

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI E IL SUO SUPERAMENTO

SIMONE PACETTI

**DIPARTIMENTO DI FISICA E GEOLOGIA
16 FEBBRAIO 2021
PERUGIA**



PROGRAMMA



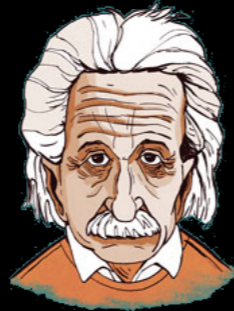
PROGRAMMA



Le costanti fondamentali



La meccanica quantistica



La relatività speciale



Il Modello Standard



Oltre il Modello Standard



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

**Il quadrante della Natura
le cui leggi si lasciano scrivere
in poche righe con precisione
assoluta e massima evidenza empirica**



Il quadrante della Natura
le cui leggi si lasciano scrivere
in poche righe con precisione
assoluta e massima evidenza empirica

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



LE CARATTERISTICHE PIÙ IMPORTANTI

Il Modello Standard è un modello matematico “**minimale**” che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Funziona molto bene per una vastissima gamma di fenomeni da quelli infinitamente piccoli, fino a 10^{-18} metri, a quelli super veloci!**



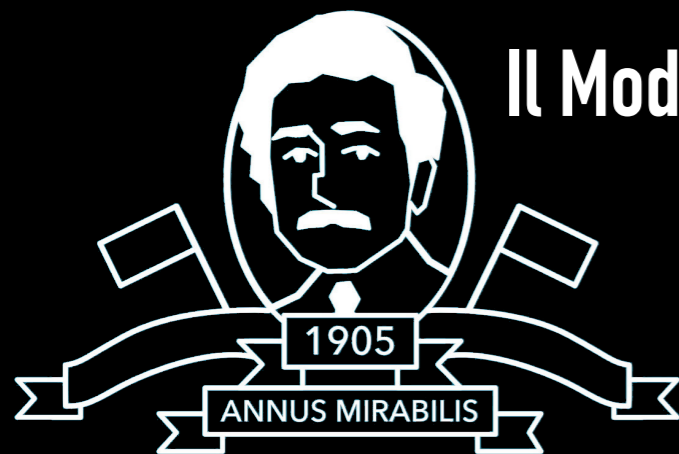
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

LE CARATTERISTICHE PIÙ IMPORTANTI

Il Modello Standard è un modello matematico “**minimale**” che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Funziona molto bene per una vastissima gamma di fenomeni da quelli infinitamente piccoli, fino a 10^{-18} metri, a quelli super veloci!**



Il Modello Standard è un modello completo perché incorpora: la relatività di Einstein e la meccanica quantistica. **È una teoria di campo quantistica e relativistica.**



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

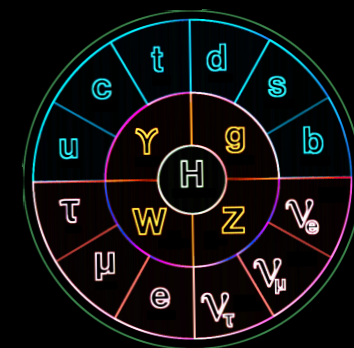
LE CARATTERISTICHE PIÙ IMPORTANTI

Il Modello Standard è un modello matematico “**minimale**” che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Funziona molto bene per una vastissima gamma di fenomeni da quelli infinitamente piccoli, fino a 10^{-18} metri, a quelli super veloci!**



Il Modello Standard è un modello completo perché incorpora: la relatività di Einstein e la meccanica quantistica. **È una teoria di campo quantistica e relativistica.**

Il Modello Standard descrive tutte le particelle note. **Tre coppie di quark e tre coppie di leptoni.**



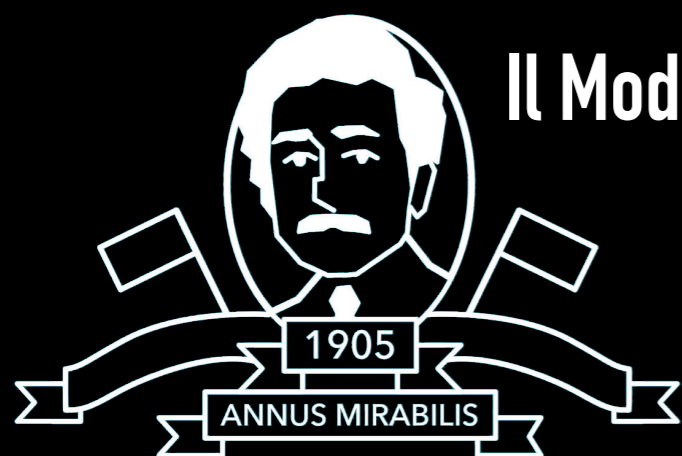
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

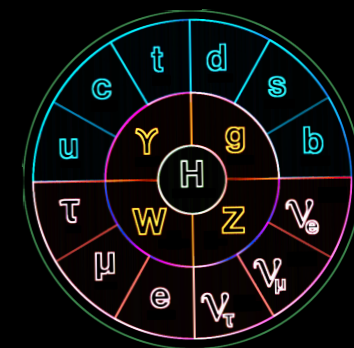
LE CARATTERISTICHE PIÙ IMPORTANTI

Il Modello Standard è un modello matematico “**minimale**” che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Funziona molto bene per una vastissima gamma di fenomeni da quelli infinitamente piccoli, fino a 10^{-18} metri, a quelli super veloci!**



Il Modello Standard è un modello completo perché incorpora: la relatività di Einstein e la meccanica quantistica. **È una teoria di campo quantistica e relativistica.**

Il Modello Standard descrive tutte le particelle note. **Tre coppie di quark e tre coppie di leptoni.**



Le interazioni scaturiscono da **simmetrie fondamentali**. Il Modello Standard descrive la forza forte, la forza debole e quella elettromagnetica ma **non la forza gravitazionale!**



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

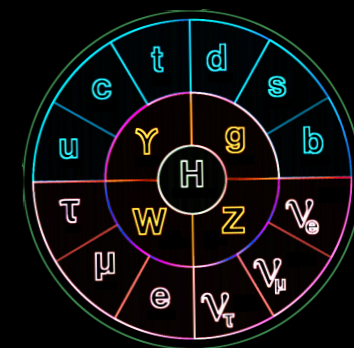
LE CARATTERISTICHE PIÙ IMPORTANTI

Il Modello Standard è un modello matematico “**minimale**” che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia. **Funziona molto bene per una vastissima gamma di fenomeni da quelli infinitamente piccoli, fino a 10^{-18} metri, a quelli super veloci!**



Il Modello Standard è un modello completo perché incorpora: la relatività di Einstein e la meccanica quantistica. **È una teoria di campo quantistica e relativistica.**

Il Modello Standard descrive tutte le particelle note. **Tre coppie di quark e tre coppie di leptoni.**

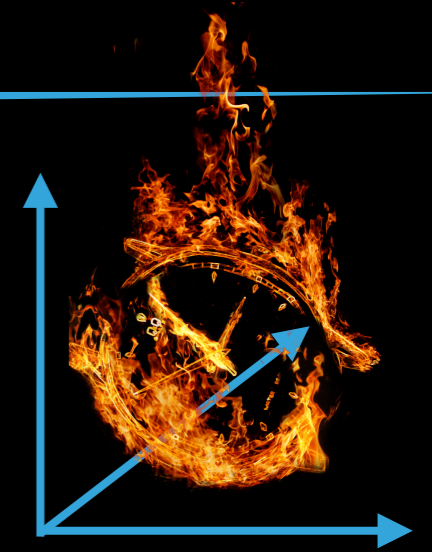


Le interazioni scaturiscono da **simmetrie fondamentali**. Il Modello Standard descrive la forza forte, la forza debole e quella elettromagnetica ma **non la forza gravitazionale!**



LE COSTANTI FONDAMENTALI

Tre grandezze fondamentali



$$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$$

dimensione = L / T

La **velocità della luce nel vuoto** rappresenta la **massima velocità raggiungibile in natura**.

È alla base della teoria della **relatività speciale** che unifica spazio e tempo, massa ed energia.

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg}$$

dimensione = E × T

La **costante di Planck** definisce il “quanto” di energia, è la porta d’accesso al regno della **meccanica quantistica**.

$$G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}$$

dimensione = E × L / M²

La **costante di Gravitazione universale** descrive l’interazione gravitazionale Newtoniana.

Il suo “status” di costante fondamentale non è ancora così solido come quello della costante di Planck e la velocità della luce.

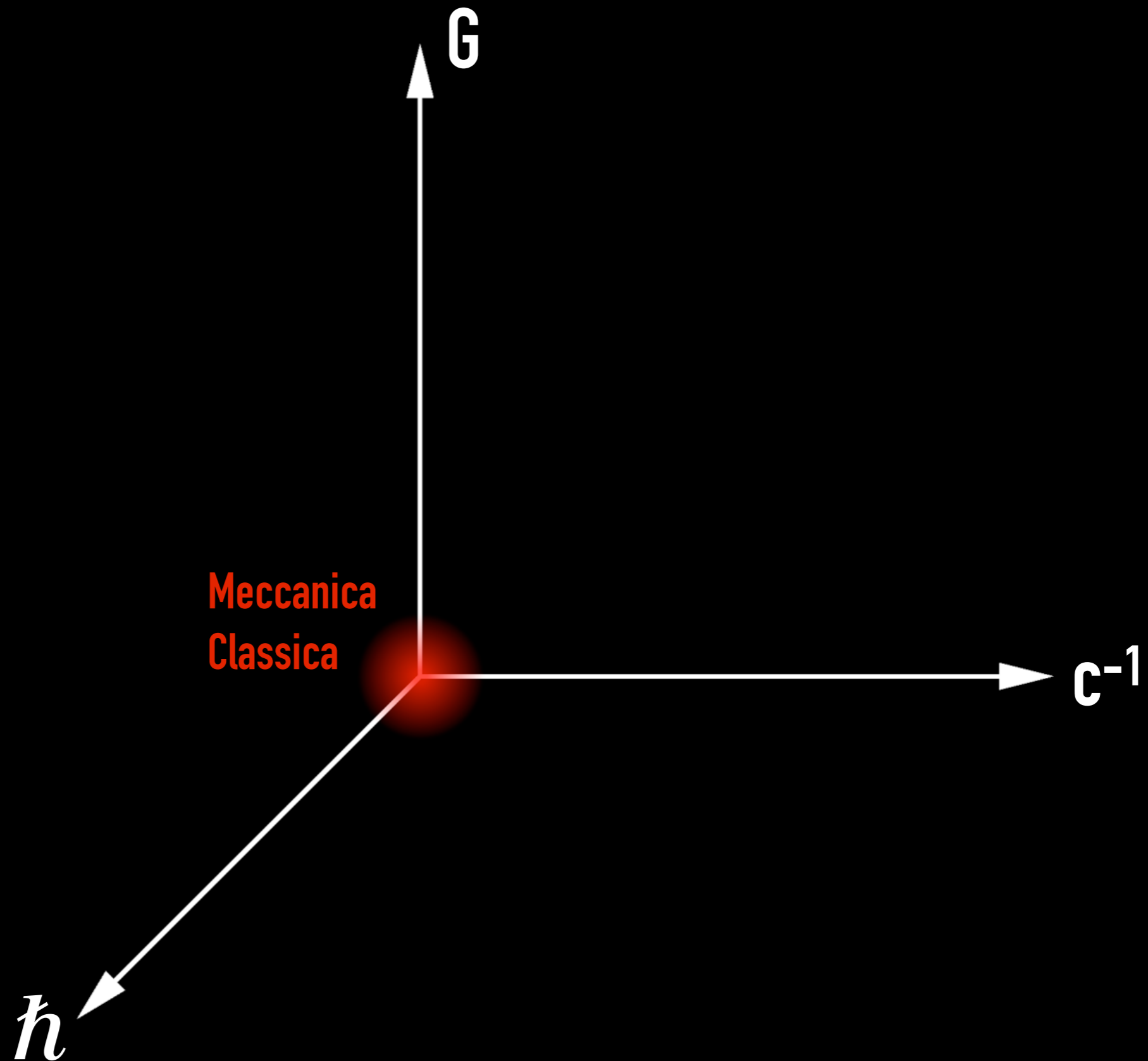


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

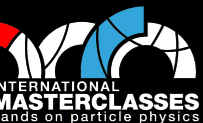


MC21.Perugia.16.2.21

LA TEORIA CUBICA (\hbar, c^{-1}, G)

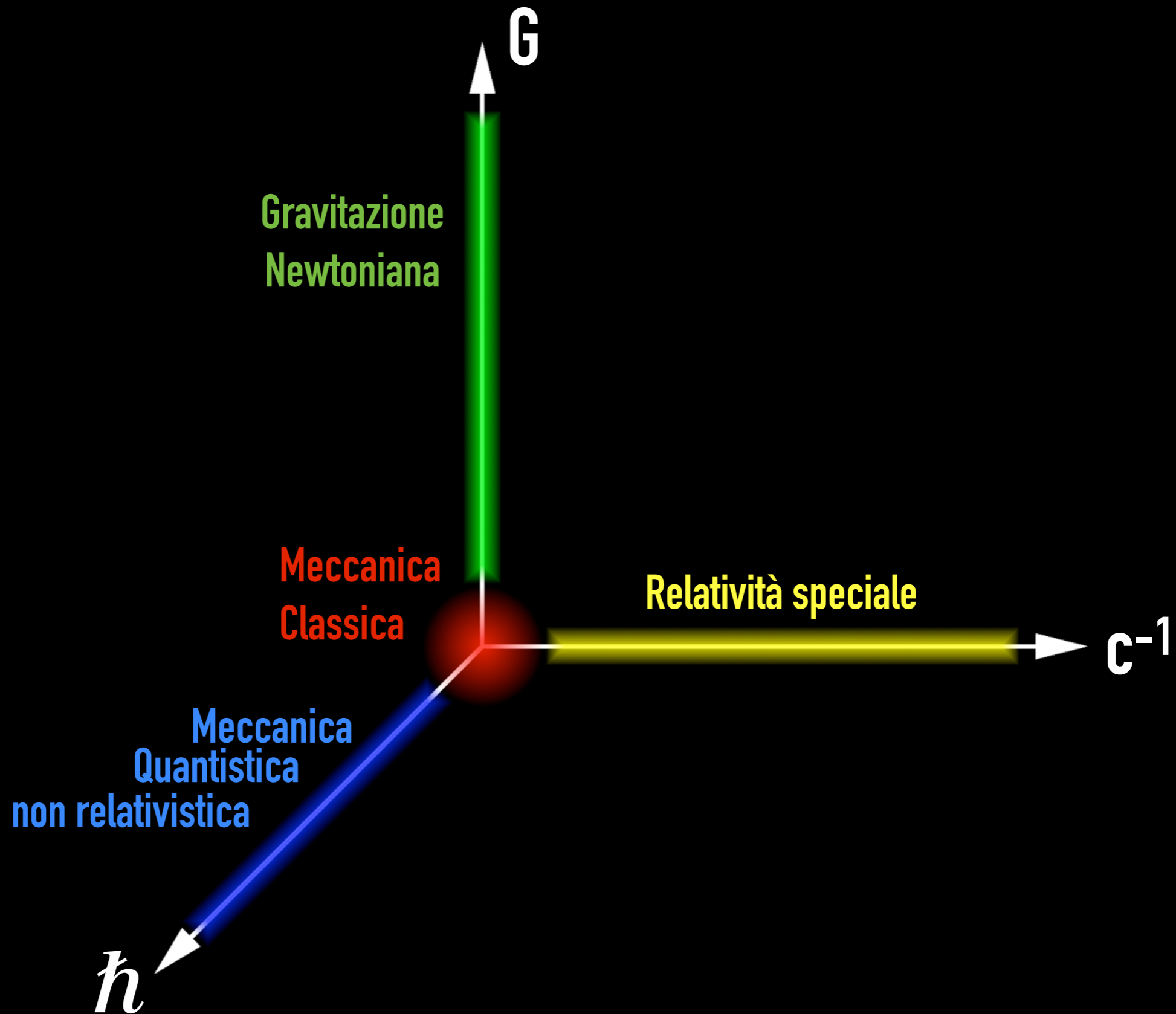


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

LA TEORIA CUBICA (\hbar, c^{-1}, G)

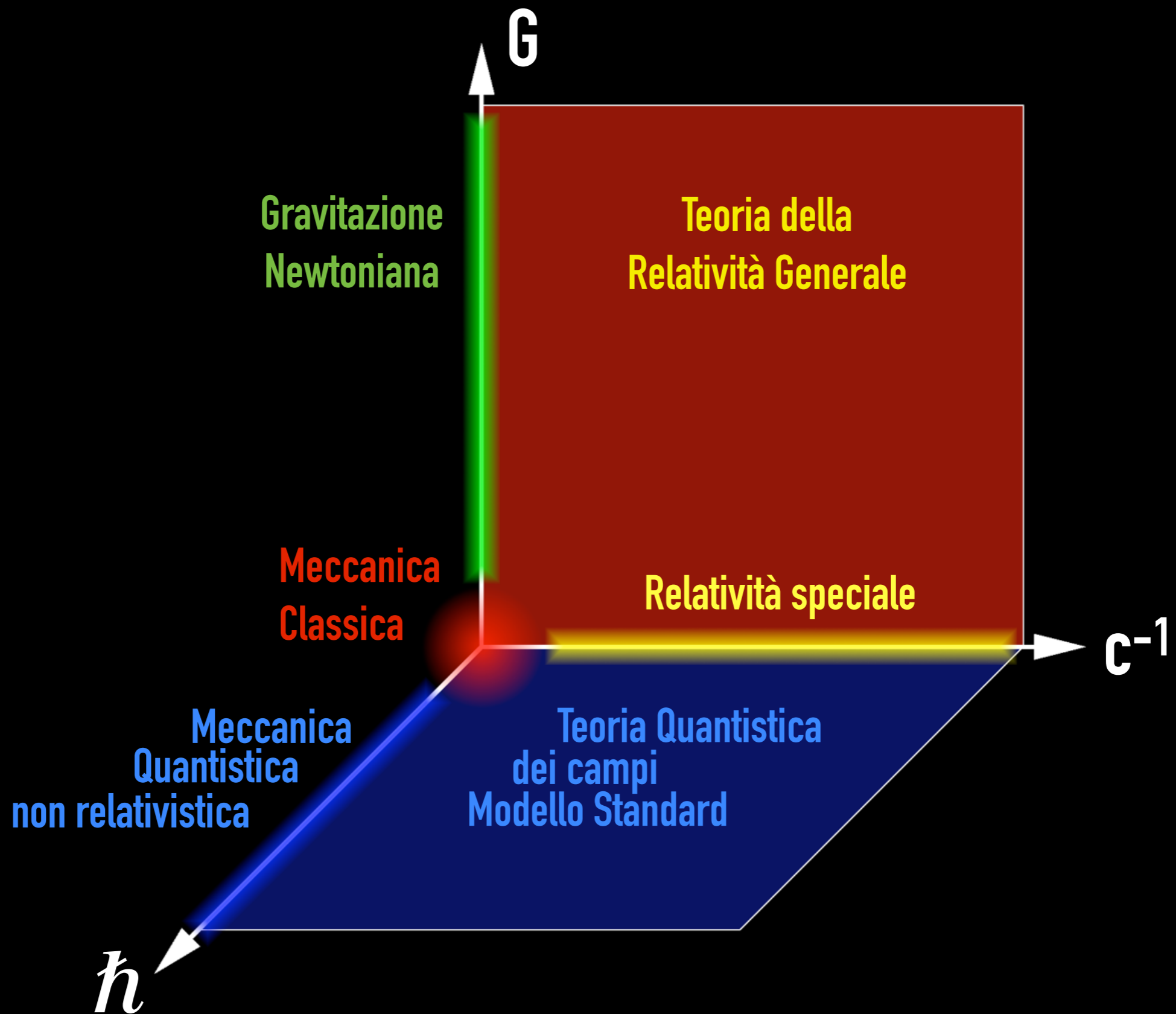


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

LA TEORIA CUBICA (\hbar, c^{-1}, G)

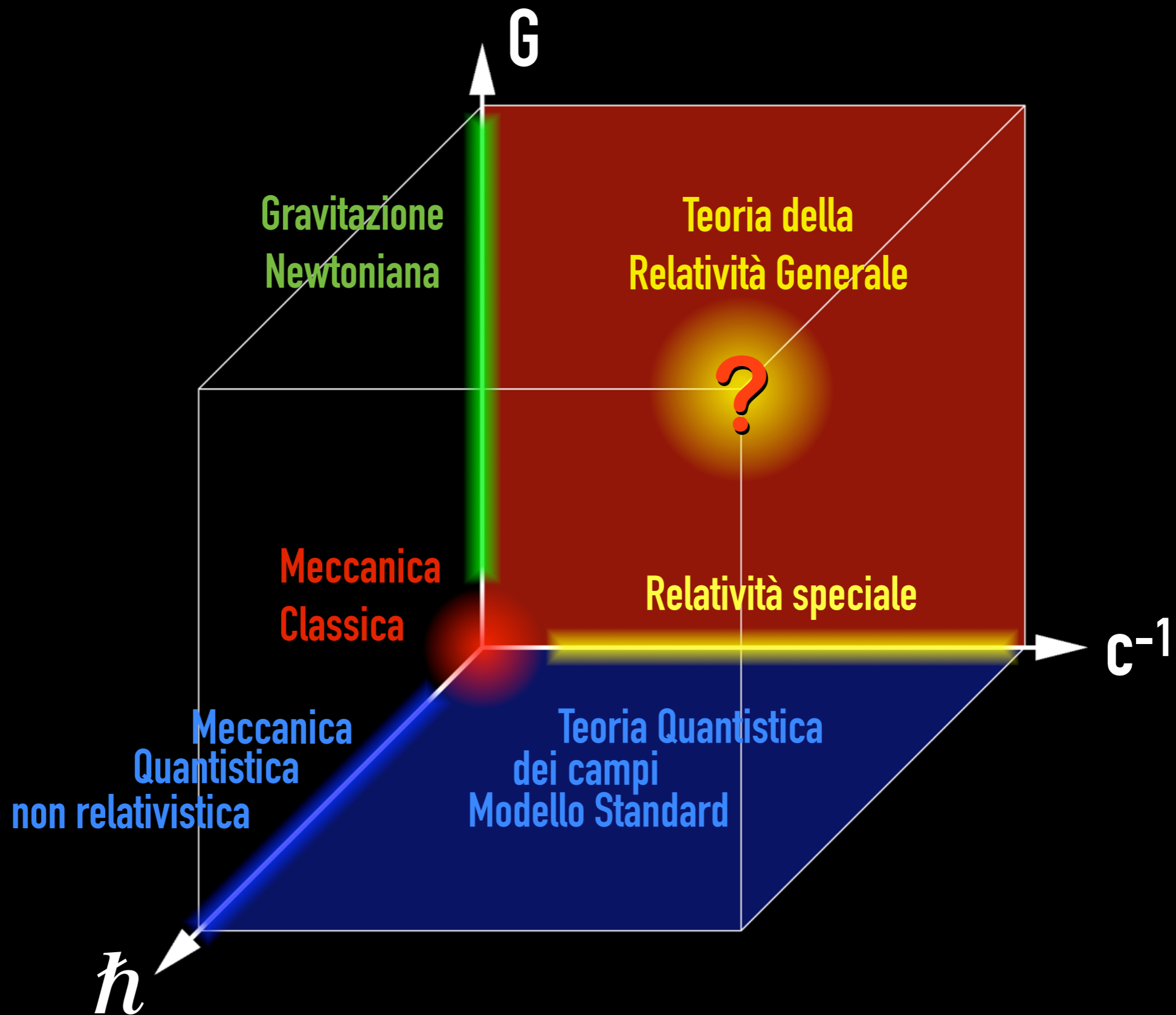


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

LA TEORIA CUBICA (\hbar, c^{-1}, G)



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



L'IMPROBABILE MONDO DELLA MECCANICA QUANTISTICA

In **meccanica quantistica**, la traiettoria di una particella che si muove da un punto iniziale **A** ad un punto finale **B**, **non è definita**.

Si “può pensare”, secondo il modello di **Feynman**, che la particella percorra **simultaneamente tutte le infinite traiettorie** che connettono i punti A e B.

Le traiettorie interagiscono tra loro. La **probabilità** che la particella arrivi in un punto “intermedio” **C** dipende da questa interazione che determina **fenomeni di interferenza**.



Richard Feynman



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

L'IMPROBABILE MONDO DELLA MECCANICA QUANTISTICA

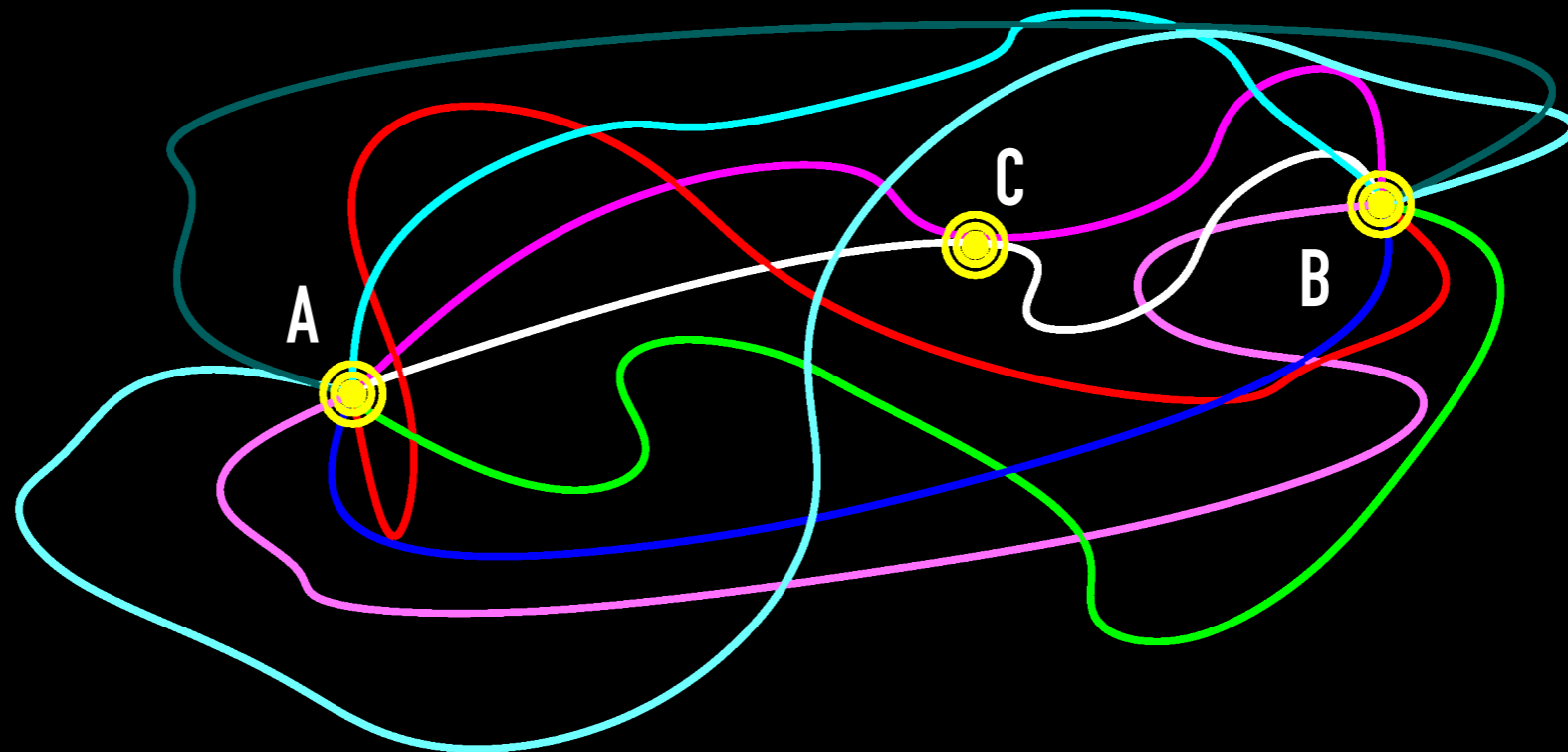
In **meccanica quantistica**, la traiettoria di una particella che si muove da un punto iniziale **A** ad un punto finale **B**, **non è definita**.

Si “può pensare”, secondo il modello di **Feynman**, che la particella percorra **simultaneamente tutte le infinite traiettorie** che connettono i punti A e B.

Le traiettorie interagiscono tra loro. La **probabilità** che la particella arrivi in un punto “intermedio” **C** dipende da questa interazione che determina **fenomeni di interferenza**.



Richard Feynman



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

L'IMPROBABILE MONDO DELLA MECCANICA QUANTISTICA

In **meccanica quantistica**, la traiettoria di una particella che si muove da un punto iniziale **A** ad un punto finale **B**, **non è definita**.

Si "può pensare", secondo il modello di **Feynman**, che la particella percorra **simultaneamente tutte le infinite traiettorie** che connettono i punti A e B.

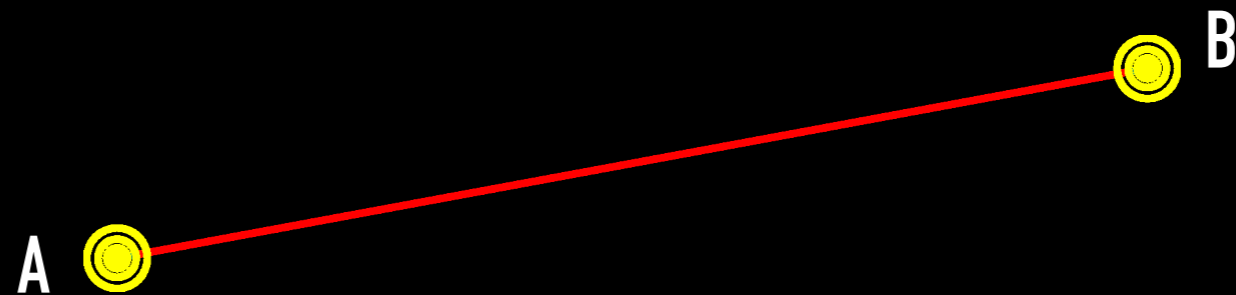
Le traiettorie interagiscono tra loro. La **probabilità** che la particella arrivi in un punto "intermedio" **C** dipende da questa interazione che determina **fenomeni di interferenza**.



Richard Feynman



Isaac Newton



In **meccanica classica**, secondo il modello di **Newton**, la traiettoria di una particella che si muove da un punto **A** ad un punto **B**, **è definita, calcolabile ed unica**.

È possibile riconciliare i due modelli?



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL PRINCIPIO DI MINIMA AZIONE

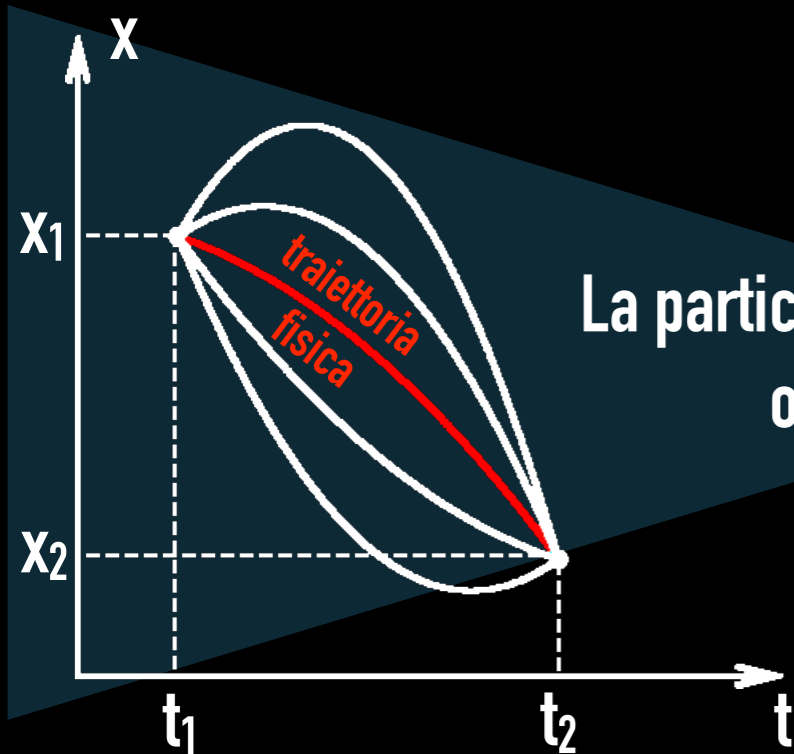
In **meccanica classica**, la legge oraria che descrive la traiettoria di una particella, può essere ottenuta con due procedure equivalenti

Equazioni
del moto
di Newton

Principio
di minima
azione

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

$$\text{Azione} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right) dt$$



La particella segue la traiettoria cui corrisponde il valore **minimo dell'azione**, ovvero il minimo scambio di energia tra termine cinetico e potenziale



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL PRINCIPIO DI MINIMA AZIONE

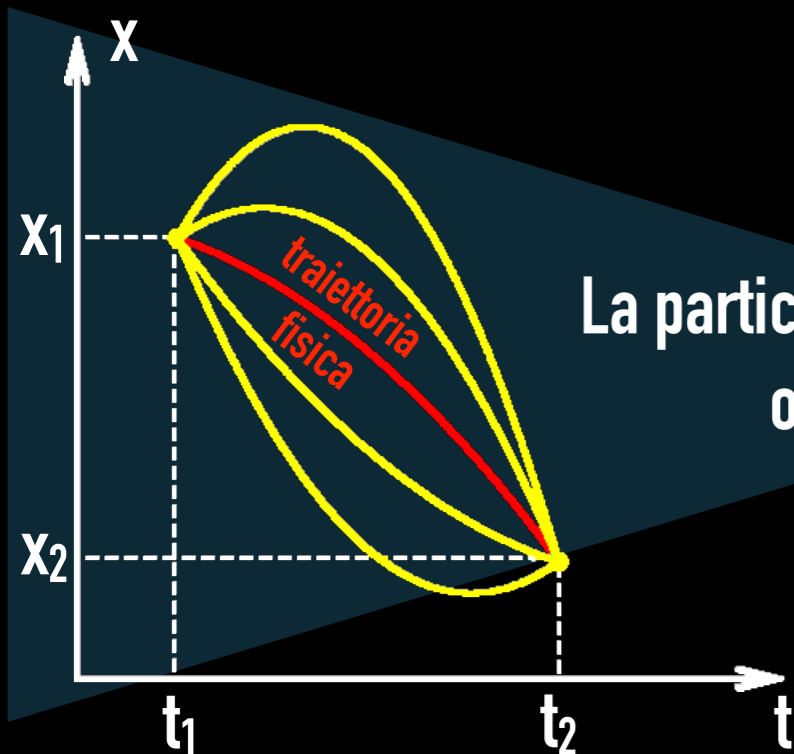
In **meccanica classica**, la legge oraria che descrive la traiettoria di una particella, può essere ottenuta con due procedure equivalenti

Equazioni
del moto
di Newton

Principio
di minima
azione

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

$$\text{Azione} = \int_{t_1}^{t_2} \left(\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right) dt$$



La particella segue la traiettoria cui corrisponde il valore **minimo dell'azione**, ovvero il minimo scambio di energia tra termine cinetico e potenziale

- Nel modello di Feynman la particella **"prova"** tutte le traiettorie AB.
- A ciascuna traiettoria è associata una grandezza vettoriale, una **"fase"**, che dipende dall'**azione** del processo.
- La **probabilità** che la particella sia osservata in B, $P(A \rightarrow B)$, è legata alla somma delle fasi, cioè alla somma su tutte le **"storie"** possibili.



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

INFN
Sezione di
Perugia



MC21.Perugia.16.2.21

IL MODELLO DI FEYNMAN

Il modello di Feynman “**generalizza**” quello di Newton, le traiettorie rettilinee si ottengono nel limite di **grandi azioni** (energie), ma grandi rispetto a cosa?

L'azione di “riferimento” che discrimina tra fenomeni classici e quantistici è la costante di Planck

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

Azione $\sim E \Delta t \gg \hbar$

Le traiettorie preferenziali sono quelle di Newton



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL MODELLO DI FEYNMAN

Il modello di Feynman “**generalizza**” quello di Newton, le traiettorie rettilinee si ottengono nel limite di **grandi azioni** (energie), ma grandi rispetto a cosa?

L'azione di “riferimento” che discrimina tra fenomeni classici e quantistici è la costante di Planck

$$\hbar = 1.055 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$$

$$\text{Azione} \sim E \Delta t \gg \hbar$$

Le traiettorie preferenziali sono quelle di Newton

$$\text{Azione} \sim E \Delta t \sim \hbar$$

Tutti i percorsi sono **ugualmente probabili** e sommandoli si ha **interferenza**

Vale il principio di indeterminazione di Heisenberg

$$\Delta x \Delta p_x \sim \hbar$$



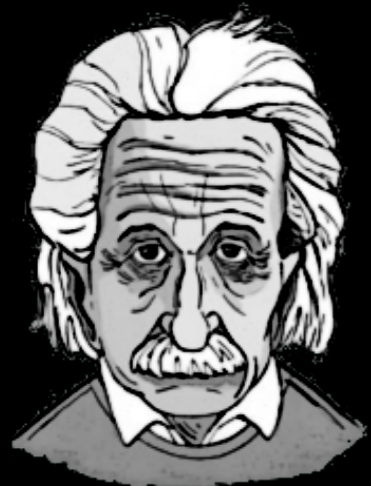
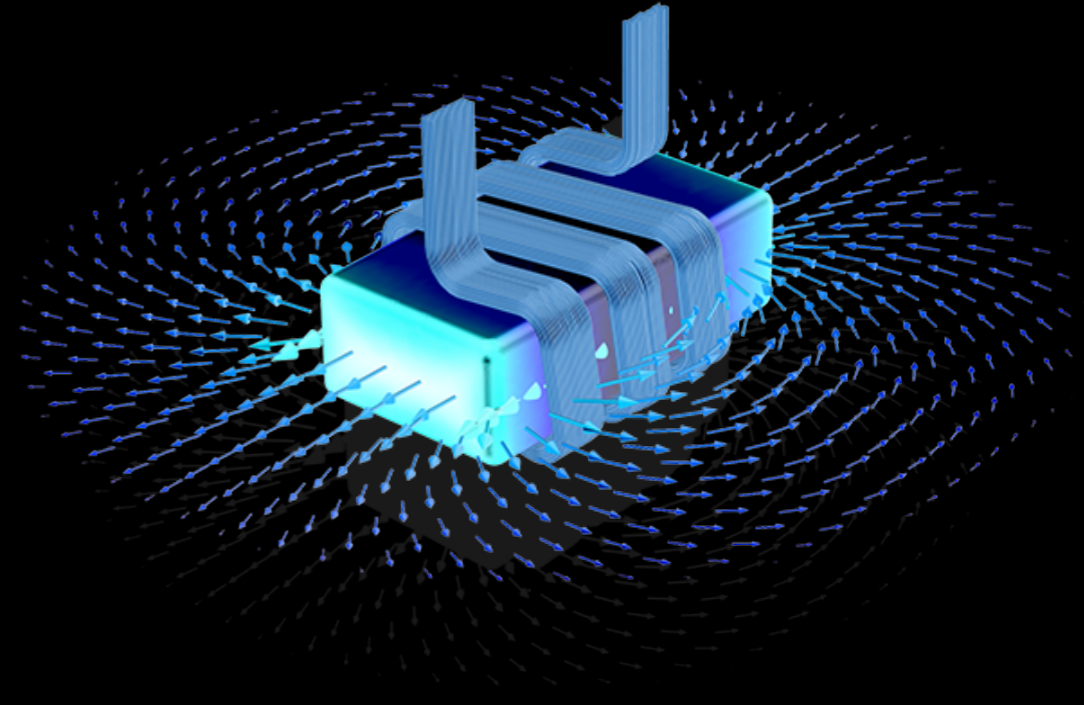
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

LA TEORIA DELLA RELATIVITÀ SPECIALE

James Clerck Maxwell (1831–1879) unificò elettricità e magnetismo in una sola formulazione matematica, le famose: **quattro equazioni di Maxwell**. Tali equazioni stabiliscono che il campo elettromagnetico si propaga sotto forma di onde ad alla velocità $c \approx 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$.



Albert Einstein

La velocità della luce nel vuoto rappresenta la velocità limite **costante in ogni sistema di riferimento**.

Nessuna contraddizione gli **intervalli di tempo** e **spazio** si trasformano entrambi in modo tale che la velocità della luce rimanga **invariata in ogni sistema di riferimento inerziale**.

Tutte le leggi fisiche sono **invarianti** in sistemi di riferimento inerziali. Quantità di moto ed energia si conservano e vale l'identità

$$E = m c^2$$



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



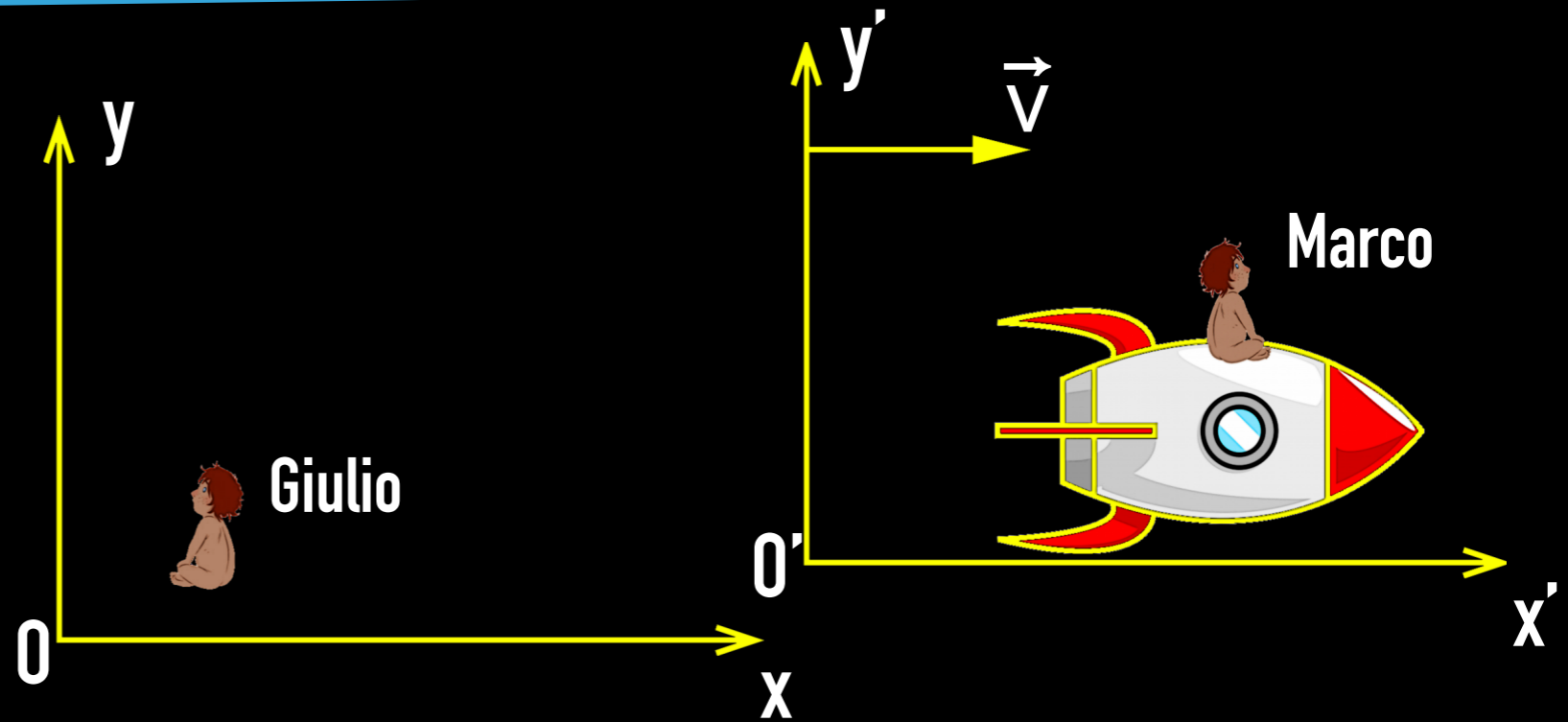
MC21.Perugia.16.2.21

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Trasformazioni di Galileo

$$\begin{cases} x' = x - vt \\ y' = y \\ t' = t \end{cases}$$

Velocità limite = ∞



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



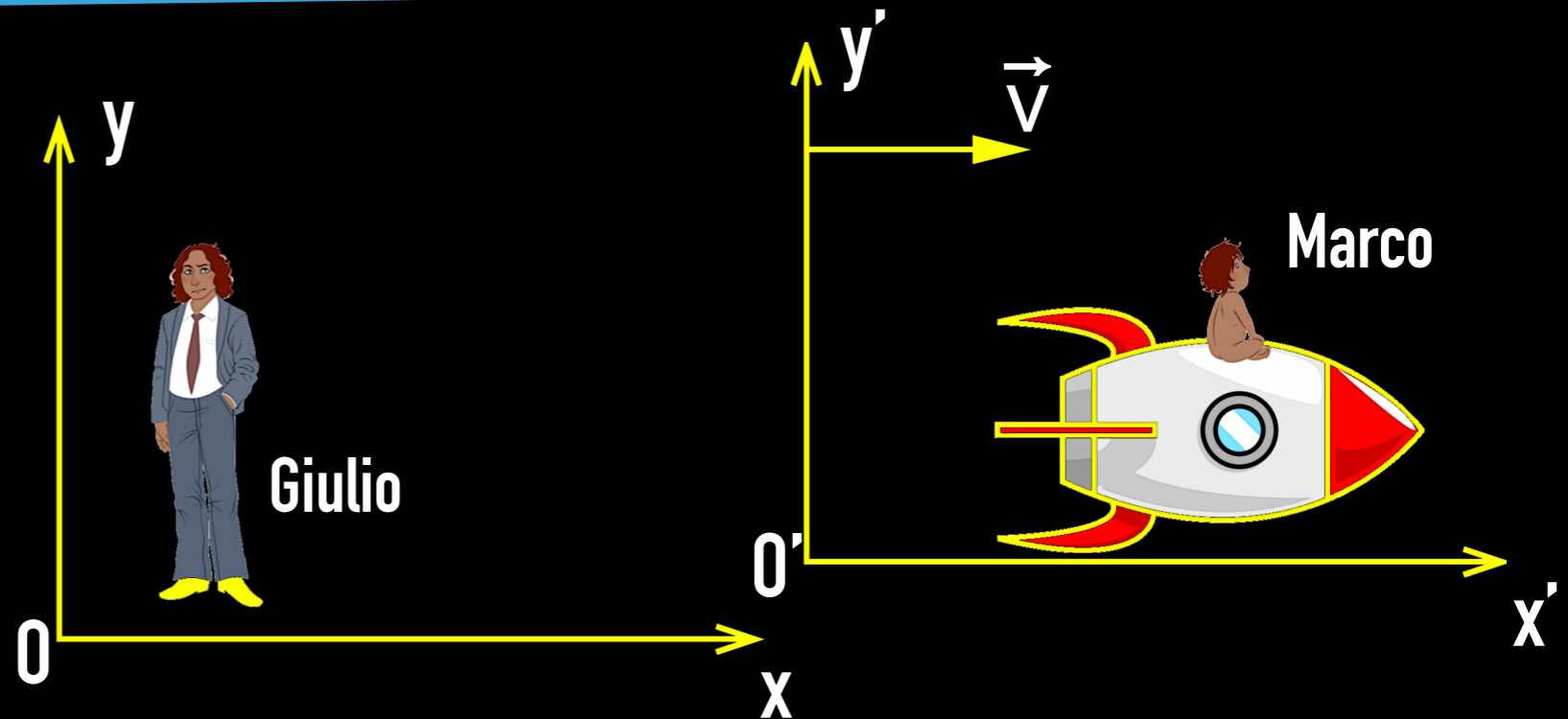
MC21.Perugia.16.2.21

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Trasformazioni di Lorentz

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

Velocità limite = c



 Dilatazione dei tempi

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



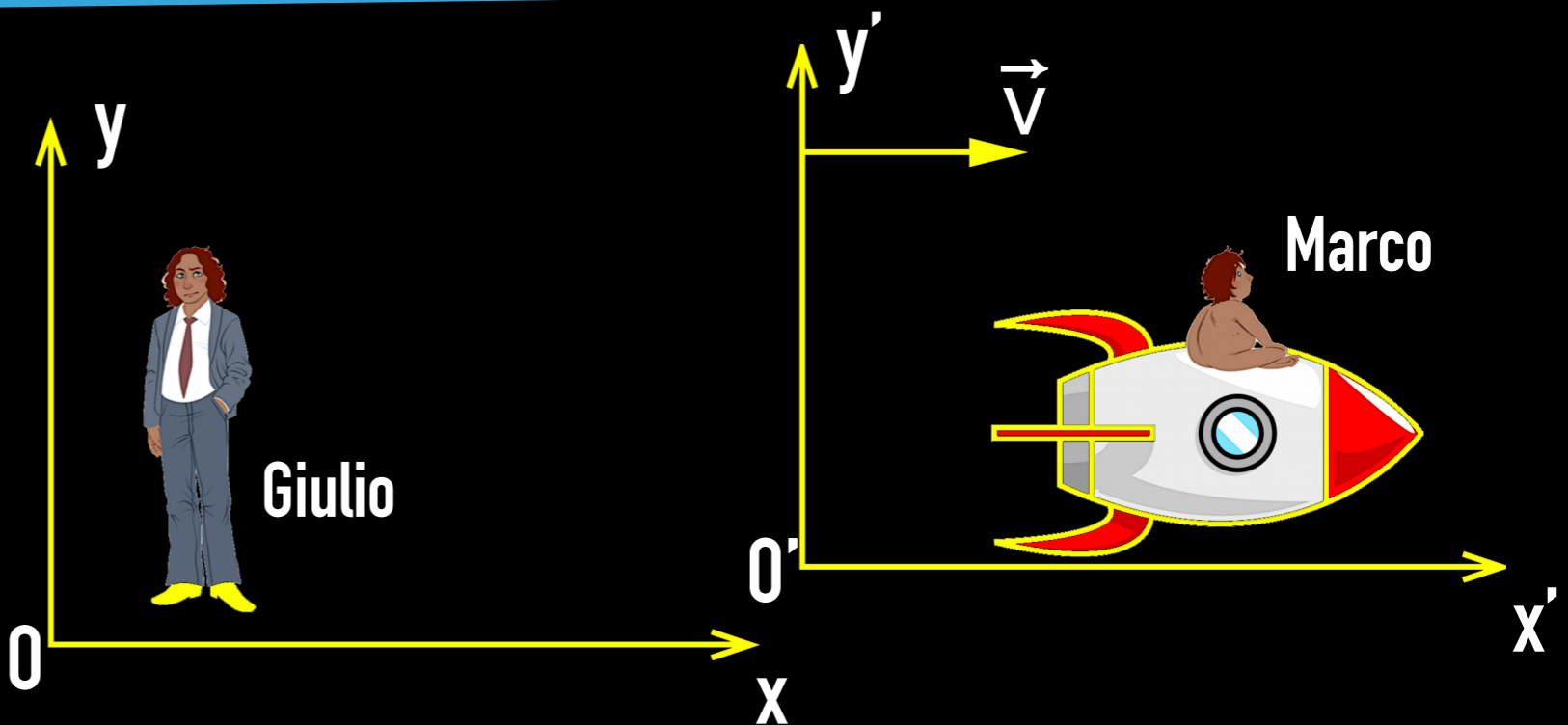
MC21.Perugia.16.2.21

LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Trasformazioni di Lorentz

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

Velocità limite = c



 Dilatazione dei tempi

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

 Dilatazione della massa

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

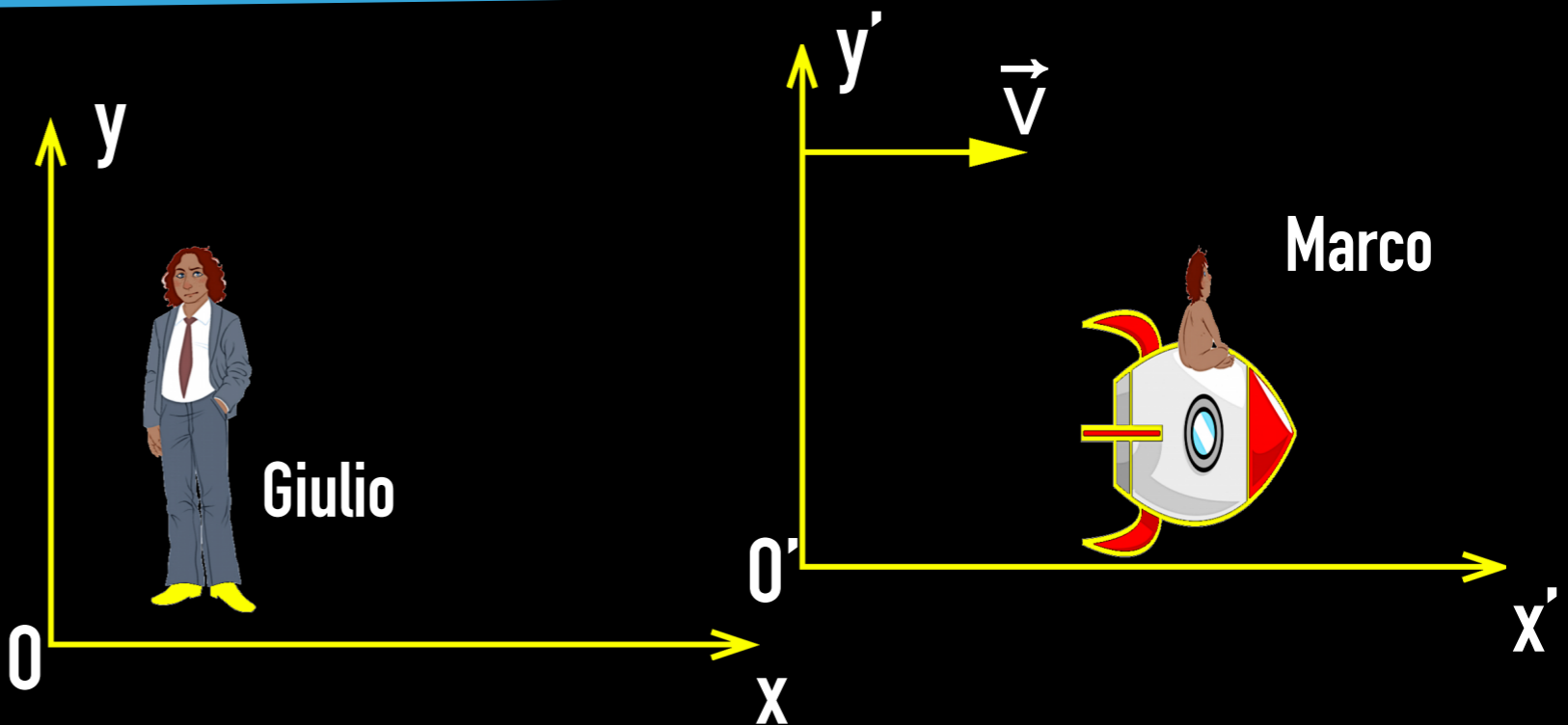


LE TRASFORMAZIONI DI LORENTZ

Trasformazioni di Lorentz

$$\begin{cases} x' = \frac{x - vt}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \\ y' = y \\ t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} \end{cases}$$

Velocità limite = c



 Dilatazione dei tempi

$$\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

 Dilatazione della massa

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$$

 Contrazione della lunghezza

$$\Delta x' = \Delta x \sqrt{1 - v^2/c^2}$$



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

INFN
Sezione di
Perugia



MC21.Perugia.16.2.21

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₁

Un **campo** in fisica è una legge
che definisce una grandezza fisica in ogni punto
dello spaziotempo



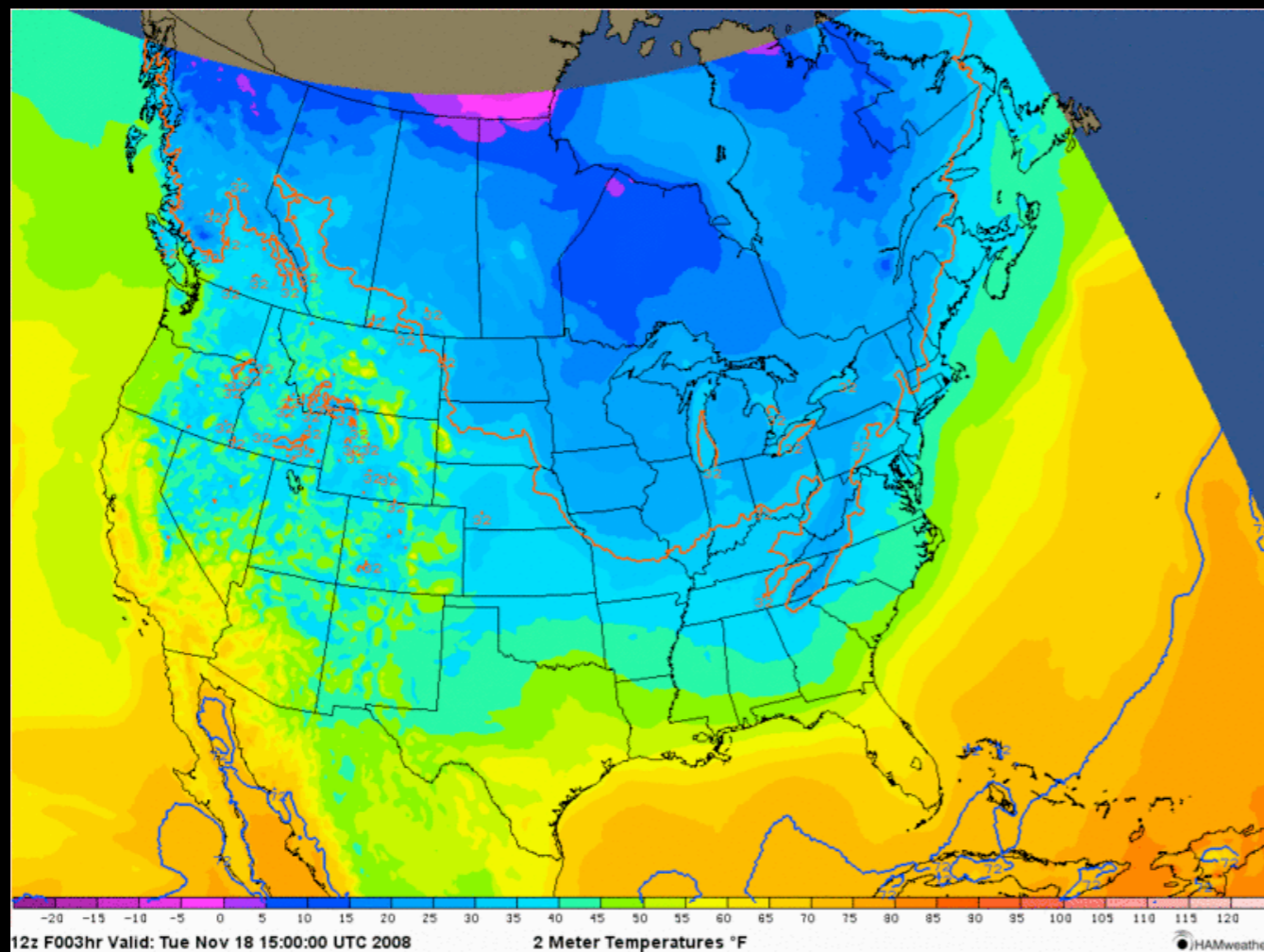
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₁

Un **campo** in fisica è una legge
che definisce una grandezza fisica in ogni punto
dello spaziotempo



La grandezza fisica
può essere **scalare** come, ad
esempio, la **temperatura**



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

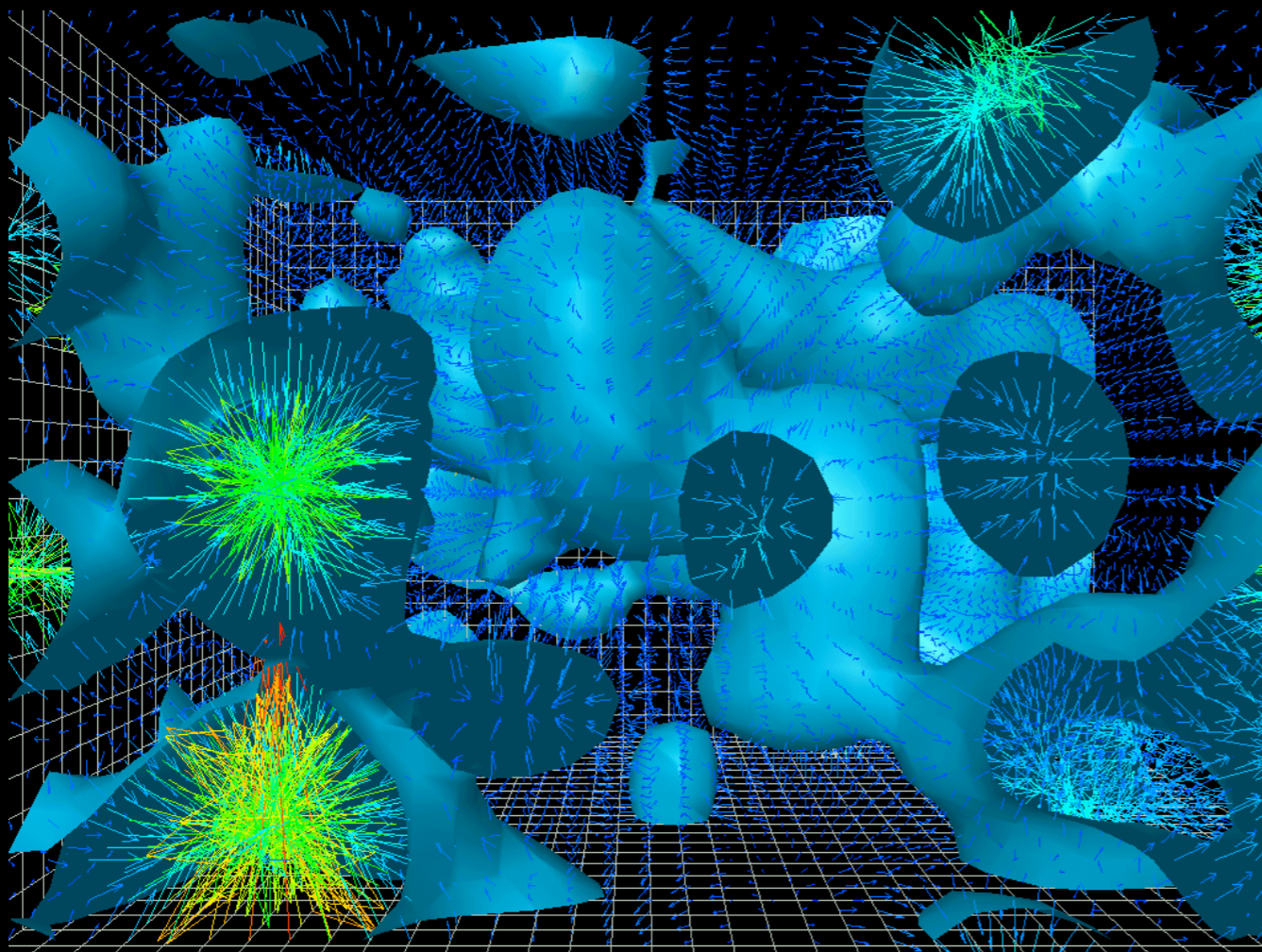
INFN
Sezione di
Perugia



MC21.Perugia.16.2.21

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₁

Un **campo** in fisica è una legge
che definisce una grandezza fisica in ogni punto
dello spaziotempo



La grandezza fisica
può essere **vettoriale** come,
ad esempio, la **forza**



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

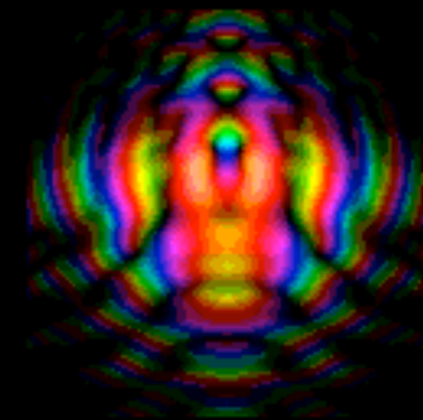


MC21.Perugia.16.2.21

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₂

La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!
Includendo la relatività speciale si ottiene la Teoria Quantistica dei Campi

Il concetto di particella come entità “**indistruttibile**” deve essere abbandonato e sostituito da quello di campo:
il campo dell'elettrone Ψ ,
del fotone A_μ , . . .



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

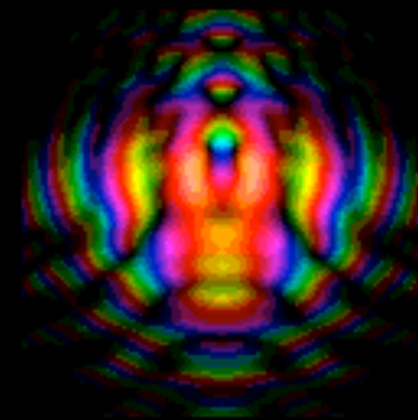


MC21.Perugia.16.2.21

TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₂

La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!
Includendo la relatività speciale si ottiene la Teoria Quantistica dei Campi

Il concetto di particella come entità “**indistruttibile**” deve essere abbandonato e sostituito da quello di campo:
il campo dell’elettrone Ψ ,
del fotone A_μ , . . .



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

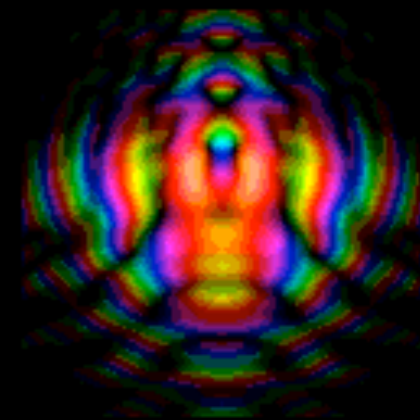


MC21.Perugia.16.2.21

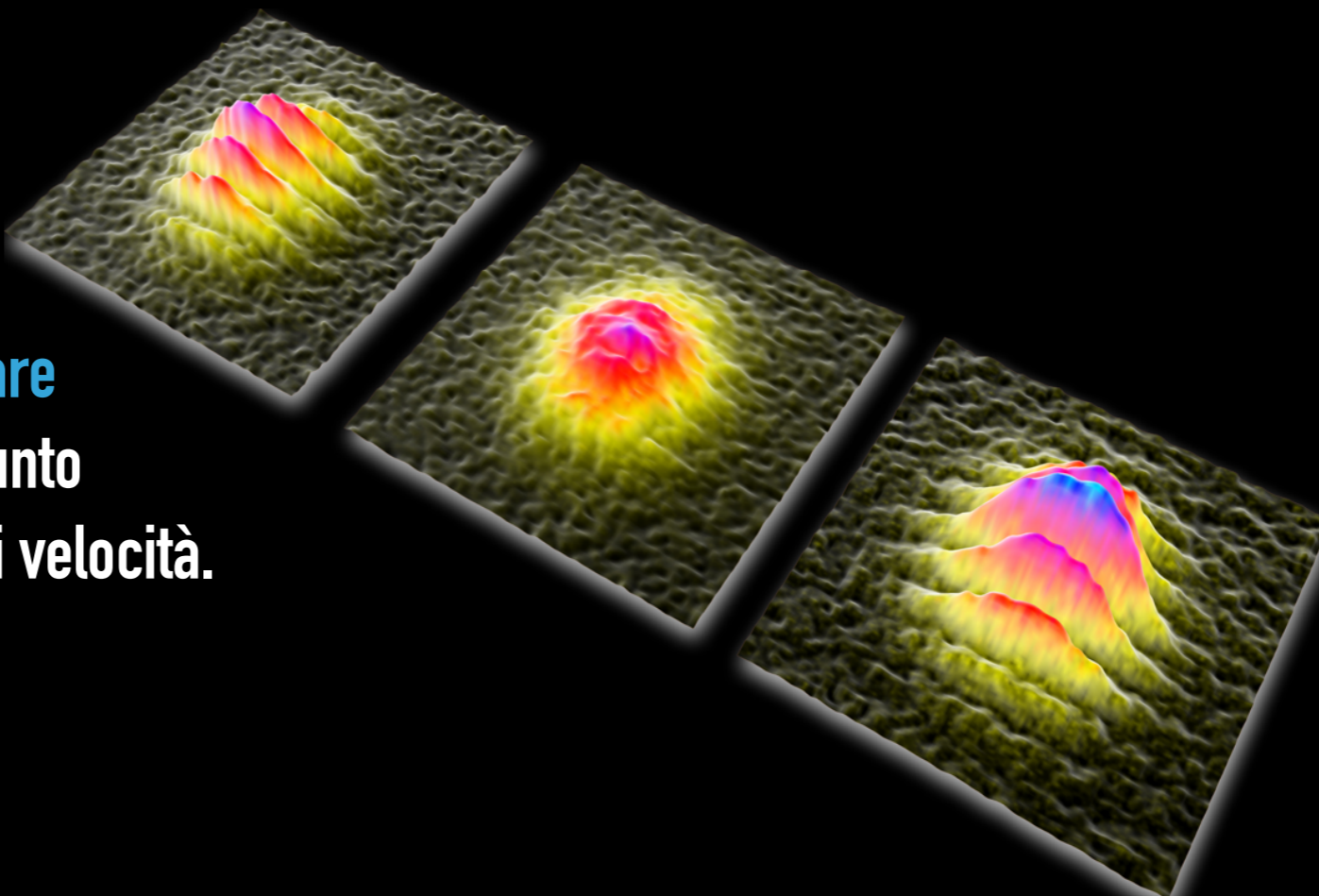
TEORIA QUANTISTICA DEI CAMPI₂

La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!
Includendo la relatività speciale si ottiene la Teoria Quantistica dei Campi

Il concetto di particella come entità “**indistruttibile**” deve essere abbandonato e sostituito da quello di campo:
il campo dell'elettrone Ψ ,
del fotone A_μ , . . .



Le Particelle sono **eccitazioni** dei campi quantistici. Stimolando o smorzando tali eccitazioni è possibile, matematicamente, **creare** o **distruggere** particelle in ogni punto dello spaziotempo e con qualsiasi velocità.



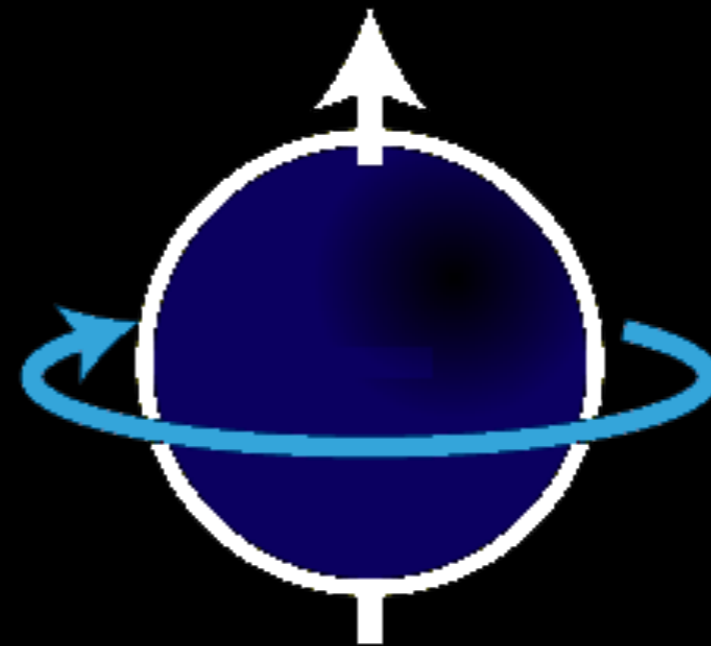
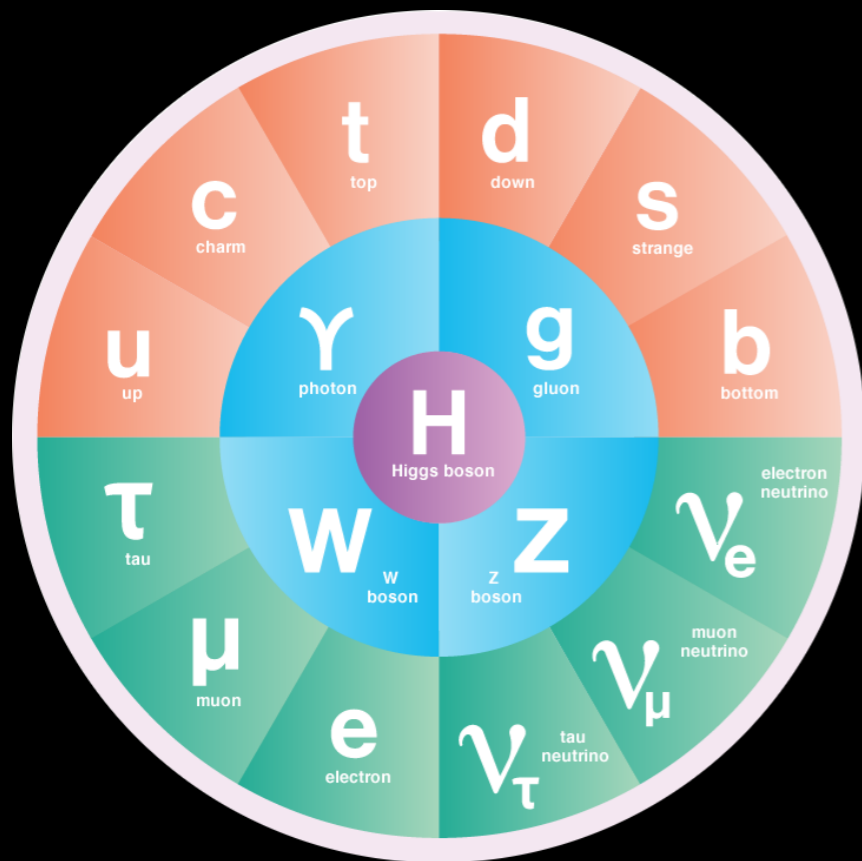
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

Lo **spin** è una **proprietà intrinseca** delle particelle, ha le dimensioni di un momento angolare. Nel Modello Standard le particelle sono **classificate in base al loro spin**.

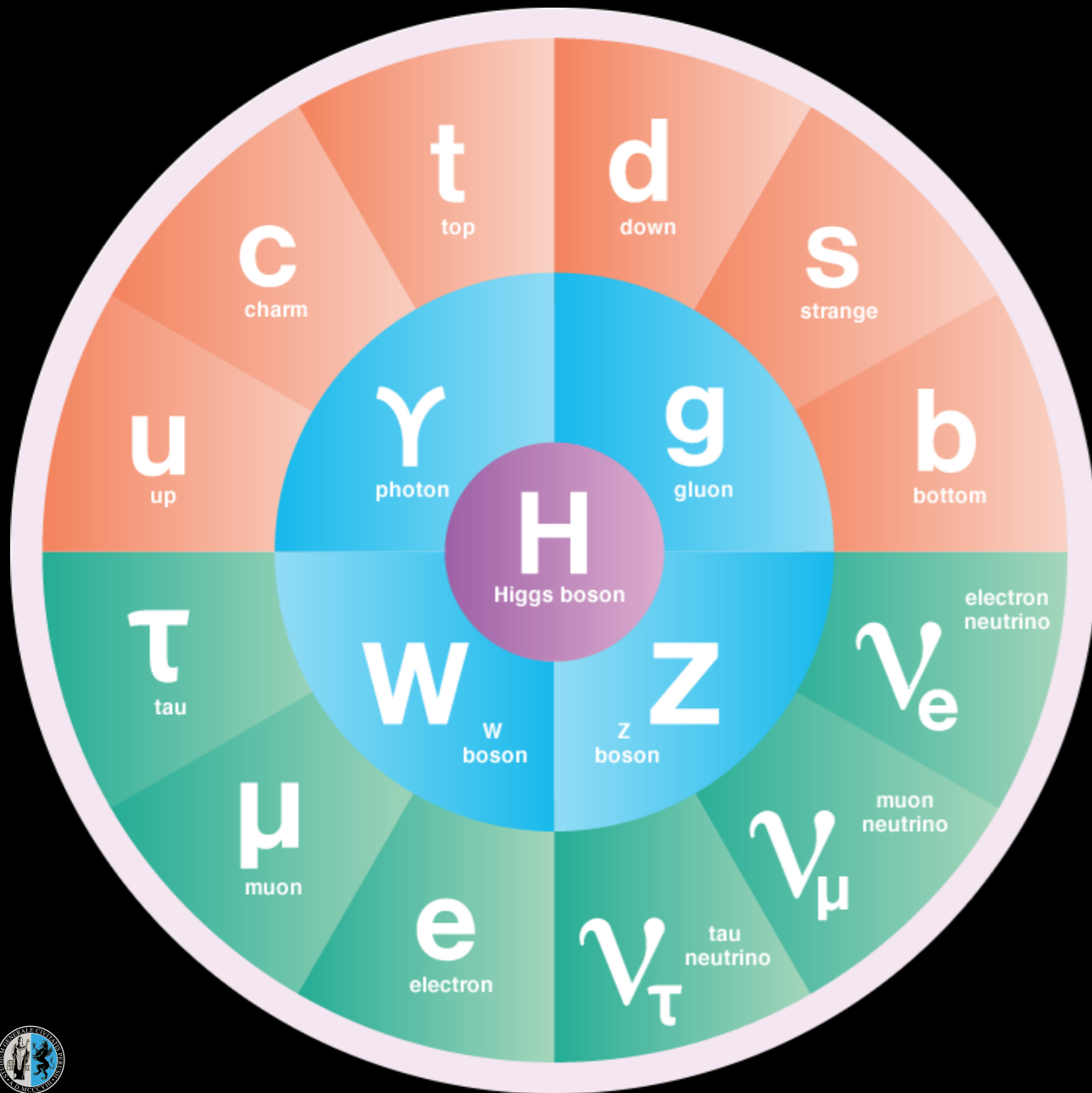


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI



Materia (fermioni)

- Campi con spin 1/2
- Tre generazioni di coppie di quark
- Tre generazioni di coppie di leptoni

Interazioni (bosoni)

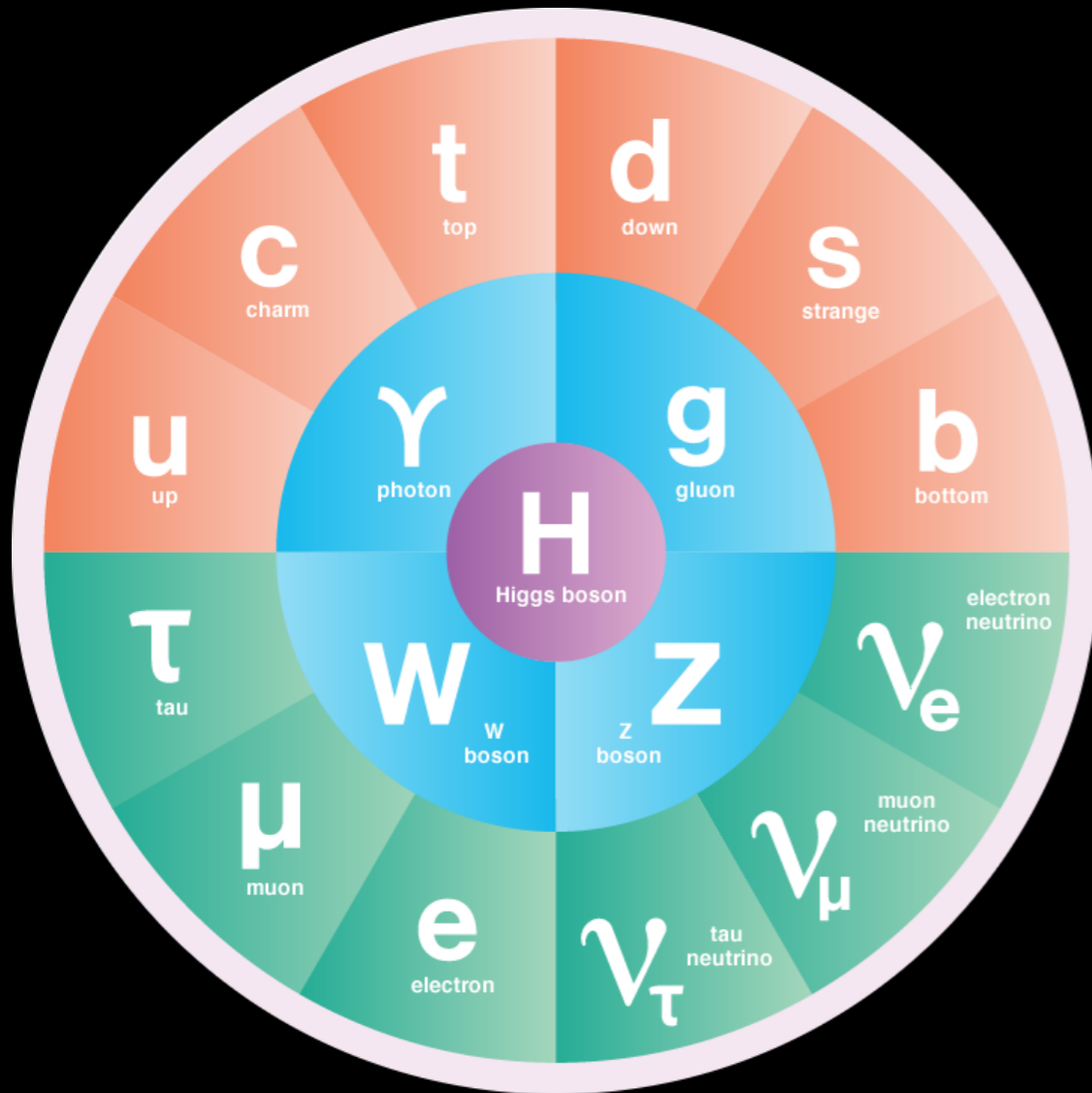
- Campi con spin 1
- Interazione elettromagnetica: fotone γ
- Interazione debole: bosoni W^+ , W^- , Z_0
- Interazione forte: gluone g



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



I QUARK

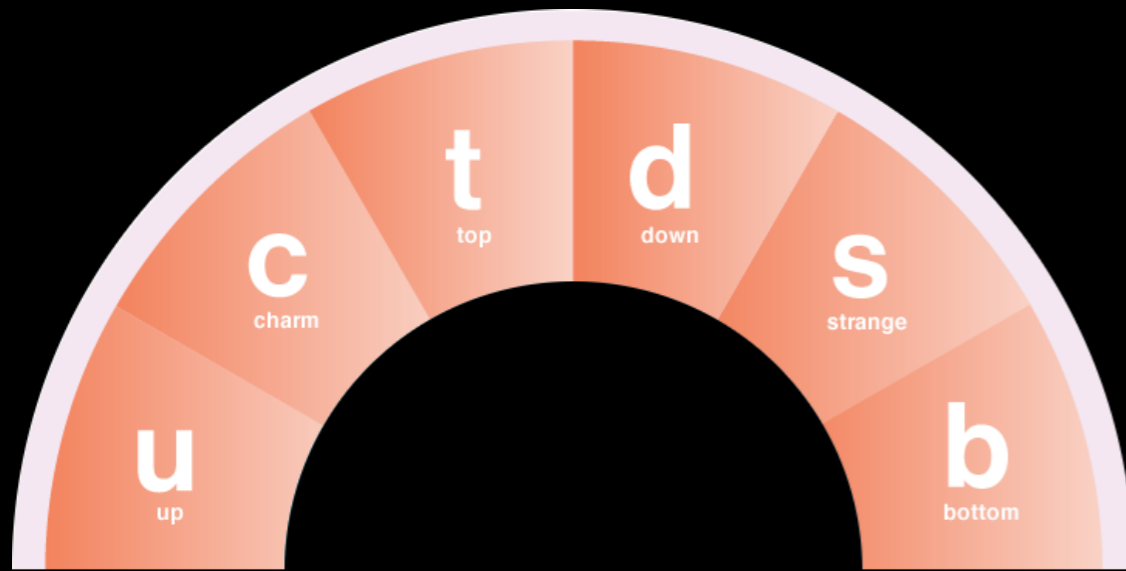


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I QUARK



Sei particelle in tre generazioni: “up” e “down”



Spin = $1/2$, sono fermioni



Hanno cariche $2/3$ gli “up” e $-1/3$ i “down”



Ciascun quark ha un’**antiparticella** con la stessa massa e cariche opposte

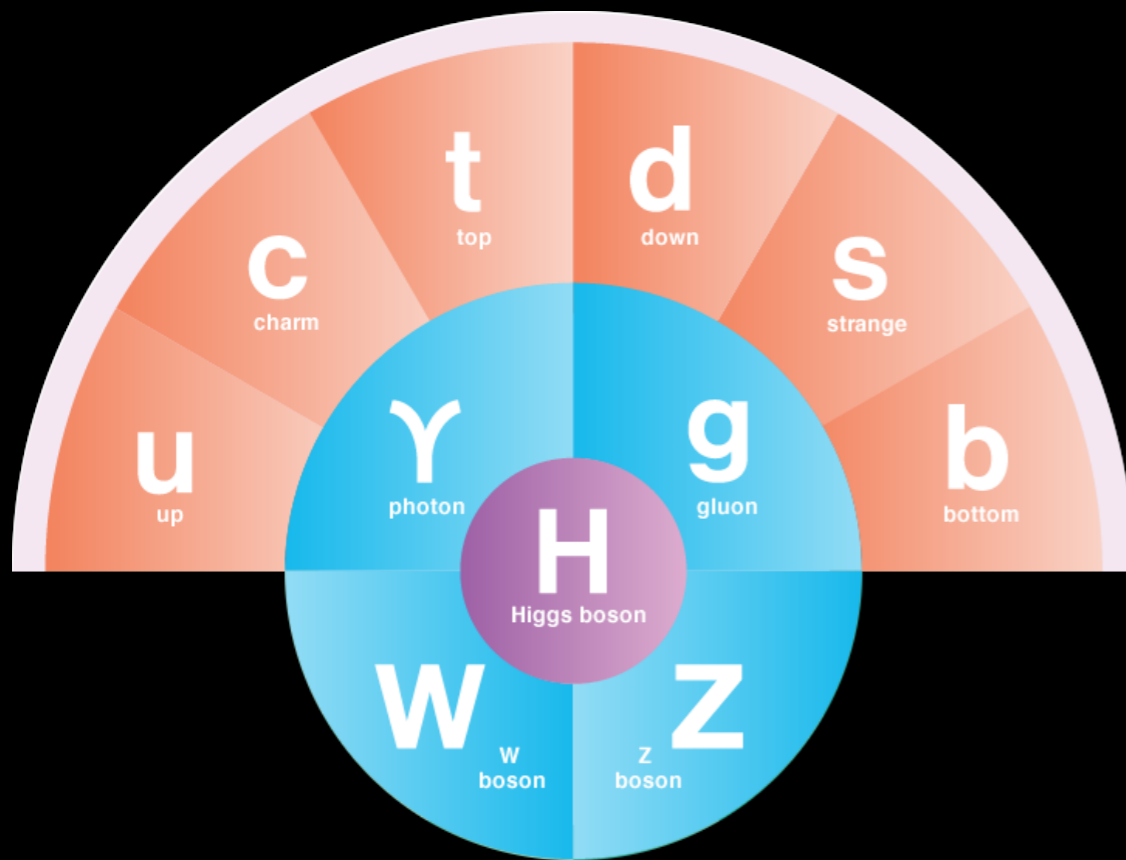


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I QUARK

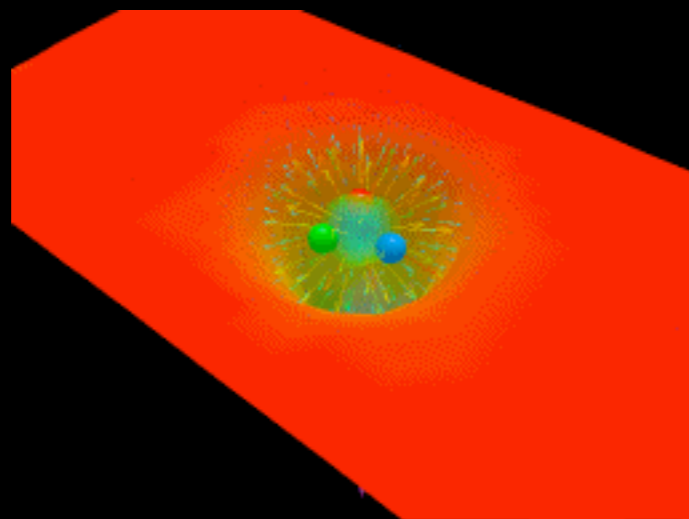


- Sei particelle in tre generazioni: “up” e “down”
- Spin = 1/2, sono fermioni
- Hanno cariche $2/3$ gli “up” e $-1/3$ i “down”
- Ciascun quark ha un’**antiparticella** con la stessa massa e cariche opposte

I quark hanno carica elettrica, di colore e debole sono quindi soggetti a tutte le interazioni del Modello Standard

L'intensità e le proprietà di simmetria dell'interazione forte sono responsabili del confinamento dei quark

non esistono quark liberi

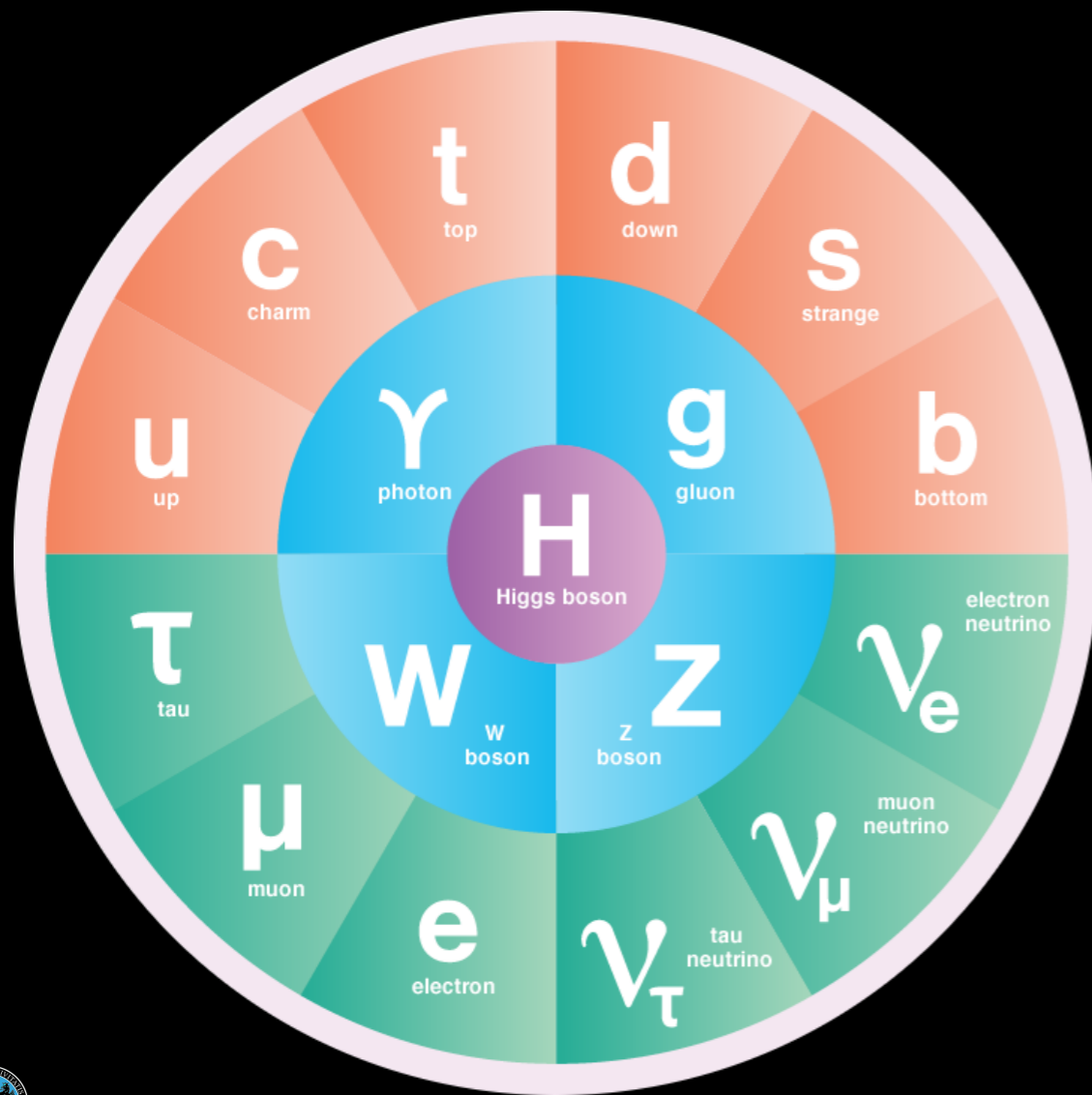


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I LEPTONI CARICHI

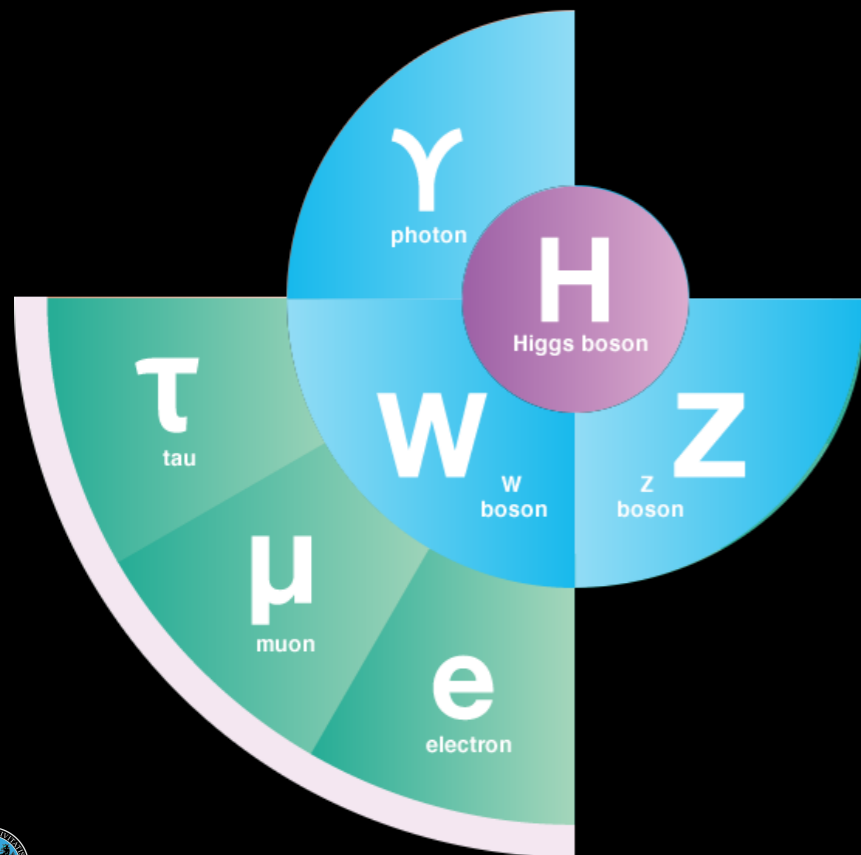






DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I LEPTONI CARICHI



-  Tre particelle in tre generazioni
-  Spin = 1/2, sono fermioni
-  Hanno carica **-1**
-  Ciascun leptone carico ha un'antiparticella con la stessa massa e carica opposta

I leptoni carichi non hanno carica di colore interagiscono solo attraverso le interazioni elettromagnetica e debole

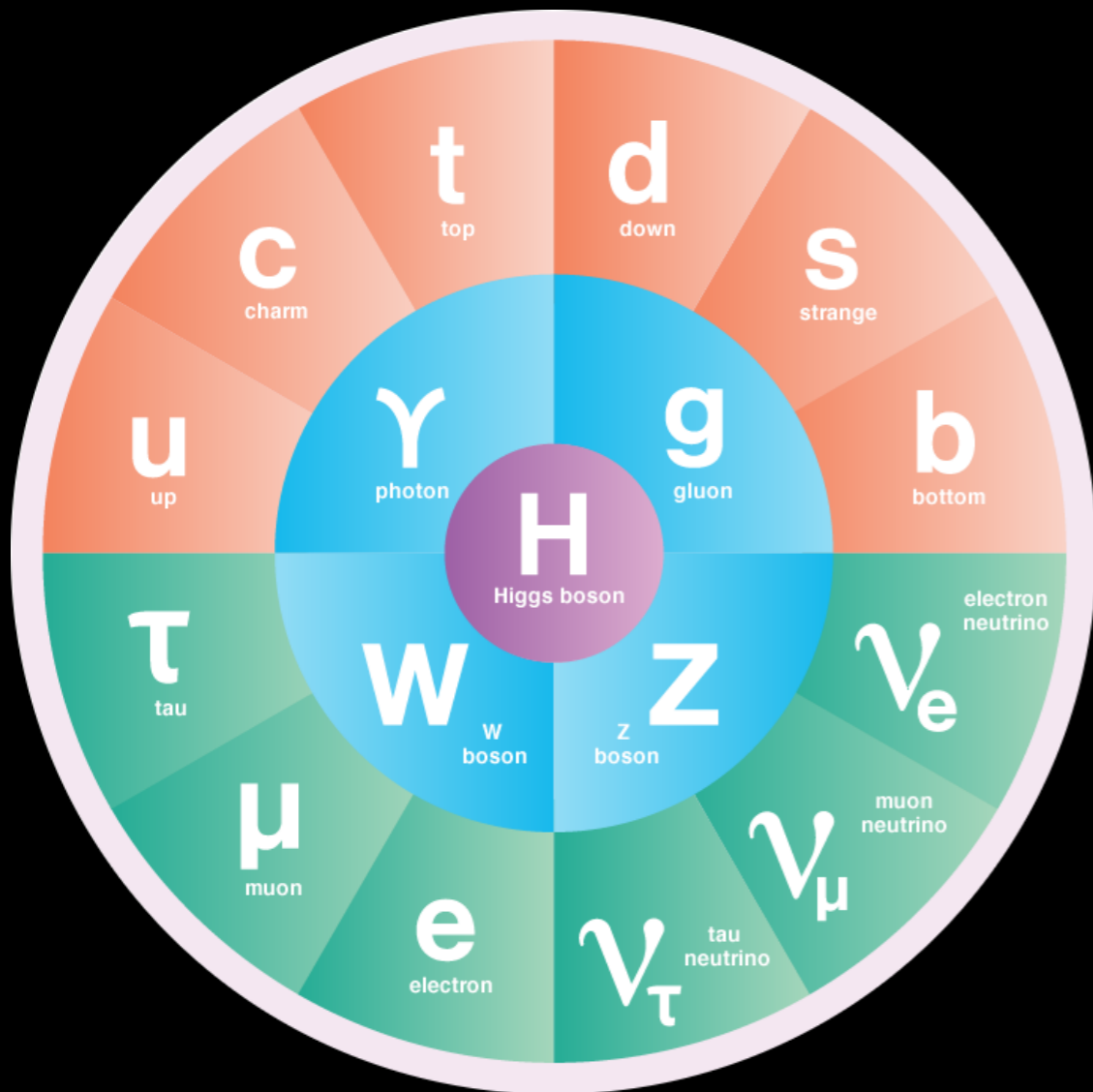


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I NEUTRINI

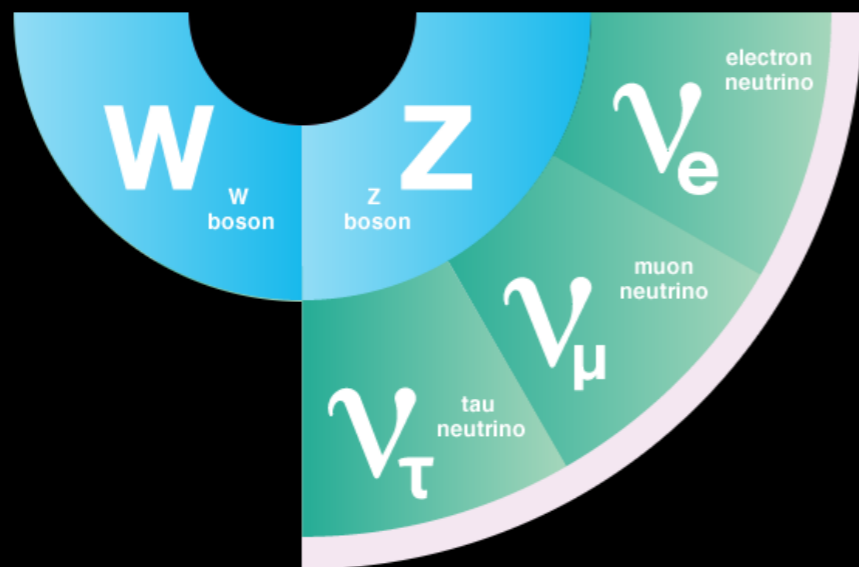






DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I NEUTRINI



-  Tre particelle in tre generazioni
-  Spin = 1/2, sono fermioni
-  Hanno carica nulla
-  Ciascun neutrino ha un'antiparticella con la stessa massa

I neutrini non hanno né carica di colore né carica elettrica, interagiscono solo attraverso l'interazione debole



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

I GRAFICI DI FEYNMAN

Lagrangiana del Modello Standard

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - i \bar{\Psi} \not{D} \Psi + \Psi_j \lambda_{jl} \Psi_l H + \text{c.h.} + |D_\mu H|^2 - V(H) + v_j M_{jl} \nu_l$$

I GRAFICI DI FEYNMAN

Lagrangiana della QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}} = -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} - i \bar{\Psi} \not{D} \Psi$$

Campi elettromagnetici fermioni
carichi liberi e interagenti

I GRAFICI DI FEYNMAN

Interazione della QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}}^{\text{int}} = -e \bar{\Psi} A_{\mu} \gamma^{\mu} \Psi$$

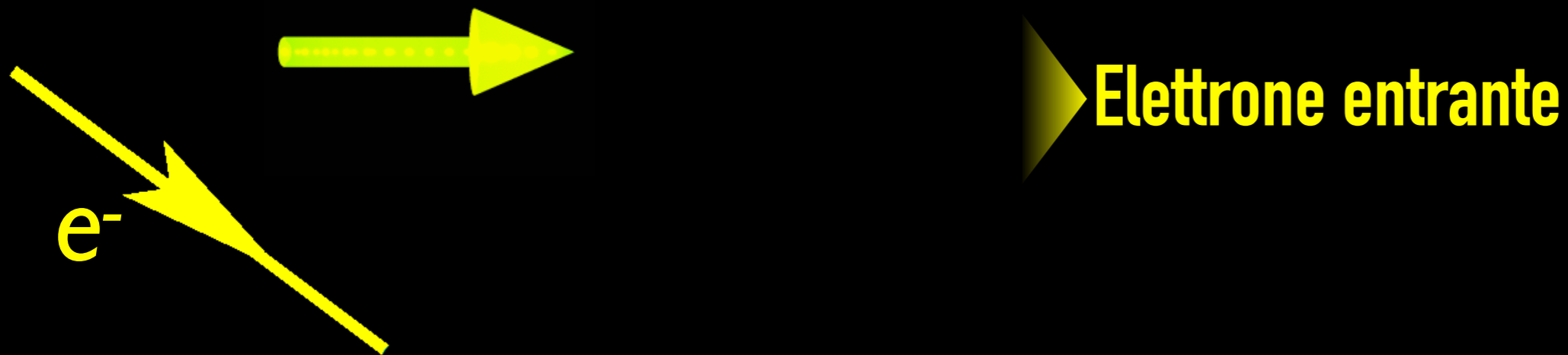
Interazione tra fermioni carichi e
campo elettromagnetico

I GRAFICI DI FEYNMAN

Interazione della QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}}^{\text{int}} = -e \bar{\Psi} A_{\mu} \gamma^{\mu} \Psi$$

Interazione tra fermioni carichi e
campo elettromagnetico

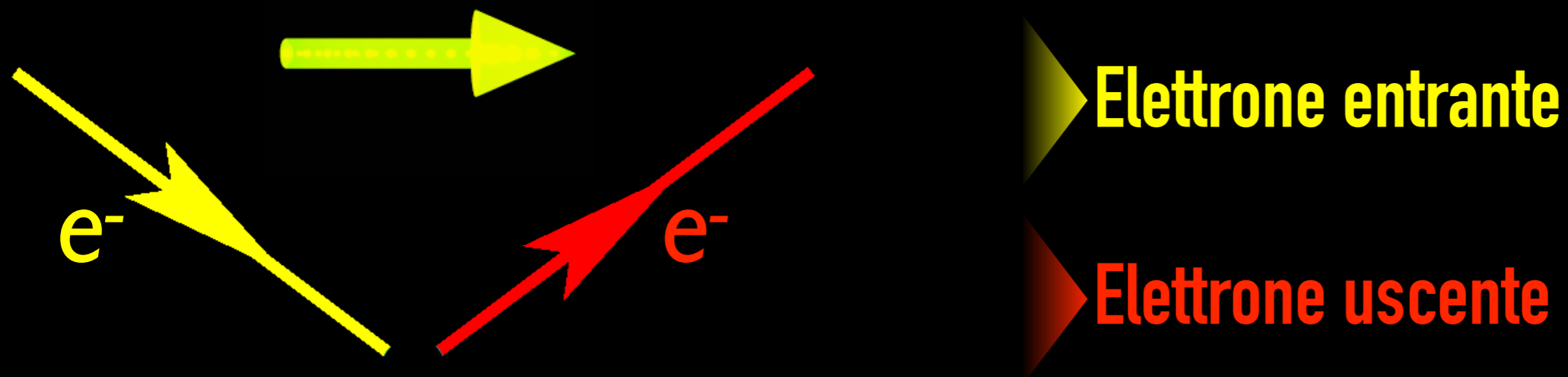


I GRAFICI DI FEYNMAN

Interazione della QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}}^{\text{int}} = -e \bar{\Psi} A_{\mu} \gamma^{\mu} \Psi$$

Interazione tra fermioni carichi e campo elettromagnetico

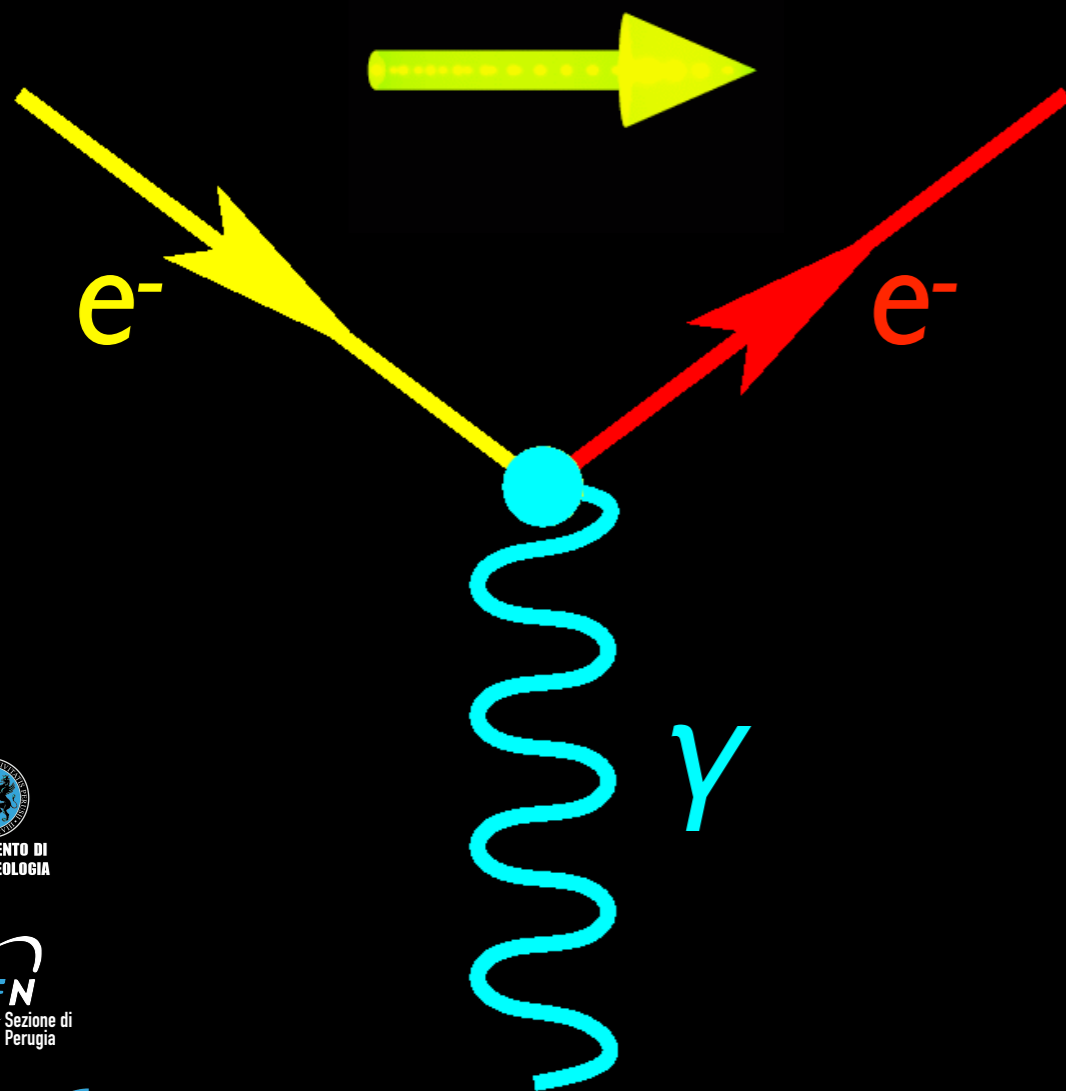


I GRAFICI DI FEYNMAN

Interazione della QED

$$\mathcal{L}_{\text{QED}}^{\text{int}} = -e \bar{\Psi} A_{\mu} \gamma^{\mu} \Psi$$

Interazione tra fermioni carichi e campo elettromagnetico

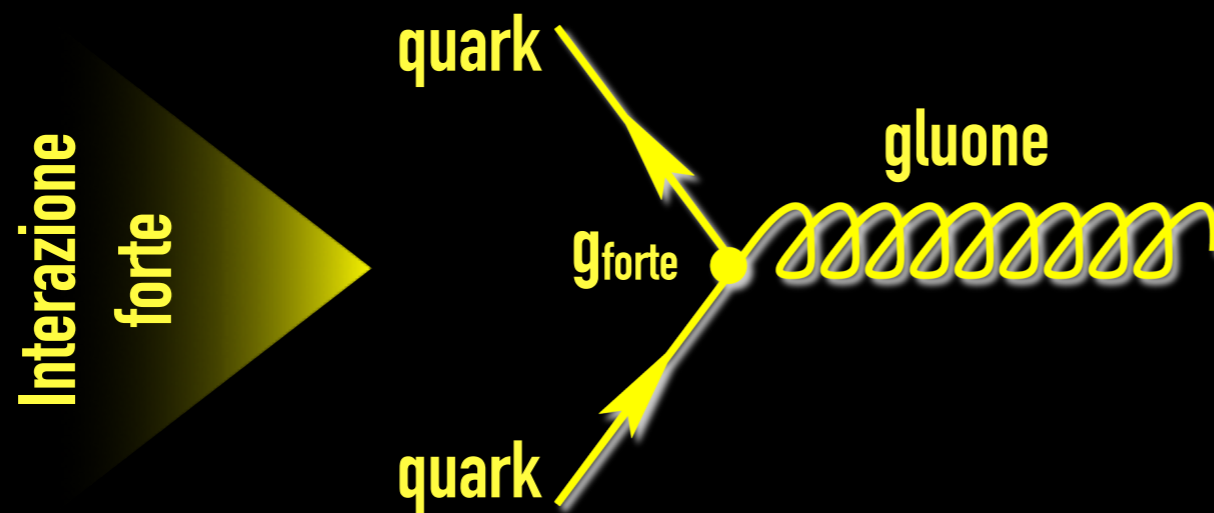


Elettrone entrante

Elettrone uscente

Fotone mediatore dell'interazione EM

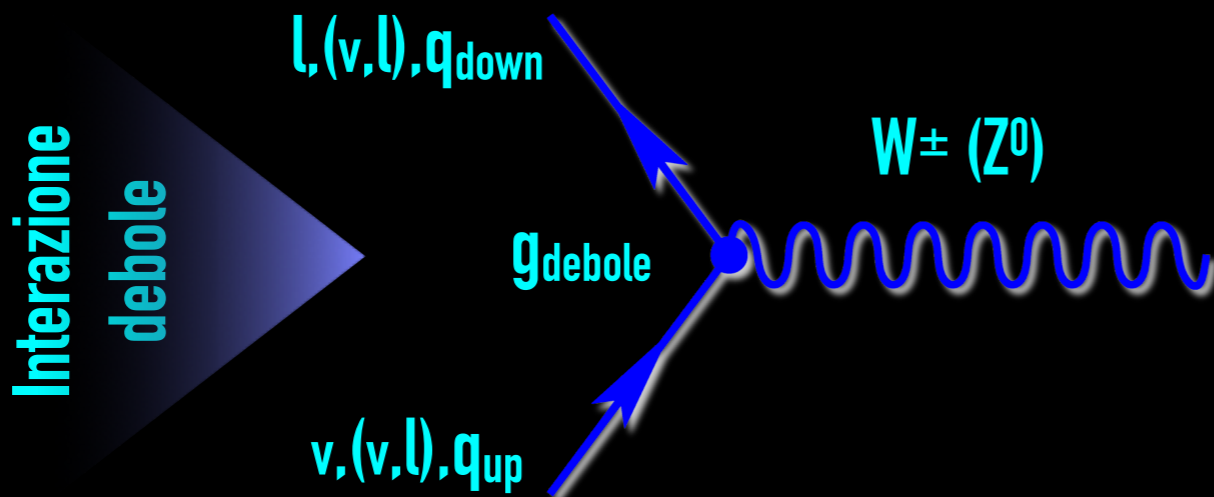
I GRAFICI DI FEYNMAN DEL MODELLO STANDARD



Intensità dell'interazione forte

$$g_{\text{forte}}(1 \text{ GeV}) \sim 3.0$$

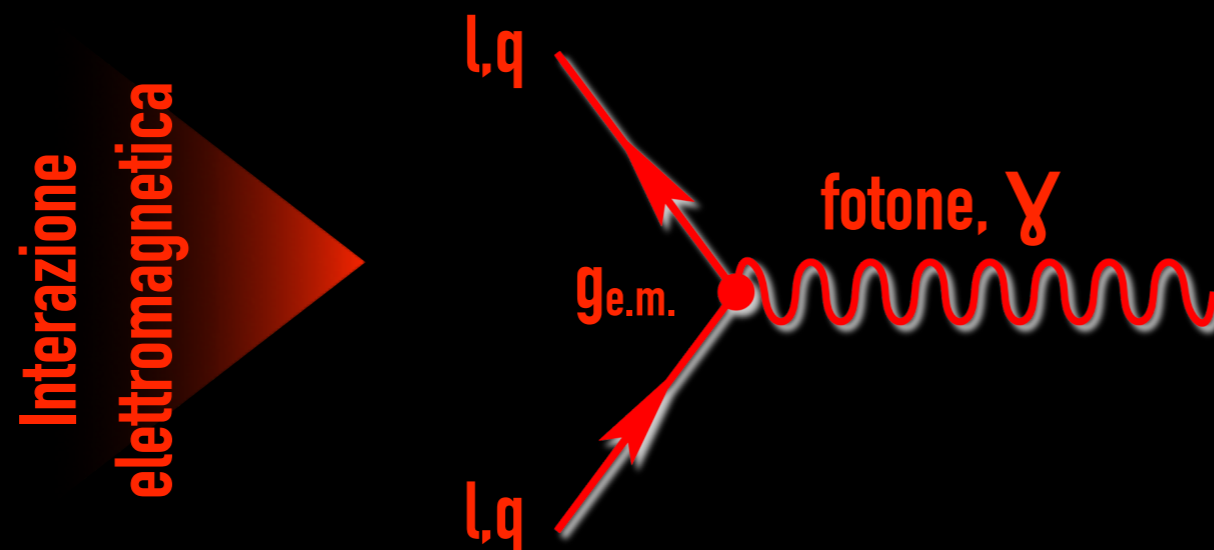
$$g_{\text{forte}}(100 \text{ GeV}) \sim 1.2$$



Intensità dell'interazione debole

$$g_{\text{debole}}(1 \text{ GeV}) \sim 0.01$$

$$g_{\text{debole}}(100 \text{ GeV}) \sim 0.4$$



Intensità dell'interazione elettromagnetica

$$g_{\text{e.m.}}(1 \text{ GeV}) \sim 0.2$$

$$g_{\text{e.m.}}(100 \text{ GeV}) \sim 0.3$$



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

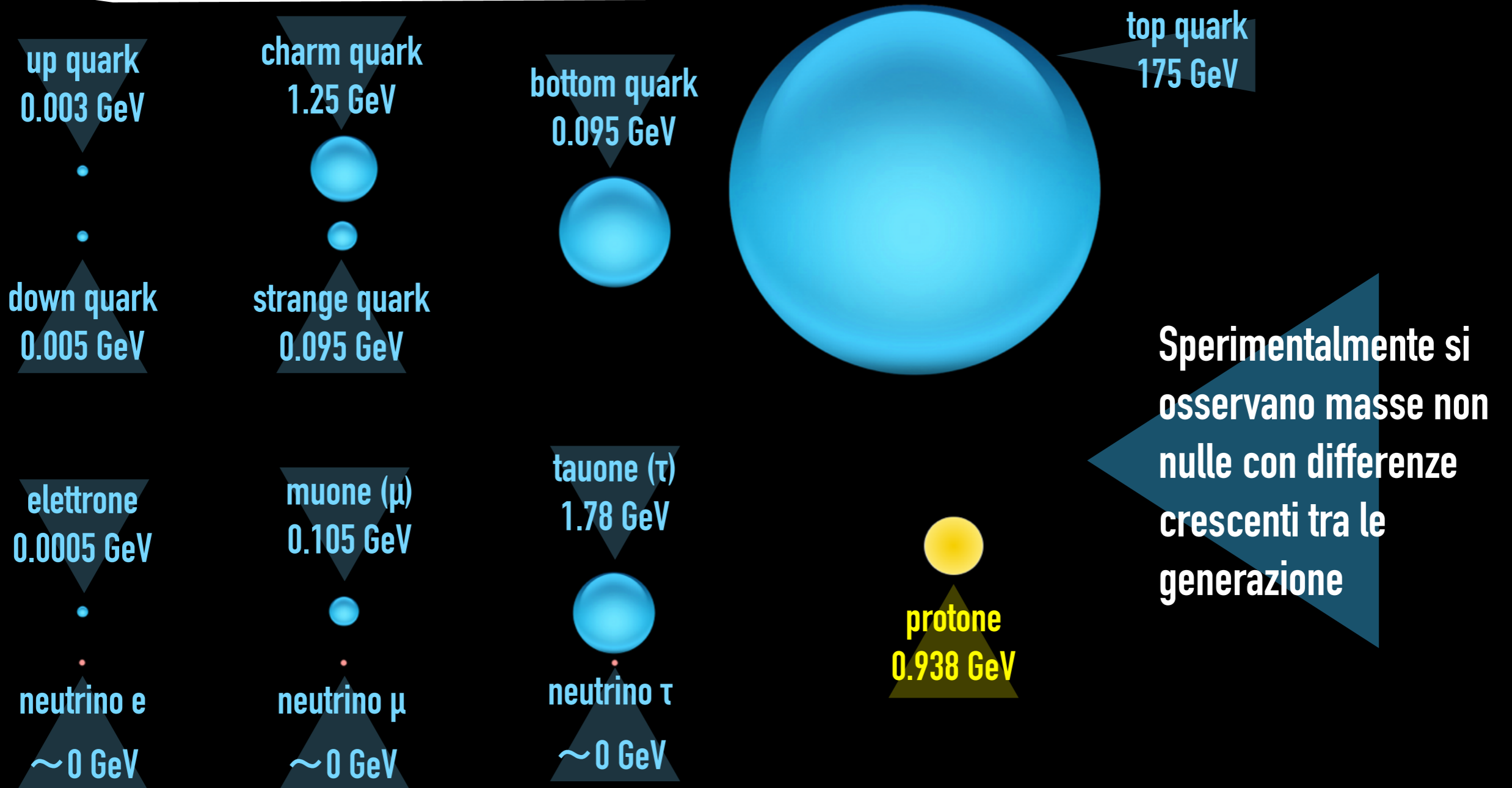
INFN
Sezione di
Perugia



MC21.Perugia.16.2.21

LE MASSE NEL MODELLO STANDARD

Le particelle del Modello Standard “nascono” con massa nulla



È necessario un meccanismo che dia origine alle masse senza “rompere” le simmetrie fondamentali



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

IL BOSONE DI HIGGS

Nel Modello Standard il problema delle masse è risolto introducendo un nuovo campo, il **campo di Higgs**, che si assume abbia un valore costante in tutto lo spazio.

Particelle a massa non nulla si possono accelerare e decelerare.

Particelle a massa nulla si muovono alla velocità della luce.

Le **masse inerziali** (apparenti) delle particelle possono essere descritte come il risultato dell'interazione dei vari campi con il campo di Higgs.



Le particelle del Modello Standard acquistano massa per effetto dell'interazione con il campo di Higgs.



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

PROBLEMA RISOLTO?

La massa del bosone di Higgs (non predetta nel modello), $M_{\text{Higgs}} \sim 126 \text{ GeV}$, è l'unica scala fondamentale di energia del Modello Standard.

M_{Higgs} 

Combinando le tre costanti fondamentali c , \hbar e G si può ottenere una grandezza con le dimensioni di una massa detta massa di Planck.

$$M_{\text{Planck}} = (\hbar c / G)^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

M_{Planck} 

La massa del bosone di Higgs è maggiore della massa del protone e molto minore della massa di Planck

M_{protone} 

Log(massa) 



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



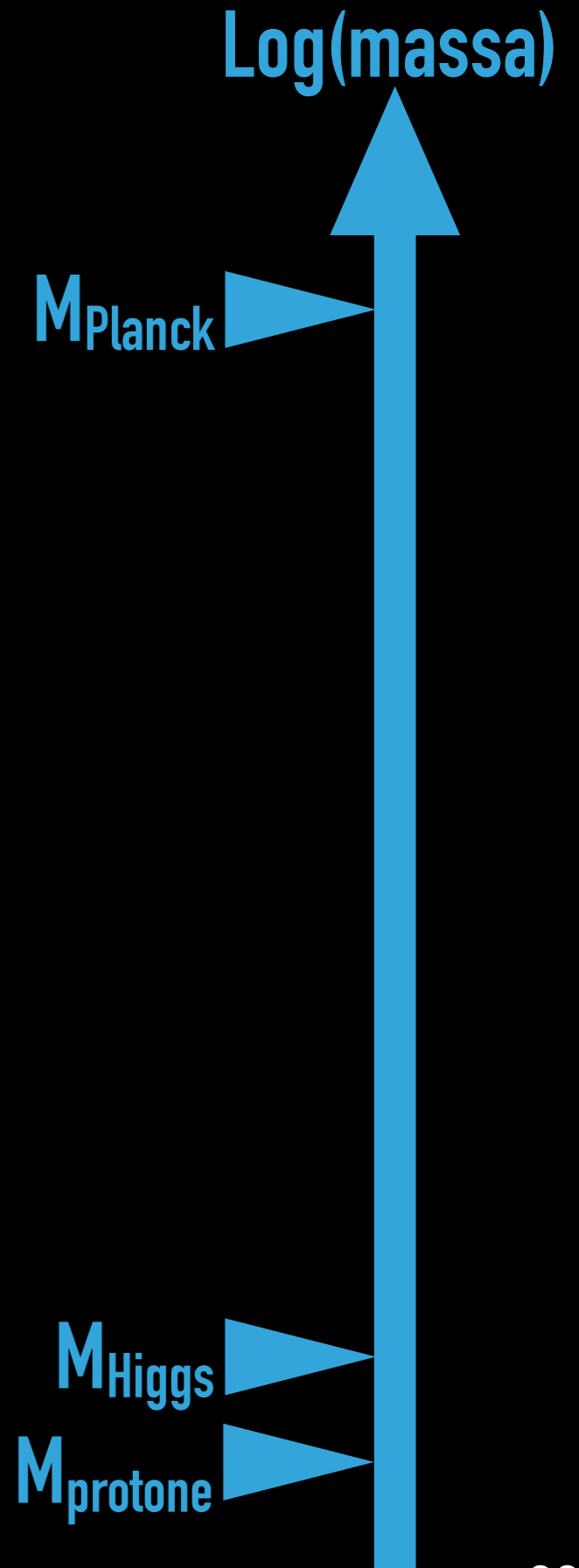
PROBLEMA RISOLTO?

La massa del bosone di Higgs (non predetta nel modello), $M_{\text{Higgs}} \sim 126 \text{ GeV}$, è l'unica scala fondamentale di energia del Modello Standard.

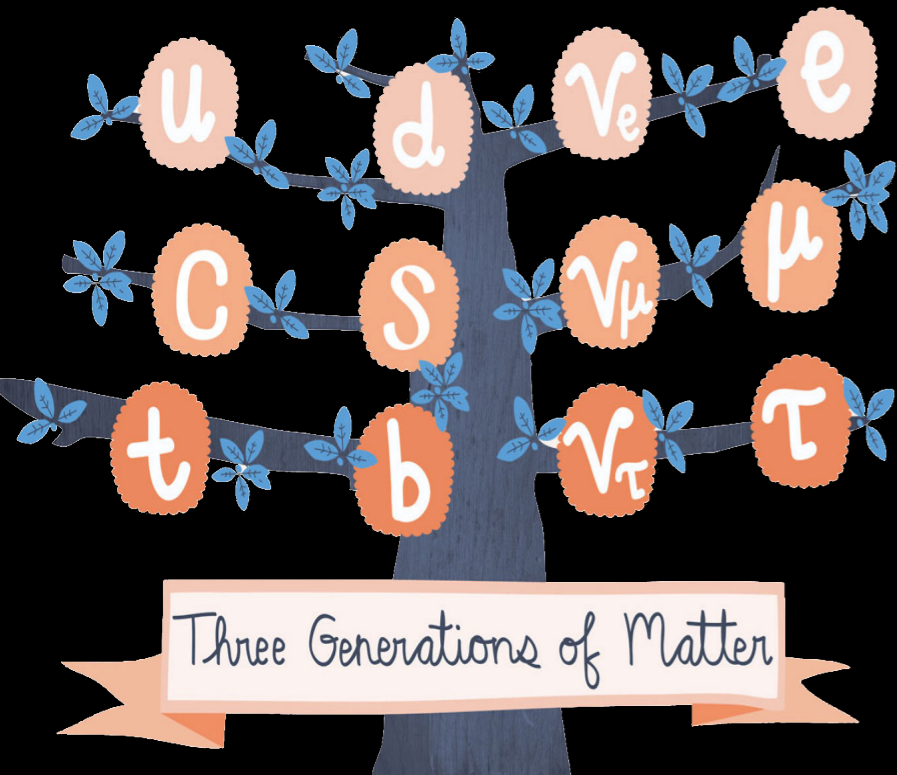
Combinando le tre costanti fondamentali c , \hbar e G si può ottenere una grandezza con le dimensioni di una massa detta massa di Planck.

$$M_{\text{Planck}} = (\hbar c / G)^{1/2} \sim 10^{19} \text{ GeV}$$

La massa del bosone di Higgs è maggiore della massa del protone e molto minore della massa di Planck



“SEGNALI DALLO SPAZIO”

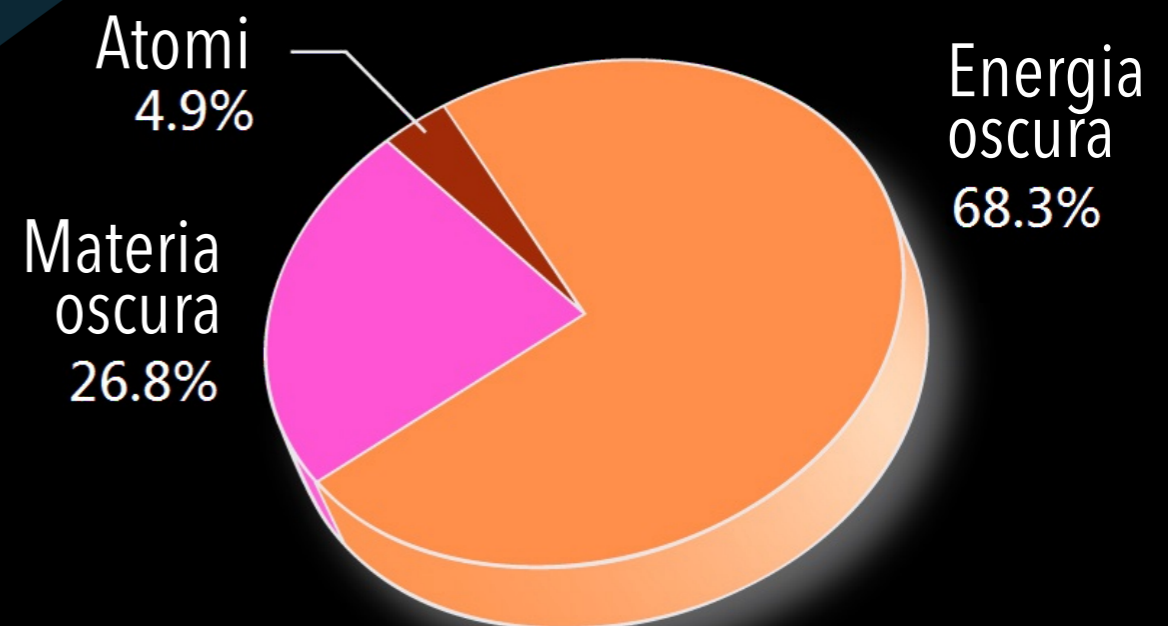


Cosa determina le diverse interazioni con il campo di Higgs e quindi la **gerarchia delle masse** delle particelle?

Perché $M_{\text{Higgs}} \ll M_{\text{Planck}}$?

Il Modello Standard può funzionare ad **energie** $\sim M_{\text{Planck}}$?

Dall'**Astrofisica** arrivano chiare indicazioni di quanto sia ancora limitata la nostra comprensione del meccanismo di generazione delle masse.



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

OLTRE IL MODELLO STANDARD (GINO ISIDORI)



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21



Esistono **molti universi diversi** in ciascun dei quali vigono leggi fisiche diverse.

Le “fisiche” degli universi sono caratterizzate da **valori diversi** delle costanti fondamentali **determinati da fenomeni alla scala di Planck**.

I valori osservati di queste costanti sono tali perché solo per essi è possibile un **“Universo antropico”**.



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA





Esistono **molti universi diversi** in ciascun dei quali vigono leggi fisiche diverse.

Le “fisiche” degli universi sono caratterizzate da **valori diversi** delle costanti fondamentali **determinati da fenomeni alla scala di Planck**.

I valori osservati di queste costanti sono tali perché solo per essi è possibile un **“Universo antropico”**.



L'uso di **principi di simmetria** per descrivere i fenomeni naturali rappresenta uno strumento fondamentale della fisica moderna.

È possibile ipotizzare l'esistenza di **nuovi principi di simmetria** che permettano di calcolare i parametri liberi del Modello Standard.

A tali simmetrie sono associate **nuove interazioni e nuove particelle**.

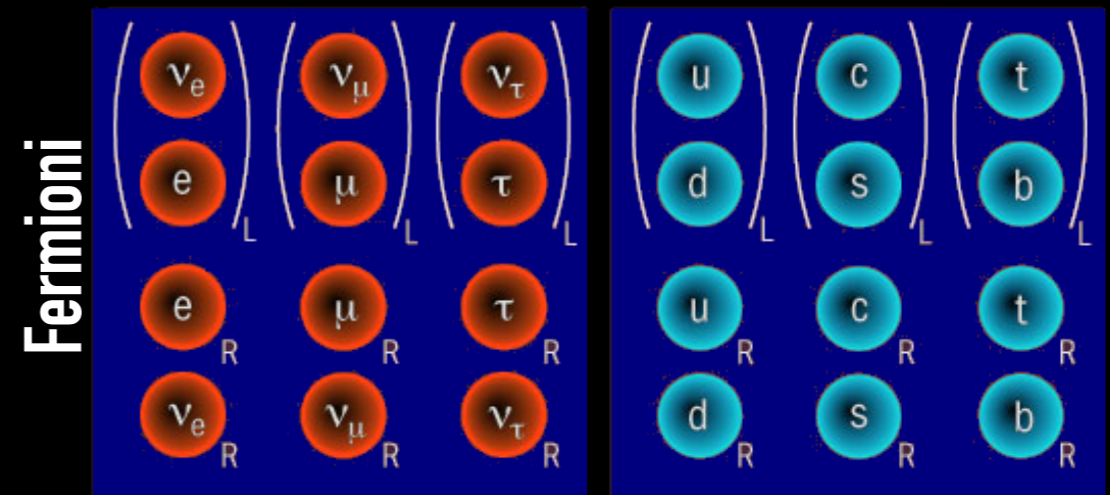
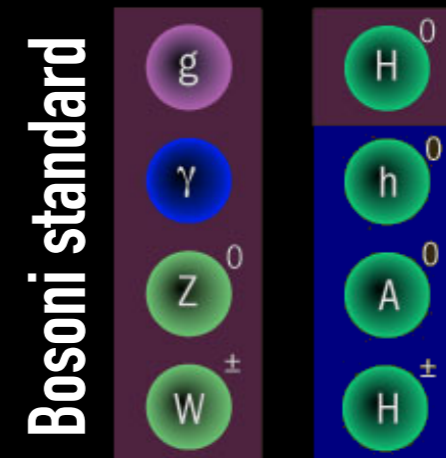


DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



LA SUPERSIMMETRIA

Tra le nuove simmetrie studiate
la più promettente è la cosiddetta
Super Simmetria (SUSY).



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



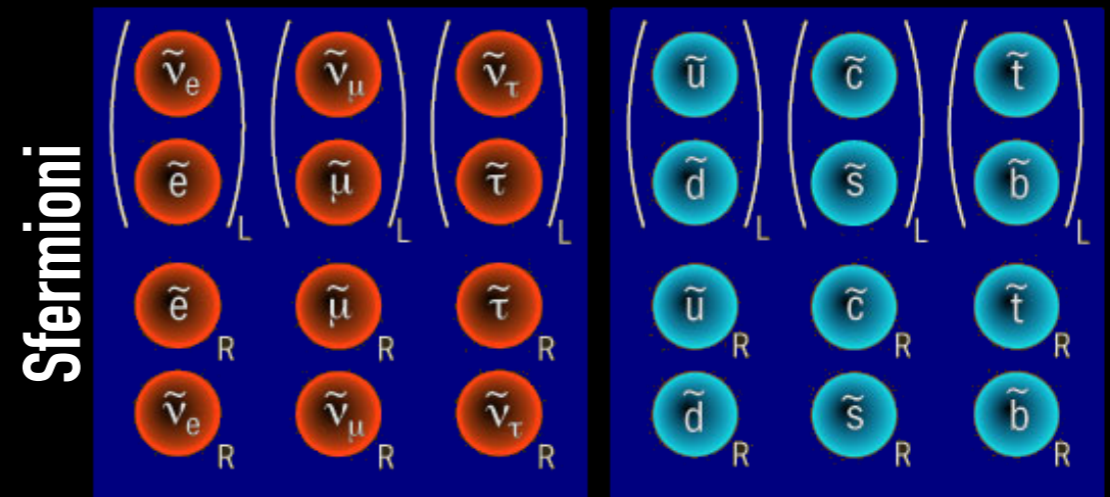
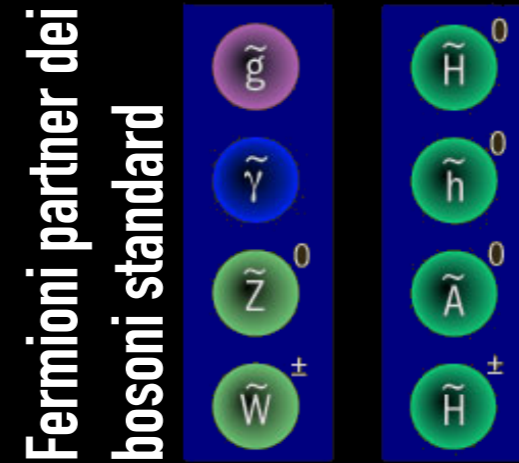
MC21.Perugia.16.2.21

LA SUPERSIMMETRIA

Tra le nuove simmetrie studiate la più promettente è la cosiddetta **Super Simmetria (SUSY)**.

Secondo la SUSY:

- ad ogni particella è associato un **partner con spin diverso** (elettrone $S = 1/2 \leftrightarrow$ selettrone $s = 0$).
- Le masse delle particelle partner sono molto grandi dell'ordine del **TeV**.
- Tali masse sono potenzialmente osservabili dagli esperimenti di **LHC**.



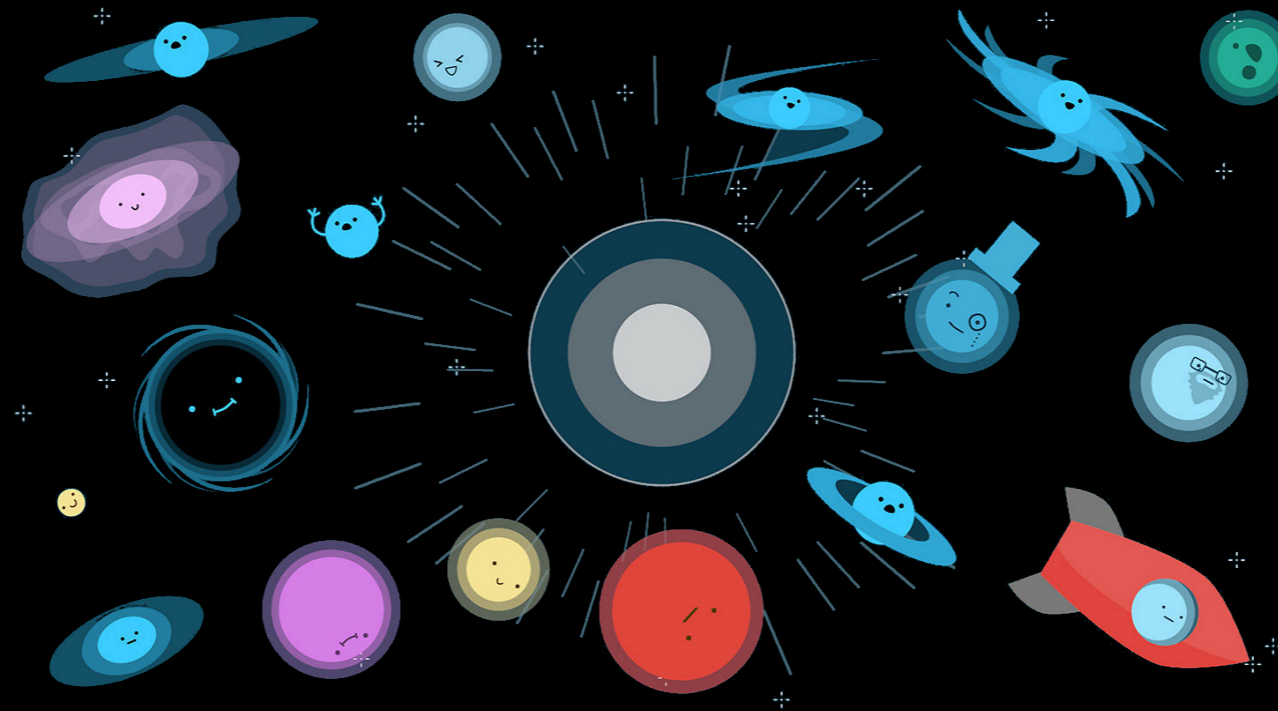
DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

CONCLUSIONI

I più recenti **risultati sperimentali** e gli **studi teorici** più avanzati concordano nell'indicare che la nostra conoscenza delle interazioni fondamentali è arrivata ad **passaggio cruciale**.



Non sappiamo ancora con certezza cosa ci aspetta oltre, è indubbio però, che c'è ancora tantissimo da scoprire e che i prossimi anni saranno ricchi di **affascinanti scoperte!**



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21

BIBLIOGRAFIA



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA

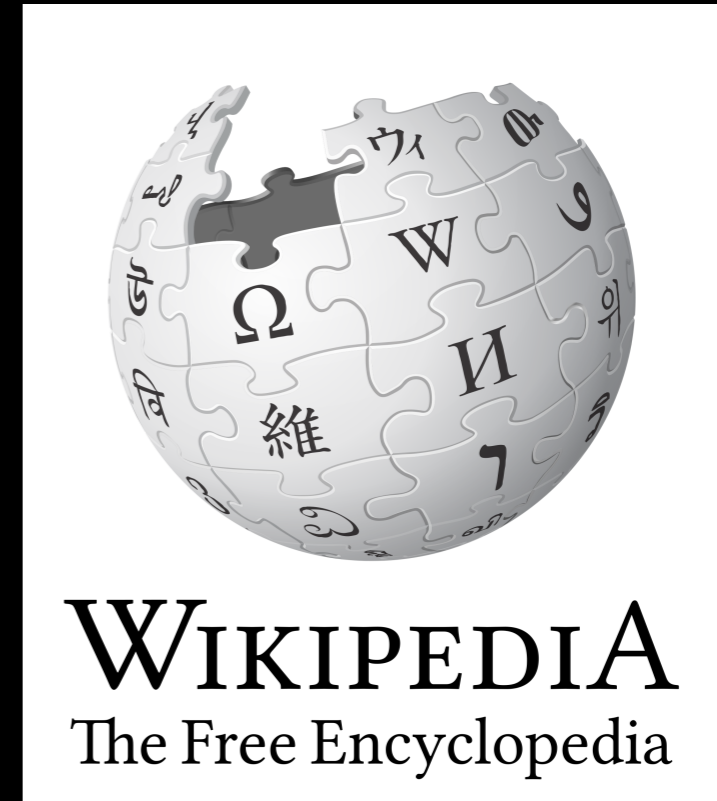


MC21.Perugia.16.2.21

BIBLIOGRAFIA



www.symmetrymagazine.org



it.wikipedia.org



DIPARTIMENTO DI
FISICA E GEOLOGIA



MC21.Perugia.16.2.21