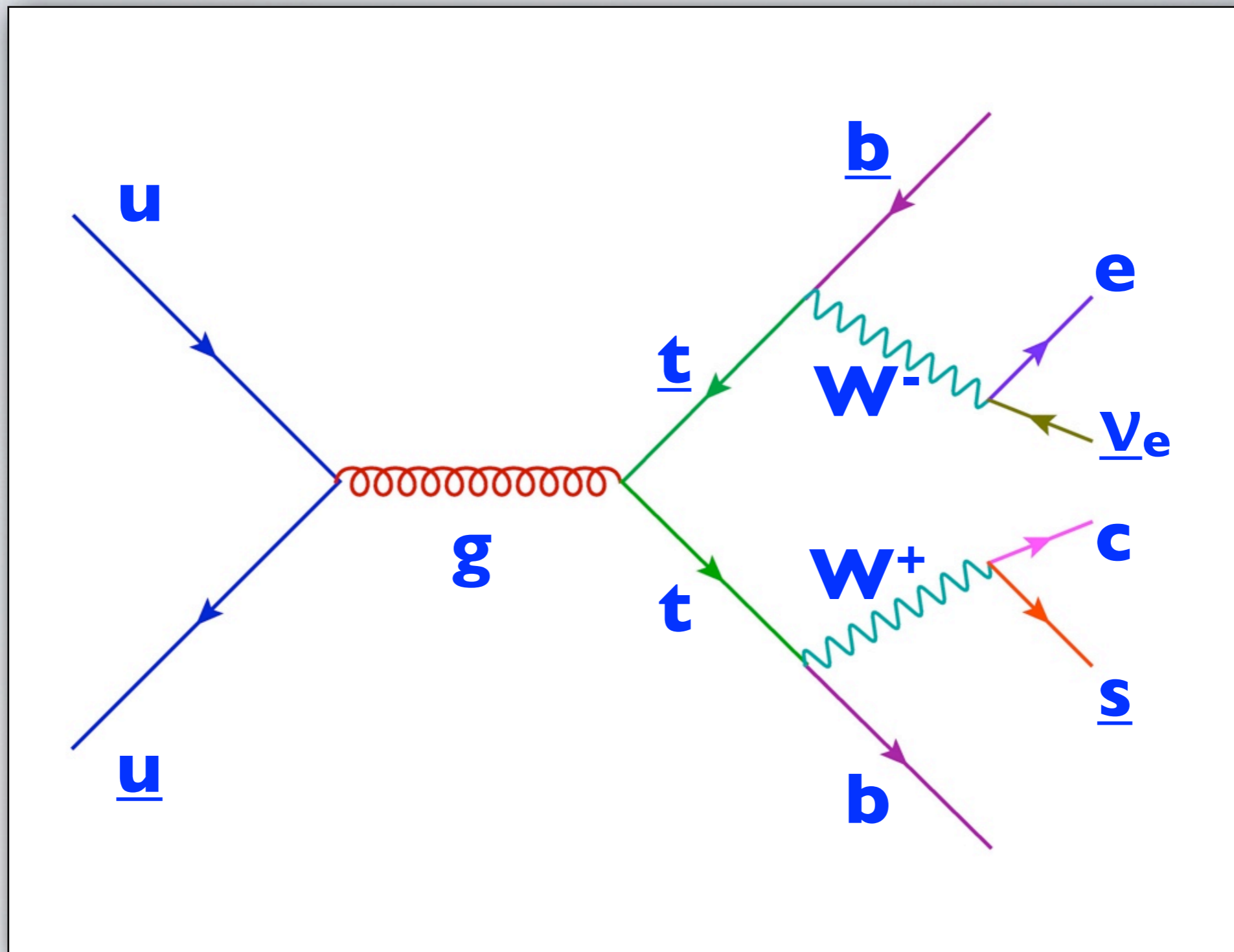
Un processo complicato, ma realistico e significativo

Un processo complicato, ma realistico e significativo



(protone + antiprotone) \Rightarrow up + antiup \Rightarrow top + antitop \Rightarrow ...

Un processo complicato, ma realistico e significativo



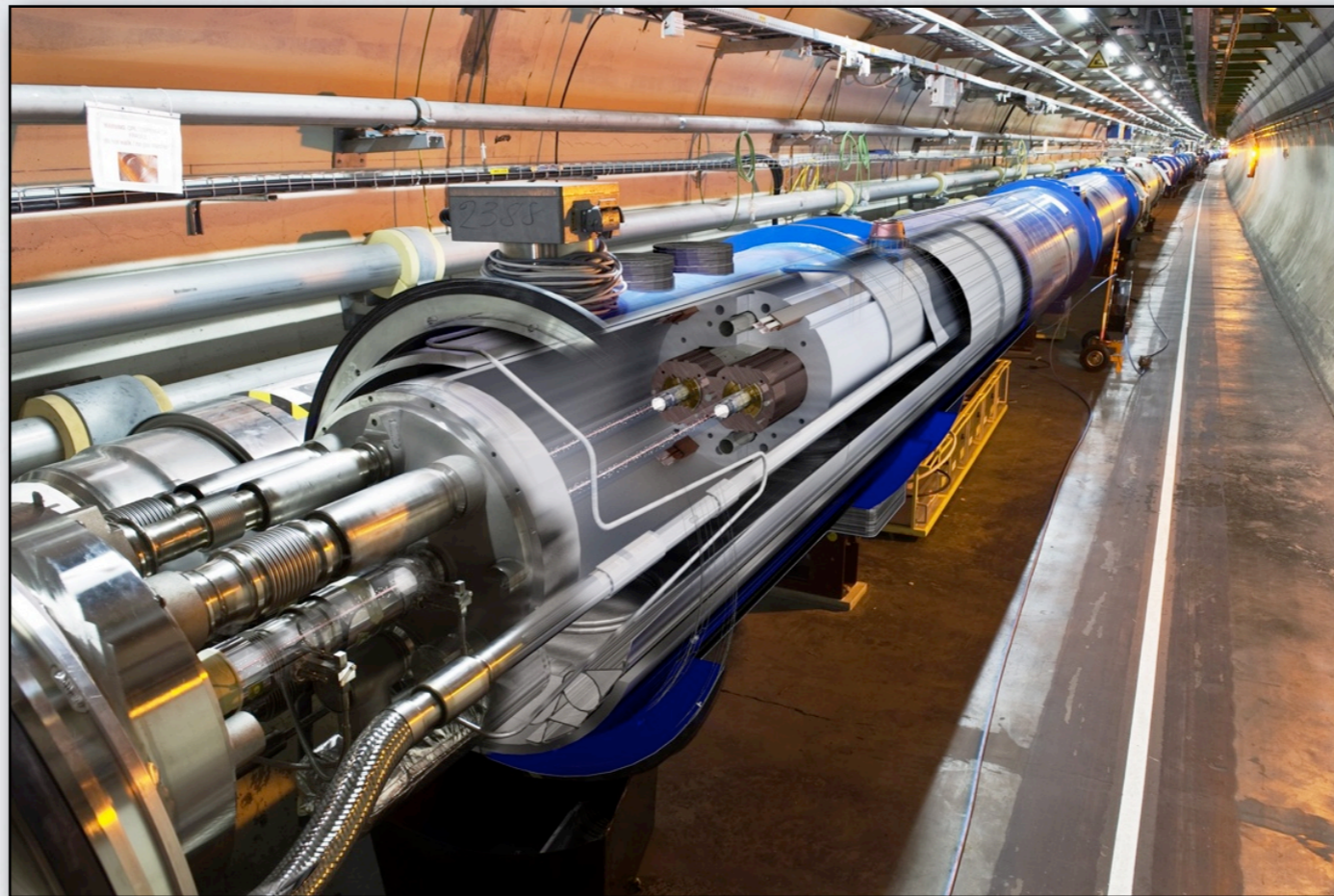
(protone + antiprotone) \Rightarrow up + antiup \Rightarrow top + antitop \Rightarrow ...

COLLISION: THE MOVIE





LA FABBRICA DEI BOSONI DI HIGGS



Che cos'è il CERN?

- L'Organizzazione **Europea** per la Ricerca Nucleare.
- ... che non ha nulla a che fare con le armi nucleari ...
- Un laboratorio internazionale con **21 Stati Membri** e numerosi altri Stati Associati.
- Situato presso Ginevra, **attraverso** il confine franco-svizzero.
- Sede del **Large Hadron Collider** (LHC).
- Luogo di nascita del **World Wide Web**.
- Bilancio annuale (2014) pari a circa **un miliardo** di Euro.
- ... pari a circa **1,8 Euro** per ogni cittadino europeo ...

Che cos'è il Large Hadron Collider?

- Il più grande **acceleratore di particelle** mai costruito.
- Collide **protoni** fino a energie di **14 TeV**.
- Occupa un **tunnel** circolare lungo circa **27 Km**.
- Utilizza **magneti** che operano a **271 °C sotto zero**.
(... “Il luogo più freddo dell’universo” ...)
- I protoni sono accelerati in “**sciami**”, ciascuno contenente fino a **cento miliardi** di particelle.
- I protoni collidono in **quattro grandi rivelatori** sotterranei fino a **quaranta milioni** di volte al secondo.
- I protoni percorrono l’acceleratore più di **10000 volte** per secondo.

Che cosa cerca il Large Hadron Collider?

- Esplora la materia alle **più piccole distanze** mai sondate.
- Cerca la **prossima rivoluzione** nella fisica, dopo la teoria della relatività e la meccanica quantistica.
- Ha scoperto e studia il **bosone di Higgs**, e il meccanismo che fornisce la massa a tutte le particelle elementari.
- Cerca risposte alle **nuove domande** poste dal cosmo:
materia oscura? energia oscura?
supersimmetria? dimensioni nascoste?
- **Non** produce pericolosi **buchi neri!**



Le dimensioni reali di LHC, Ginevra, e il Monte Bianco ...



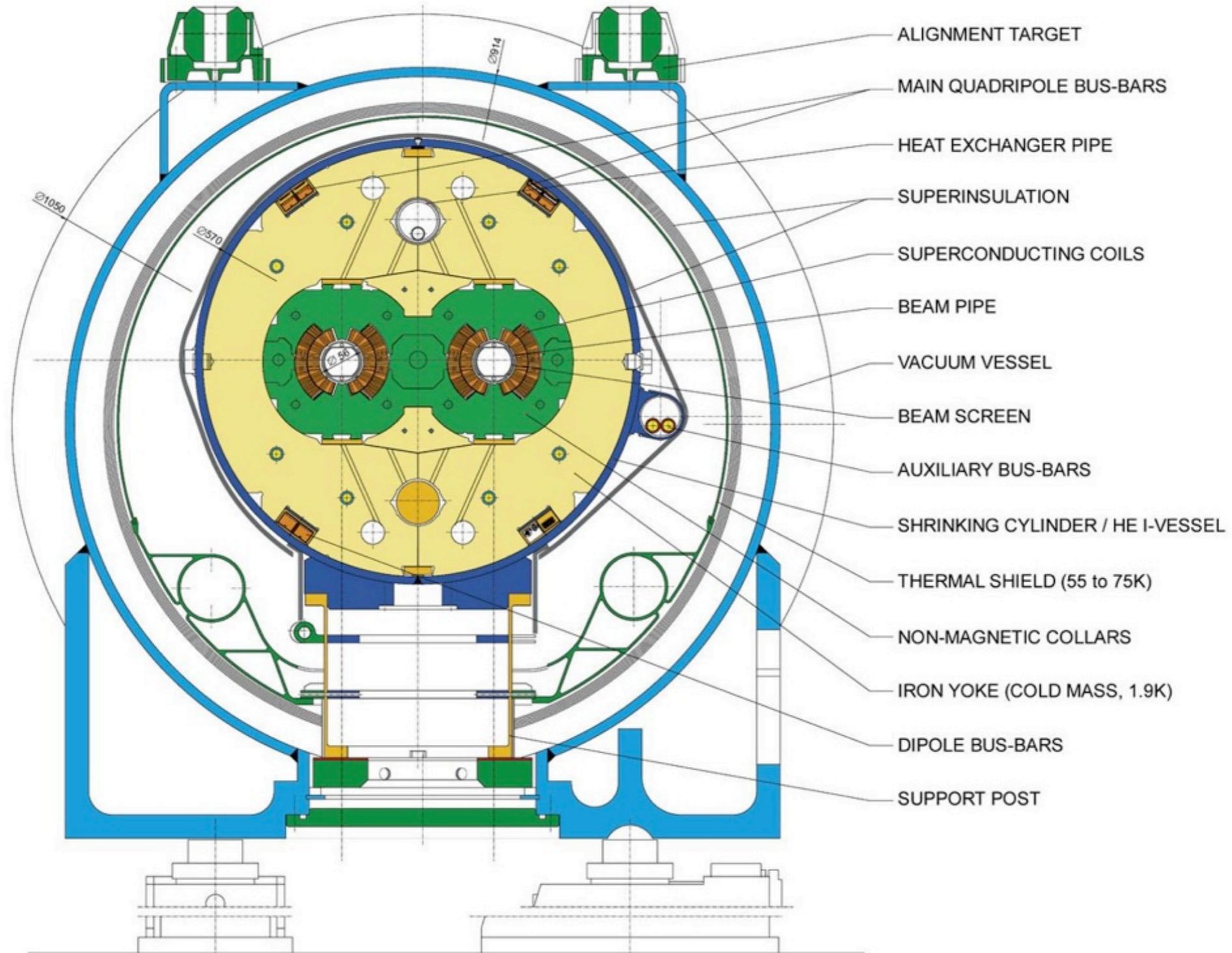
Al lavoro nel tunnel di LHC



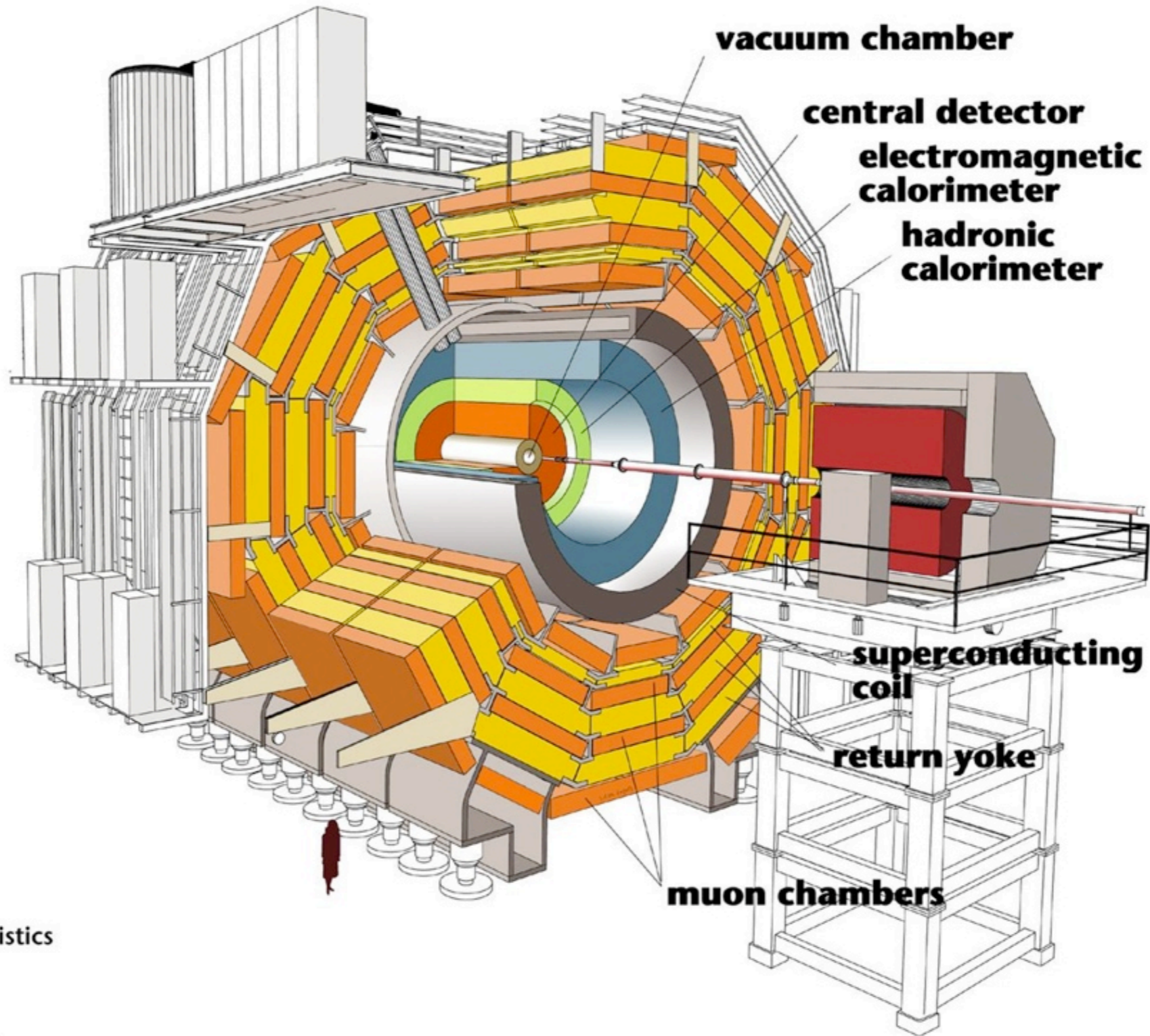
Uno dei magneti viene calato nel tunnel, a cento metri di profondità

LHC DIPOLE : STANDARD CROSS-SECTION

CERN AC/DI/MM - HE107 - 30 04 1999



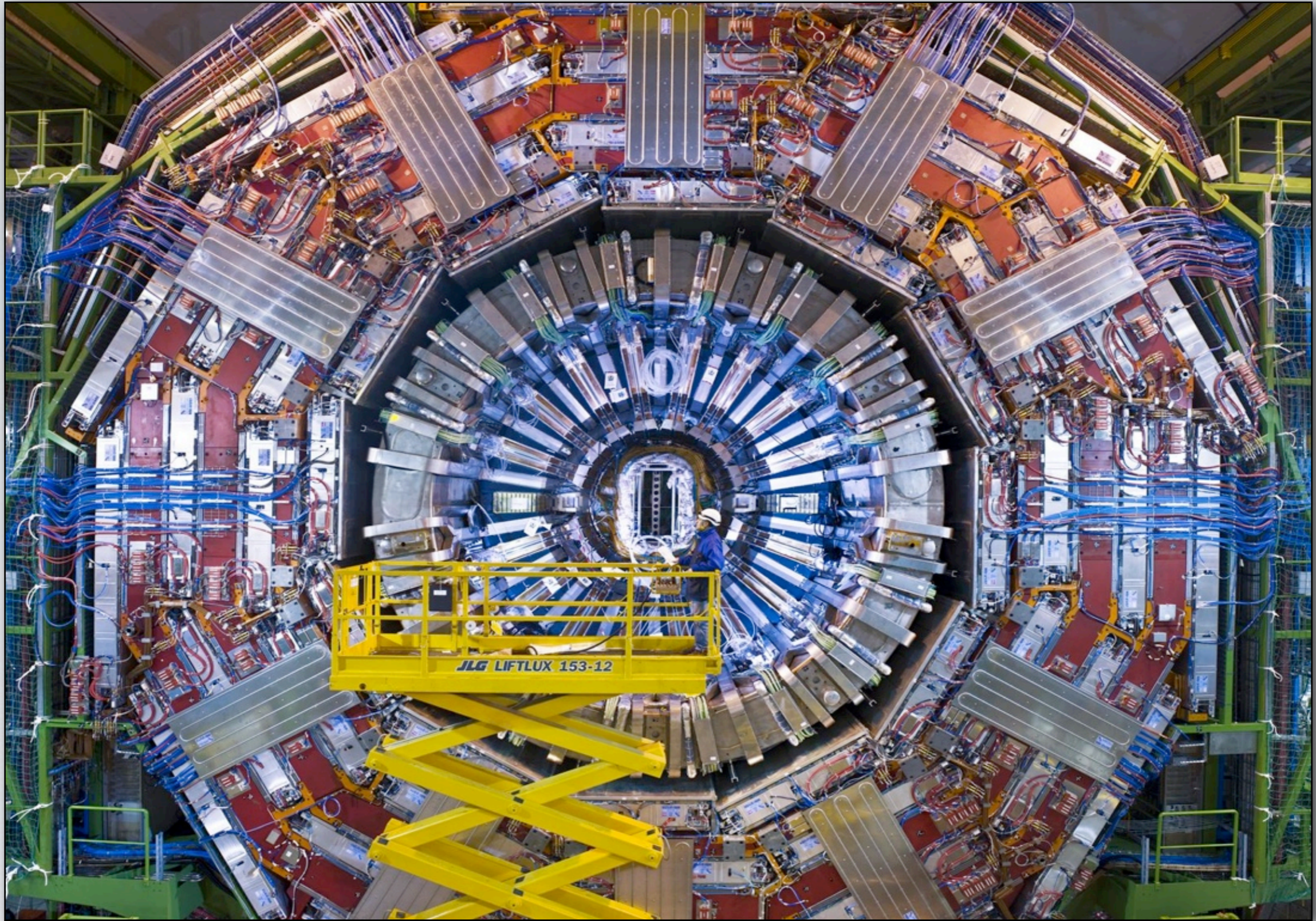
Una sezione dell'acceleratore, il magnete, e i tubi per i fasci di protoni



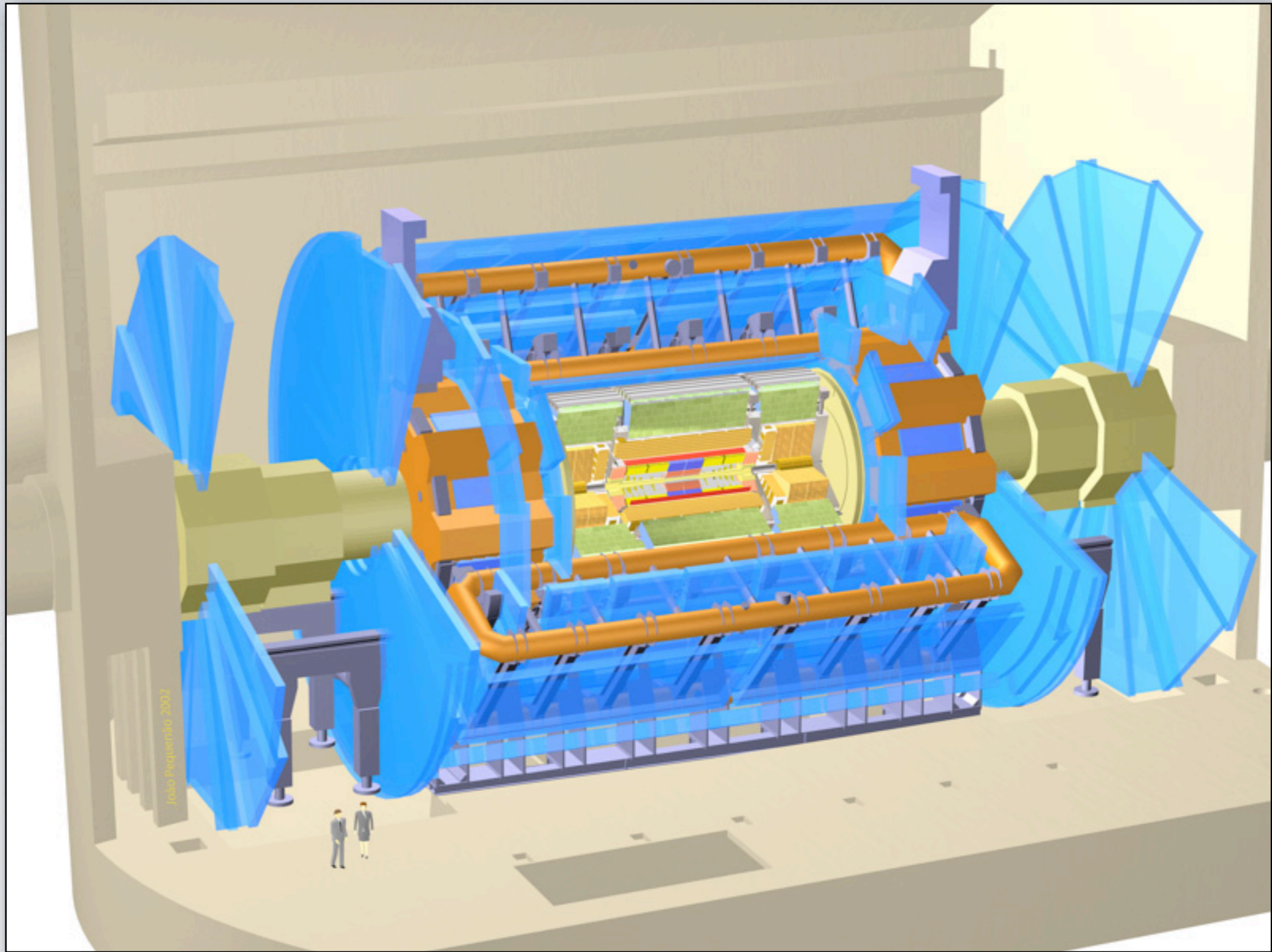
Detector characteristics

Width: 22m
Diameter: 15m
Weight: 14'500t

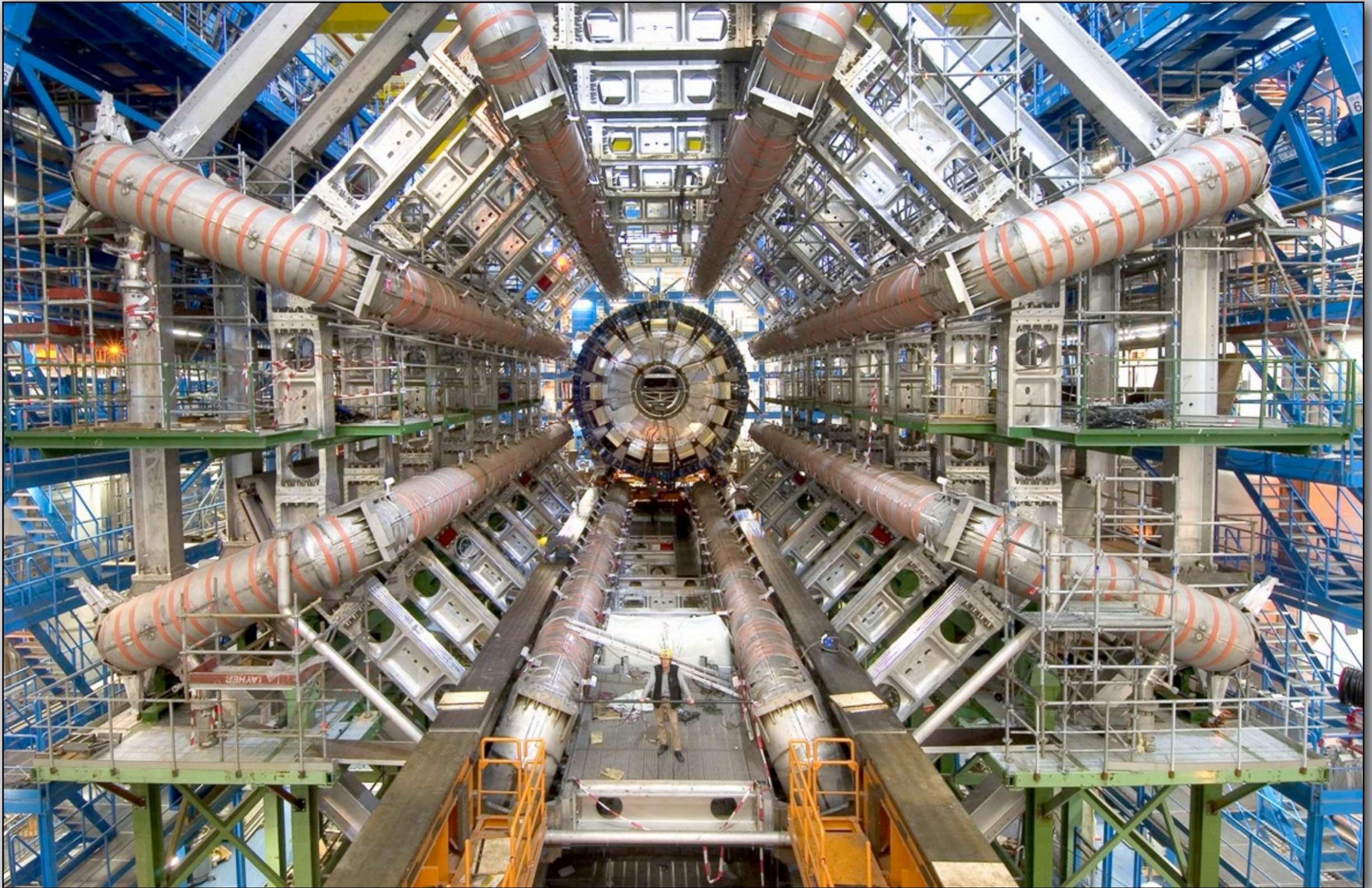
Un disegno del rivelatore CMS (importanti contributi Torinesi!)



Il rivelatore CMS prima della chiusura



Un disegno del rivelatore ATLAS, il più grande dei rivelatori di LHC



Il rivelatore ATLAS durante la costruzione nella sua "caverna".

Il Campo di Higgs

Come funziona il campo di Higgs

Alla ricerca della particella che dà la massa alla materia

Il campo **permea tutto l'universo**.
Le particelle che lo attraversano
avvertono ognuna
una resistenza diversa.
Questa **resistenza** è quella
che chiamiamo **massa**

CAMPO DI HIGGS

Particelle di massa
piccolissima o zero
(fotoni, elettroni, ecc.)

Particelle
di massa media
(muoni, ecc.)

Particelle
di grande massa
(quark top, ecc.)

Per spiegare come mai
la materia abbia massa,
il fisico Peter Higgs
nel 1960 ha ipotizzato
l'esistenza del bosone
di Higgs.

Il bosone di Higgs
è la particella che dà
la massa a tutte le altre.
Ciò avviene quando queste
interagiscono col campo
prodotto dall'Higgs.

Provare l'esistenza
dell'Higgs è uno degli
obiettivi principali
di LHC, in particolare
degli esperimenti ATLAS
e CMS.



Fonte: Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

centimstri.it

Le particelle acquisiscono massa perché il vuoto ... non è vuoto!

Il Bosone di Higgs

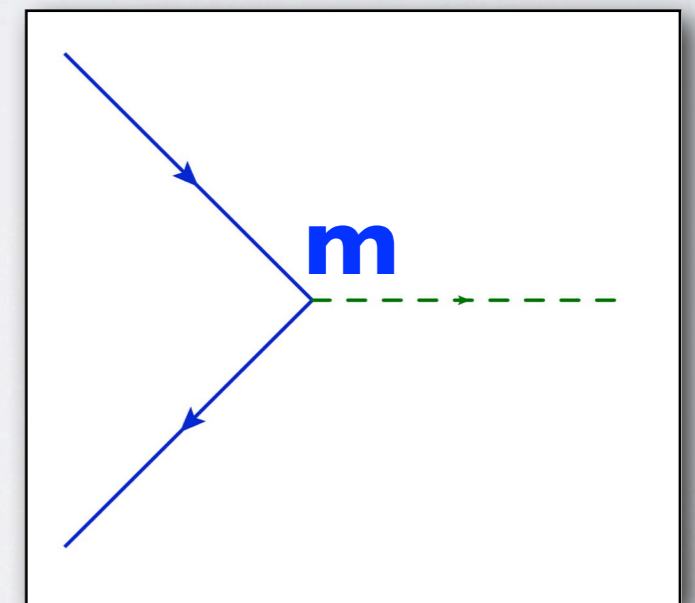


Fabiola Gianotti

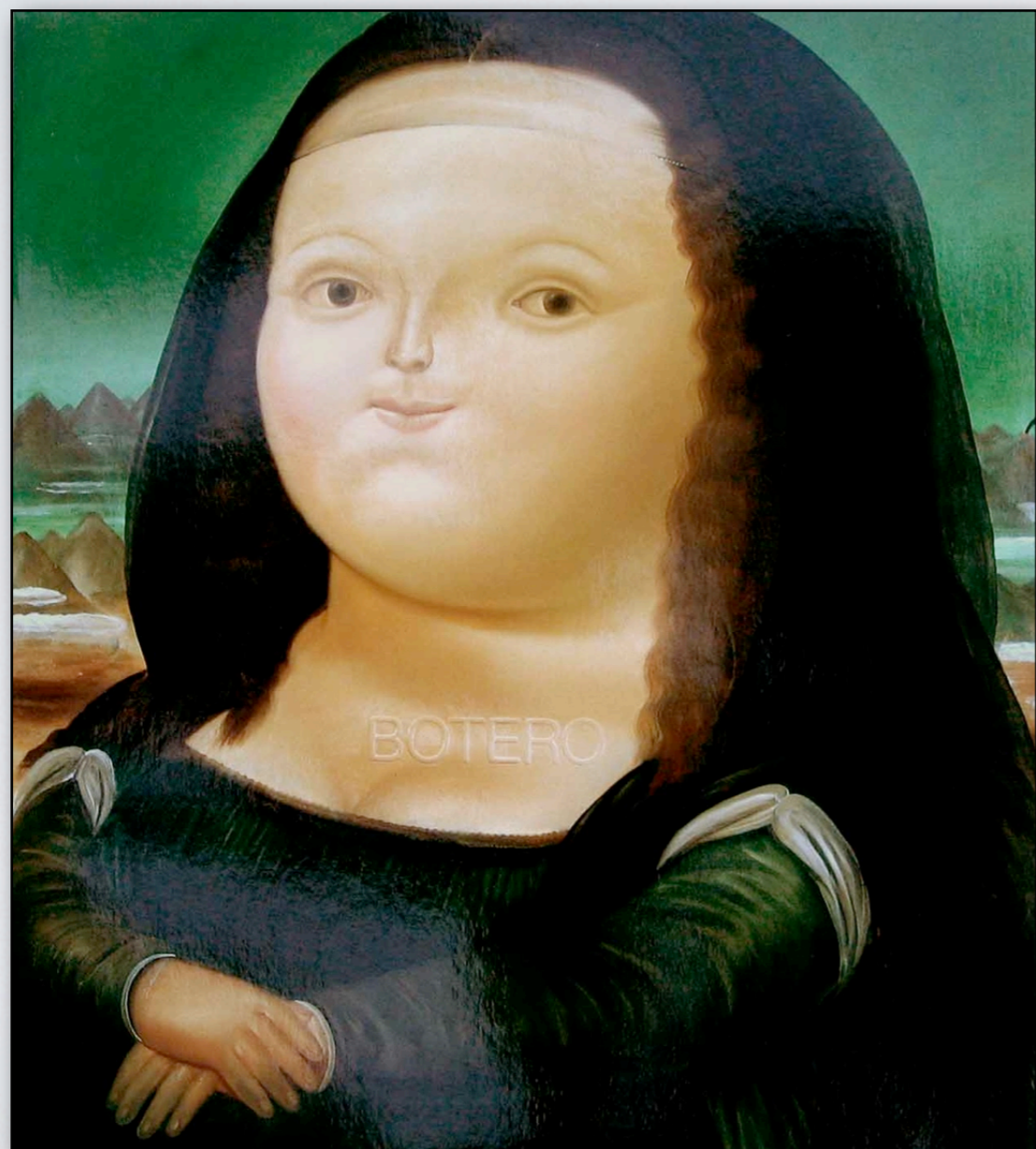


Guido Tonelli

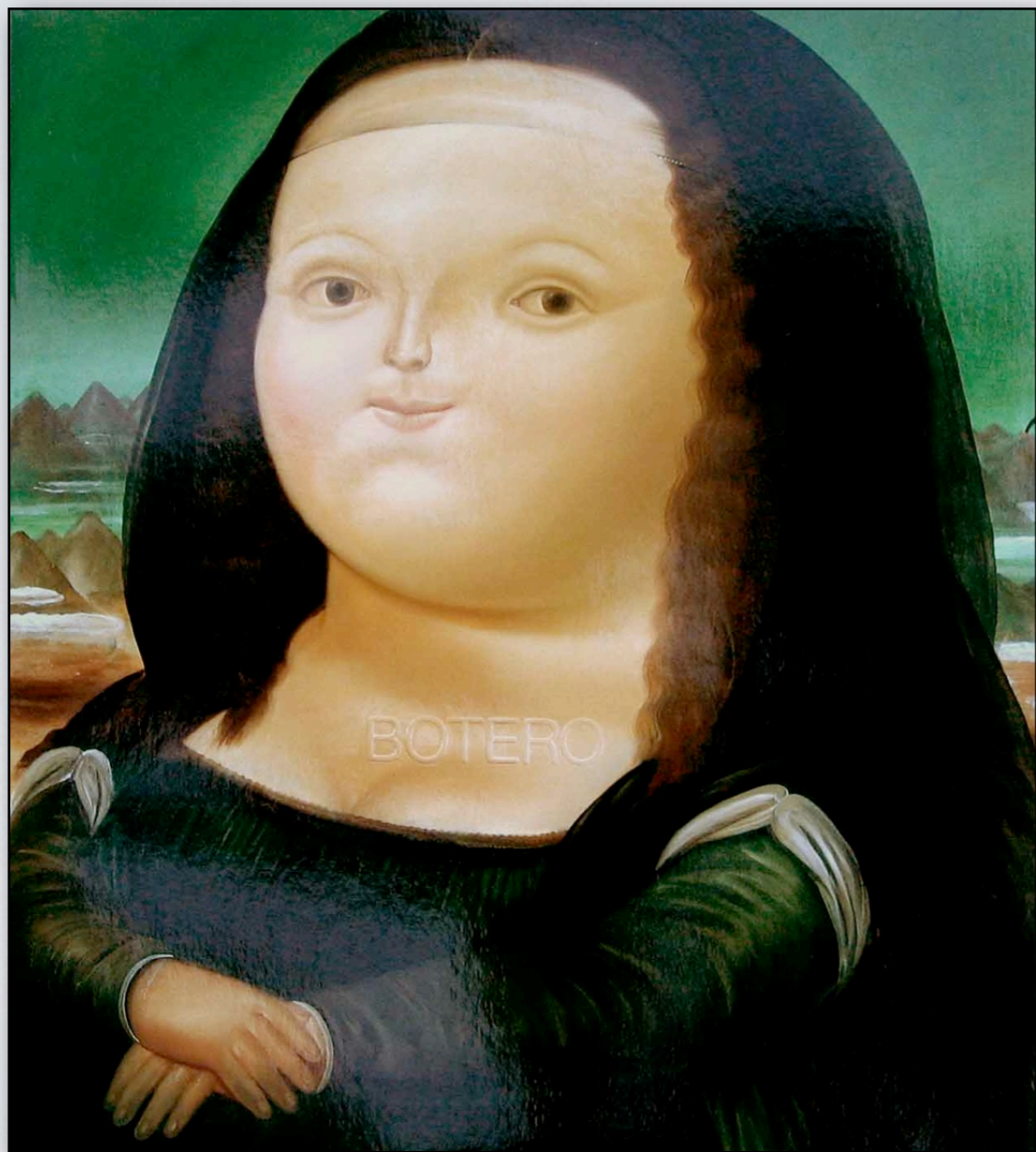
- Il bosone di Higgs è come un'onda, una **perturbazione locale del campo di Higgs**.
- Il bosone di Higgs ha **spin $s = 0$** , la **prima** particella elementare mai scoperta con questa proprietà.
- Ora sappiamo che il bosone di Higgs **pesa circa 130 volte più del protone**.
- Il bosone di Higgs **interagisce** con le altre particelle con **intensità proporzionale alla loro massa**.
- Per questo l'Higgs è molto **difficile da osservare**: interagisce poco con particelle leggere e facili da produrre come gli elettroni, e per nulla con i fotoni.
- È necessario produrre **particelle molto massive**, in grandi quantità, e dotarle di grande energia.



Interazione proporzionale alla massa



Grande massa



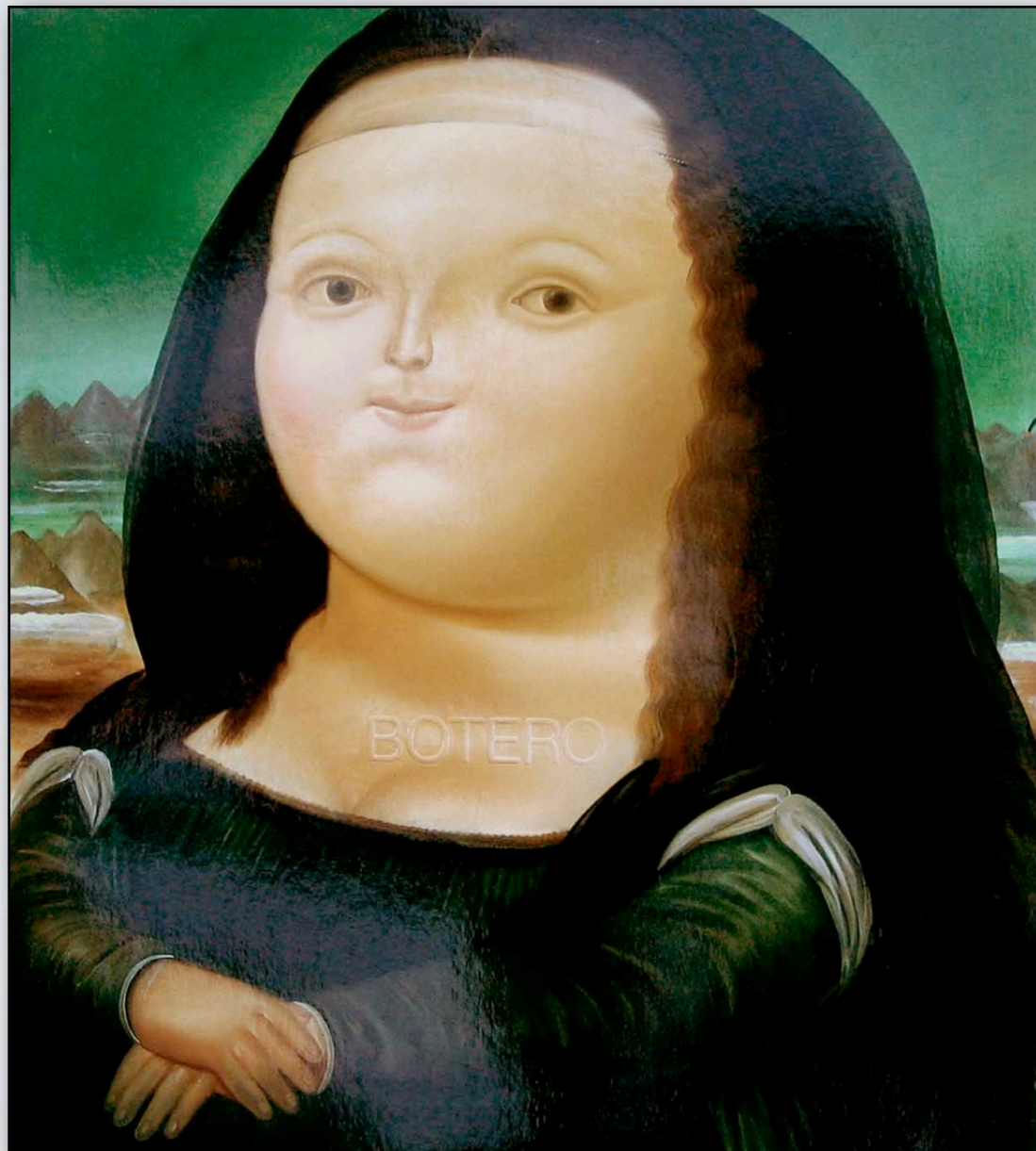
Grande massa



Piccola massa



Il Bosone di Higgs interagisce più intensamente con particelle di grande massa

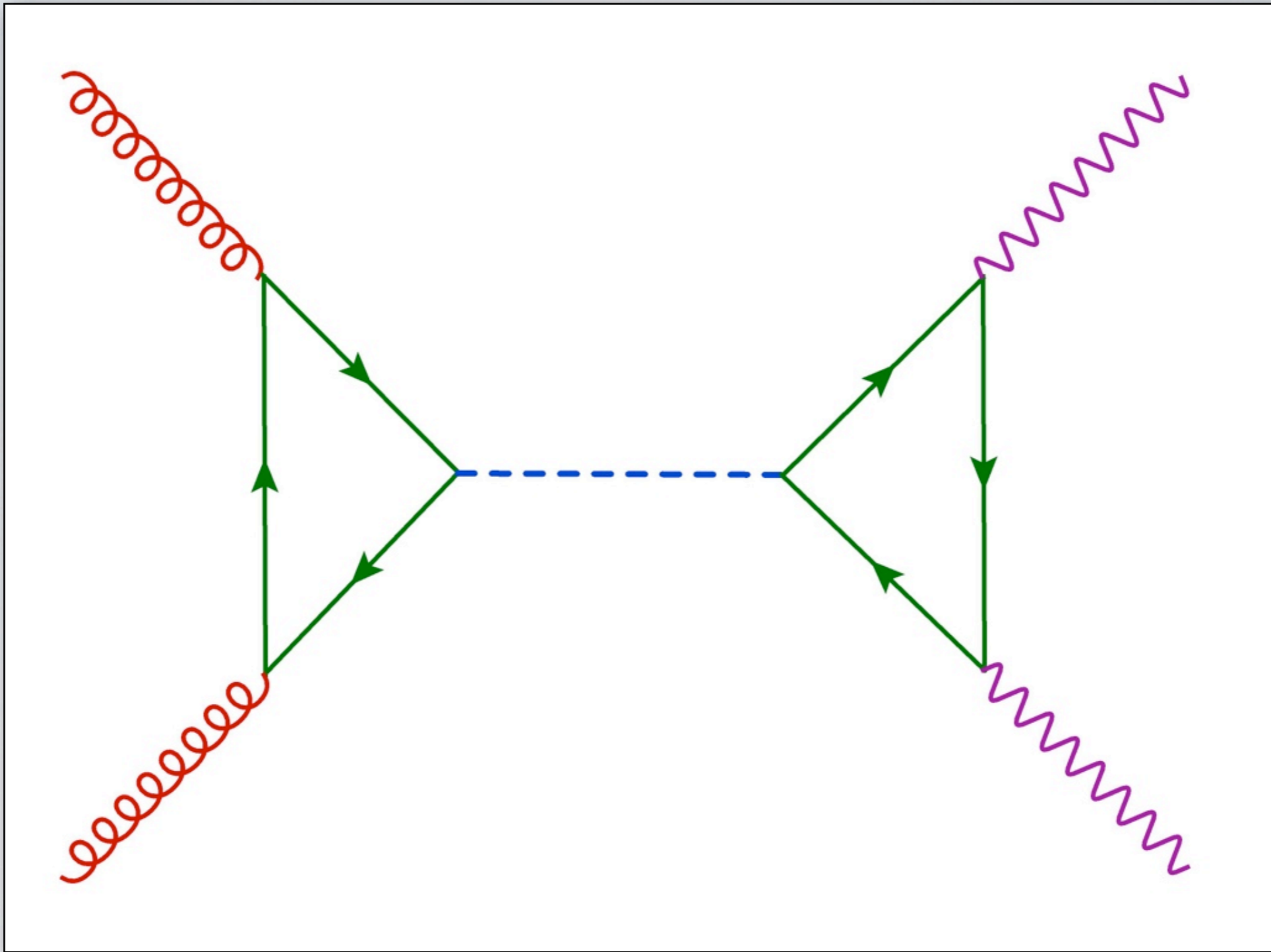


Grande massa



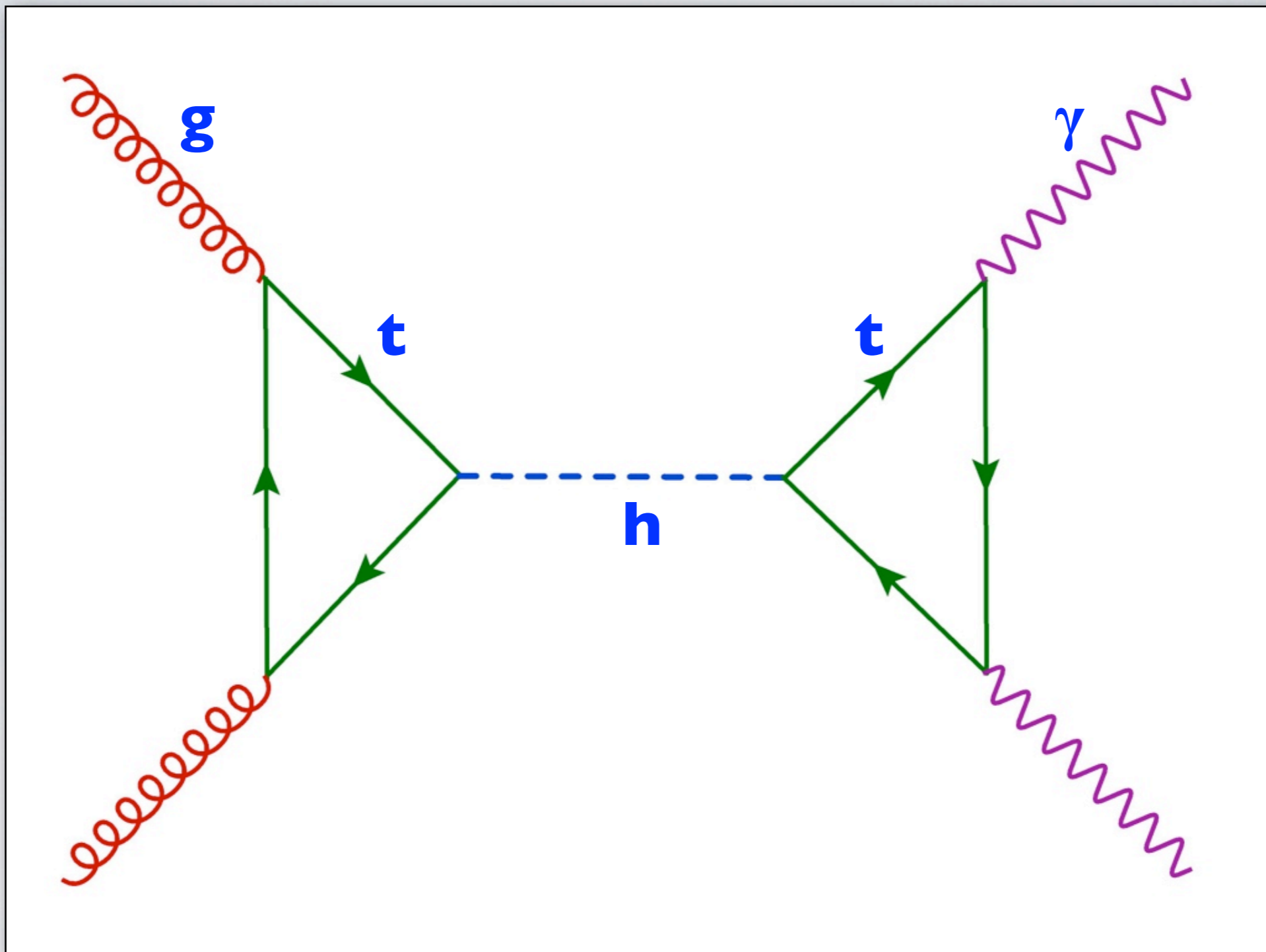
Piccola massa

Il Bosone di Higgs



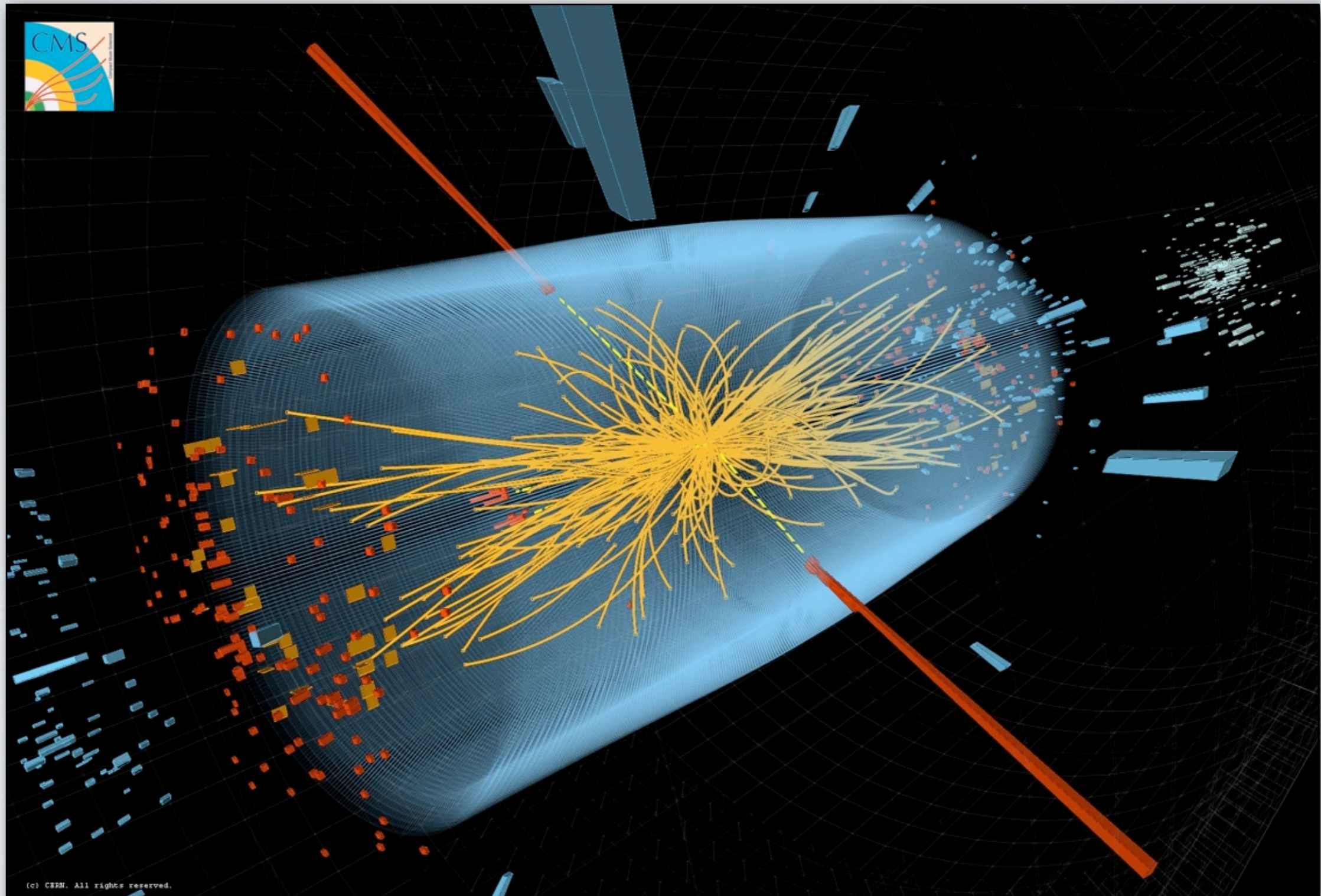
Uno dei principali processi di produzione e rivelazione del bosone di Higgs a LHC

Il Bosone di Higgs

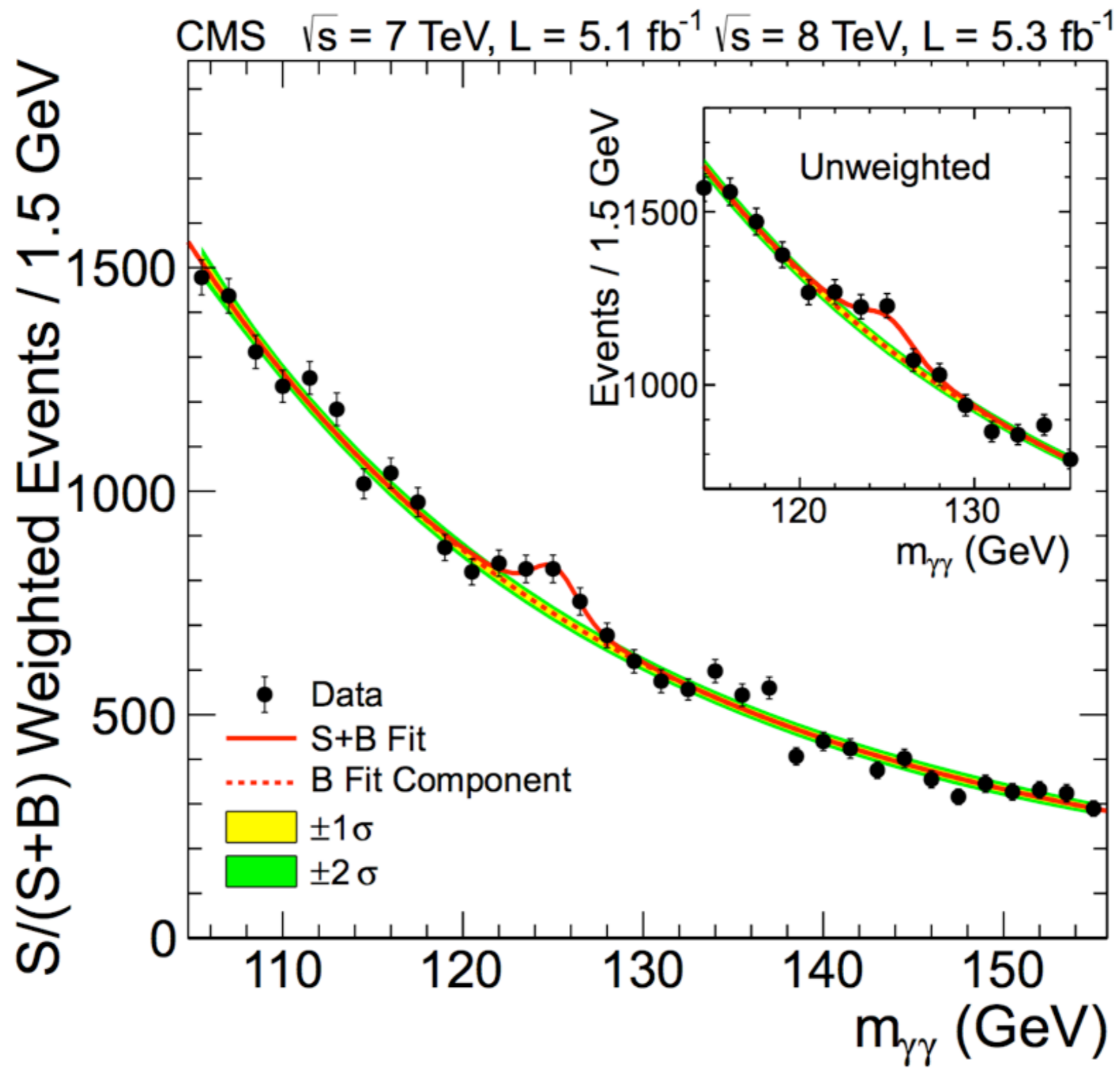


Uno dei principali processi di produzione e rivelazione del bosone di Higgs a LHC

Il Bosone di Higgs



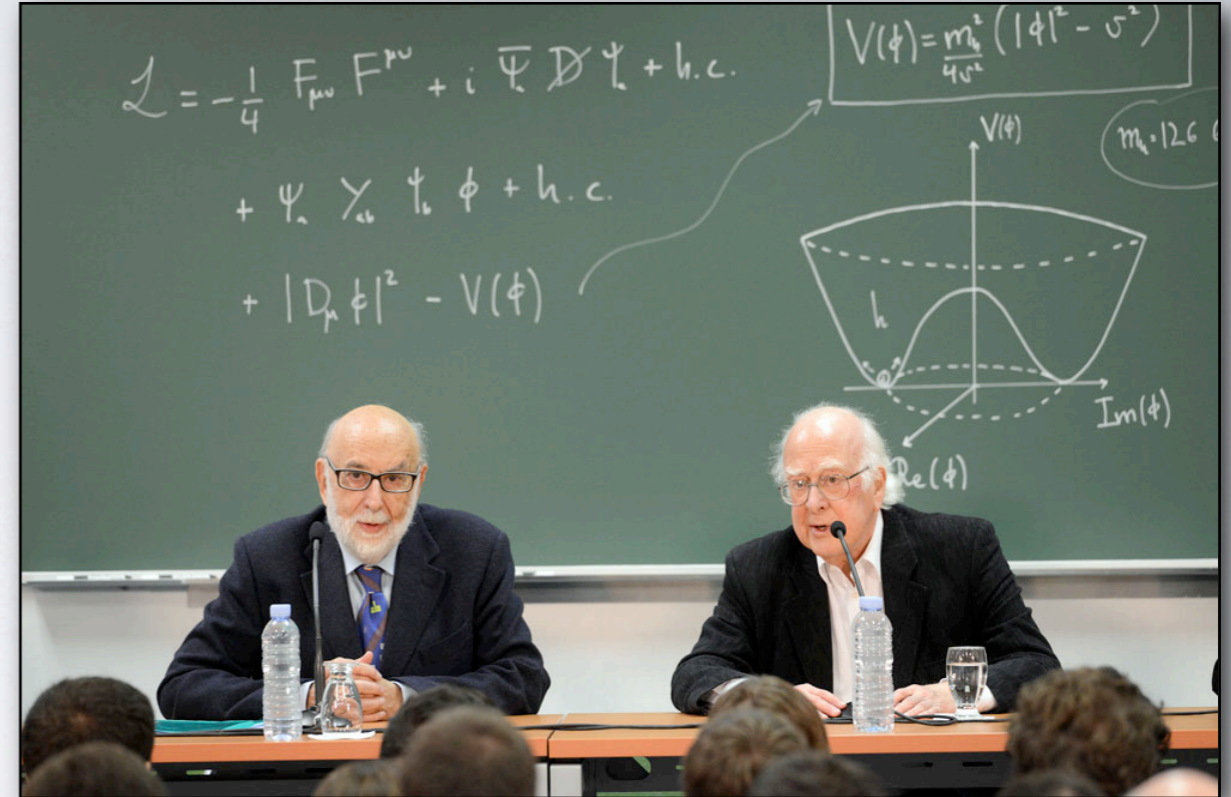
Un possibile evento di produzione di Higgs che decade in due fotoni a LHC



Il grafico dei risultati per la produzione di Higgs che decade in due fotoni a LHC




Fabiola Gianotti e Peter Higgs



François Englert e Peter Higgs

2013 NOBEL PRIZE IN PHYSICS

François Englert
Peter W. Higgs



© The Nobel Foundation. Photo: Lovisa Engblom.

The image is a promotional banner for the 2013 Nobel Prize in Physics. It features a dark blue background with white text. On the right side, there is a gold Nobel Prize medal showing the profile of Alfred Nobel. The text on the medal includes "ALFR. NOBEL" and "MDXXIII".

Il Premio Nobel per la Fisica 2013

Riassumendo

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante
- Le nostre conoscenze spaziano su 45 ordini di grandezza

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante
- Le nostre conoscenze spaziano su 45 ordini di grandezza
- La mente umana è in grado di rappresentare il cosmo

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante
- Le nostre conoscenze spaziano su 45 ordini di grandezza
- La mente umana è in grado di rappresentare il cosmo
- Il Modello Standard ha quasi mezzo secolo di vita

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante
- Le nostre conoscenze spaziano su 45 ordini di grandezza
- La mente umana è in grado di rappresentare il cosmo
- Il Modello Standard ha quasi mezzo secolo di vita
- L'ultimo tassello mancante è stato appena scoperto

Riassumendo

- L'universo è immenso, complesso ed elegante
- Le nostre conoscenze spaziano su 45 ordini di grandezza
- La mente umana è in grado di rappresentare il cosmo
- Il Modello Standard ha quasi mezzo secolo di vita
- L'ultimo tassello mancante è stato appena scoperto
- Ci aspettiamo, con il fiato sospeso, nuove, splendide scoperte!

$$\begin{aligned}\mathcal{L} = & -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}F^{\mu\nu} \\ & + i\bar{\Psi}\not{D}\Psi + \text{h.c.} \\ & + \Psi_i\gamma_{ij}\Psi_j\Phi + \text{h.c.} \\ & + |D_\mu\Phi|^2 - V(\Phi)\end{aligned}$$

Grazie per la vostra attenzione!