

# La Fisica delle particelle elementari



Dipartimento di Fisica e Geologia- Università di Perugia  
Perugia - 6 marzo 2013

[www.fisica.unipg.it/dip/](http://www.fisica.unipg.it/dip/)

# Agenda

# Agenda



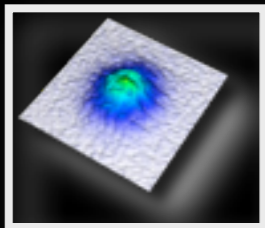
Modelli matematici e costanti fondamentali



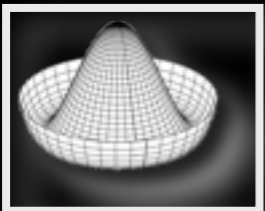
La Meccanica Quantistica



La Teoria della Relatività



Teoria Quantistica dei Campi



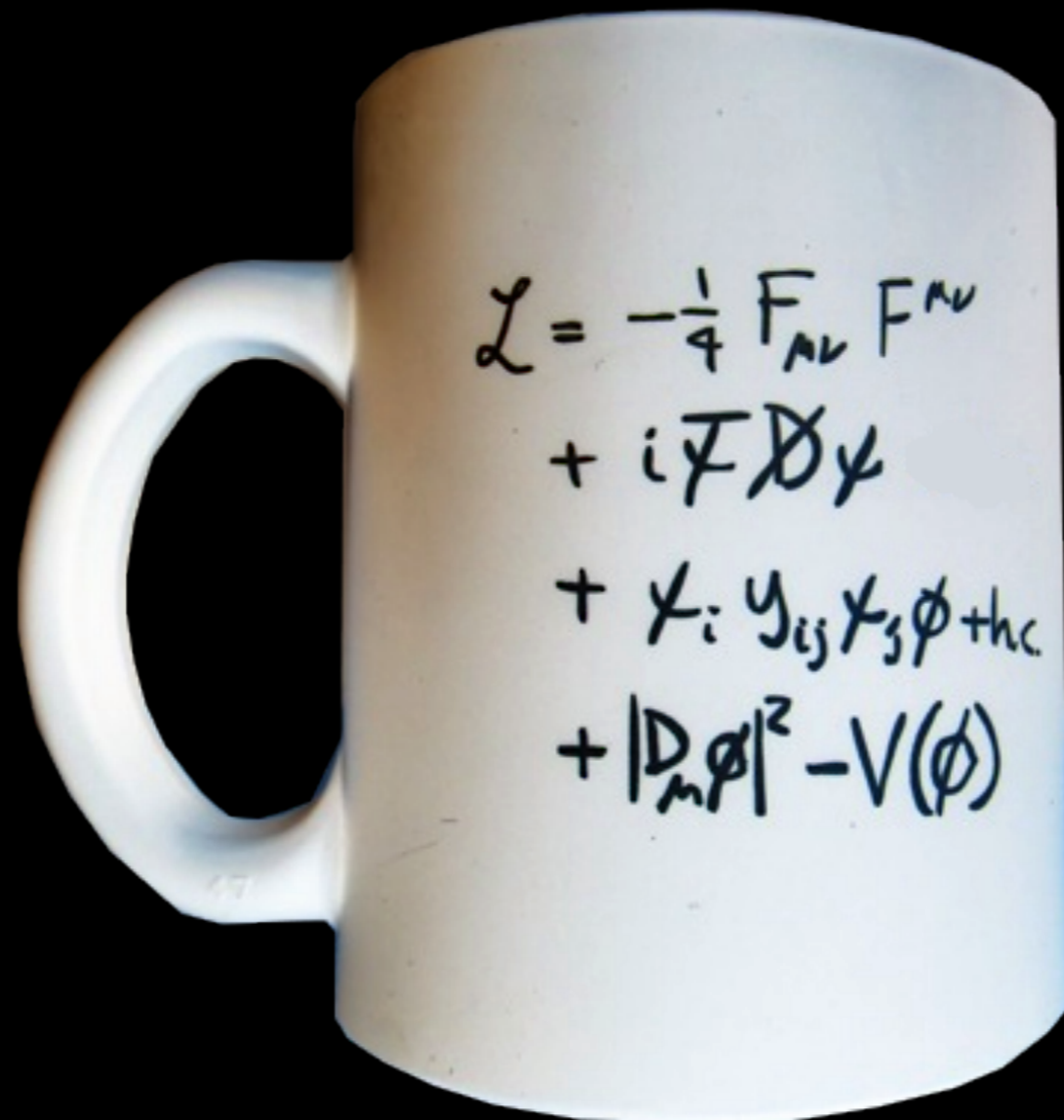
Il Modello Standard

# La Fisica delle Particelle in poche righe

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

# La Fisica delle Particelle in poche righe

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



# Alcune risposte veloci

∞ **Cos'è il Modello Standard?**

∞ **Come fa ad essere così “completo”?**

∞ **Quali e quante particelle riesce a descrivere?**

∞ **... e le interazioni?**

# Alcune risposte veloci

## ∞ Cos'è il Modello Standard?

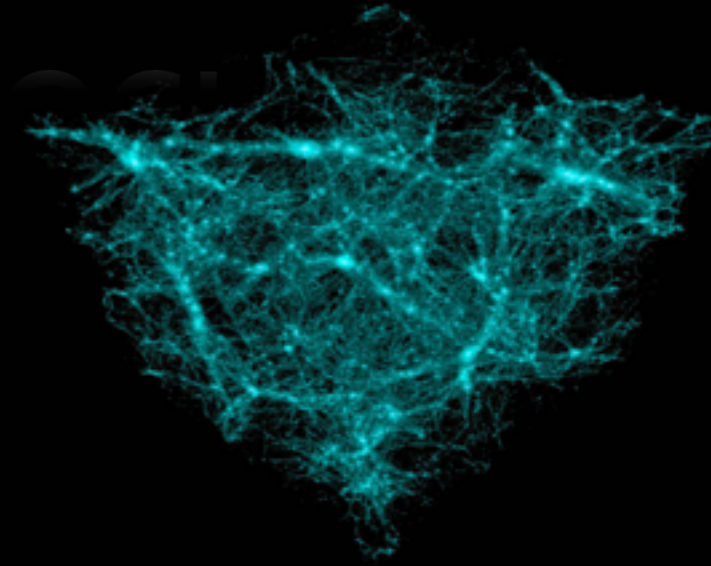
È un modello matematico non troppo complesso che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia.

Descrive molto bene una vastissima gamma di fenomeni da quelli microscopici (“attoscopici”) a quelli super veloci!

## ∞ Come fa ad essere così “completo”?

## ∞ Quali e quante particelle riesce a descrivere?

## ∞ ... e le interazioni?



# Alcune risposte veloci

## ∞ Cos'è il Modello Standard?

È un modello matematico non troppo complesso che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia.

Descrive molto bene una vastissima gamma di fenomeni da quelli microscopici (“attoscopici”) a quelli super veloci!

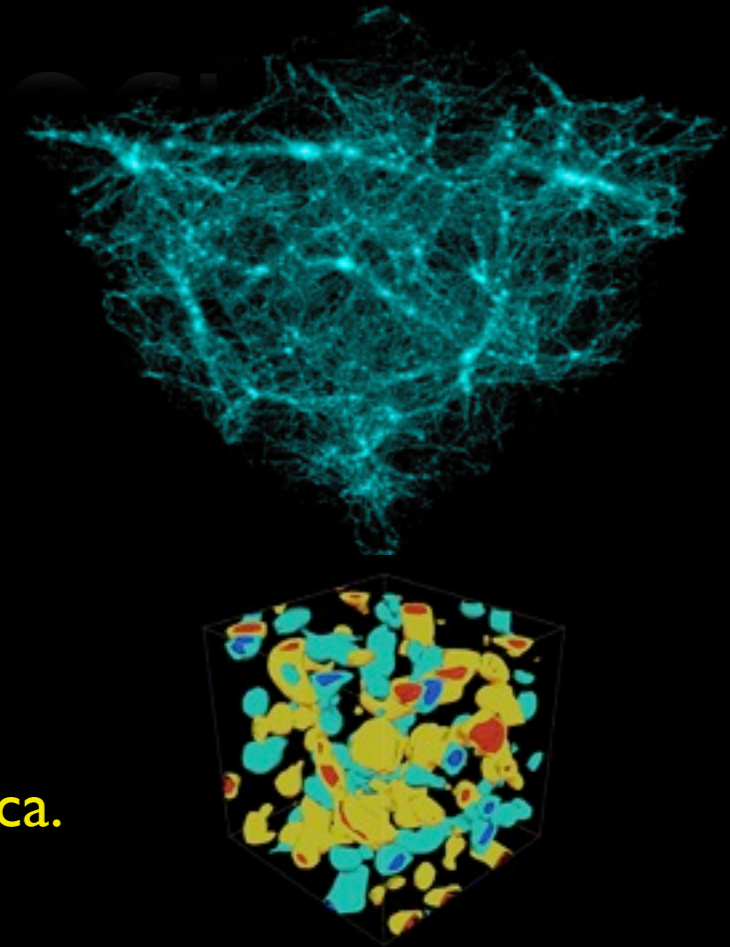
## ∞ Come fa ad essere così “completo”?

Incorpora sia le relatività di Einstein che la meccanica quantistica.

Il Modello Standard è una teoria di campo quantistica e relativistica.

## ∞ Quali e quante particelle riesce a descrivere?

## ∞ ... e le interazioni?





# Alcune risposte veloci

## ∞ Cos'è il Modello Standard?

È un modello matematico non troppo complesso che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia.

Descrive molto bene una vastissima gamma di fenomeni da quelli microscopici (“attoscopici”) a quelli super veloci!

## ∞ Come fa ad essere così “completo”?

Incorpora sia le relatività di Einstein che la meccanica quantistica.

Il Modello Standard è una teoria di campo quantistica e relativistica.

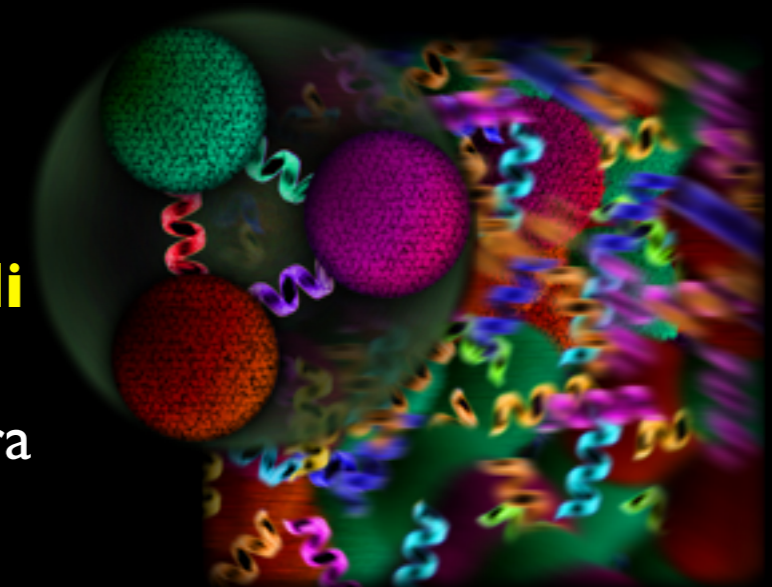
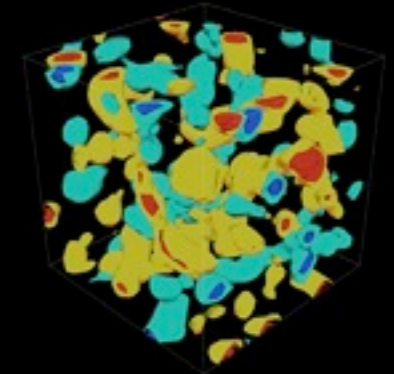
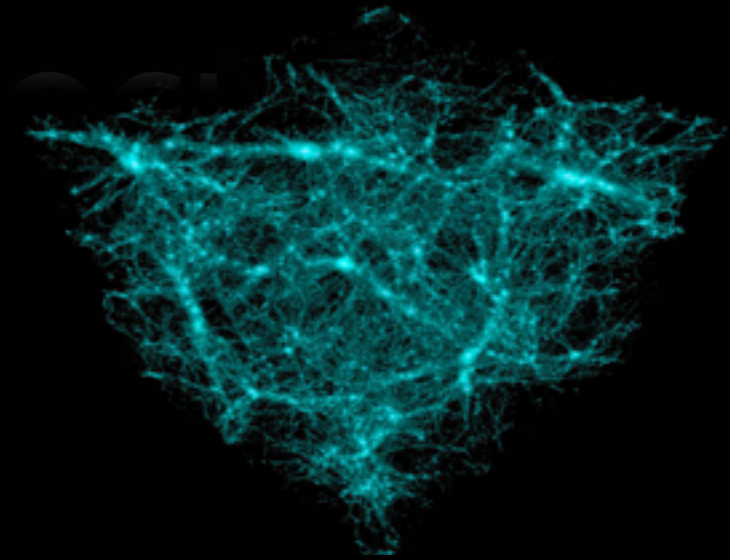
## ∞ Quali e quante particelle riesce a descrivere?

Tutte quelle note! Tre coppie di **quark** e tre di **leptoni**

## ∞ ... e le interazioni?

Le interazioni scaturiscono da **simmetrie fondamentali**

Il Modello Standard riesce a descrivere l'interazione forte, l'interazione debole e quella elettromagnetica ma non ancora l'interazione gravitazionale!



# Modelli Matematici e Costanti Fondamentali della Fisica

# Modelli matematici per la Fisica

*... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.*

*(Il Saggiatore, Cap. VI)*

*Galileo Galilei*

# Modelli matematici per la Fisica

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap. VI)



Scopo della Fisica: **descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche**

Modello matematico: **un insieme di equazioni per grandezze adimensionali che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...**

**Equazione  
matematica**

$$y(t) = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

Contiene soltanto  
quantità adimensionali

# Modelli matematici per la Fisica

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap.VI)



Scopo della Fisica: **descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche**

Modello matematico: **un insieme di equazioni per grandezze adimensionali che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...**

**Legge oraria  
del moto  
uniformemente  
accelerato**

$$y(t) = y_0 + v_0 t - \frac{1}{2} g t^2$$

Costante fisica dimensionale  
Misurata negli esperimenti

Coefficiente adimensionale  
Calcolato nel modello

# Modelli matematici per la Fisica

... questo grandissimo libro [...] è scritto in lingua matematica, e i caratteri son triangoli, cerchi, ed altre figure geometriche, senza i quali mezzi è impossibile a intendere umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto.

(Il Saggiatore, Cap.VI)



Scopo della Fisica: **descrivere i fenomeni naturali usando formule matematiche**

Modello matematico: **un insieme di equazioni per grandezze adimensionali che deriva da principi logici come ad esempio: simmetrie, leggi di conservazione, ...**

L'introduzione di quantità dimensionali determina il "passaggio"

modello matematico



teoria fisica

ovvero alla **descrizione e previsione dei fenomeni naturali**

In una **teoria ideale**

- tutti i coefficienti adimensionali sono **calcolabili**
- si ha un **numero minimo di costanti fisiche dimensionali fondamentali**
- le dimensioni della grandezze coinvolte sono **automaticamente** determinate dalle costanti fondamentali

# Unità fondamentali

Le grandezze fondamentali sono { spazio  $\rightarrow L$   
tempo  $\rightarrow T$   
energia  $\rightarrow E$

We define as fundamental those constants which cannot be calculated at our **present level** of fundamental knowledge (or rather ignorance). **Lev B. Okun**

# Unità fondamentali

Le grandezze fondamentali sono

{	spazio	→	<b>L</b>
	tempo	→	<b>T</b>
	energia	→	<b>E</b>

We define as fundamental those constants which cannot be calculated at our **present level** of fundamental knowledge (or rather ignorance). **Lev B. Okun**

Ad esse “corrispondono” tre costanti fondamentali dimensionali



La velocità della luce nel vuoto  **$c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$**   
Rappresenta la **massima velocità raggiungibile in natura**. È alla base della teoria della relatività ristretta che unifica spazio e tempo, come anche massa ed energia.



# Unità fondamentali

Le grandezze fondamentali sono { spazio  $\rightarrow L$   
tempo  $\rightarrow T$   
energia  $\rightarrow E$

We define as fundamental those constants which cannot be calculated at our **present level** of fundamental knowledge (or rather ignorance). **Lev B. Okun**

Ad esse “corrispondono” tre costanti fondamentali dimensionali



La velocità della luce nel vuoto  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$   
Rappresenta la **massima velocità raggiungibile in natura**. È alla base della teoria della relatività ristretta che unifica spazio e tempo, come anche massa ed energia.

+Tu Ricerca Immagini Maps Play YouTube News Gmail Documenti Calendar Altro -

Google

costante di planck

Ricerca Circa 3.810.000 risultati (0,35 secondi)

Web


Immagini

Maps

Video

Notizie

Shopping

 **Planck's constant =  $6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$**   
[Dettagli sulla calcolatrice](#)

[Planck constant - Wikipedia, the free encyclopedia](#)  
[en.wikipedia.org/wiki/Planck\\_constant](https://en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant) - Traduci questa pagina  
The **Planck constant** (denoted  $h$ , also called **Planck's constant**) is a physical constant reflecting the sizes of energy quanta in quantum mechanics. It is named ...  
[Value](#) - [Significance of the value](#) - [Origins](#) - [Dependent physical constants](#)

# Unità fondamentali

Le grandezze fondamentali sono

- spazio  $\rightarrow L$
- tempo  $\rightarrow T$
- energia  $\rightarrow E$

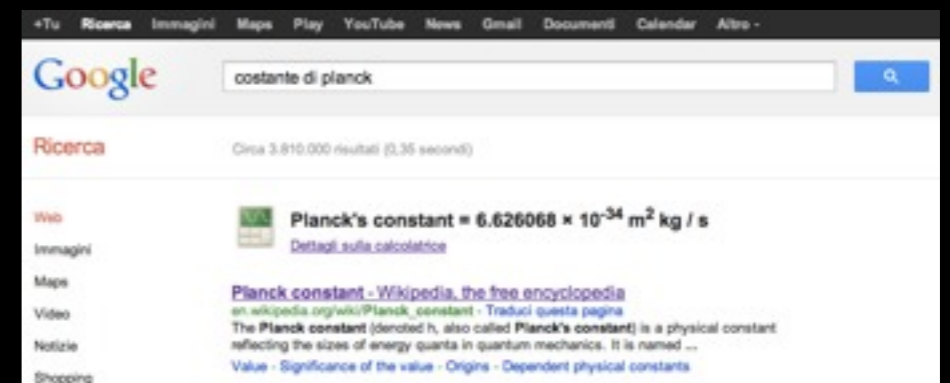
We define as fundamental those constants which cannot be calculated at our **present level** of fundamental knowledge (or rather ignorance). **Lev B. Okun**

Ad esse “corrispondono” tre costanti fondamentali dimensionali



La velocità della luce nel vuoto  $c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$   
Rappresenta la **massima velocità raggiungibile in natura**. È alla base della teoria della relatività ristretta che unifica spazio e tempo, come anche massa ed energia.

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



**Gravity.**

It's not just a good idea.  
It's the Law.

La costante di gravitazione universale

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

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.

# Unità fondamentali<sub>2</sub>

I valori numerici delle tre costanti  $c$ ,  $\hbar$  e  $G$  espressi nelle unità del Sistema Internazionale ( $m, s, kg$ ) appaiono “inumani”, lontani dall’esperienza quotidiana...

La velocità della luce nel vuoto

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

dimensione:  $L/T$

La Costante di Planck

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

dimensione:  $E \times T$

La costante di gravitazione universale

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

dimensione:  $E \times L/M^2$

# Unità fondamentali<sub>2</sub>

I valori numerici delle tre costanti  $c$ ,  $\hbar$  e  $G$  espressi nelle unità del Sistema Internazionale ( $m, s, kg$ ) appaiono “inumani”, lontani dall’esperienza quotidiana...

La velocità della luce nel vuoto

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

dimensione:  $L/T$

La costante di Planck

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

dimensione:  $E \times T$

La costante di gravitazione universale

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

dimensione:  $E \times L/M^2$

**Esercizio.** Trovare le combinazioni delle tre costanti fondamentali che hanno le dimensioni: di una **lunghezza**, di un **tempo** e di una **massa**.

Si procede così

$$[c^x \hbar^y G^z]^{l/n} = [L^{x+2y+3z} T^{-(x+y+2z)} M^{y-z}]^{l/n}$$

per avere, ad esempio, una lunghezza,  $L$ , dobbiamo porre a zero gli esponenti di  $T$  e  $M$  e quindi  $n=z+2y+3z\dots$

# Unità fondamentali<sub>2</sub>

I valori numerici delle tre costanti  $c$ ,  $\hbar$  e  $G$  espressi nelle unità del Sistema Internazionale ( $m, s, kg$ ) appaiono “inumani”, lontani dall’esperienza quotidiana...

La velocità della luce nel vuoto

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

dimensione:  $L/T$

La costante di Planck

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

dimensione:  $E \times T$

La costante di gravitazione universale

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

dimensione:  $E \times L/M^2$

Ricombinando  $c$ ,  $\hbar$  e  $G$  si possono ottenere tre nuove costanti con dimensione pura

$$\cdot \cdot \cdot L_{\text{Planck}} = [\hbar G/c^3]^{1/2} \sim 10^{-35} \text{ m}$$

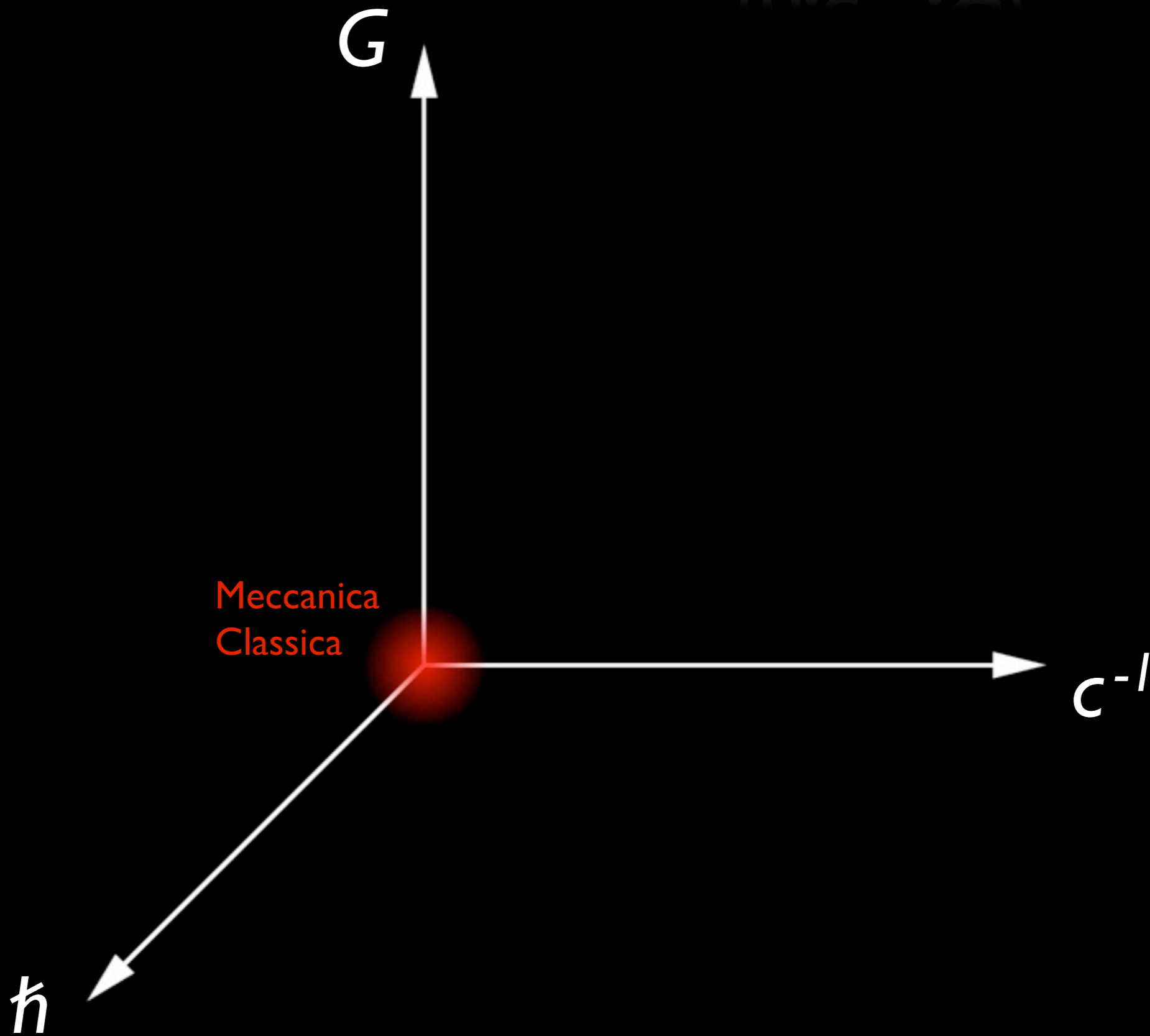
$$\cdot \cdot \cdot T_{\text{Planck}} = [\hbar G/c^5]^{1/2} \sim 10^{-43} \text{ s}$$

$$\cdot \cdot \cdot M_{\text{Planck}} = [\hbar c/G]^{1/2} \sim 10^{19} M_{\text{protone}}$$

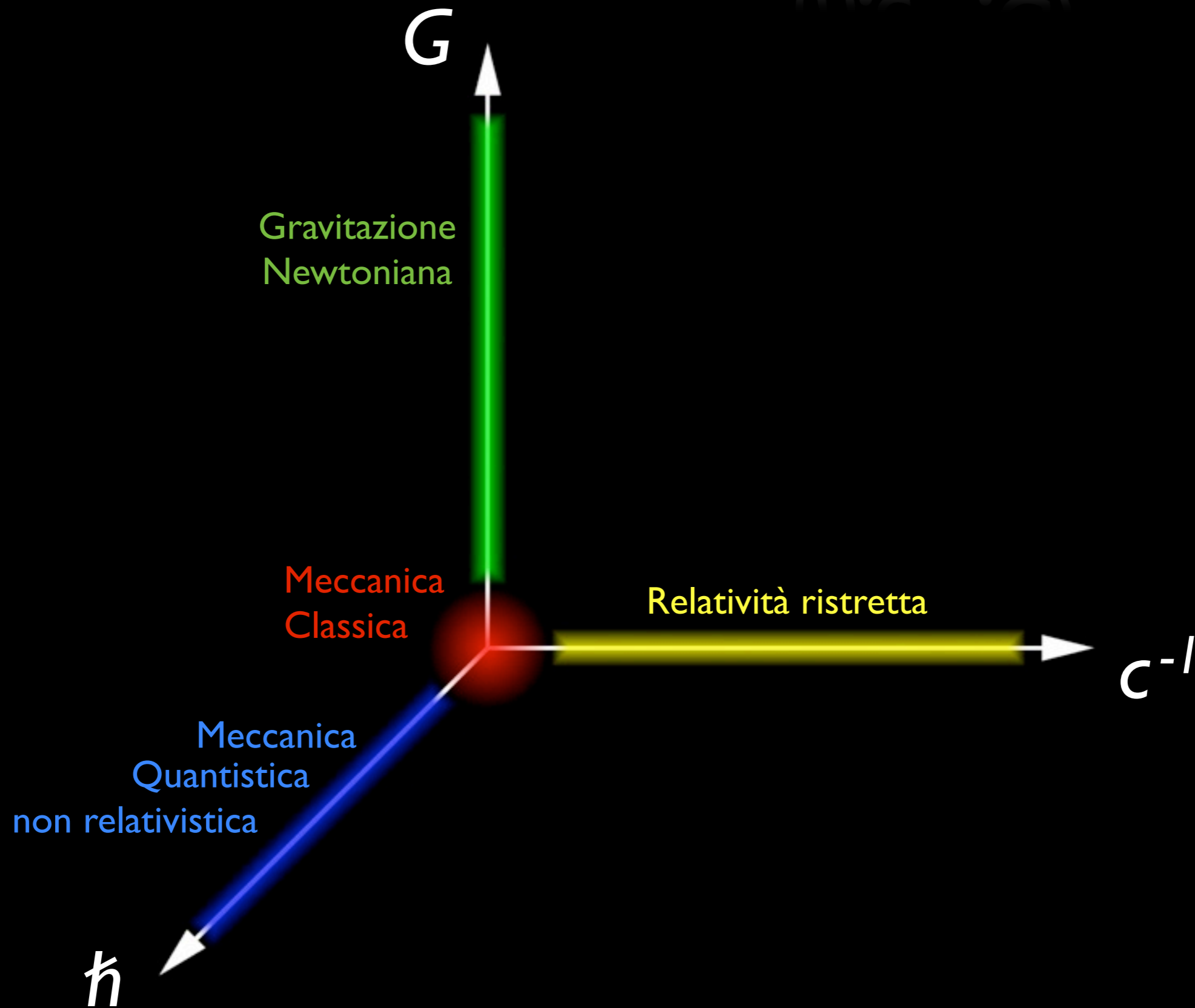
*If, however, we imagine other worlds, with the same physical laws as those of our own world, but with different numerical values for the physical constants determining the limits of applicability of the old concepts, the new and correct concepts of space, time and motion, at which modern science arrives only after very long and elaborate investigations, would become a matter of common knowledge.*

George Gamow, “Mr. Tompkins in paperback”

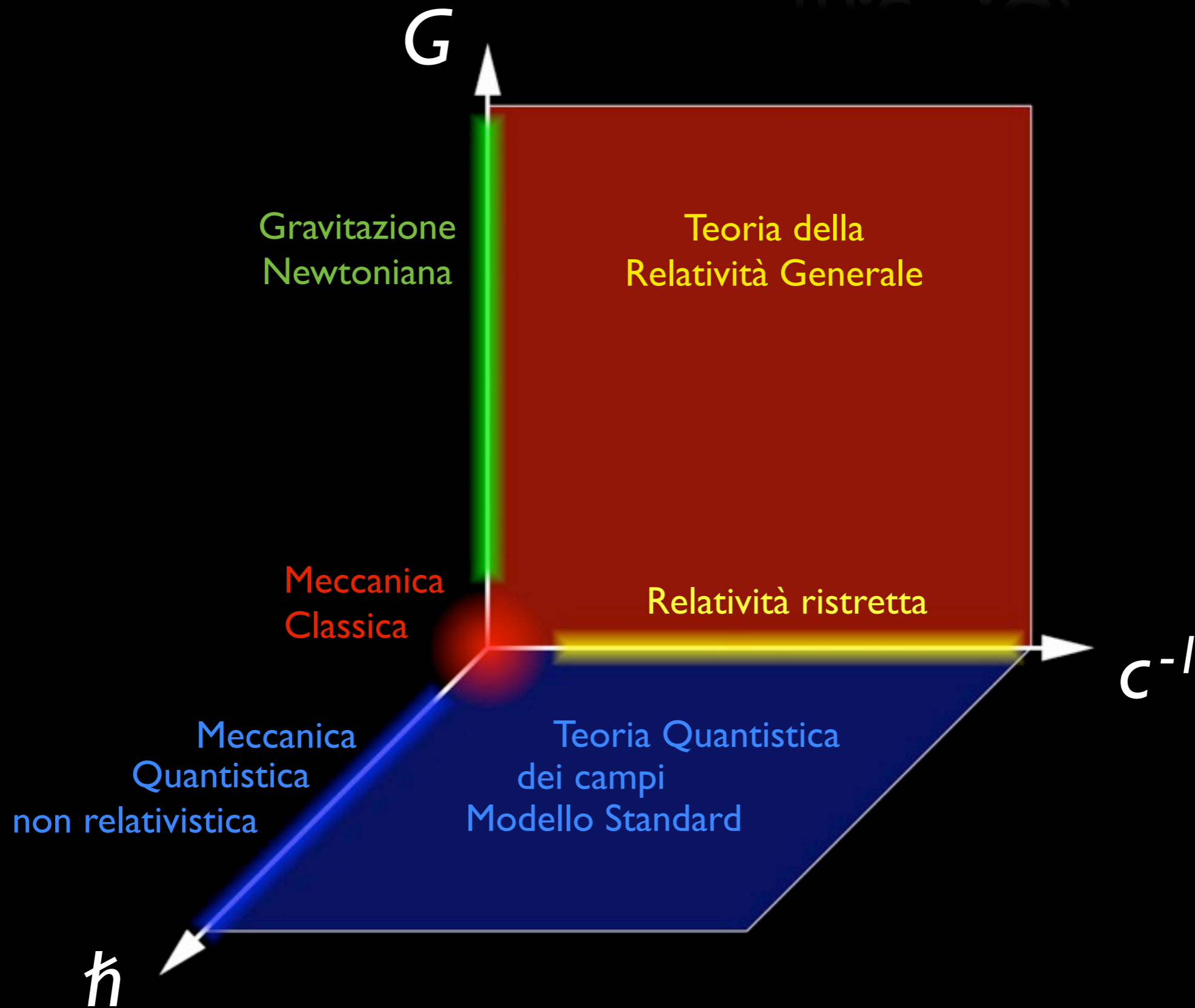
# Le teoria cubica $(\hbar, c^{-1}, G)$



# Le teoria cubica $(\hbar, c^{-1}, G)$

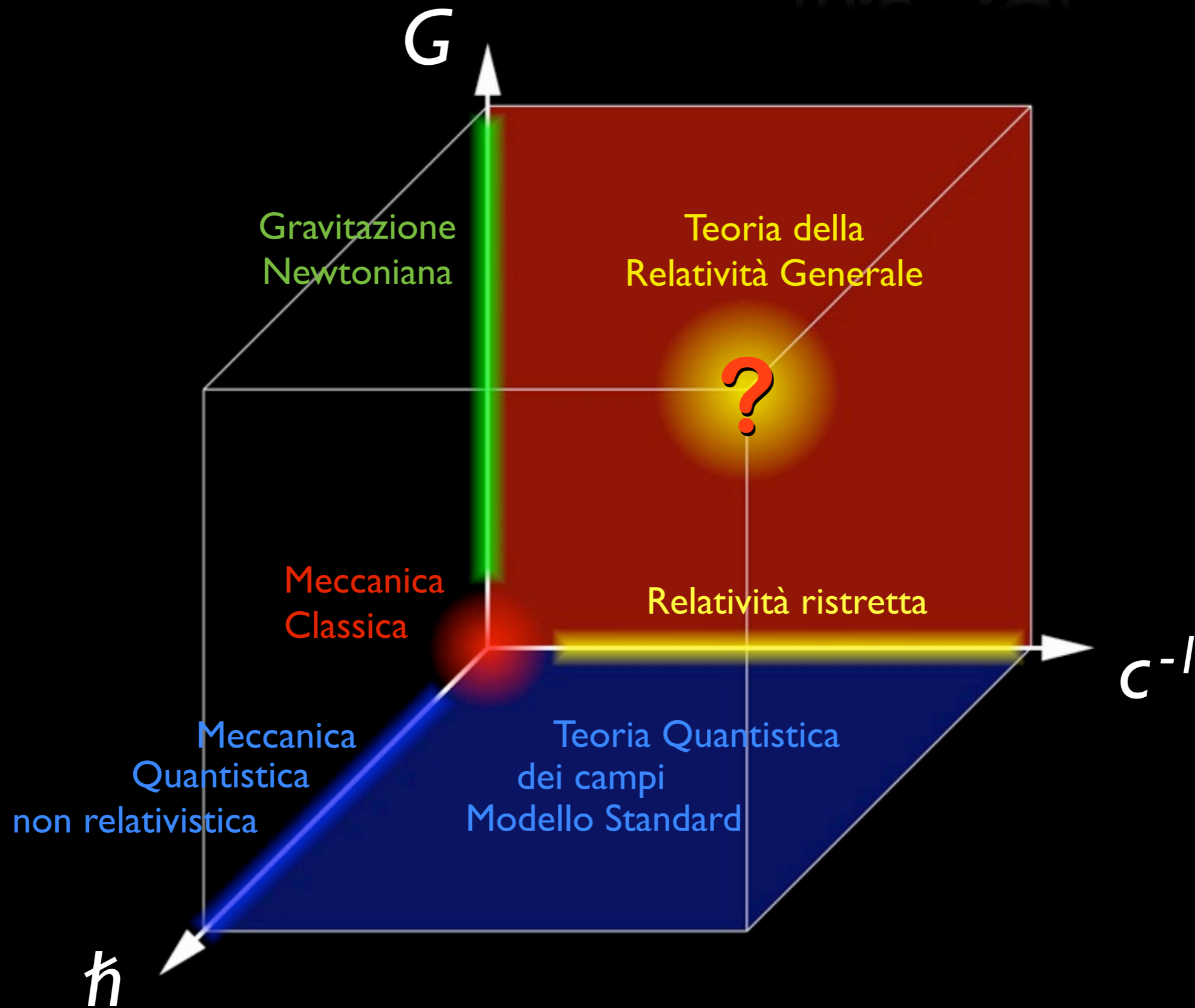


# Le teoria cubica $(\hbar, c^{-1}, G)$

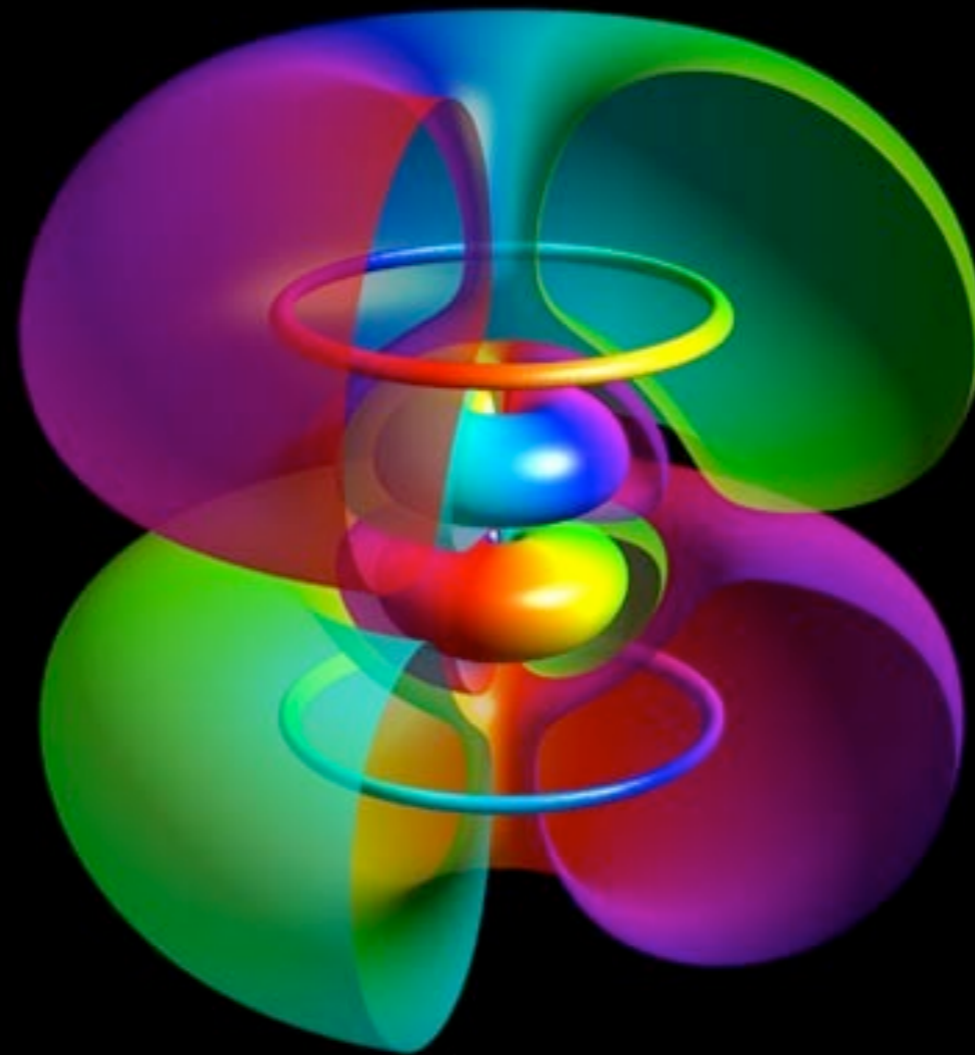




# Le teoria cubica $(\hbar, c^{-1}, G)$



# Meccanica Quantistica

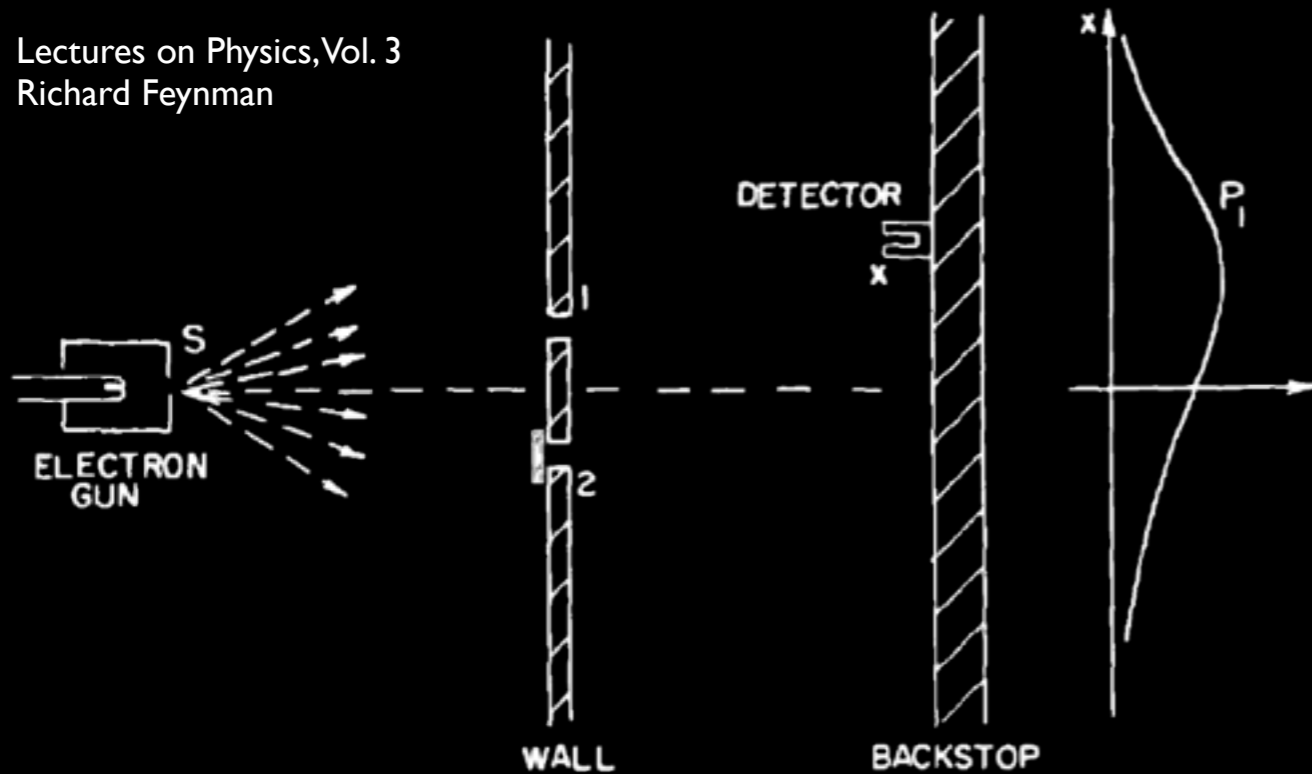




# Meccanica Quantistica

*Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it. N. Bohr*

Lectures on Physics, Vol. 3  
Richard Feynman



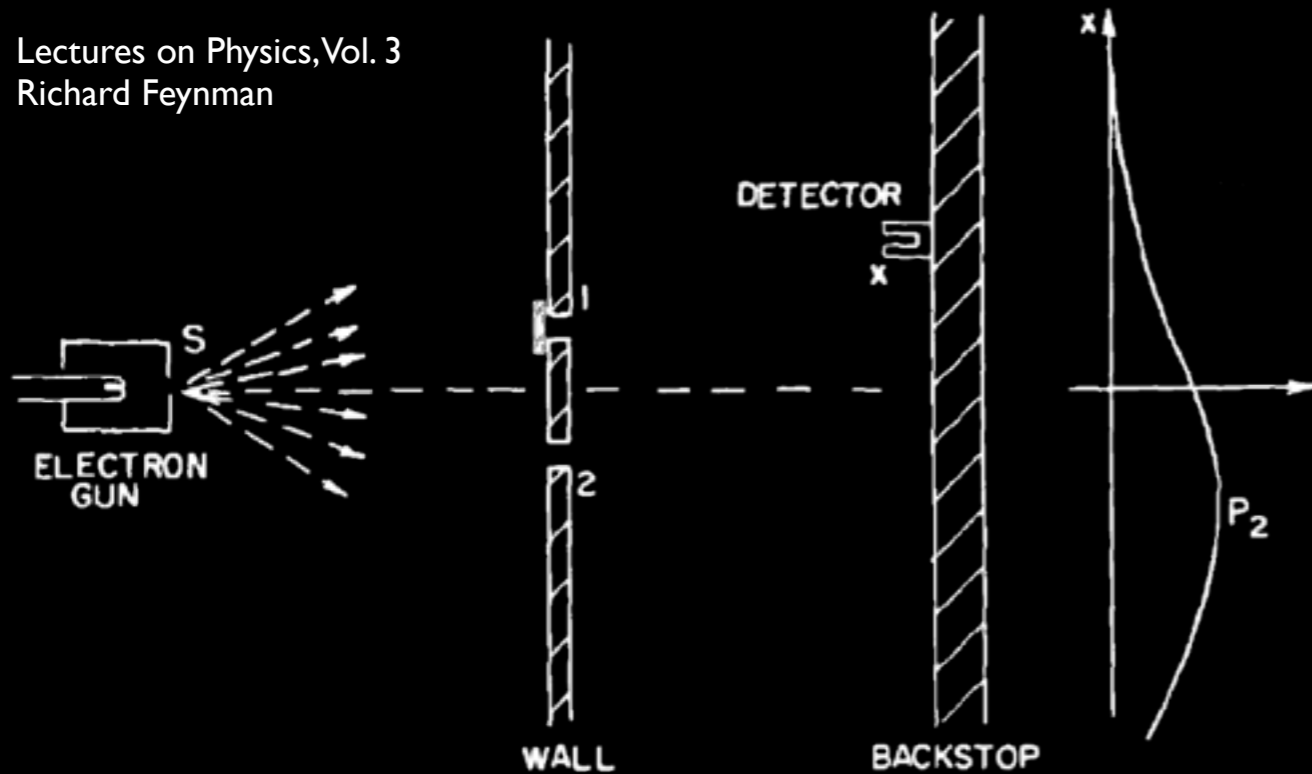
- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo  $x$ , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione coincide con quella di **probabilità  $P_{1,2,12}$**



# Meccanica Quantistica

*Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it. N. Bohr*

Lectures on Physics, Vol. 3  
Richard Feynman



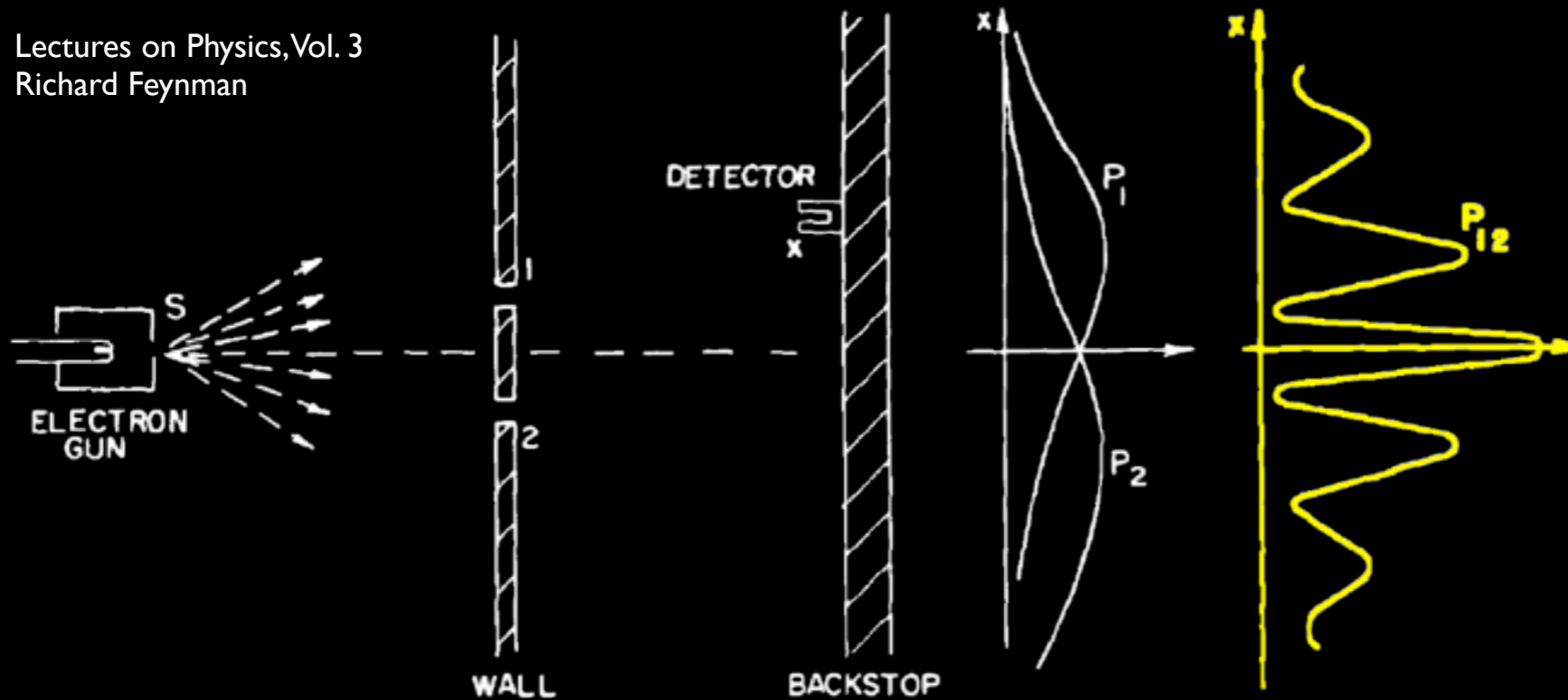
- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo  $x$ , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione coincide con quella di **probabilità  $P_{1,2,12}$**



# Meccanica Quantistica

*Anyone who is not shocked by the quantum theory does not understand it. N. Bohr*

Lectures on Physics, Vol. 3  
Richard Feynman

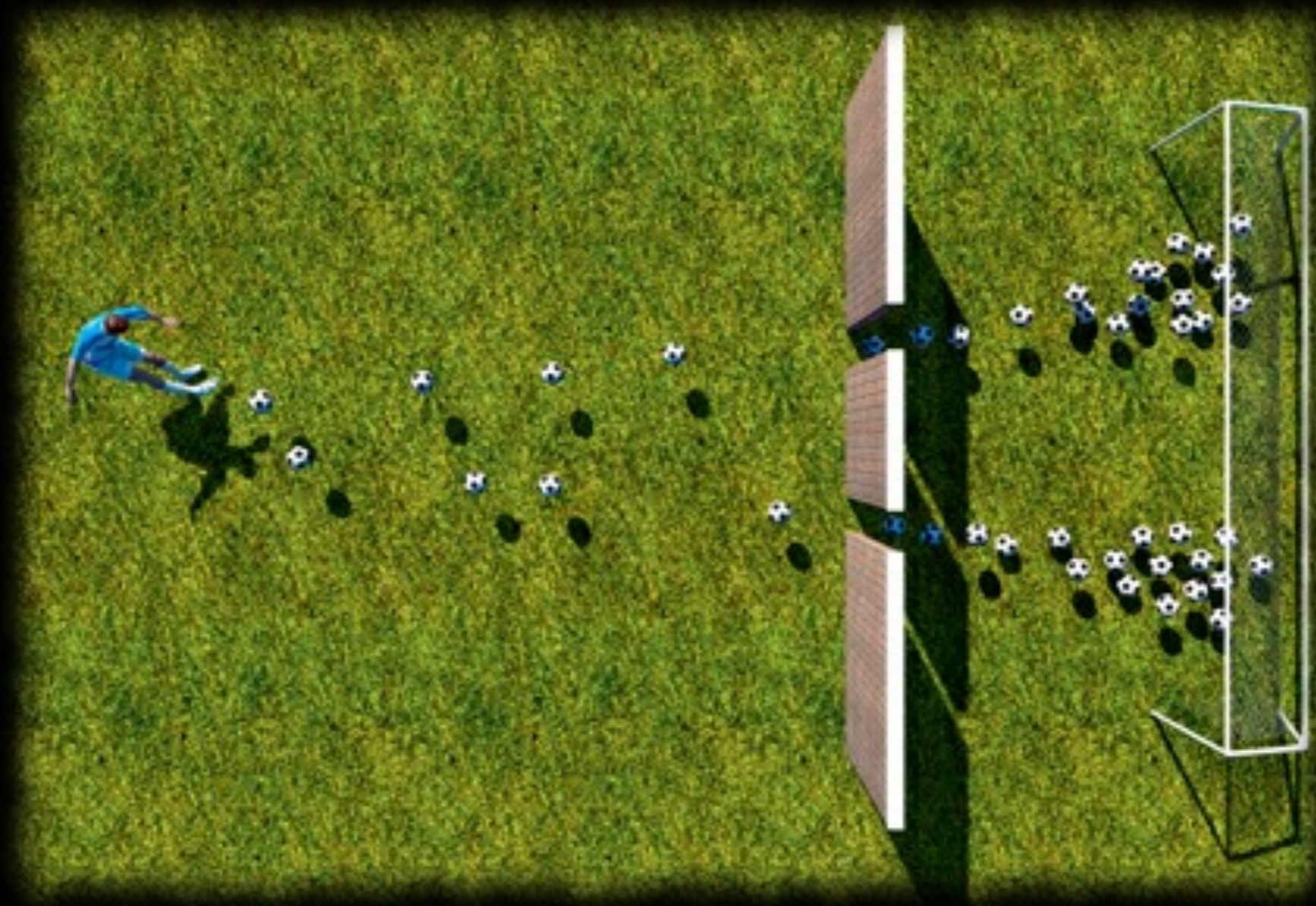


- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo  $x$ , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato in ogni posizione è grande la distribuzione coincide con quella di **probabilità  $P_{1,2,12}$**

- Con una singola fenditura il comportamento è quello tipico di una **particella**
- Quando entrambe le fenditure sono aperte la distribuzione misurata non è semplicemente la somma:  **$P_{12} = P_1 + P_2$** !
- Si osserva, sorprendentemente, una **figura di interferenza** tipica delle onde!



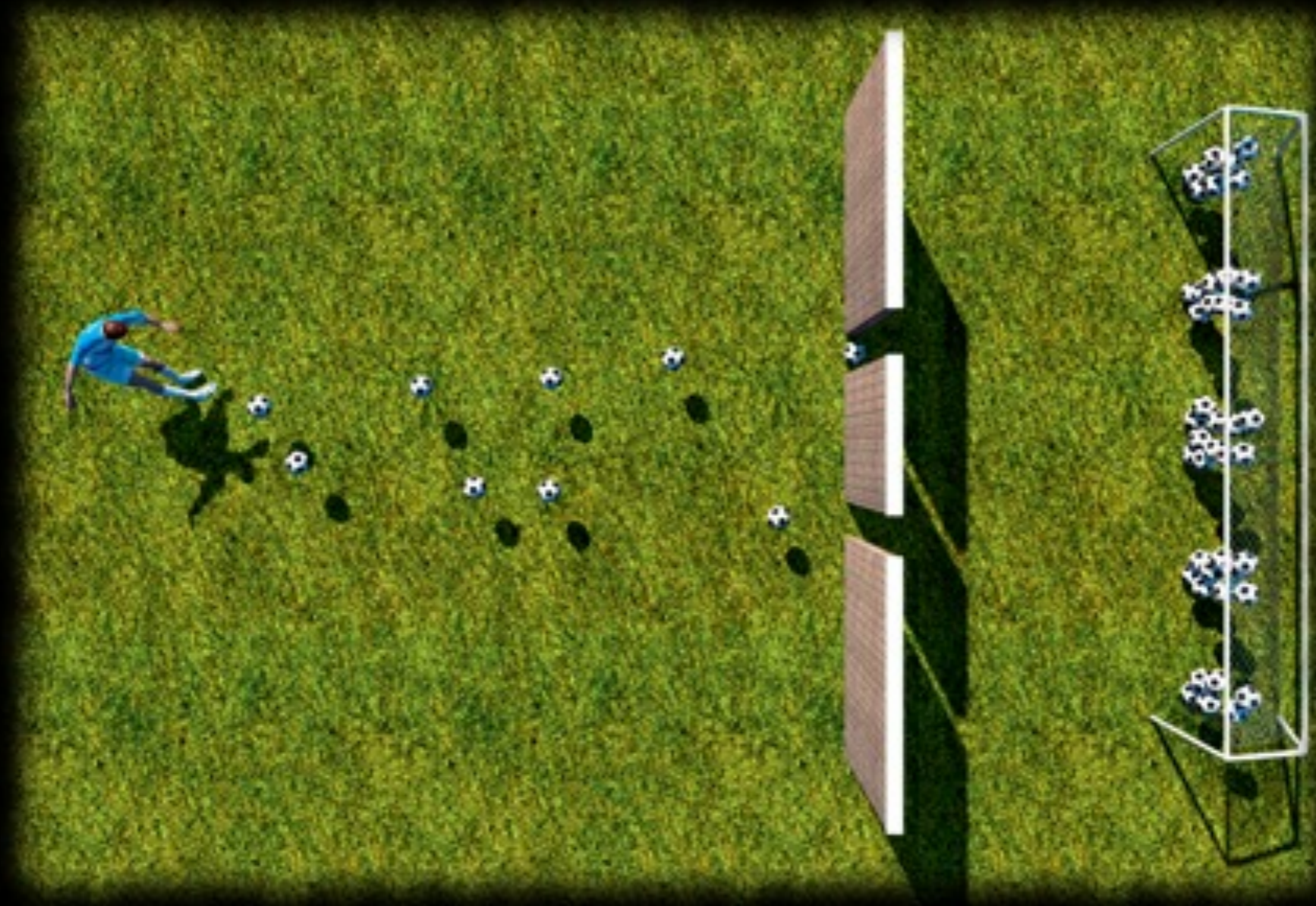
# Meccanica “Calcistica”



Calciatore classico



# Meccanica “Calcistica”



Calciatore quantistico



# Meccanica Quantistica e R. Feynman

- In meccanica quantistica la particella **non ha una posizione definita** nell'intervallo di tempo in cui “vola” dalla sorgente allo schermo.
- Le particelle **non percorrono nessuna traiettoria.**





# Meccanica Quantistica e R. Feynman

- In meccanica quantistica la particella **non ha una posizione definita** nell'intervallo di tempo in cui “vola” dalla sorgente allo schermo.
- Le particelle **non percorrono nessuna traiettoria**.
- Ovvero: percorrono simultaneamente **tutte le traiettorie possibili** che connettono la sorgente e lo schermo.

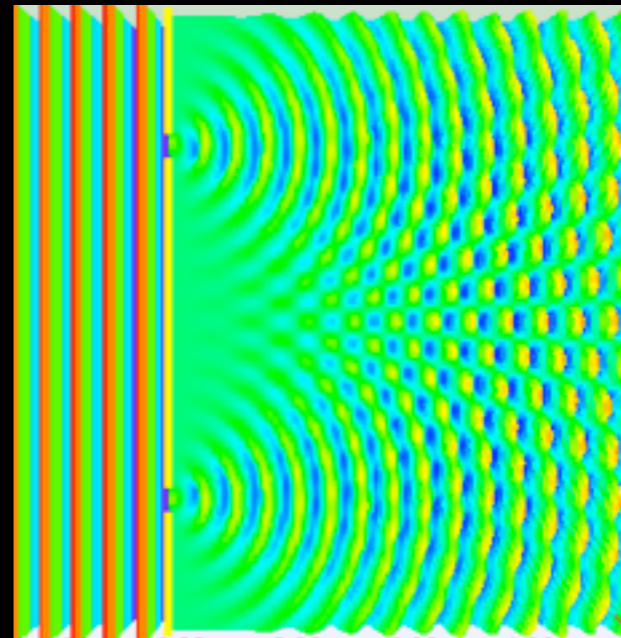


- Le particelle “sanno” così quali e quante fenditure sono aperte.
- Le diverse traiettorie interagiscono tra loro!



# Meccanica Quantistica e R. Feynman

- In meccanica quantistica la particella **non ha una posizione definita** nell'intervallo di tempo in cui “vola” dalla sorgente allo schermo.
- Le particelle **non percorrono nessuna traiettoria**.
- Ovvero: percorrono simultaneamente **tutte le traiettorie possibili** che connettono la sorgente e lo schermo.



- Le particelle “sanno” così quali e quante fenditure sono aperte.
- Le diverse traiettorie interagiscono tra loro!
- La **probabilità** che una particella sia rivelata in un dato punto dello schermo risulta da tale interazione  $\Rightarrow$  **interferenza**.



# Il principio di minima azione

In meccanica classica la legge oraria  $\mathbf{r}=\mathbf{r}(t)$ , che descrive la traiettoria di una particella, può essere ricavata usando due procedure equivalenti

Equazioni del moto di Newton



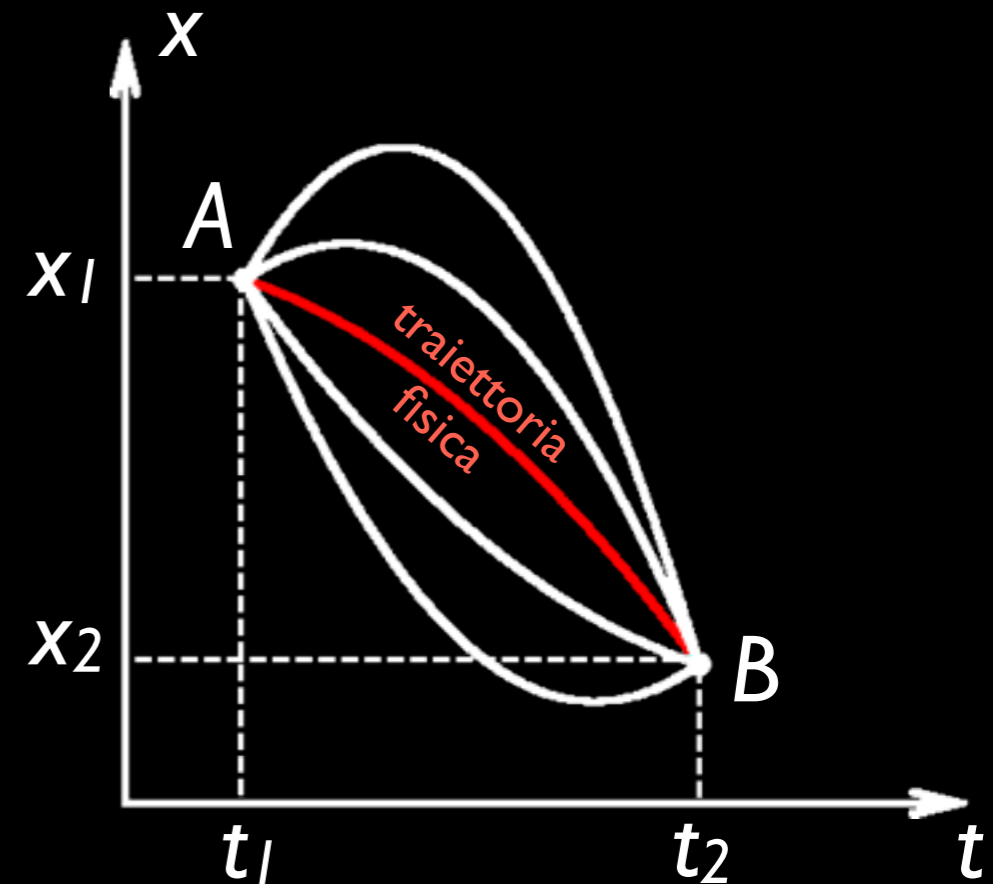
Principio di minima azione

Cos'è l'azione?

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

“Discretizzando”, l'azione rappresenta la somma su tutti gli intervalli di tempo  $\Delta t$  della differenza tra energia cinetica e potenziale

$$S = \sum_{\Delta t} (E_{\text{cin}} - E_{\text{pot}}) \Delta t$$



Ogni traiettoria che unisce i punti  $A=(t_1, x_1)$  e  $B=(t_2, x_2)$  ha associato un valore dell'azione

La traiettoria seguita dalla particella coincide con quella che **minimizza l'azione** ovvero che minimizza lo scambio di energia tra termine cinetico e energia potenziale



# Il Modello di R. Feynman

Una particella **libera**, inizialmente nel punto  $A$ , viene rivelata, dopo un certo intervallo di tempo, nel punto  $B$ .

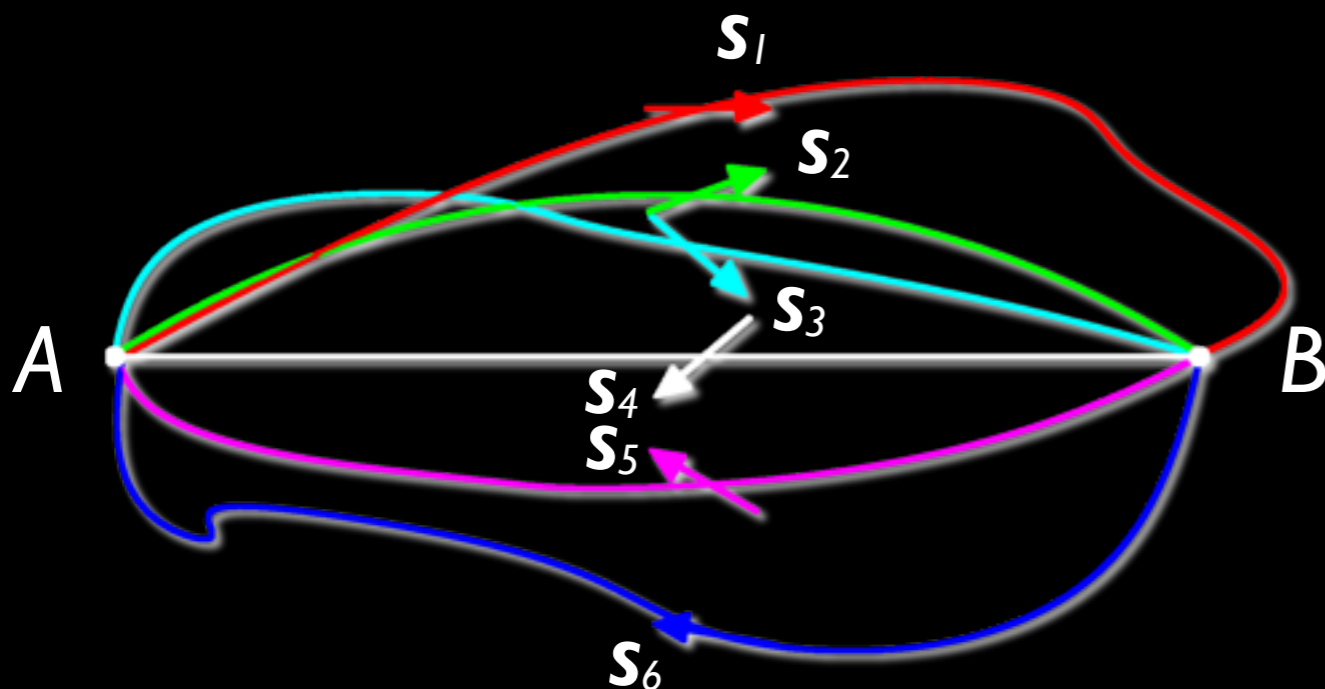
- Nel modello di Newton la traiettoria è quella **rettilinea**.
- Nel modello di Feynman la particella **“prova” tutte le traiettorie  $AB$** .
- A ciascuna traiettoria è associata una **“fase”**, cioè una grandezza vettoriale, che dipende essenzialmente dall'energia del processo.
- La probabilità che la particella sia rivelata in  $B$ ,  **$P(A \rightarrow B)$** , è legata alla somma di queste fasi, ovvero alla somma su tutte le **“storie” possibili**.



# Il Modello di R. Feynman

Una particella **libera**, inizialmente nel punto  $A$ , viene rivelata, dopo un certo intervallo di tempo, nel punto  $B$ .

- Nel modello di Newton la traiettoria è quella **rettilinea**.
- Nel modello di Feynman la particella **“prova” tutte le traiettorie  $AB$** .
- A ciascuna traiettoria è associata una **“fase”**, cioè una grandezza vettoriale, che dipende essenzialmente dall'energia del processo.
- La probabilità che la particella sia rivelata in  $B$ ,  **$P(A \rightarrow B)$** , è legata alla somma di queste fasi, ovvero alla somma su tutte le **“storie” possibili**.

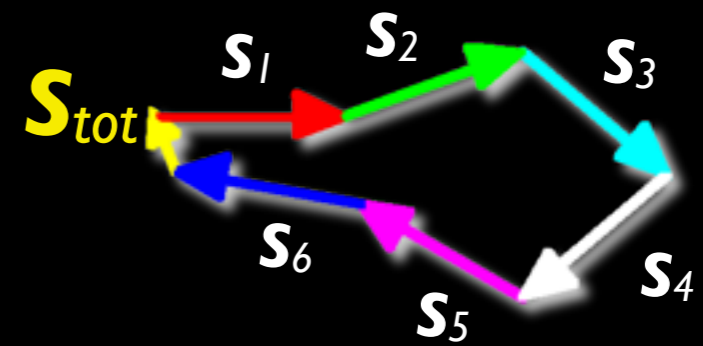
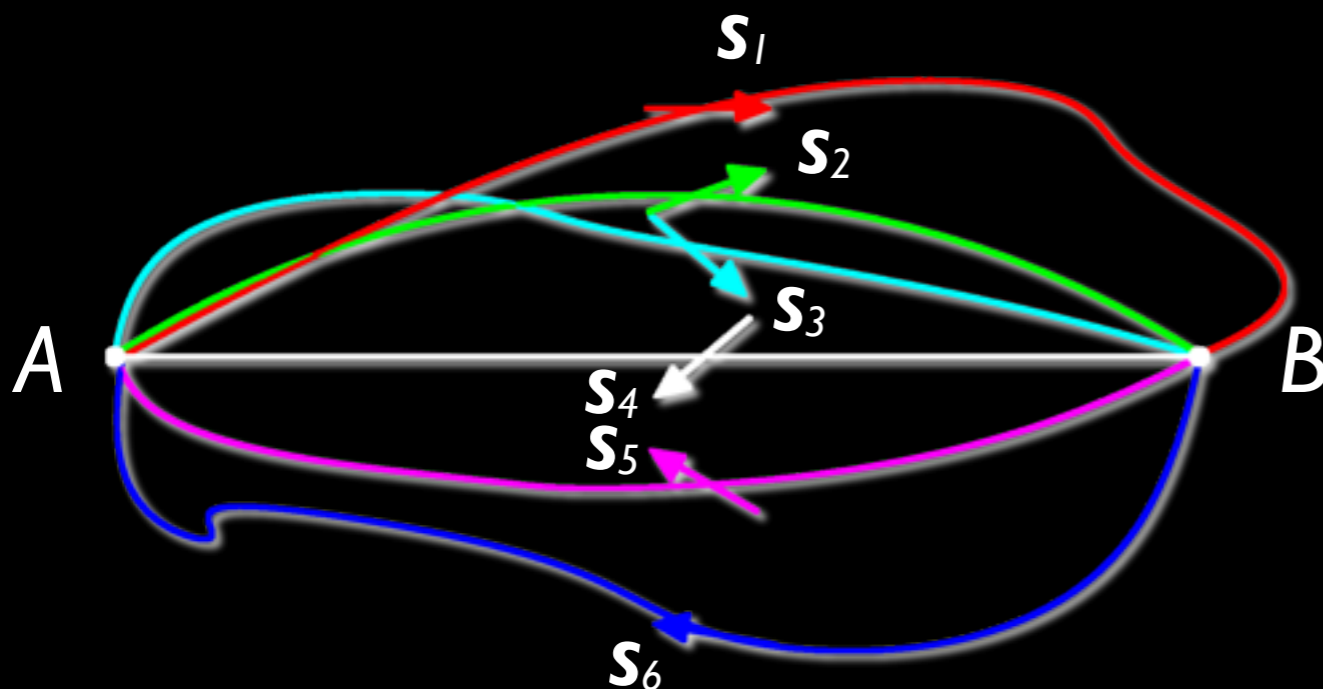




# Il Modello di R. Feynman

Una particella **libera**, inizialmente nel punto  $A$ , viene rivelata, dopo un certo intervallo di tempo, nel punto  $B$ .

- Nel modello di Newton la traiettoria è quella **rettilenea**.
- Nel modello di Feynman la particella **“prova” tutte le traiettorie  $AB$** .
- A ciascuna traiettoria è associata una **“fase”**, cioè una grandezza vettoriale, che dipende essenzialmente dall'energia del processo.
- La probabilità che la particella sia rivelata in  $B$ ,  **$P(A \rightarrow B)$** , è legata alla somma di queste fasi, ovvero alla somma su tutte le **“storie” possibili**.



$$P(A \rightarrow B) \propto S_{tot}^2$$

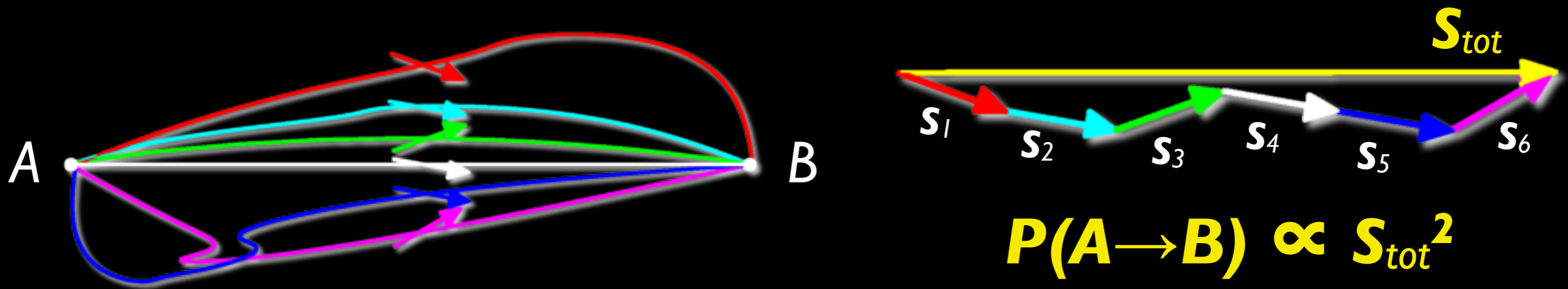
La probabilità è piccola!



# Il Modello di R. Feynman

Una particella **libera**, inizialmente nel punto  $A$ , viene rivelata, dopo un certo intervallo di tempo, nel punto  $B$ .

- Nel modello di Newton la traiettoria è quella **rettilinea**.
- Nel modello di Feynman la particella **“prova” tutte le traiettorie  $AB$** .
- A ciascuna traiettoria è associata una **“fase”**, cioè una grandezza vettoriale, che dipende essenzialmente dall'energia del processo.
- La probabilità che la particella sia rivelata in  $B$ ,  **$P(A \rightarrow B)$** , è legata alla somma di queste fasi, ovvero alla somma su tutte le **“storie” possibili**.



$$P(A \rightarrow B) \propto S_{tot}^2$$

La probabilità è grande!



# I Modelli di Feynman e Newton

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

- Le fasi associate a ciascuna traiettoria dipendono dall'energia (azione) e dalla costante di Planck che è piccolissima:  $\hbar = 6.6 \times 10^{-34} \text{ kg m}^2 \text{ s}^{-1}$
- Ci sono **traiettorie preferenziali**, hanno fasi che tendono ad allinearsi.
- Per i corpi “grandi” cioè molto energetici

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

**le traiettorie preferenziali coincidono con quelle di Newton.**

- La probabilità associata alla traiettoria rettilinea, per corpi grandi, è **vicinissima all'unità**, di conseguenza, le probabilità associate a tutte le altre traiettorie, non rettilinee, saranno praticamente nulle.
- Se, invece:  $E \Delta t \sim \hbar$ , tutti i percorsi diventano **ugualmente probabili** e sommandoli si ha **interferenza**.
- Vale il **principio di indeterminazione di Heisenberg**

$$\Delta x \Delta p \sim \hbar$$



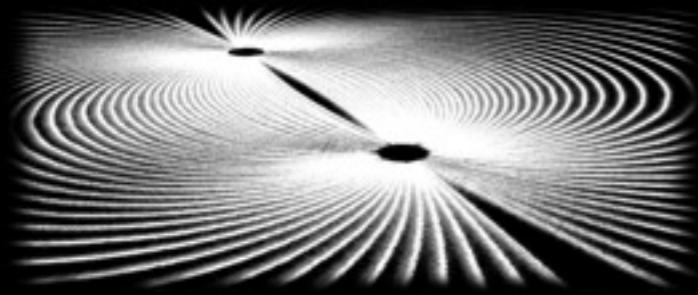
# La teoria della Relatività





# Un velocità “assoluta”

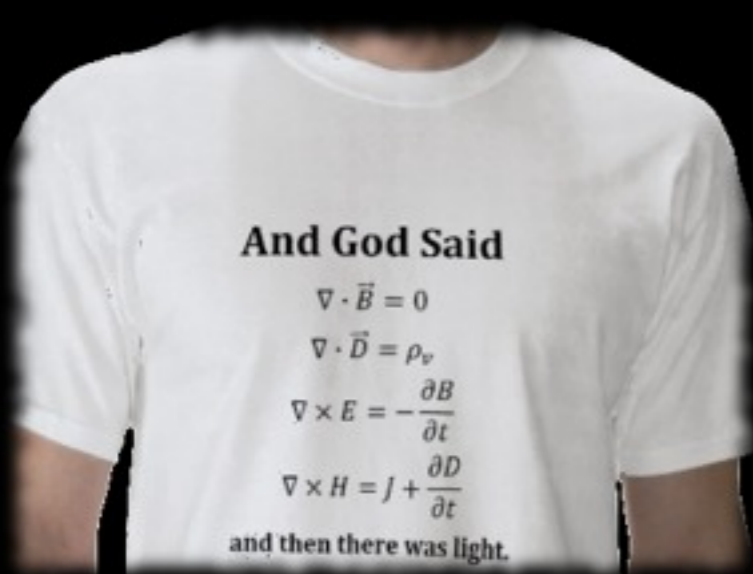
Richard Faraday (1791-1867) fu il primo scienziato ad introdurre il concetto di **campo di forza**. Lo fece “contro voglia” poiché era convinto che le forze agissero solo per contatto, non a distanza.



Usando della limatura di ferro ed un magnete è possibile visualizzare le linee del campo magnetico.

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 unificato elettromagnetico si propaga sotto forma di onde ad una velocità di  $\sim 3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$ . Tale valore compare nelle equazioni come una costante fondamentale detta: **c**.

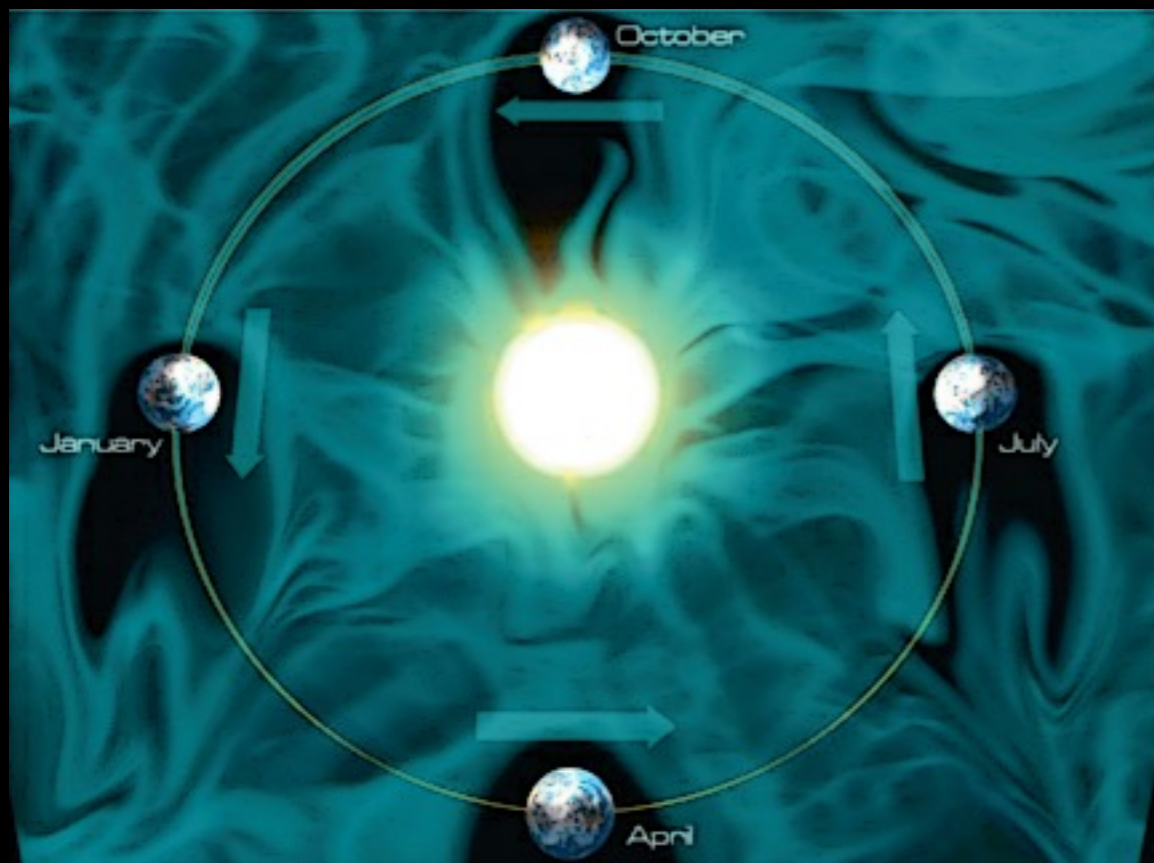


...Ma **c** è una velocità rispetto a cosa?



# Un velocità “assoluta” o no...

- Le equazioni di Maxwell funzionano in **tutto l'universo**, non aveva senso pensare che la velocità trovata fosse relativa alla terra.
- Doveva esistere un mezzo di propagazione che permeasse tutto l'universo. Tale mezzo fu detto **etere luminifero**.
- Ma, se così era, ci doveva anche essere un modo per “misurare” la sua presenza, Maxwell escogitò un esperimento...

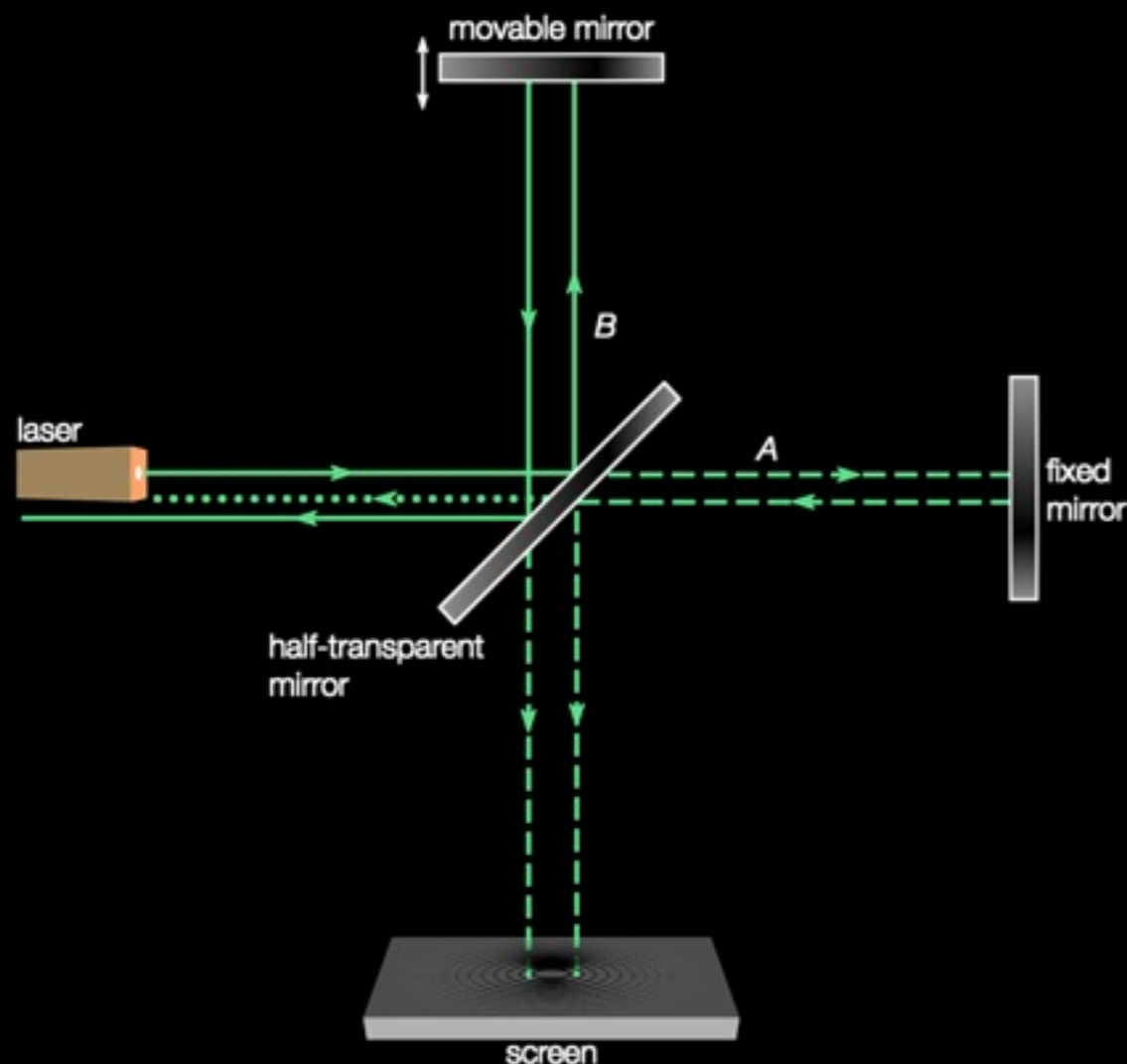


La terra si muove all'interno dell'etere, è quindi possibile misurare la **velocità relativa terra-etere**.



# Un velocità “assoluta” o no...

- Le equazioni di Maxwell funzionano in **tutto l'universo**, non aveva senso pensare che la velocità trovata fosse relativa alla terra.
- Doveva esistere un mezzo di propagazione che permeasse tutto l'universo. Tale mezzo fu detto **etere luminifero**.
- Ma, se così era, ci doveva anche essere un modo per “misurare” la sua presenza, Maxwell escogitò un esperimento...



La terra si muove all'interno dell'etere, è quindi possibile misurare la **velocità relativa terra-etere**.

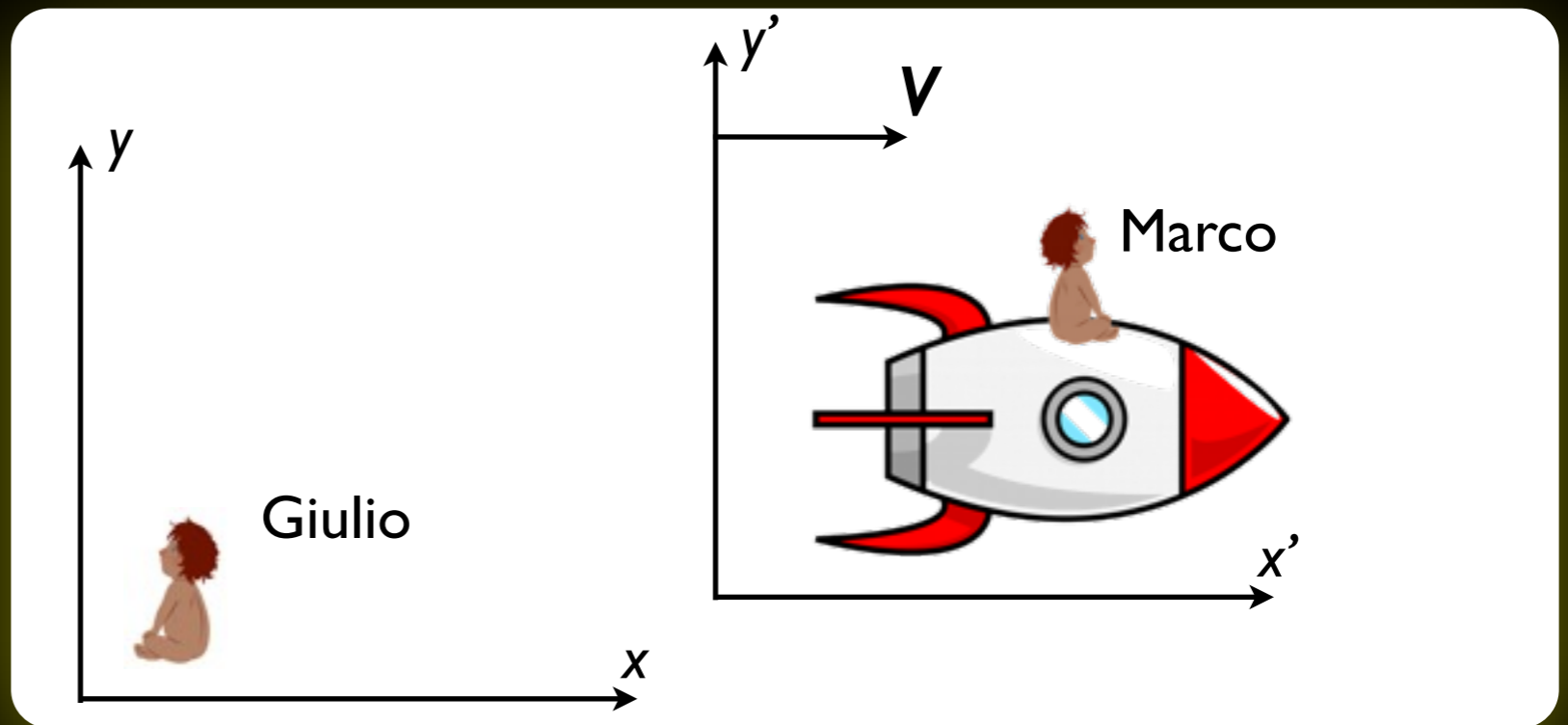
Due fisici americani Albert Michelson e Edward Morley eseguirono nel 1887, l'esperimento suggerito da Maxwell trovando una **velocità relativa nulla!**

# La teoria della Relatività

Trasformazioni di Galileo

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

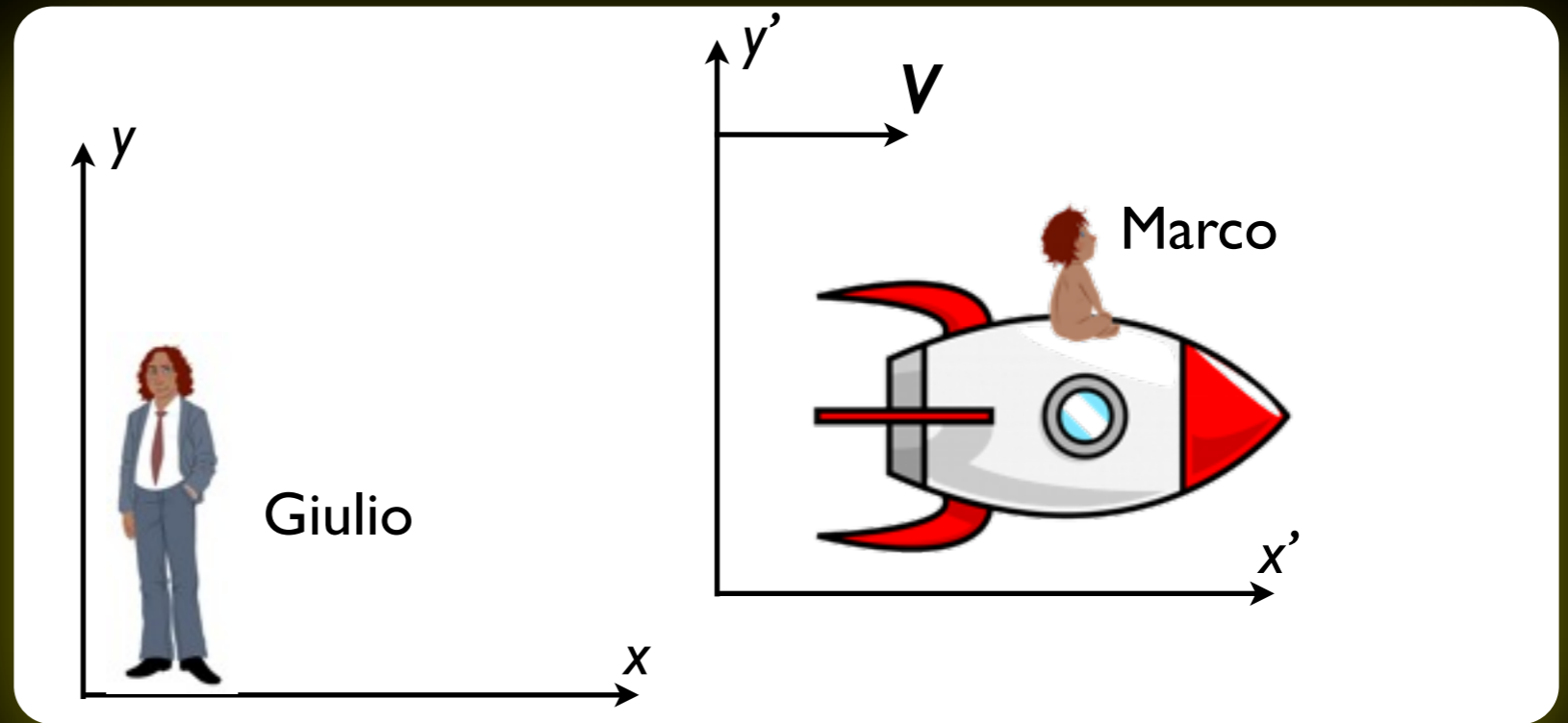
Velocità limite =  $\infty$



# La teoria della Relatività

Trasformazioni di Lorentz

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



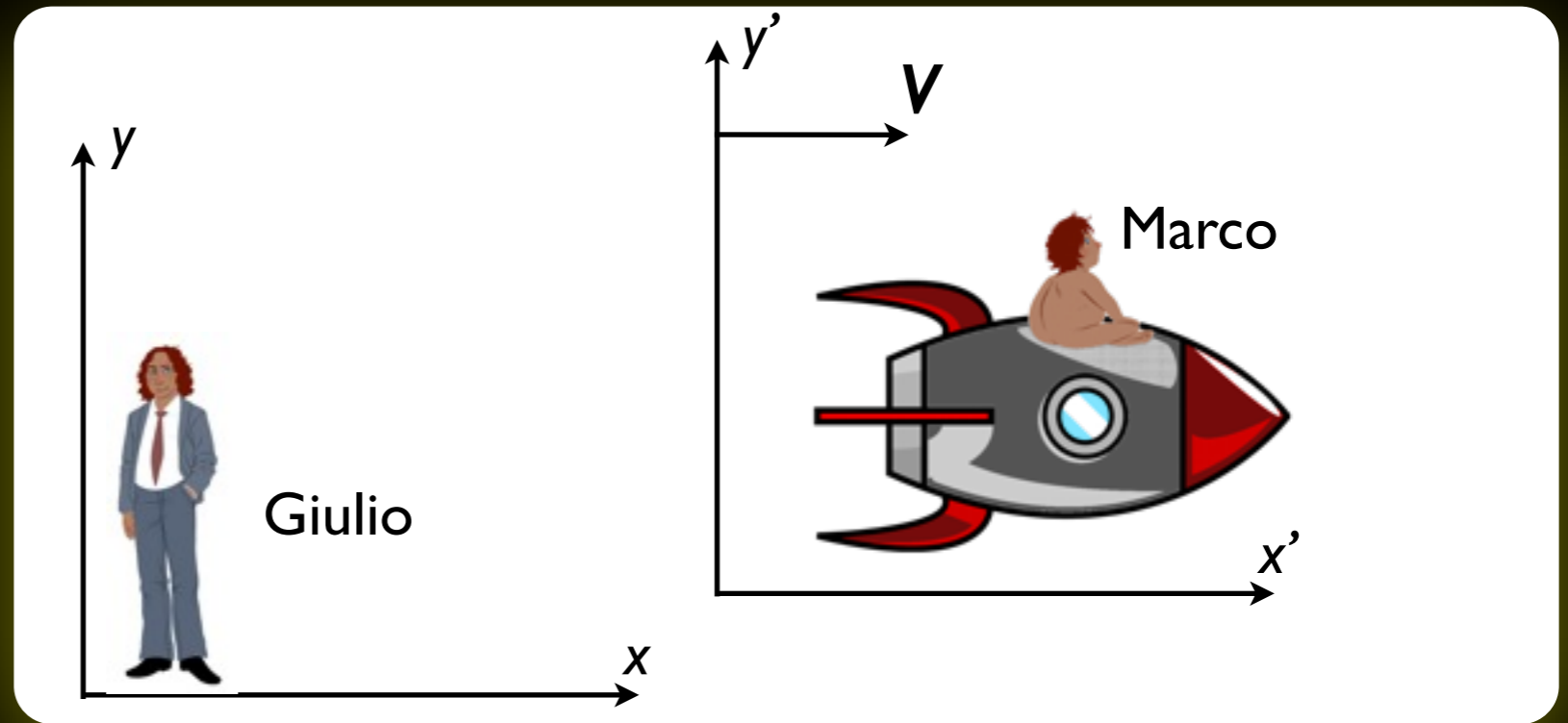
••• Dilatazione dei tempi:

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

# La teoria della Relatività

Trasformazioni di Lorentz

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



••• Dilatazione dei tempi:

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

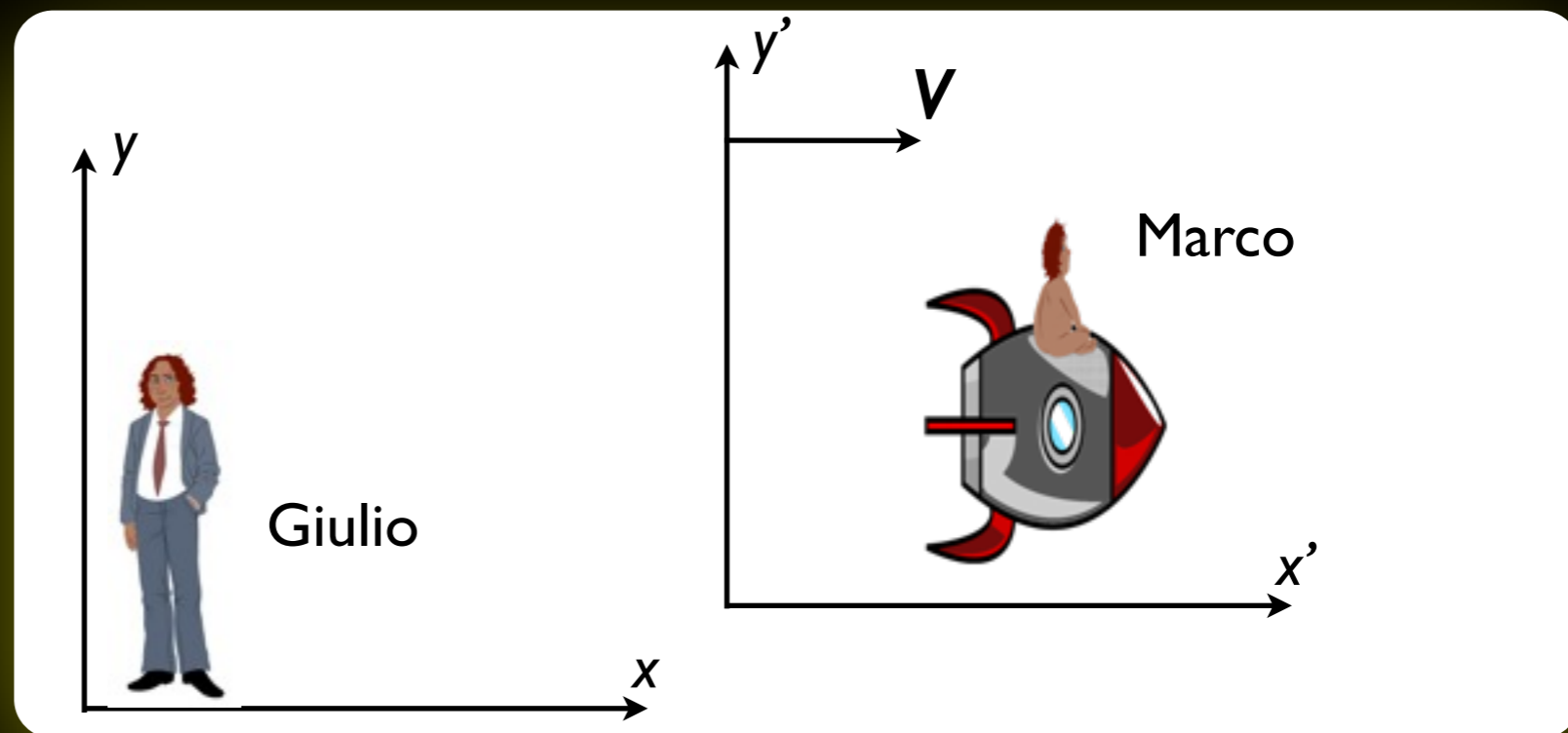
••• Dilatazione della massa:

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

# La teoria della Relatività

Trasformazioni di Lorentz

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



• 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:

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



# La teoria della Relatività

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

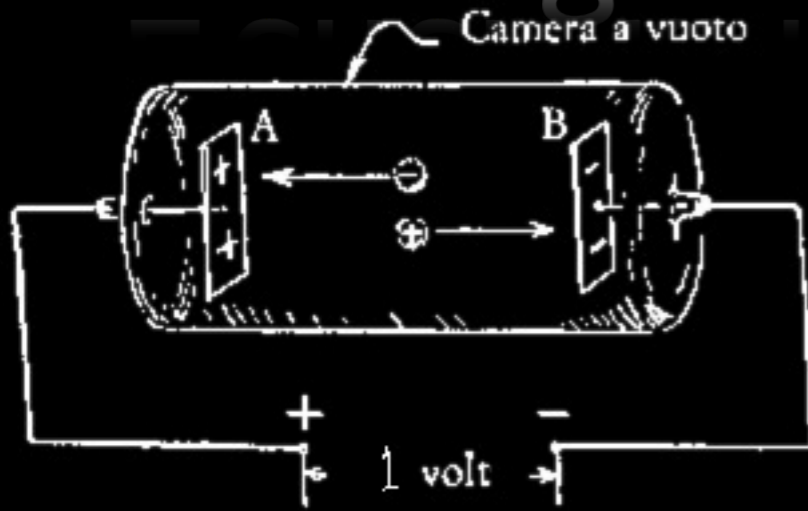
Nessuna contraddizione gli **intervalli di tempo** e **spazio** si trasformano entrambi in modo tale che la velocità della luce rimanga **invariata in ogni sistema di riferimento inerziale**

Tutte le leggi fisiche sono **invarianti** in sistemi di riferimento inerziali

Quantità di moto ed energia si conservano e vale l'identità

$$E = mc^2$$

# L'energia nella teoria della Relatività

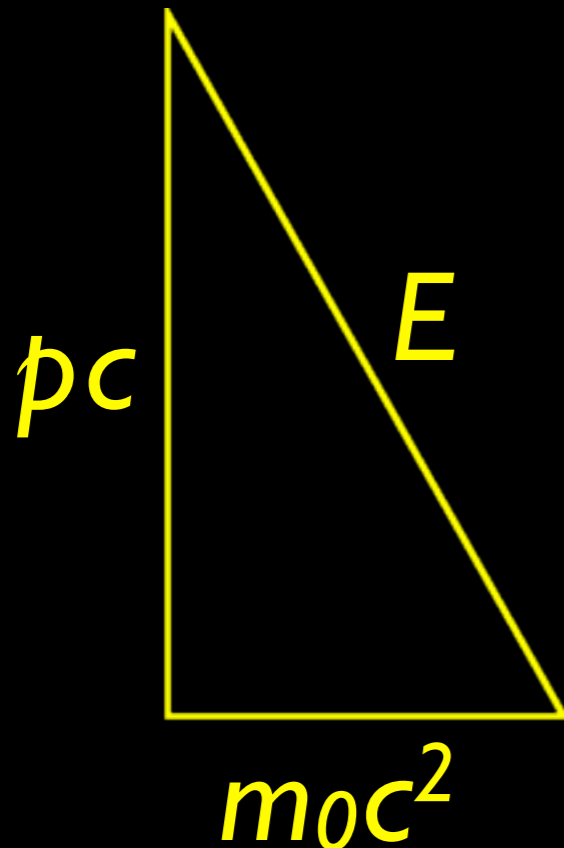


Un elettronvolt, simbolo eV, rappresenta l'energia cinetica acquisita da una carica di un elettrone accelerata da una differenza di potenziale di un Volt

$$1 \text{ eV} = 1.6021 \times 10^{-19} \text{ Joule}$$

(keV=10<sup>3</sup> eV, MeV=10<sup>6</sup> eV, GeV=10<sup>9</sup> eV, TeV=10<sup>12</sup> eV,...)

$$E^2 = (pc)^2 + (m_0c)^2$$



Si usano le unità naturali:  $c = \hbar = 1$

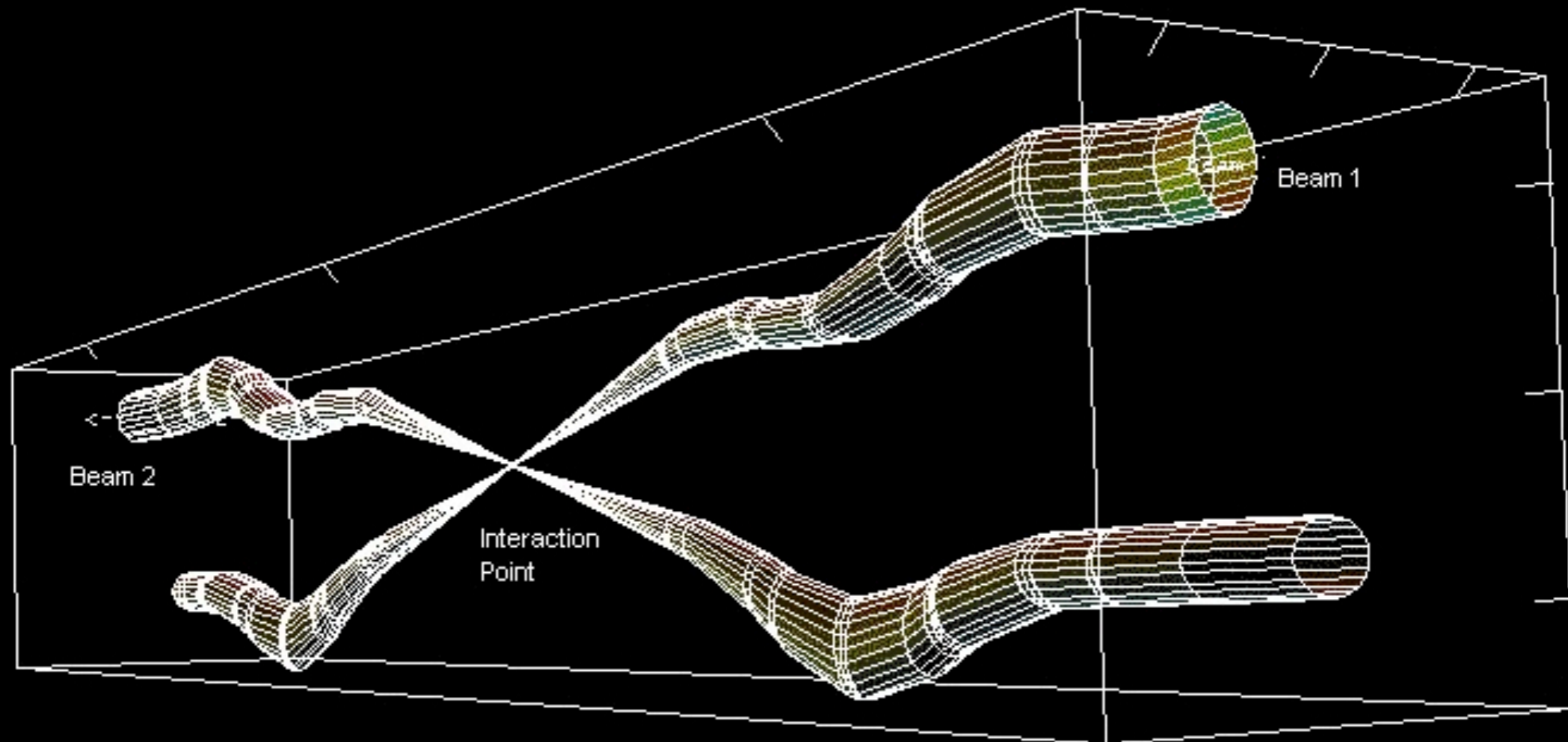
- energia  $E$  da GeV  $\longrightarrow$  GeV
- momento  $p$  da GeV/c  $\longrightarrow$  GeV
- massa  $m$  da GeV/c<sup>2</sup>  $\longrightarrow$  GeV

$$\begin{aligned} M_{\text{elettrone}} &= 0.5 \text{ MeV} \\ M_{\text{protone}} &= 938 \text{ MeV} \\ M_{\text{Higgs}} &= 125 \text{ GeV} \end{aligned}$$

# Massa prodotta dall'LHC

L'energia (massa) di collisione è di **7 TeV**, ma quante collisioni avvengono ogni secondo di "run"?  
Ci servono i seguenti dati:

- $N_{\text{bunch}} = 2500$  numero di pacchetti
- $N_{\text{proton}} = 10^{11}$  numero di protoni in ogni pacchetto
- $\sigma = 2 \times 10^{-10}$  probabilità che avvenga un'interazione protone-protone "anelastica" in LHC



# Massa prodotta dall'LHC

L'energia (massa) di collisione è di **7 TeV**, ma quante collisioni avvengono ogni secondo di "run"?  
Ci servono i seguenti dati:

•  $N_{\text{bunch}} = 2500$  numero di pacchetti

•  $N_{\text{proton}} = 10^{11}$  numero di protoni in ogni pacchetto

•  $\sigma = 2 \times 10^{-10}$  probabilità che avvenga un'interazione protone-protone "anelastica" in LHC

$$F_{\text{cross}} = \frac{c}{L} = \frac{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2.7 \times 10^4 \text{ m}} = 1.1 \times 10^4 \text{ Hz}$$

Numero di incroci al secondo  
per un singolo pacchetto

# Massa prodotta dall'LHC

L'energia (massa) di collisione è di **7 TeV**, ma quante collisioni avvengono ogni secondo di "run"?  
Ci servono i seguenti dati:

•  $N_{\text{bunch}} = 2500$  numero di pacchetti

•  $N_{\text{proton}} = 10^{11}$  numero di protoni in ogni pacchetto

•  $\sigma = 2 \times 10^{-10}$  probabilità che avvenga un'interazione protone-protone "anelastica" in LHC

$$F_{\text{cross}} = \frac{c}{L} = \frac{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2.7 \times 10^4 \text{ m}} = 1.1 \times 10^4 \text{ Hz}$$

Numero di incroci al secondo  
per un singolo pacchetto

$$F_{\text{coll}} = N_{\text{bunch}} \times N_{\text{proton}} \times \sigma \times F_{\text{cross}}$$

Numero di collisioni al secondo

$$F_{\text{coll}} = 2.5 \times 10^3 \times 10^{11} \times 2 \times 10^{-10} \times 1.1 \times 10^4 \text{ Hz} = 5.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

# Massa prodotta dall'LHC

L'energia (massa) di collisione è di **7 TeV**, ma quante collisioni avvengono ogni secondo di "run"?  
Ci servono i seguenti dati:

•  $N_{\text{bunch}} = 2500$  numero di pacchetti

•  $N_{\text{proton}} = 10^{11}$  numero di protoni in ogni pacchetto

•  $\sigma = 2 \times 10^{-10}$  probabilità che avvenga un'interazione protone-protone "anelastica" in LHC

$$F_{\text{cross}} = \frac{c}{L} = \frac{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2.7 \times 10^4 \text{ m}} = 1.1 \times 10^4 \text{ Hz}$$

Numero di incroci al secondo  
per un singolo pacchetto

$$F_{\text{coll}} = N_{\text{bunch}} \times N_{\text{proton}} \times \sigma \times F_{\text{cross}}$$

Numero di collisioni al secondo

$$F_{\text{coll}} = 2.5 \times 10^3 \times 10^{11} \times 2 \times 10^{-10} \times 1.1 \times 10^4 \text{ Hz} = 5.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{coll}} = F_{\text{coll}} \times 7 \text{ TeV} = 3.9 \times 10^9 \text{ TeVs}^{-1}$$

Potenza prodotta

# Massa prodotta dall'LHC

L'energia (massa) di collisione è di **7 TeV**, ma quante collisioni avvengono ogni secondo di "run"?  
Ci servono i seguenti dati:

•  $N_{\text{bunch}} = 2500$  numero di pacchetti

•  $N_{\text{proton}} = 10^{11}$  numero di protoni in ogni pacchetto

•  $\sigma = 2 \times 10^{-10}$  probabilità che avvenga un'interazione protone-protone "anelastica" in LHC

$$F_{\text{cross}} = \frac{c}{L} = \frac{3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}}{2.7 \times 10^4 \text{ m}} = 1.1 \times 10^4 \text{ Hz}$$

Numero di incroci al secondo per un singolo pacchetto

$$F_{\text{coll}} = N_{\text{bunch}} \times N_{\text{proton}} \times \sigma \times F_{\text{cross}}$$

Numero di collisioni al secondo

$$F_{\text{coll}} = 2.5 \times 10^3 \times 10^{11} \times 2 \times 10^{-10} \times 1.1 \times 10^4 \text{ Hz} = 5.5 \times 10^8 \text{ Hz}$$

$$P_{\text{coll}} = F_{\text{coll}} \times 7 \text{ TeV} = 3.9 \times 10^9 \text{ TeVs}^{-1}$$

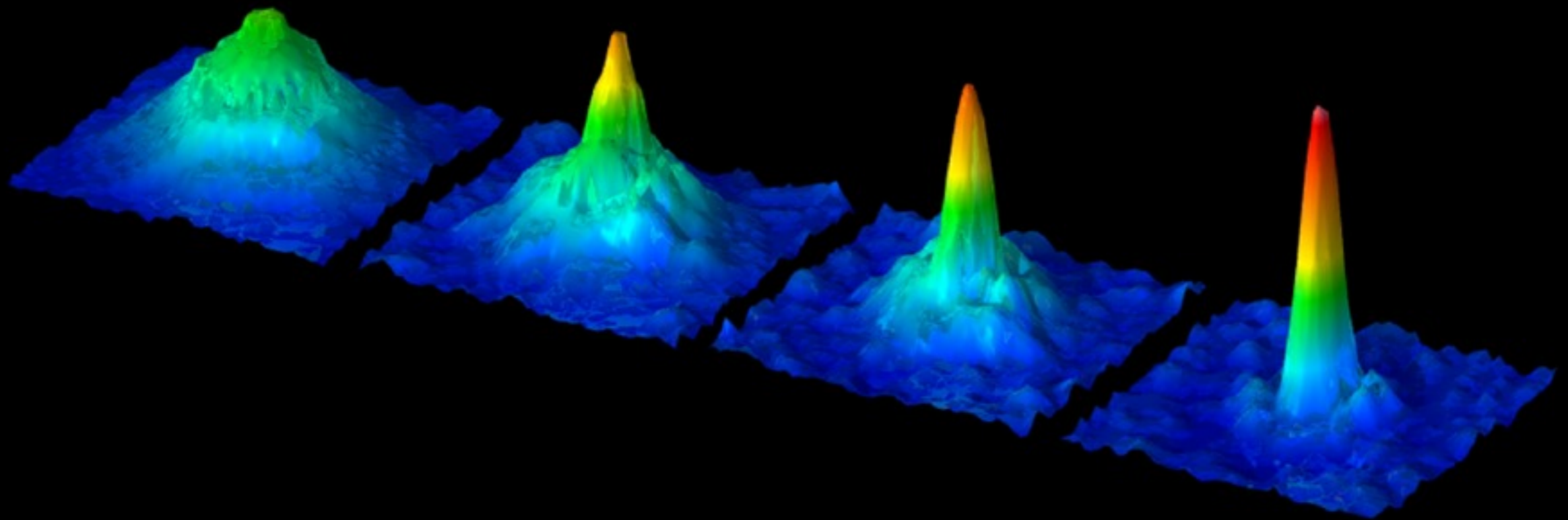
Potenza prodotta

$$M_{\text{coll}} = \frac{P_{\text{coll}}}{c^2} = \frac{3.9 \times 10^9 \text{ TeVs}^{-1}}{(3 \times 10^8)^2 \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}} = \frac{3.9 \times 10^{21} \times 1.6 \times 10^{-19} \text{ Js}^{-1}}{9 \times 10^{16} \text{ m}^2 \text{ s}^{-2}}$$

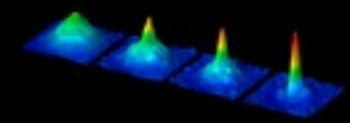
$$M_{\text{coll}} = 6.9 \times 10^{-15} \text{ kg s}^{-1} = 2.2 \times 10^{-7} \text{ kg anno}^{-1}$$

Massa prodotta per secondo e per anno

# Teoria quantistica dei campi







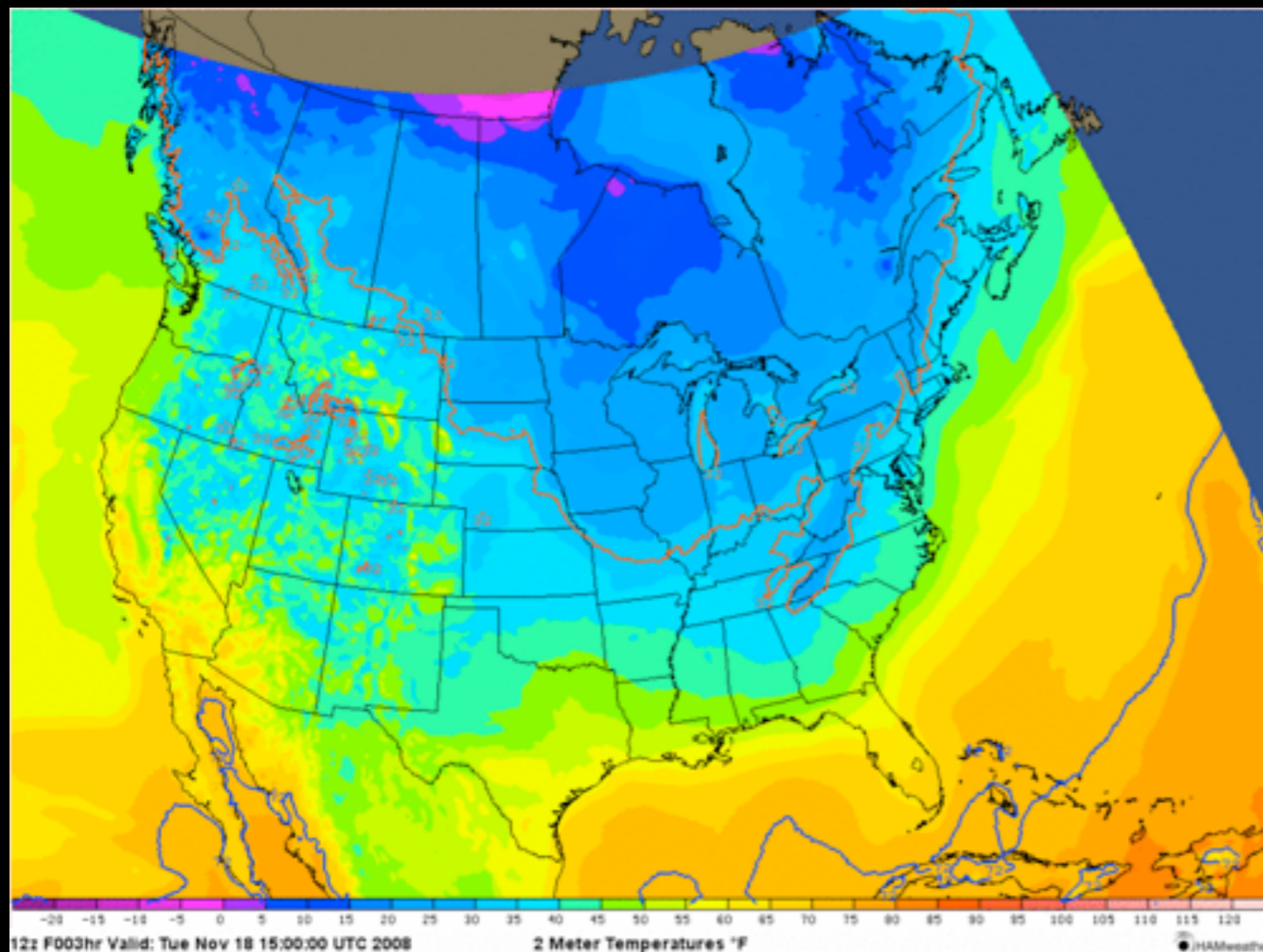
# Teoria quantistica dei campi

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



# Teoria quantistica dei campi

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

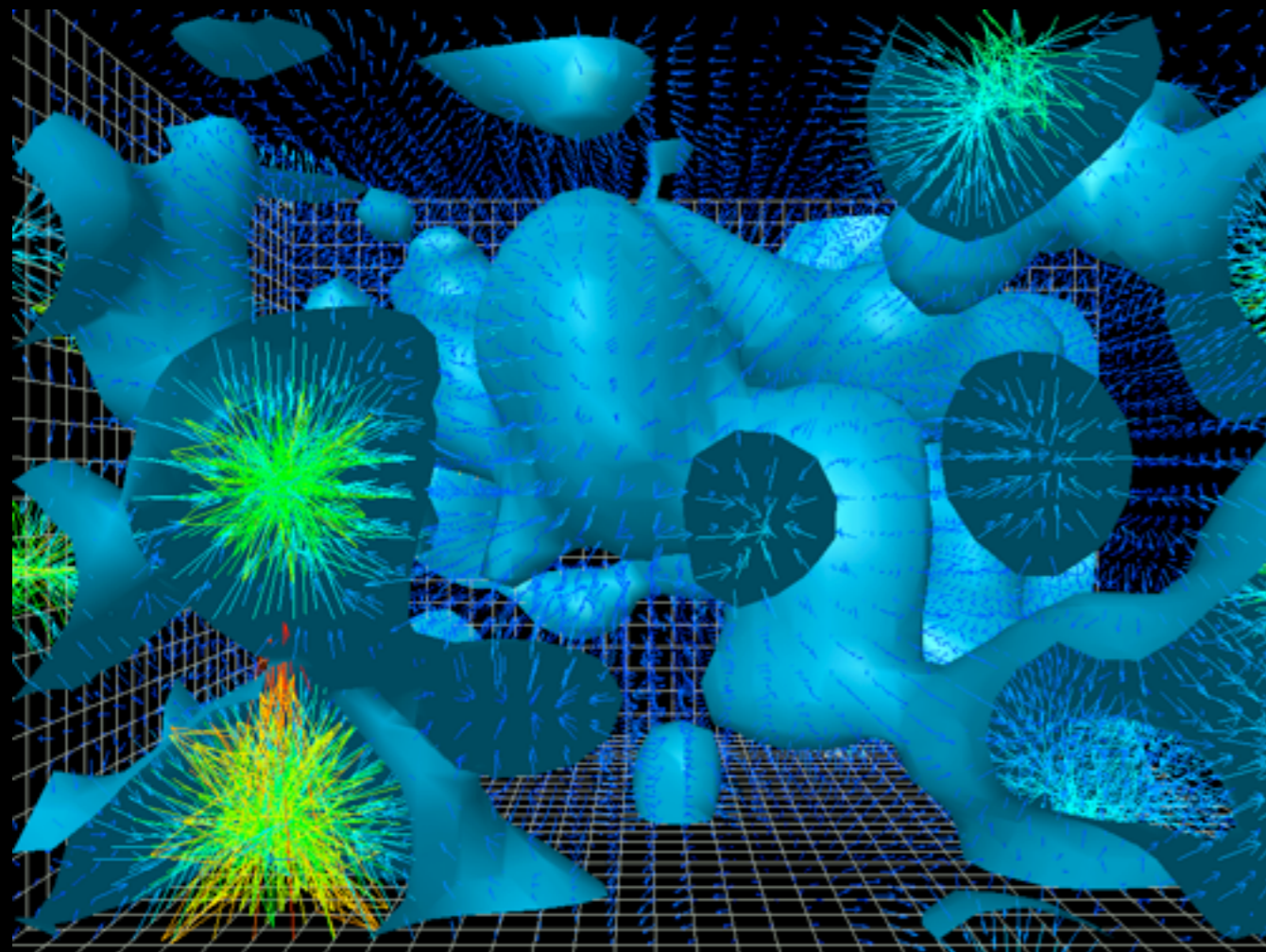


La grandezza fisica può essere **scalare** come, ad esempio, la **temperatura**



# Teoria quantistica dei campi

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**

# Teoria quantistica dei campi

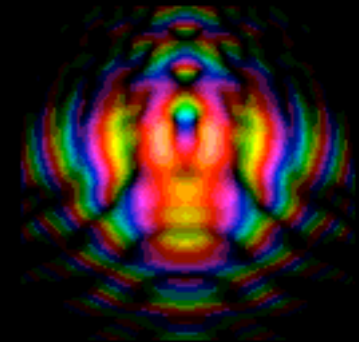
Il concetto di particella come entità “**indistruttibile**”  
deve essere abbandonato e sostituito da quello di campo:  
il campo dell’elettrone  $\Psi$ , del fotone  $A_\mu$ , ecc.



# Teoria quantistica dei campi

La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!  
Includendo la relatività ristretta 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  $\Psi$ , del fotone  $A_\mu$ , ecc.

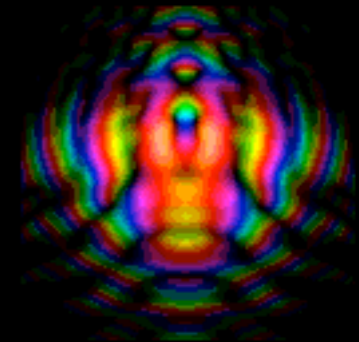




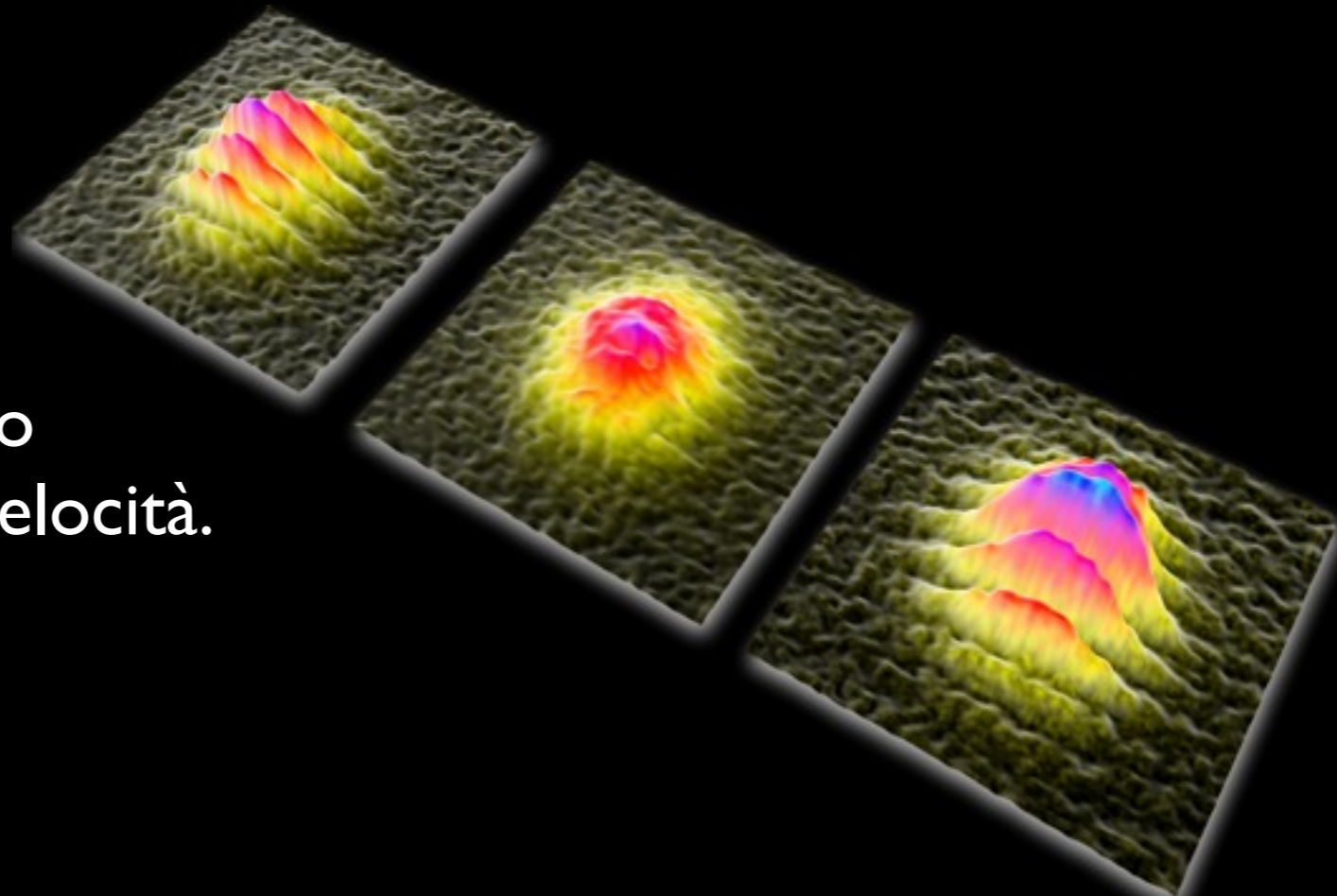
# Teoria quantistica dei campi

La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!  
Includendo la relatività ristretta 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  $\Psi$ , del fotone  $A_\mu$ , ecc.



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



# Standard Model of FUNDAMENTAL PARTICLES AND INTERACTIONS

The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it is one of the fundamental interactions even though not part of the "Standard Model."

## FERMIONS

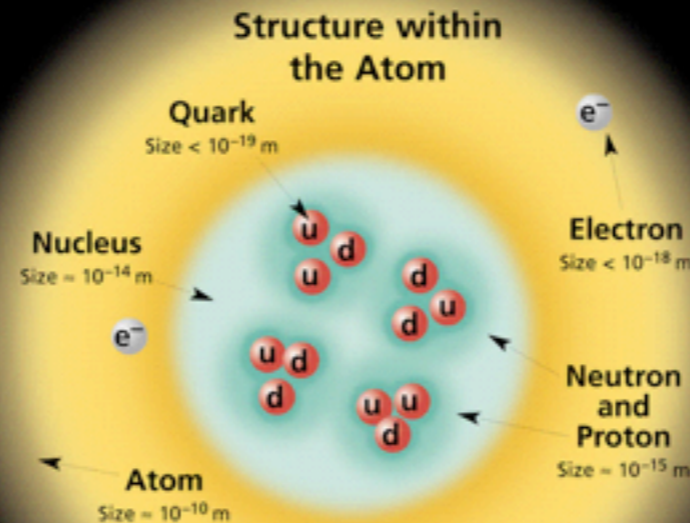
matter constituents  
spin = 1/2, 3/2, 5/2, ...

## BOSONS

force carriers  
spin = 0, 1, 2, ...

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\nu_e$ electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
$e$ electron	0.000511	-1
$\nu_\mu$ muon neutrino	$<0.0002$	0
$\mu$ muon	0.106	-1
$\nu_\tau$ tau neutrino	$<0.02$	0
$\tau$ tau	1.7771	-1

Quarks spin = 1/2		
Flavor	Approx. Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>u</b> up	0.003	2/3
<b>d</b> down	0.006	-1/3
<b>c</b> charm	1.3	2/3
<b>s</b> strange	0.1	-1/3
<b>t</b> top	175	2/3
<b>b</b> bottom	4.3	-1/3



If the protons and neutrons in this picture were 10 cm across, then the quarks and electrons would be less than 0.1 mm in size and the entire atom would be about 10 km across.

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
$\gamma$ photon	0	0
$W^-$	80.4	-1
$W^+$	80.4	+1
$Z^0$	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Electric charge
<b>g</b> gluon	0	0

**Color Charge**  
Each quark carries one of three types of "strong charge," also called "color charge." These charges have nothing to do with the colors of visible light. There are eight possible types of color charge for gluons. Just as electrically-charged particles interact by exchanging photons, in strong interactions color-charged particles interact by exchanging gluons. Leptons, photons, and  $W$  and  $Z$  bosons have no strong interactions and hence no color charge.

### Quarks Confined in Mesons and Baryons

One cannot isolate quarks and gluons; they are confined in color-neutral particles called **hadrons**. This confinement (binding) results from multiple exchanges of gluons among the color-charged constituents. As color-charged particles (quarks and gluons) move apart, the energy in the color-force field between them increases. This energy eventually is converted into additional quark-antiquark pairs (see figure below). The quarks and antiquarks then combine into hadrons; these are the particles seen to emerge. Two types of hadrons have been observed in nature: **mesons**  $q\bar{q}$  and **baryons**  $qqq$ .

### Residual Strong Interaction

The strong binding of color-neutral protons and neutrons to form nuclei is due to residual strong interactions between their color-charged constituents. It is similar to the residual electrical interaction that binds electrically neutral atoms to form molecules. It can also be viewed as the exchange of mesons between the hadrons.

**Spin** is the intrinsic angular momentum of particles. Spin is given in units of  $\hbar$ , which is the quantum unit of angular momentum, where  $\hbar = h/2\pi = 6.58 \times 10^{-25} \text{ GeV s} = 1.05 \times 10^{-34} \text{ J s}$ .

**Electric charges** are given in units of the proton's charge. In SI units the electric charge of the proton is  $1.60 \times 10^{-19}$  coulombs.

The **energy** unit of particle physics is the electronvolt (eV), the energy gained by one electron in crossing a potential difference of one volt. **Masses** are given in  $\text{GeV}/c^2$  (remember  $E = mc^2$ ), where  $1 \text{ GeV} = 10^9 \text{ eV} = 1.60 \times 10^{-10} \text{ joule}$ . The mass of the proton is  $0.938 \text{ GeV}/c^2 = 1.67 \times 10^{-27} \text{ kg}$ .

## PROPERTIES OF THE INTERACTIONS

Baryons $qqq$ and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
<b>p</b>	proton	<b>uud</b>	1	0.938	1/2
$\bar{p}$	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
<b>n</b>	neutron	<b>udd</b>	0	0.940	1/2
$\Lambda$	lambda	<b>uds</b>	0	1.116	1/2
$\Omega^-$	omega	<b>sss</b>	-1	1.672	3/2

Property \ Interaction	Gravitational	Weak	Electromagnetic	Strong	
		(Electroweak)		Fundamental	Residual
Acts on:	Mass - Energy	Flavor	Electric Charge	Color Charge	See Residual Strong Interaction Note
Particles experiencing:	All	Quarks, Leptons	Electrically charged	Quarks, Gluons	Hadrons
Particles mediating:	Graviton (not yet observed)	$W^+$ $W^-$ $Z^0$	$\gamma$	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:	$10^{-41}$	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	$10^{-41}$	$10^{-4}$	1	60	
for two protons in nucleus	$10^{-36}$	$10^{-7}$	1	Not applicable to hadrons	20

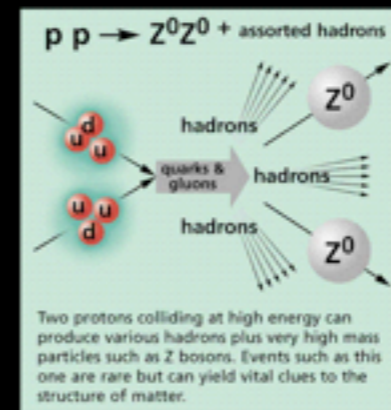
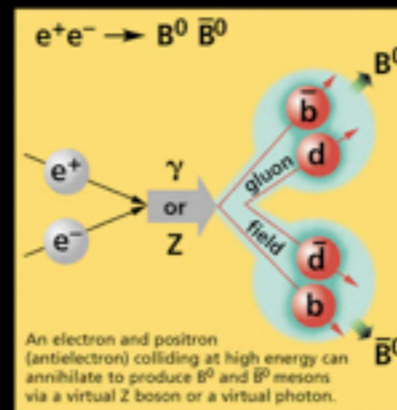
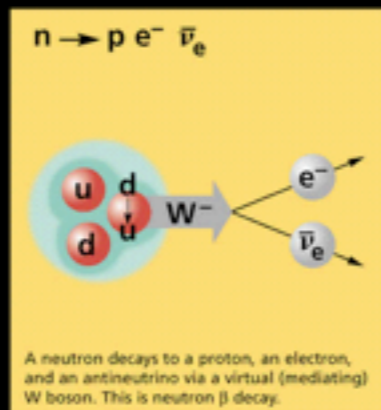
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c <sup>2</sup>	Spin
$\pi^+$	pion	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.140	0
$K^-$	kaon	<b>s<math>\bar{u}</math></b>	-1	0.494	0
$\rho^+$	rho	<b>u<math>\bar{d}</math></b>	+1	0.770	1
$B^0$	B-zero	<b>d<math>\bar{b}</math></b>	0	5.279	0
$\eta_c$	eta-c	<b>c<math>\bar{c}</math></b>	0	2.980	0

### Matter and Antimatter

For every particle type there is a corresponding antiparticle type, denoted by a bar over the particle symbol (unless + or - charge is shown). Particle and antiparticle have identical mass and spin but opposite charges. Some electrically neutral bosons (e.g.,  $Z^0$ ,  $\gamma$ , and  $\eta_c = c\bar{c}$ , but not  $K^0 = d\bar{s}$ ) are their own antiparticles.

### Figures

These diagrams are an artist's conception of physical processes. They are not exact and have no meaningful scale. Green shaded areas represent the cloud of gluons or the gluon field, and red lines the quark paths.



### The Particle Adventure

Visit the award-winning web feature *The Particle Adventure* at <http://ParticleAdventure.org>

This chart has been made possible by the generous support of:

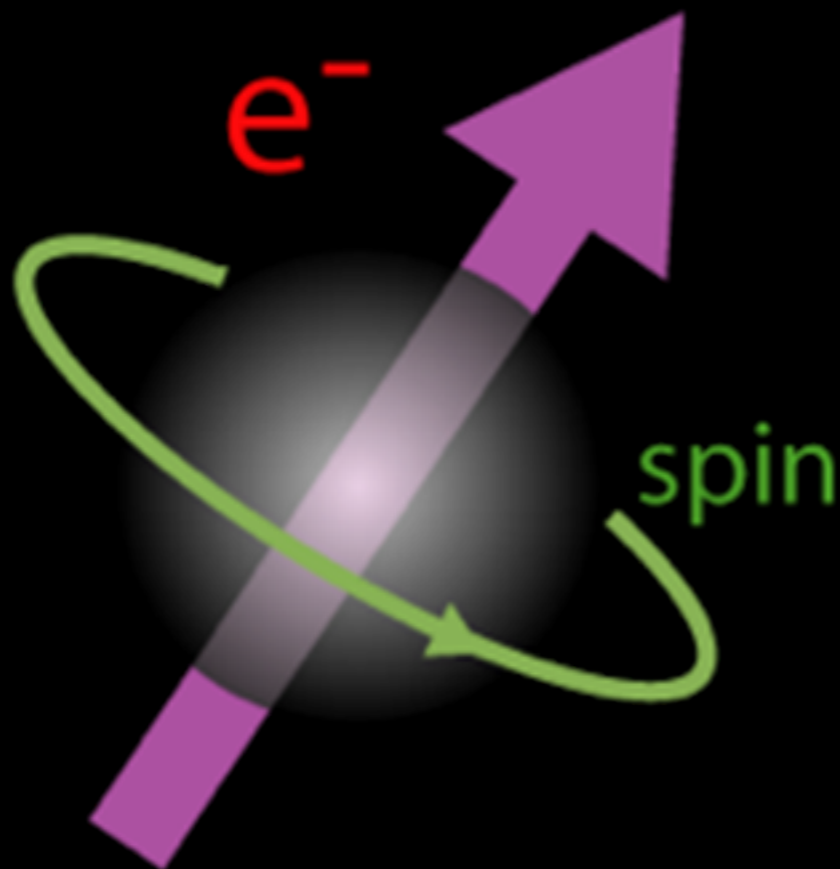
U.S. Department of Energy  
U.S. National Science Foundation  
Lawrence Berkeley National Laboratory  
Stanford Linear Accelerator Center  
American Physical Society, Division of Particles and Fields  
**BURLE INDUSTRIES, INC.**

©2000 Contemporary Physics Education Project. CPEP is a non-profit organization of teachers, physicists, and educators. Send mail to: CPEP, MS 50-308, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, 94720. For information on charts, text materials, hands-on classroom activities, and workshops, see:

<http://CPEPweb.org>

# Il Modello Standard

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**.



		Generazioni			
		I	II	III	
leptoni	quark	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	$0$ $0$ $1$ <b><math>\gamma</math></b> photon
		$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ $1$ <b>g</b> gluon
		$<2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ $0$ $1$ <b><math>Z^0</math></b> Z boson
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1$ <b><math>W^\pm</math></b> W boson
		portatori dell'interazione			



# Il Modello Standard

## 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
- Interazioni elettromagnetica: fotone, massa nulla  $\Rightarrow$  raggio d'azione infinito
- Interazione debole: bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$ , masse grandi  $\Rightarrow$  corto raggio d'azione
- Interazione forte: gluone g

		Generazioni			
		I	II	III	
leptoni	quark	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ <b>u</b> up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ <b>c</b> charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ <b>t</b> top	$0$ $0$ <b><math>\gamma</math></b> photon
		$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ <b>d</b> down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ <b>s</b> strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ <b>g</b> gluon
		$<2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ $0$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ $0$ <b><math>Z^0</math></b> Z boson
		$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ <b><math>\tau</math></b> tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ <b><math>W^\pm</math></b> W boson
	leptoni				portatori dell'interazione

# I quark

## Quarks

- 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

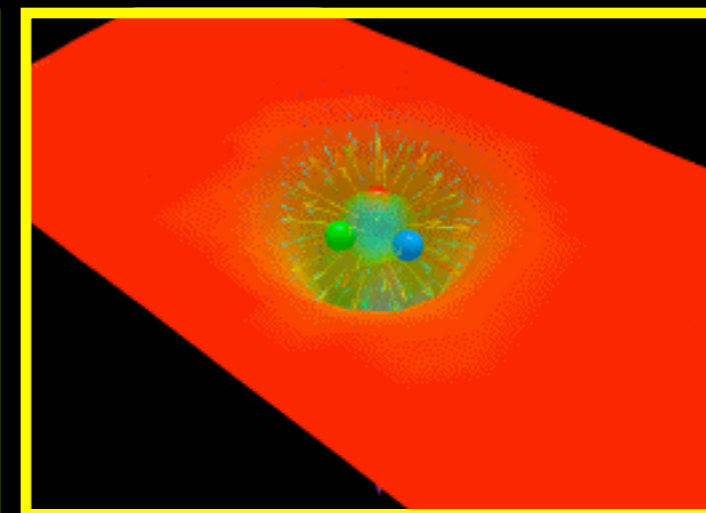
confinamento  
dei quark



non esistono  
quark liberi

## Generazioni

	I	II	III		
quark	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	$0$ $0$ $1$ <b>γ</b> photon	portatori dell'interazione
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ $1$ <b>g</b> gluon	
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>e</sub></b> electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>μ</sub></b> muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b>ν<sub>τ</sub></b> tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ $0$ $1$ <b>Z<sup>0</sup></b> Z boson	
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>μ</b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>τ</b> tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $1$ <b>W<sup>±</sup></b> W boson	



# I leptoni

## Leptoni

- Sei particelle in tre generazioni: “**neutrino**” e “**leptone carico**”
- Spin = 1/2, sono fermioni
- Carica del neutrino = 0, carica del leptone = -1
- Ogni leptone ha un'antiparticella con la stessa massa e cariche opposte

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

## Generazioni

	I	II	III	
leptoni	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>u</b> up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>c</b> charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>t</b> top	$0$ $0$ $1$ <b><math>\gamma</math></b> photon
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>d</b> down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>s</b> strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ <b>b</b> bottom	$0$ $0$ $1$ <b>g</b> gluon
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_e</math></b> electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\mu</math></b> muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ $0$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\nu_\tau</math></b> tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ $0$ $1$ <b><math>Z^0</math></b> Z boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b>e</b> electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\mu</math></b> muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ $-1$ $\frac{1}{2}$ <b><math>\tau</math></b> tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ $\pm 1$ $1$ <b><math>W^\pm</math></b> W boson
				portatori dell'interazione

# I leptoni

## Leptoni

- Sei particelle in tre generazioni: “**neutrino**” e “**leptone carico**”
- Spin = 1/2, sono fermioni
- Carica del neutrino = 0, carica del leptone = -1
- Ogni leptone ha un'antiparticella con la stessa massa e cariche opposte

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

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

## Generazioni

	I	II	III	
	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$1.27 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$171.2 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	0 0 1 $\gamma$ photon
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$104 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$4.2 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 g gluon
<b>leptoni</b>	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_e$ electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\mu$ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ $\nu_\tau$ tau neutrino	$91.2 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 $Z^0$ Z boson
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ $\mu$ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ $\tau$ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ -1 1 $W^\pm$ W boson

portatori dell'interazione

# Lagrangiana e grafici di Feynman

Lagrangiana del Modello Standard

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

# Lagrangiana e 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

# Lagrangiana e grafici di Feynman

Interazione della QED

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

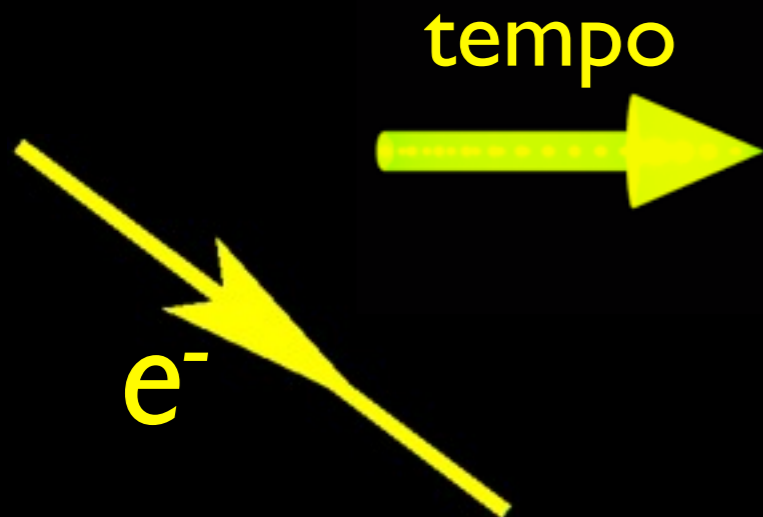
Interazione tra fermioni  
carichi e campo  
elettromagnetico

# Lagrangiana e 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**

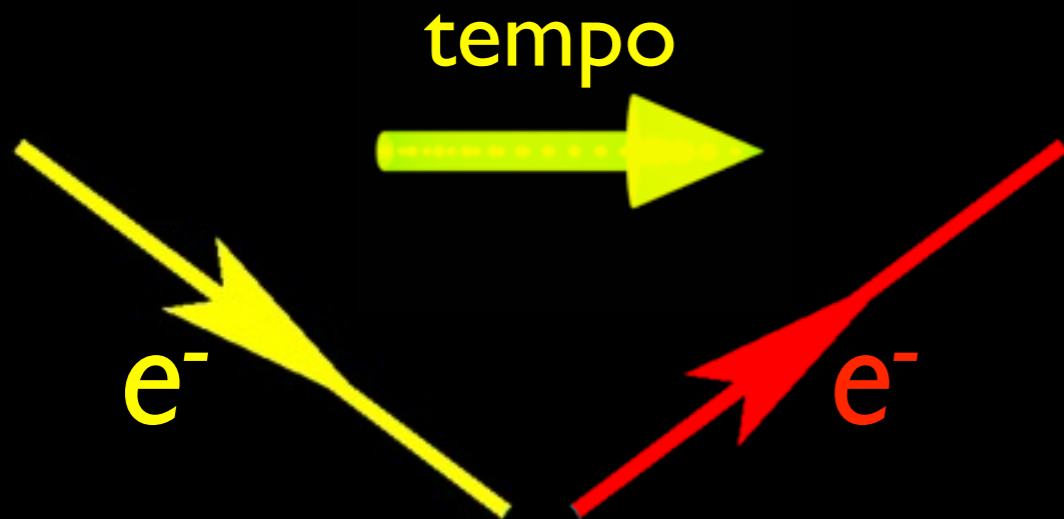


# Lagrangiana e grafici di Feynman

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

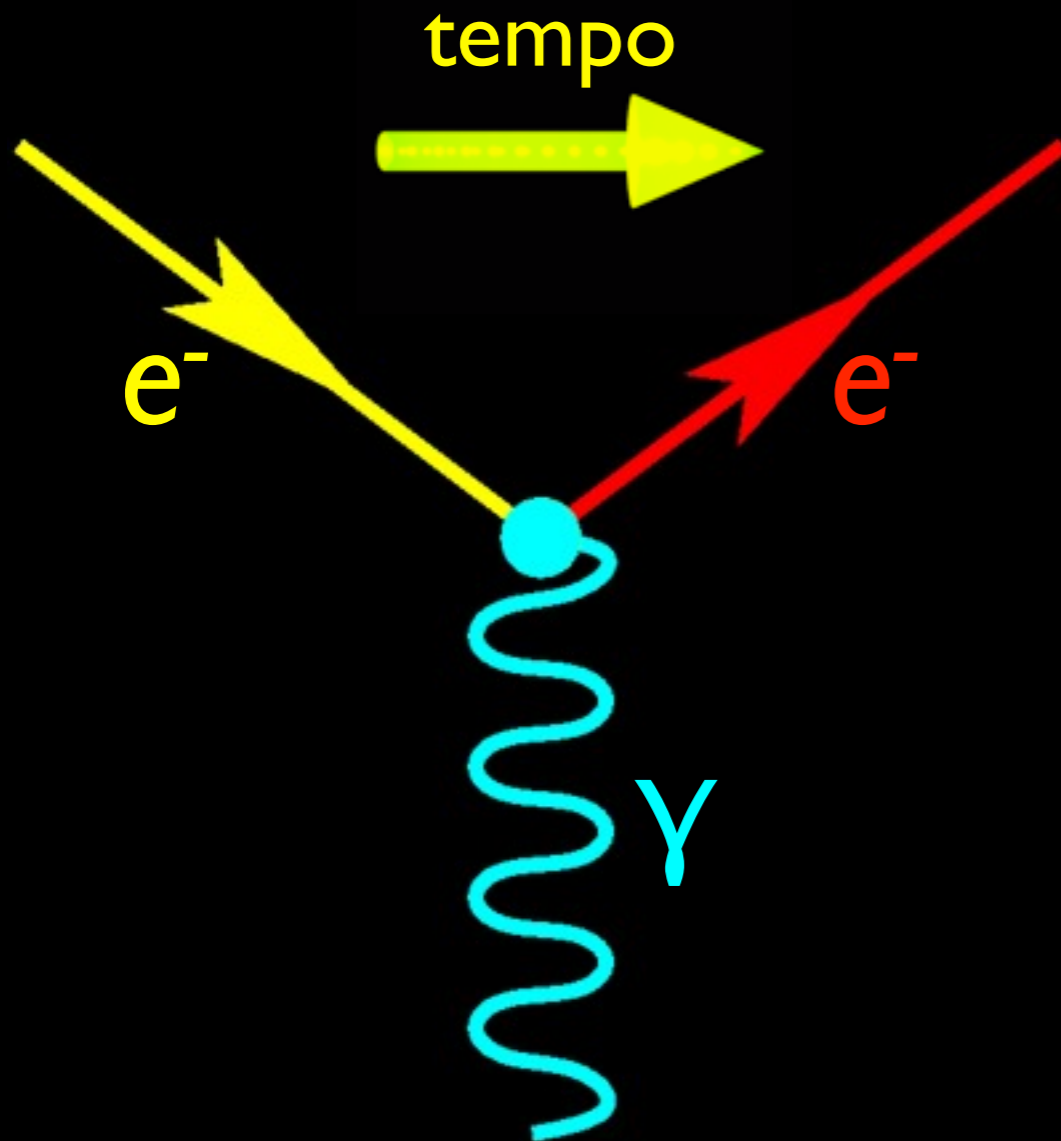
Elettrone uscente

# Lagrangiana e 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

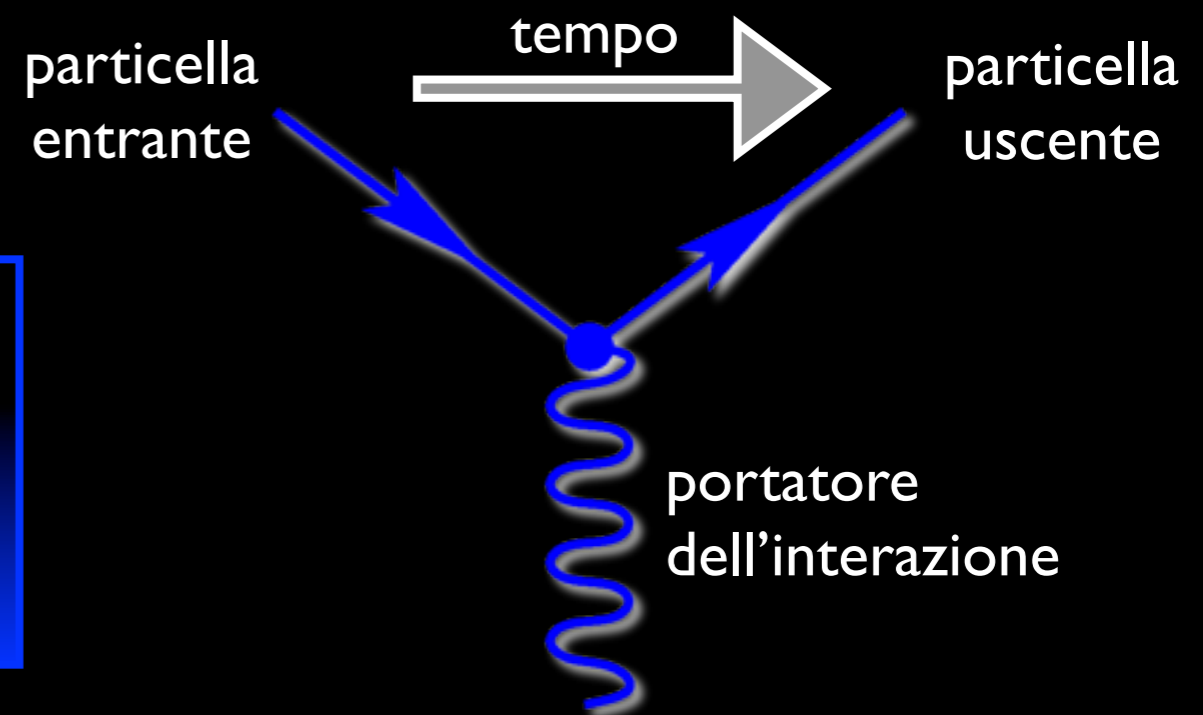
Elettrone uscente

Fotone mediatore dell'interazione EM

# I grafici di Feynman

*I was sort of half-dreaming, like a kid would... that it would be funny if these funny pictures turned out to be useful, because the damned Physical Review would be full of these odd-looking things. And that turned out to be true. R. Feynman*

- Le interazioni fondamentali possono essere descritte usando un simbolo detto **vertice di Feynman**
- Questo simbolo **schematizza la procedura matematica** che permette di calcolare la probabilità che l'interazione avvenga
- Nel Modello Standard ci sono **tre vertici fondamentali** uno per ogni interazione
- La struttura del vertice di Feynman assicura la conservazione dei **numeri quantici** e **dell'impulso**



Importante: i grafici di Feynman sono soltanto dei simboli!

**Non rappresentano le traiettorie delle particelle nello spazio-tempo!**

# I grafici di Feynman del Modello Standard

## Interazione forte

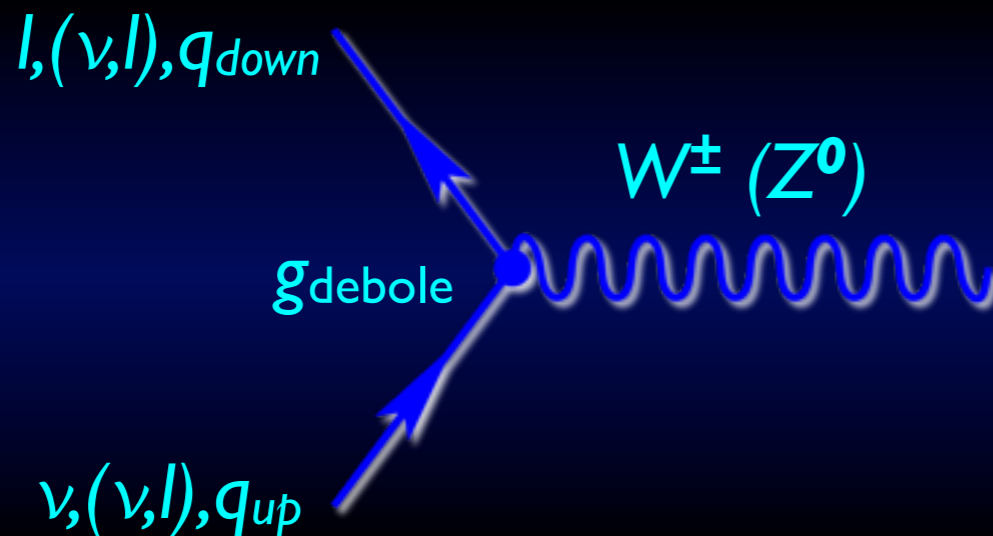


Intensità dell'interazione forte

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

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

## Interazione debole

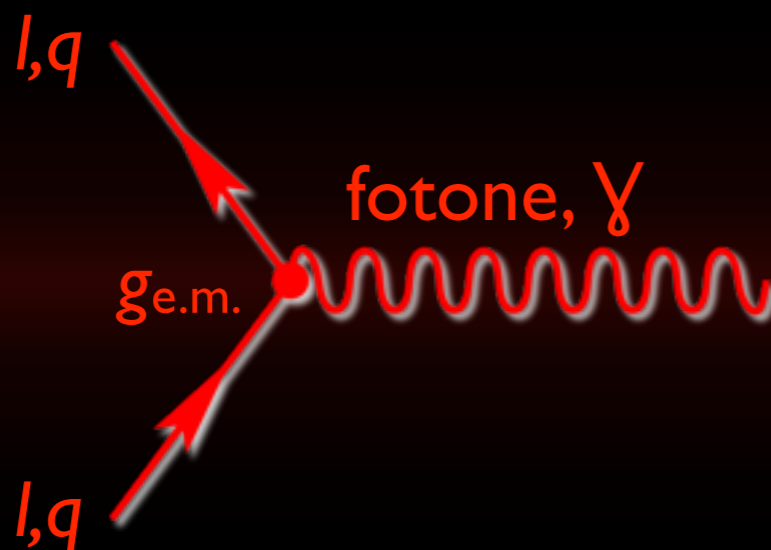


Intensità dell'interazione debole

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

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

## Interazione elettromagnetica



Intensità dell'interazione elettromagnetica

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

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

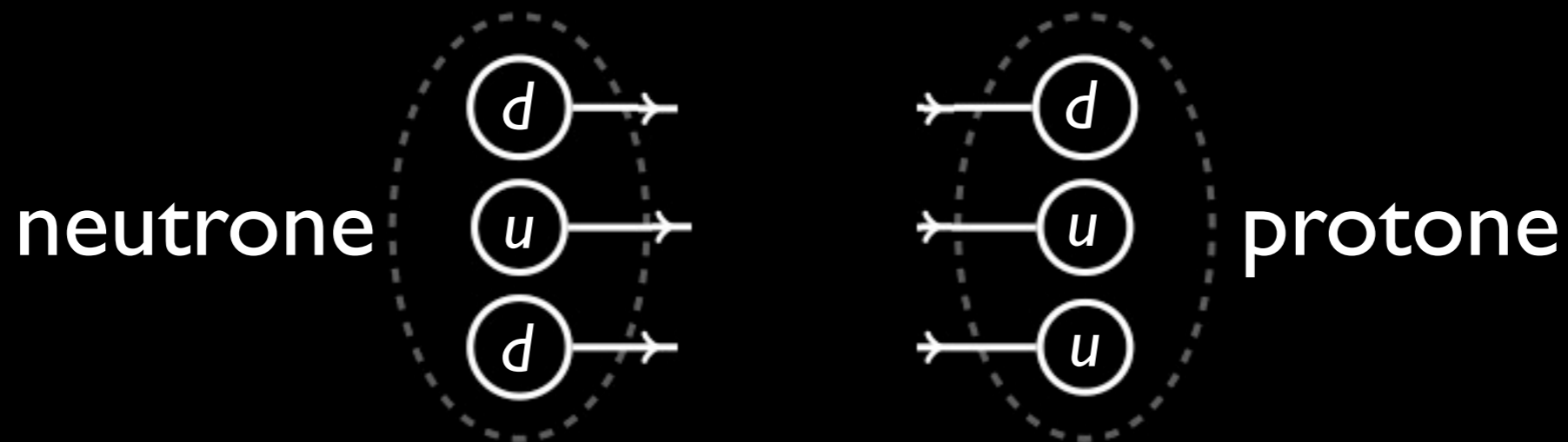
# Come si usano...

Decadimento beta del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

# Come si usano...

Decadimento beta del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

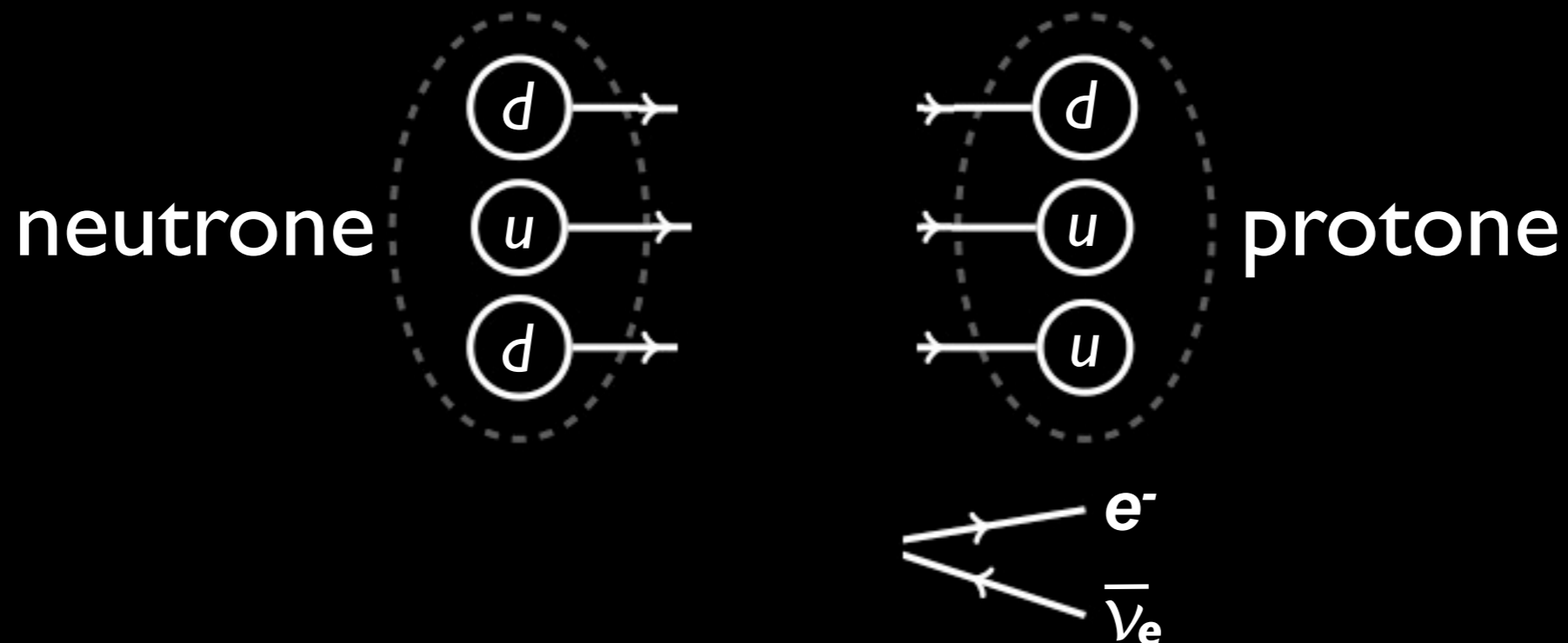
- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark:  $p = |uud\rangle$  e  $n = |udd\rangle$  (infatti sommando le cariche...)



# Come si usano...

Decadimento beta del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

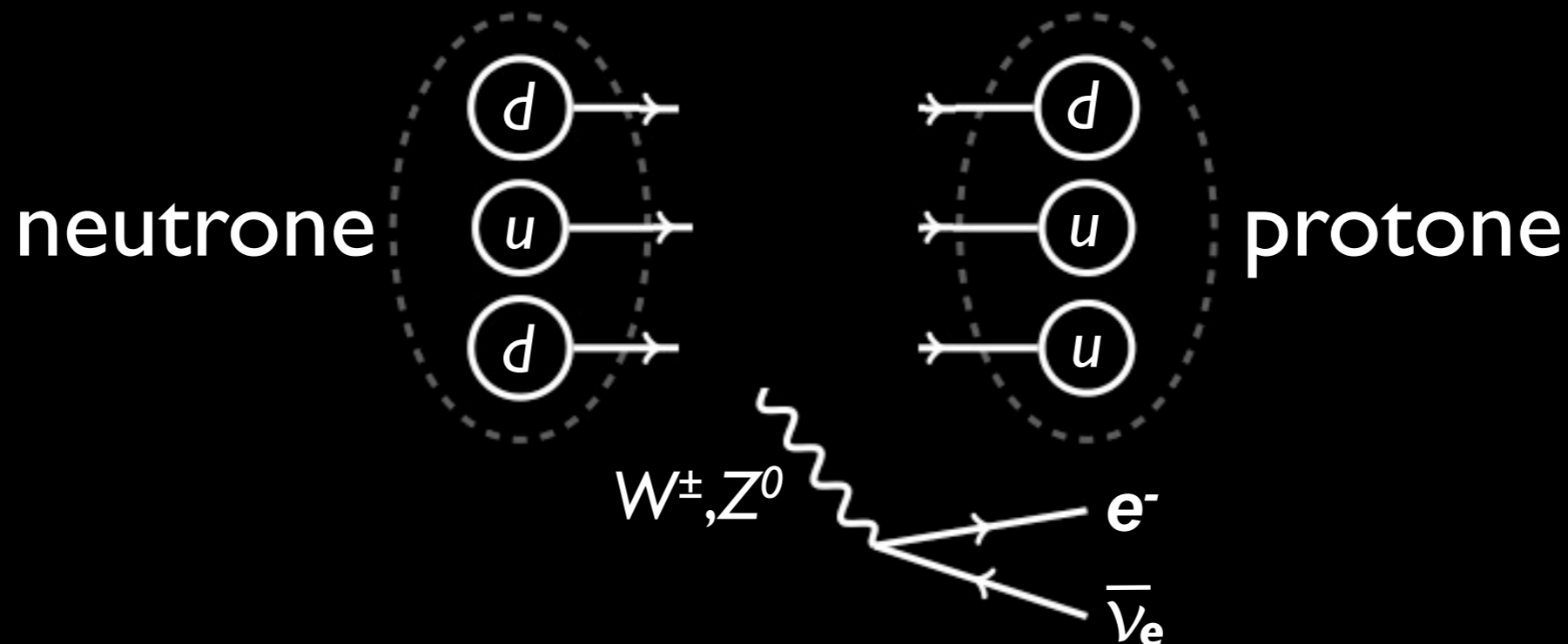
- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark:  $p = |uud\rangle$  e  $n = |udd\rangle$  (infatti sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino sono particelle elementari



# Come si usano...

Decadimento beta del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark:  $p = |uud\rangle$  e  $n = |udd\rangle$  (infatti sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino sono particelle elementari
- Il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un "portatore" del tipo  $W^\pm$  o  $Z^0$  che fa un vertice con i leptoni

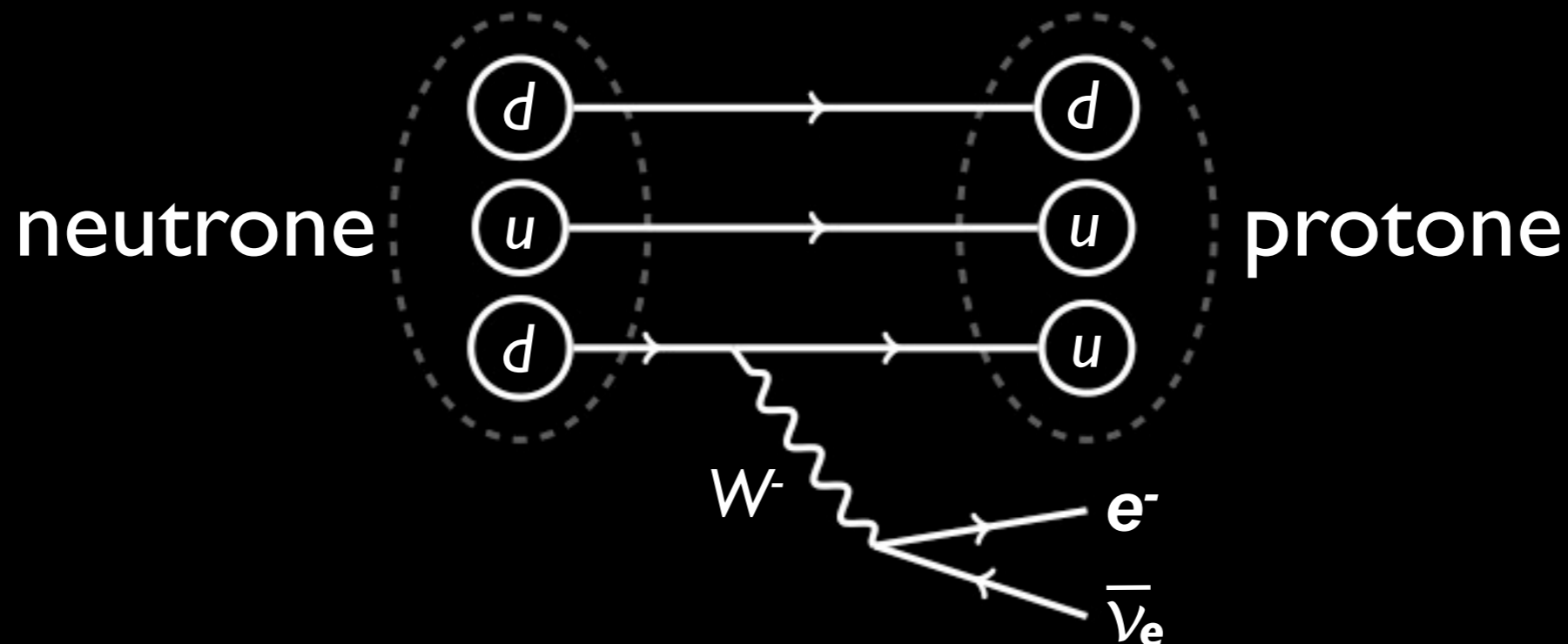




# Come si usano...

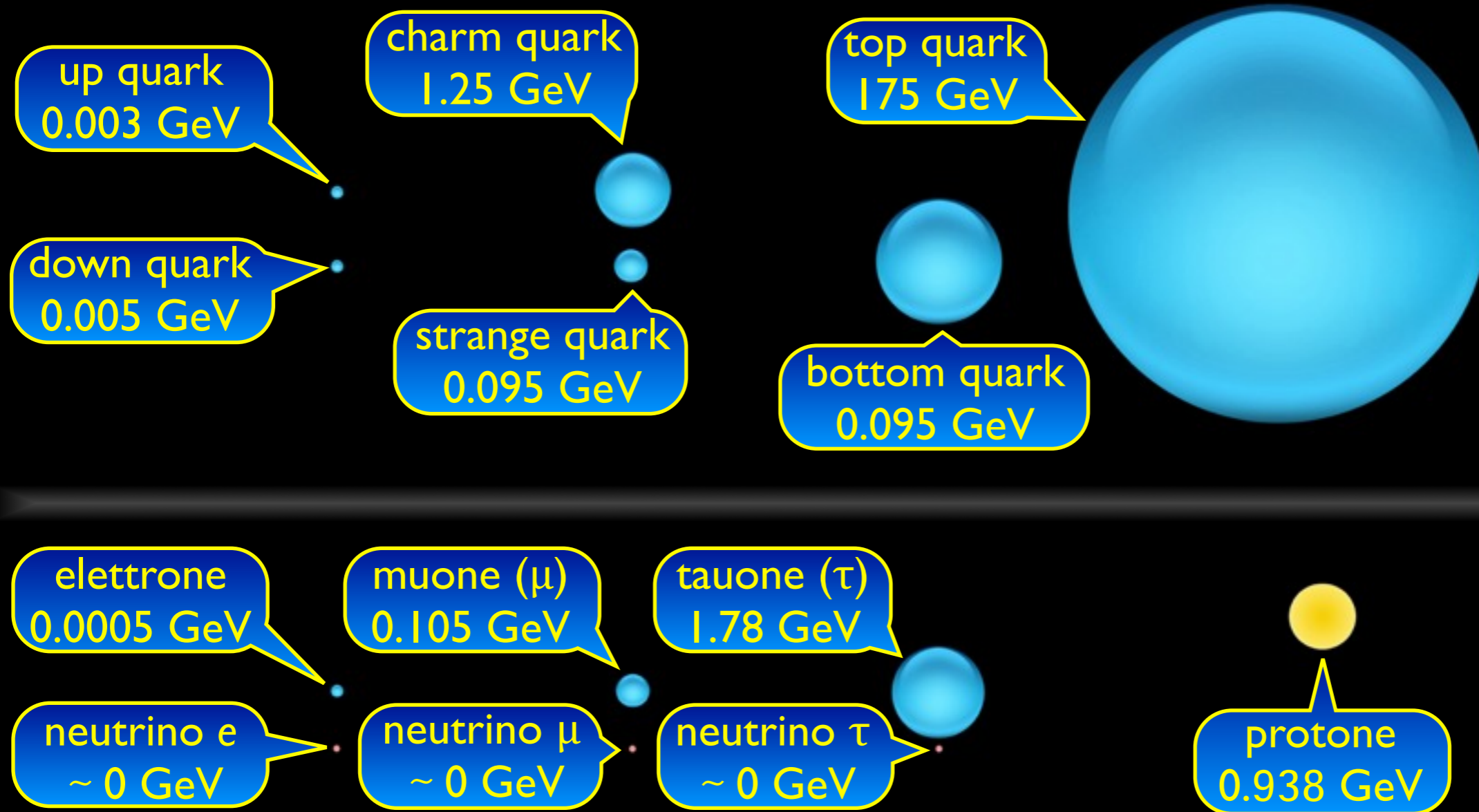
Decadimento beta del neutrone:  $n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$

- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark:  $p = |uud\rangle$  e  $n = |udd\rangle$  (infatti sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino sono particelle elementari
- Il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo scambio di un "portatore" del tipo  $W^\pm$  o  $Z^0$  che fa un vertice con i leptoni
- Poiché un quark  $d$  con carica  $-1/3$  si converte in un quark  $u$  con carica  $+2/3$  si deve avere l'emissione di un bosone con carica  $-1$ , ovvero  $W^-$



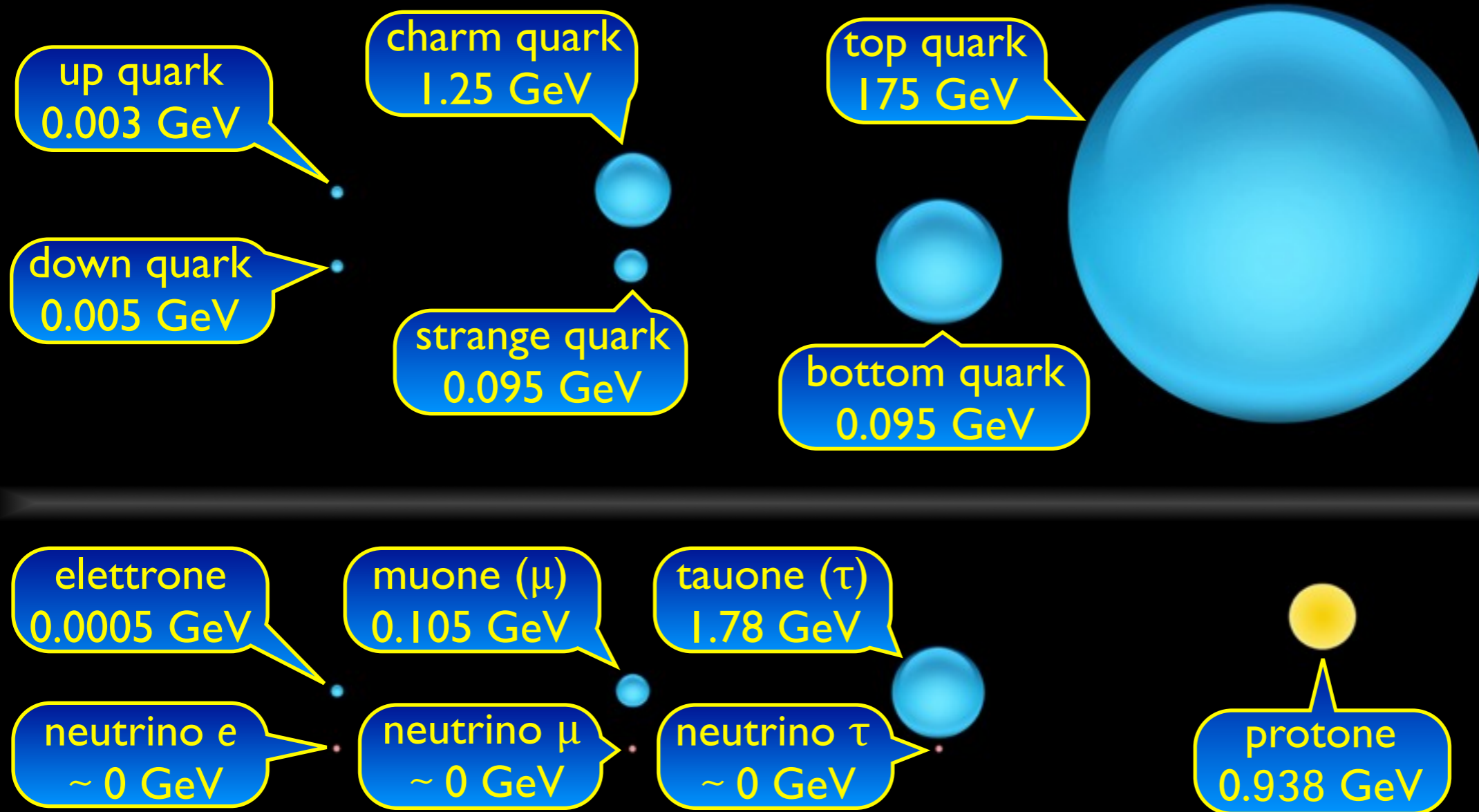
# Il mistero delle masse

Le particelle del Modello Standard “nascono” con massa nulla



# Il mistero delle masse

Le particelle del Modello Standard “nascono” con massa nulla



Sperimentalmente si osservano masse non nulle con differenze crescenti tra le generazione

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

# Il campo di Higgs a fumetti

<http://www.phdcomics.com/higgs/>

THE HIGGS  
BOSON  
EXPLAINED



TRUE  
TALES

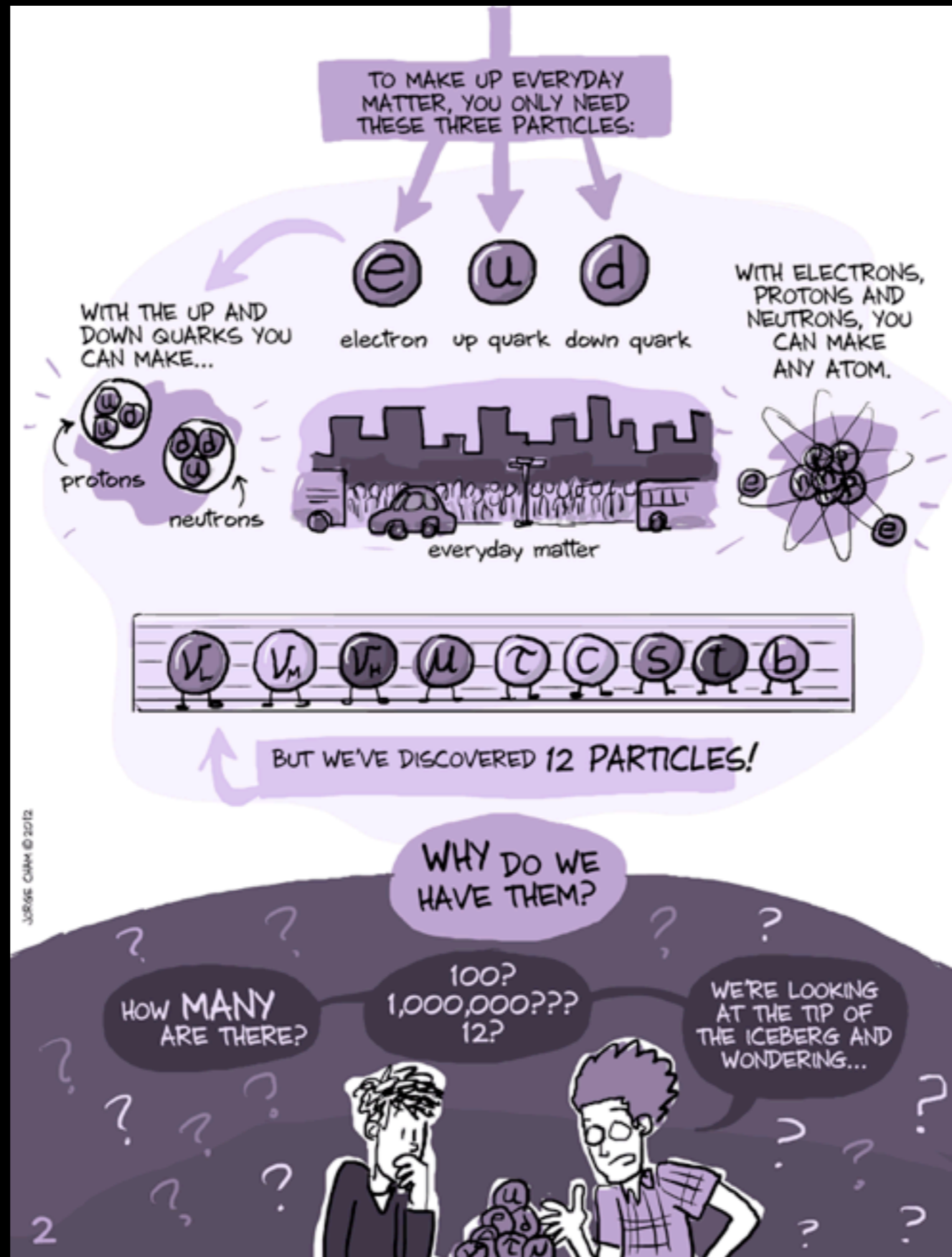


WE VISIT PARTICLE PHYSICIST DANIEL WHITESON AT **CERN**, WHERE HE TALKS TO US ABOUT WHAT THE MYSTERIOUS HIGGS BOSON IS AND HOW THE LHC IS GOING TO FIND IT (IF IT EXISTS).

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

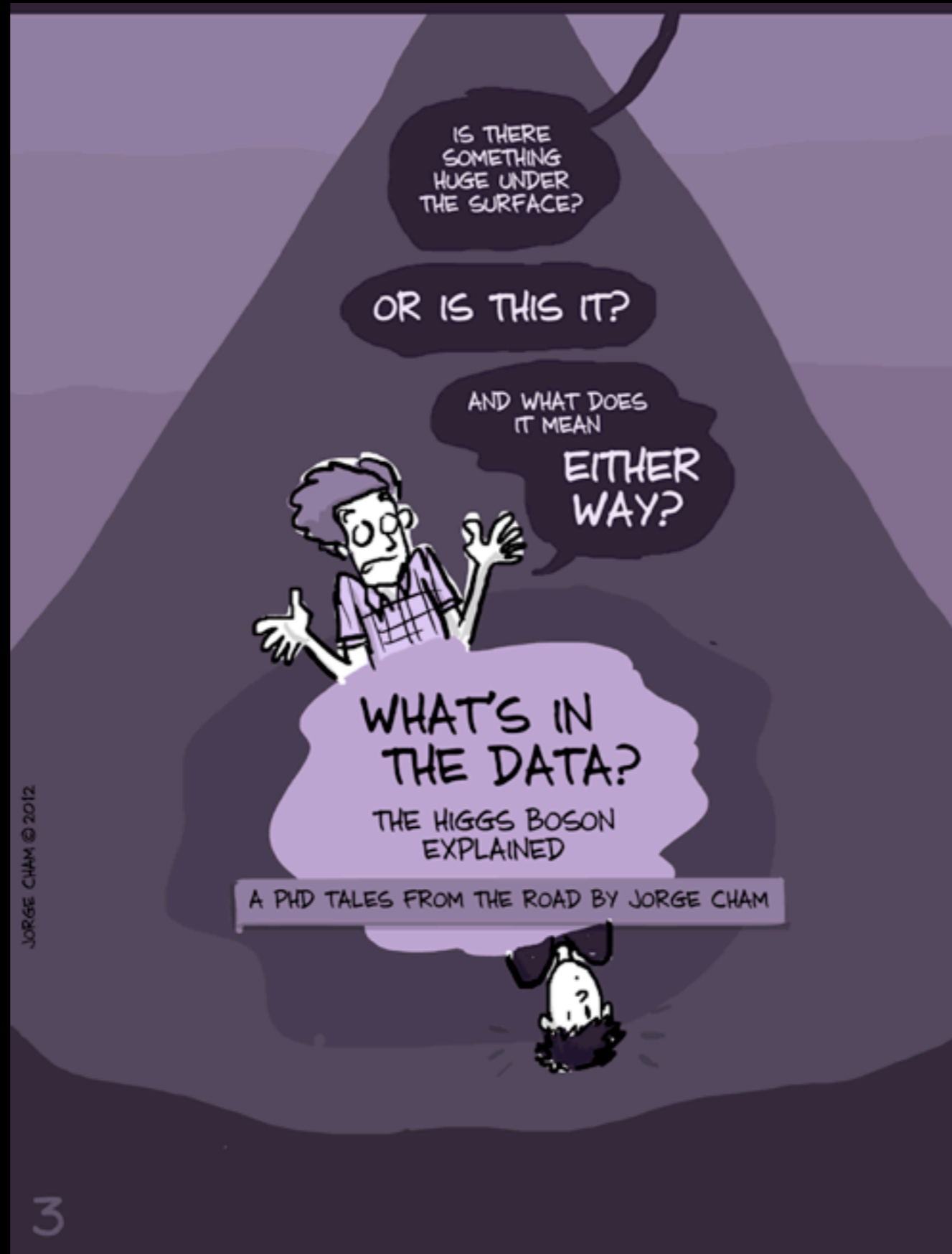


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

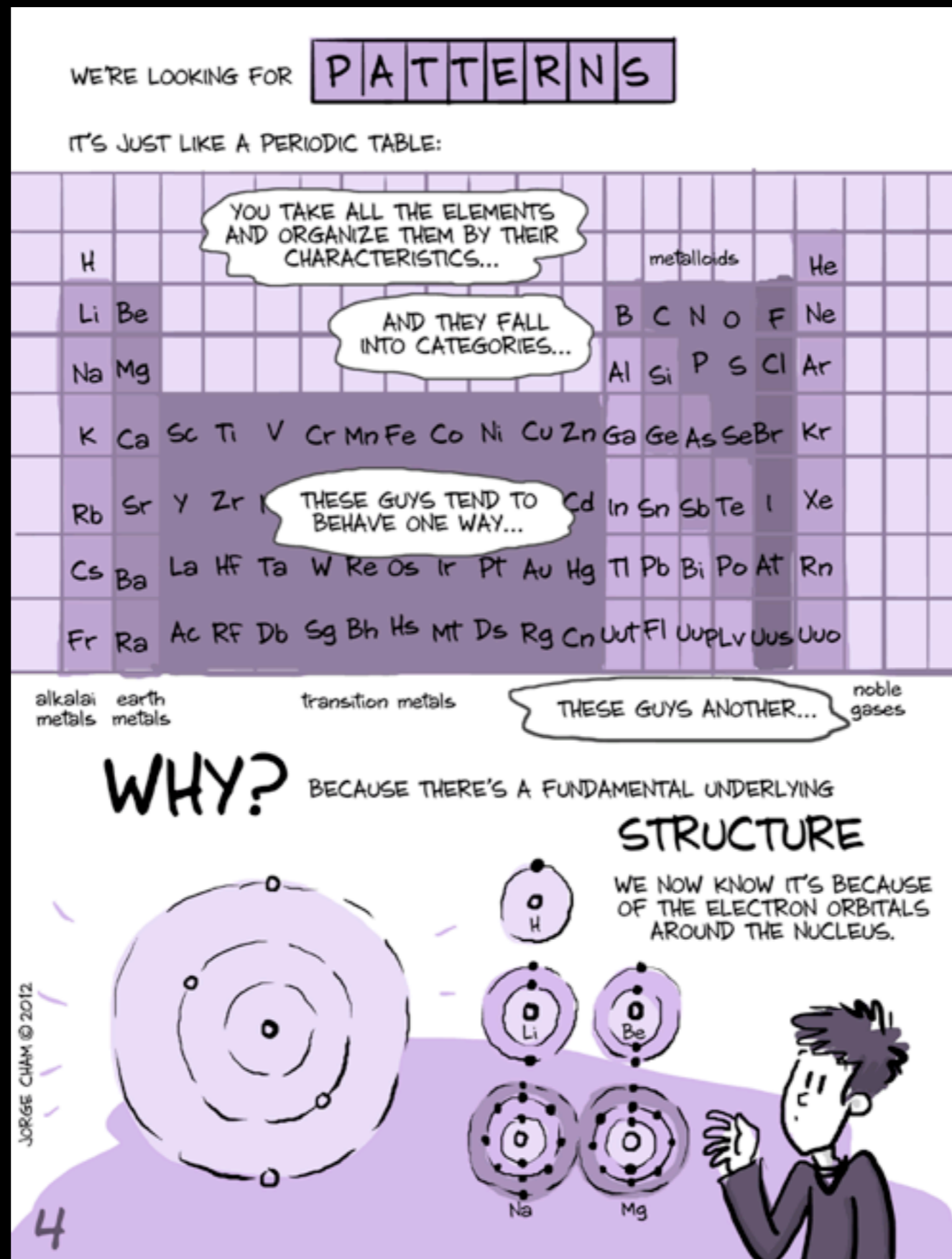


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti



<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

SIMILARLY, WE HAVE A

## PERIODIC TABLE OF THE FUNDAMENTAL PARTICLES

	charge				
QUARKS	$\frac{2}{3}$	u up	c charm	t top	? ?
	$-\frac{1}{3}$	d down	s strange	b bottom	? ?
LEPTONS	-1	e electron	$\mu$ muon	$\tau$ tau	? ??
	0	$\nu_e$ electron neutrino	$\nu_\mu$ muon neutrino	$\nu_\tau$ tau neutrino	? ?

mass →

JORGE CHAM © 2012

IT HAS INTERESTING FEATURES TOO.

PATTERNS THAT SUGGEST THERE MUST BE SOME SORT OF UNDERLYING STRUCTURE THAT WE DON'T UNDERSTAND.

WE HAVEN'T SEEN IT YET.

ARE THERE MORE PARTICLES?

WHAT'S THE SOURCE OF THE PATTERNS?

WE'RE TRYING TO FIGURE OUT CLUES BY SEEING WHAT OTHER KINDS OF PARTICLES ALSO EXIST.

WHAT IS OUT THERE?

5

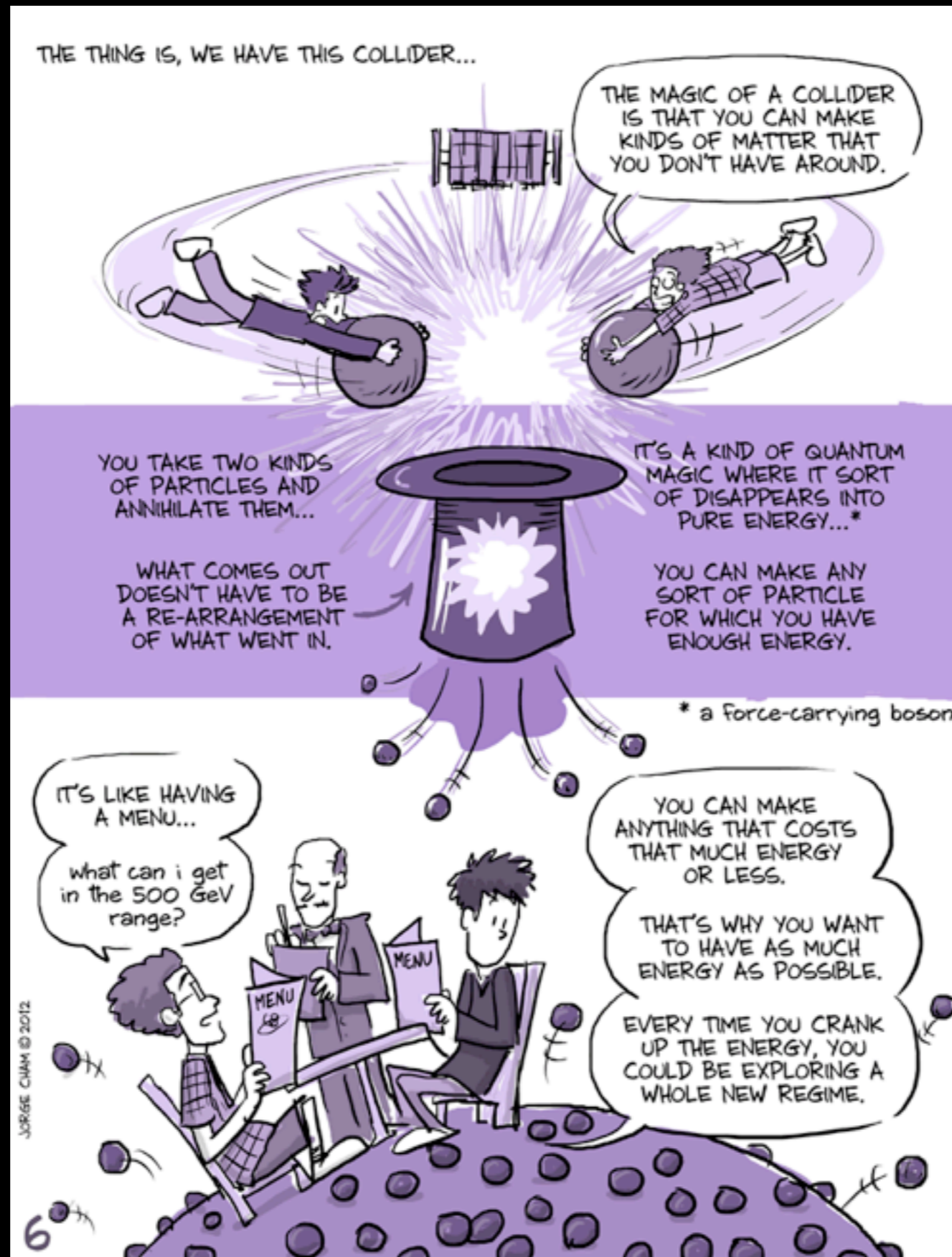
<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham





# Il campo di Higgs a fumetti

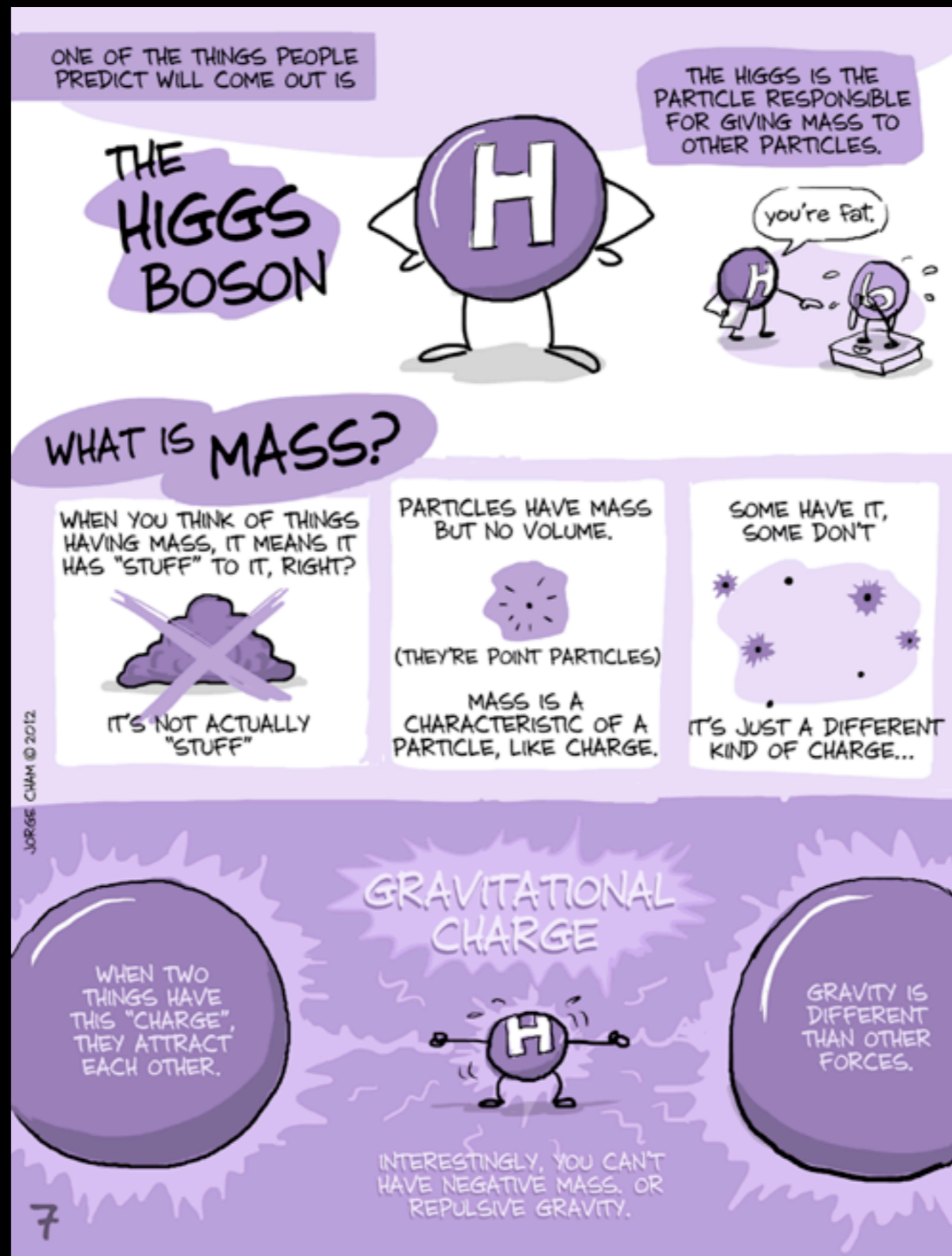


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti



<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

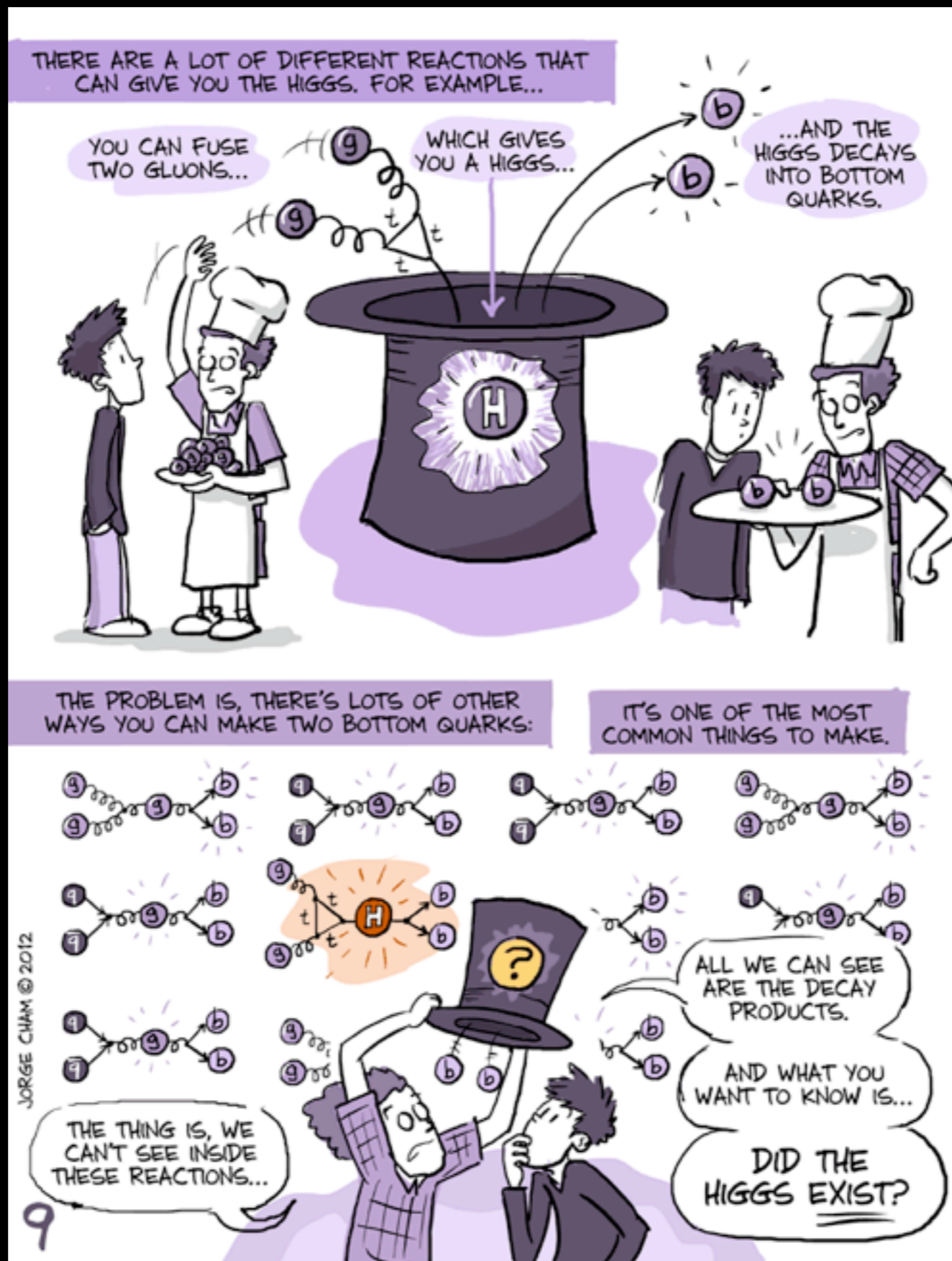


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

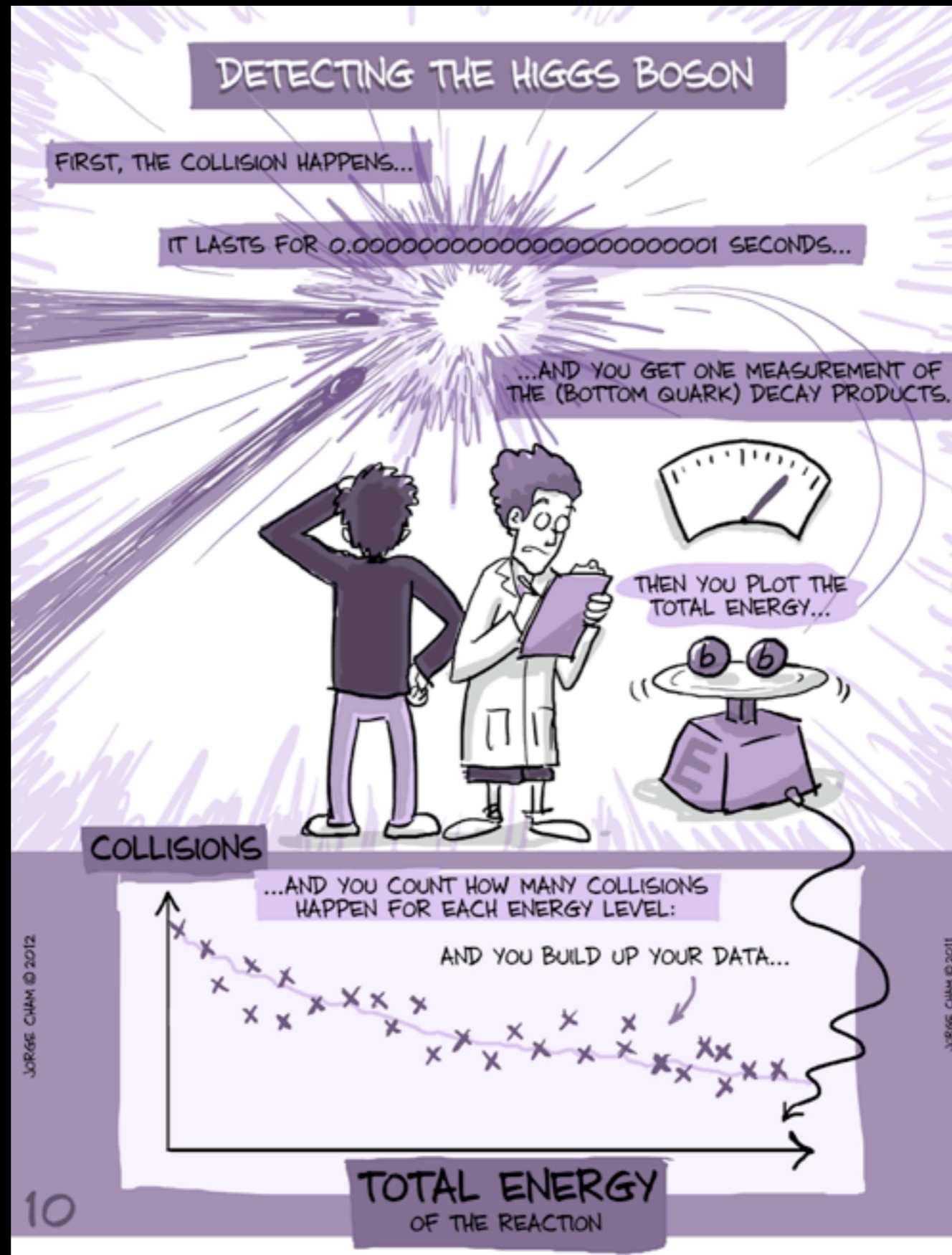


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

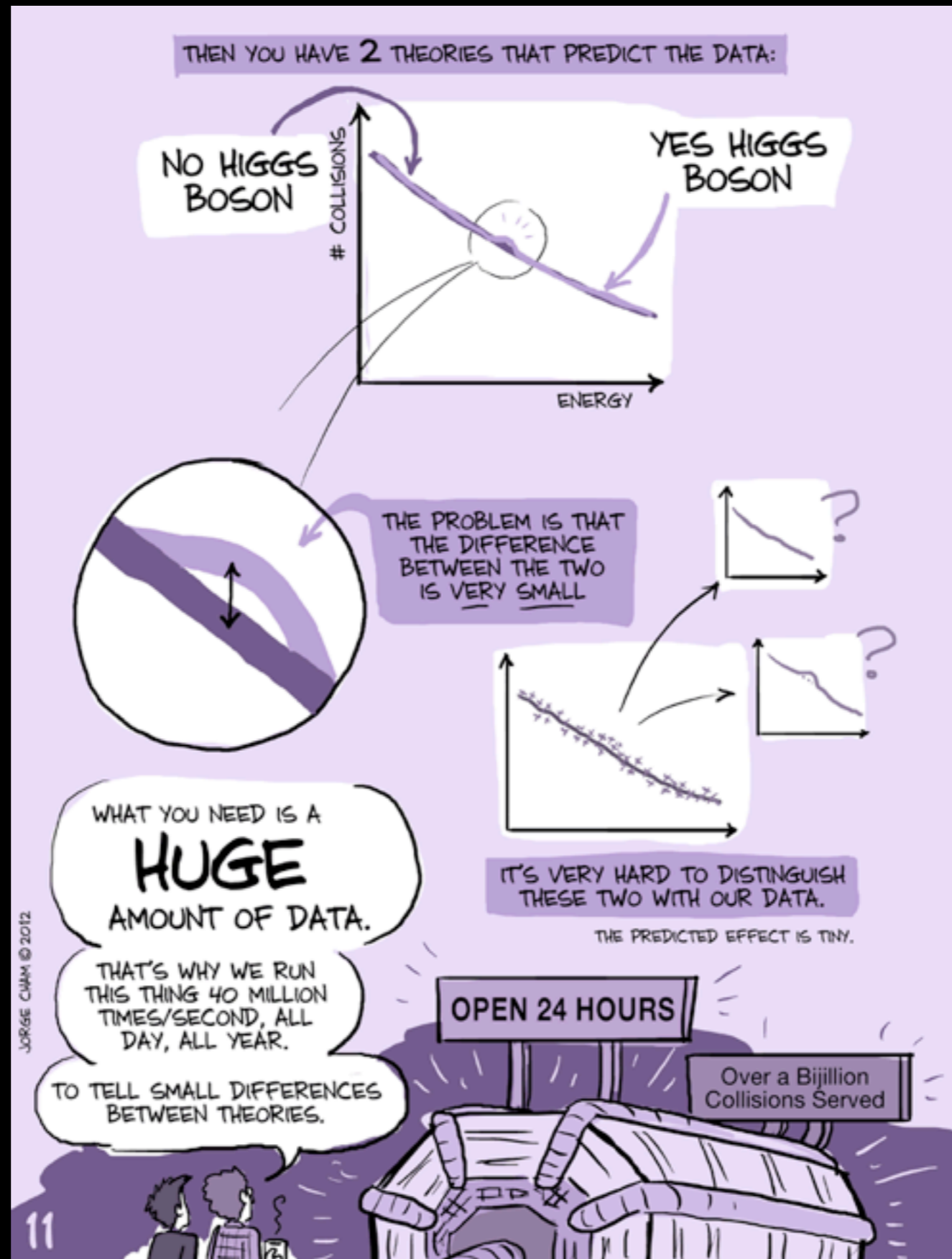


<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti



<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti



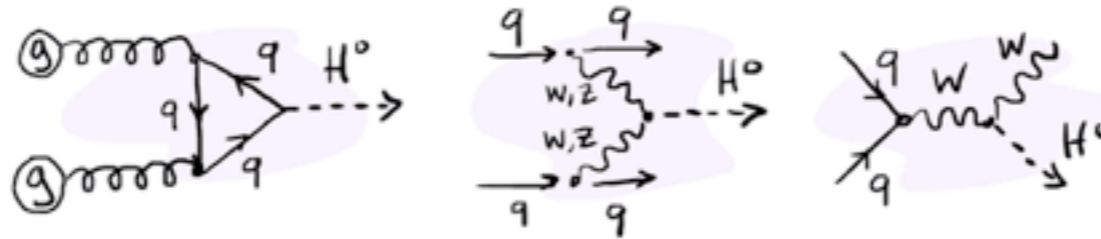
<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Il campo di Higgs a fumetti

THERE'S LOTS OF OTHER WAYS TO SEE THE HIGGS BOSON



SOME PEOPLE ARE WORKING ON THIS ONE...

SOME ARE WORKING ON THAT ONE...



JORGE CHAM © 2012

WE WORK IN A COLLABORATION OF THOUSANDS OF PEOPLE AND THERE ARE PEOPLE WORKING ON EVERY SINGLE "CHANNEL".

THE IDEA IS TO TRY TO LOOK EVERYWHERE AT THE SAME TIME.

SO THAT A LITTLE EVIDENCE HERE AND THERE CAN BE COMBINED INTO SOMETHING CONVINCING.

WE'RE GOING TO LEAVE IT RUNNING FOR A LONG TIME AND HOPE SOMETHING POPS OUT.

13

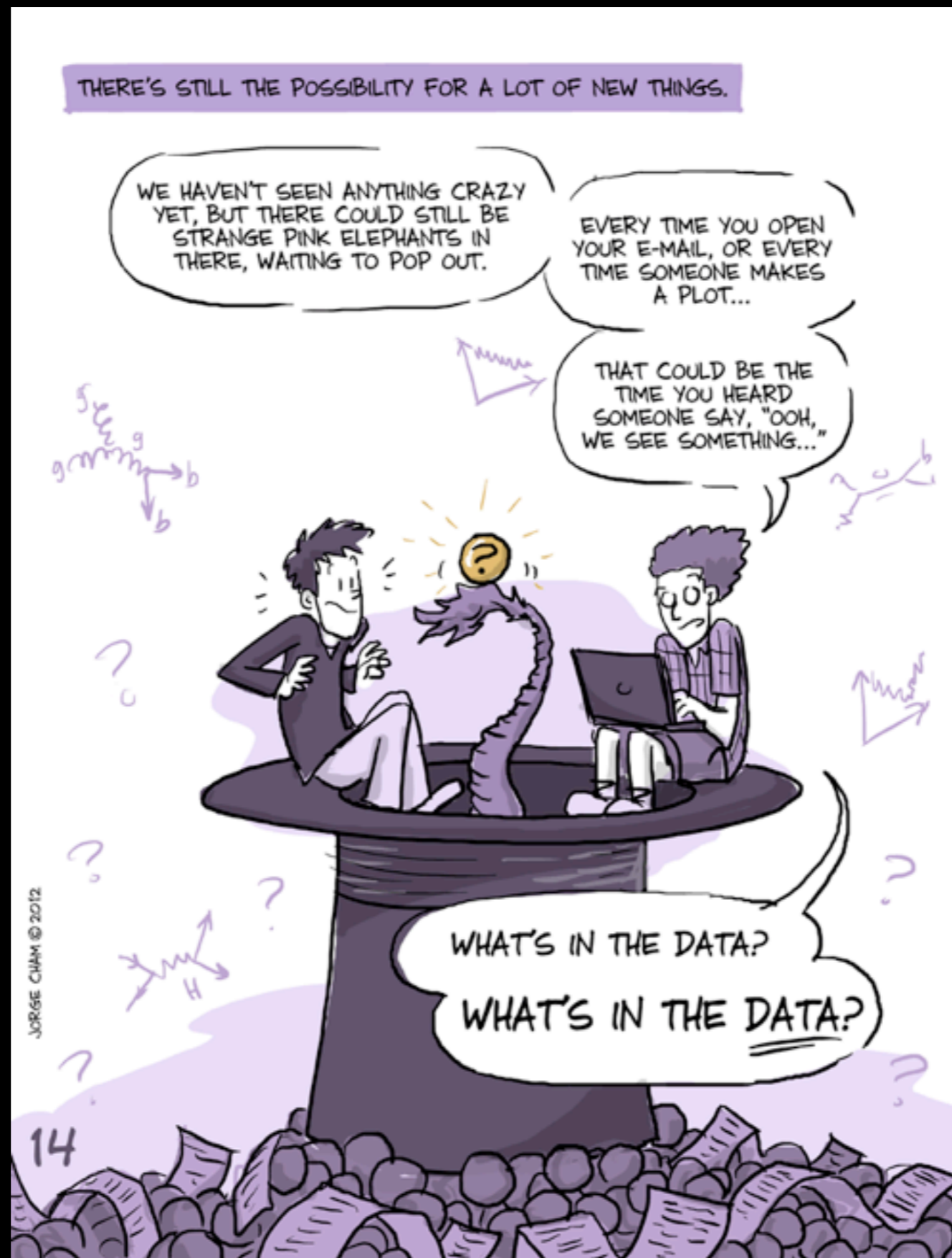
<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham





# Il campo di Higgs a fumetti



<http://www.phdcomics.com/higgs/>

Testi: Daniel Whiteson  
Disegni: Jorge Cham



# Al di là del Modello Standard

## • Oscillazione e quindi masse dei neutrini

Il Modello standard non prevede masse per i neutrini, l'osservazione di oscillazioni è la prima evidenza di “fisica oltre il Modello Standard”.

## • Materia ed energia oscura

Il Modello Standard spiega solo il 4% della massa-energia dell'Universo. Il rimanente 96% si pensa costituito da materia oscura (24%) ed energia oscura (72%).

## • Asimmetria materia - antimateria

Il Modello Standard prevede la creazione di uguali quantità di materia e antimateria, ma l'Universo sembra costituito da un solo tipo...

• ...

## • Supersimmetria

È un'estensione del Modello Standard che introduce nuove particelle partner di quelle note, che hanno differenti valori dello spin.

## • Teoria delle Stringhe

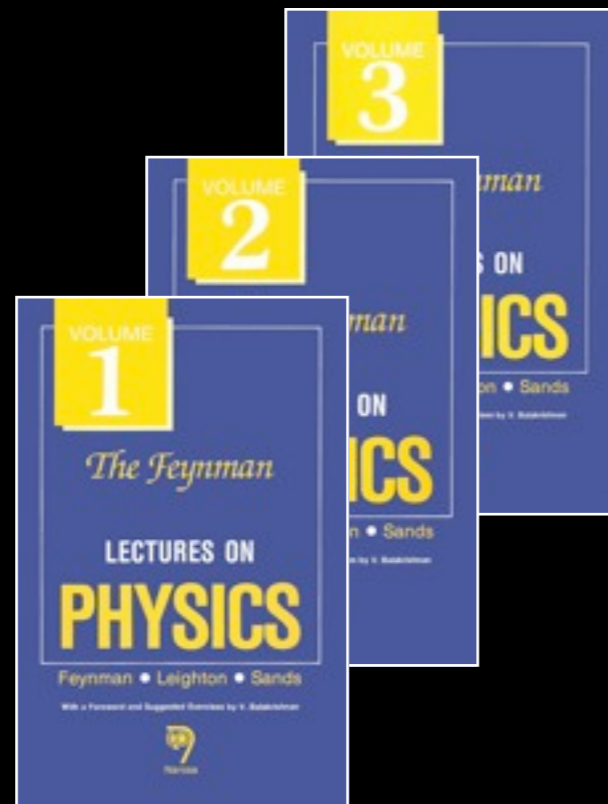
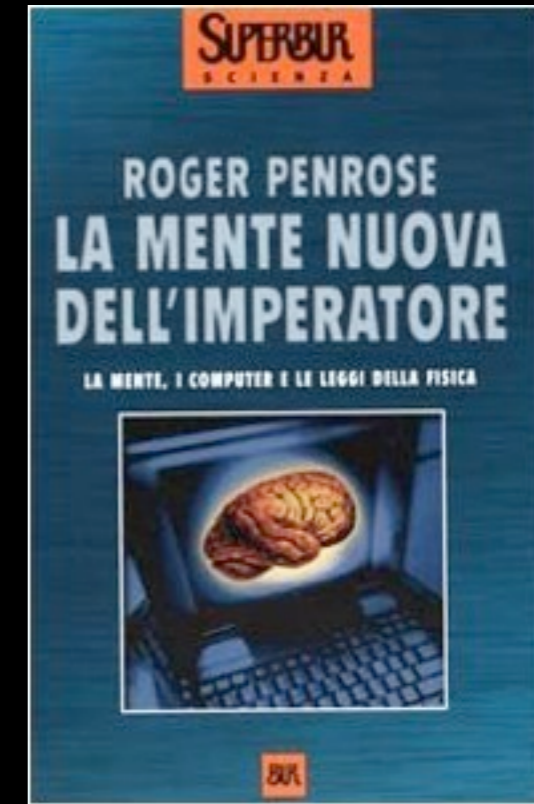
La teoria del “Tutto” per unificare le teorie di campo e la Relatività Generale?

• ...

*”...qui sono stati rivelati, riguardo a questa nuova ed eccellente scienza di cui il mio lavoro è solo l’inizio, strade e strumenti dei quali altre menti, più acute della mia, esploreranno gli angoli più remoti.”*

*Galileo Galilei*

# Bibliografia



WIKIPEDIA