

Agenda

Agenda



Realtà e realismo...



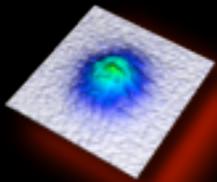
Modelli matematici e costanti fondamentali



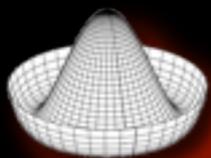
La Meccanica Quantistica



La Teoria della Relatività



Teoria Quantistica dei Campi



Il Modello Standard

Realtà e realismo



Nel 2004 il consiglio comunale di Monza ha vietato le vasche curve per i pesci rossi, attraverso le pareti di tali vasche i pesci avrebbero una visione “distorta” della realtà...

Se il pesce formulasse delle leggi basandosi sull’osservazione dei fenomeni come sarebbero “giuste”.



Realtà e realismo



Nel 2004 il consiglio comunale di Monza ha vietato le vasche curve per i pesci rossi, attraverso le pareti di tali vasche i pesci avrebbero una visione “distorta” della realtà...

Se il pesce formulasse delle leggi basandosi sull’osservazione dei fenomeni come sarebbero “giuste”.

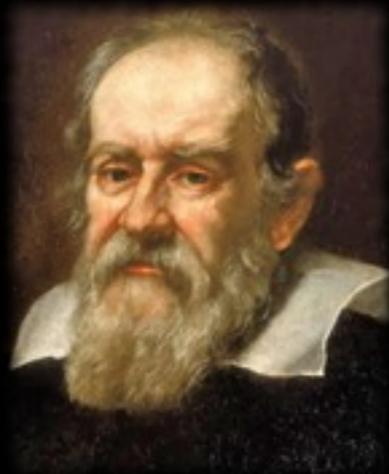


Realtà e realismo



Nel 2004 il consiglio comunale di Monza ha vietato le vasche curve per i pesci rossi, attraverso le pareti di tali vasche i pesci avrebbero una visione “distorta” della realtà...

Se il pesce formulasse delle leggi basandosi sull’osservazione dei fenomeni come sarebbero “giuste”.



L’Universo di Tolomeo (~150 d.C.) è concepito con la Terra in quiete (al centro). Questo modello si contrapponeva a quello eliocentrico proposto da Aristarco (~250 a.C.), poi ripreso e sviluppato da: Copernico nel ***De revolutionibus orbitum coelestium*** (1543) e Galileo Galilei (1610) nel ***Sidereus Nuncius***.

Chi ha ragione, Tolomeo o Copernico?

Realtà e realismo



Nel 2004 il consiglio comunale di Monza ha vietato le vasche curve per i pesci rossi, attraverso le pareti di tali vasche i pesci avrebbero una visione “distorta” della realtà...

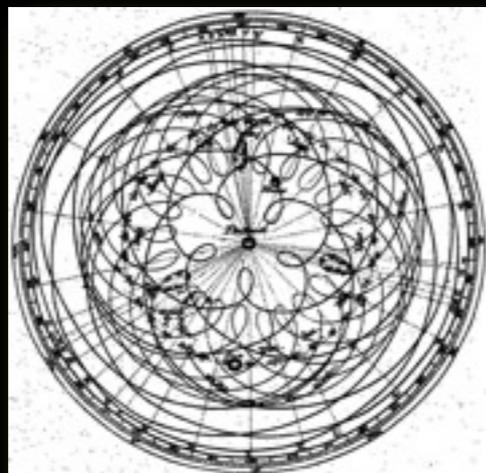
Se il pesce formulasse delle leggi basandosi sull’osservazione dei fenomeni come sarebbero “giuste”.



L’Universo di Tolomeo (~150 d.C.) è concepito con la Terra in quiete (al centro). Questo modello si contrapponeva a quello eliocentrico proposto da Aristarco (~250 a.C.), poi ripreso e sviluppato da Copernico nel ***De revolutionibus orbitum coelestium*** (1543) e Galileo Galilei (1610) nel ***Sidereus Nuncius***.

Chi ha ragione, Tolomeo o Copernico?

Scenario Tolomaico



Scenario Copernicano



Tutti e due!

Realtà virtuale

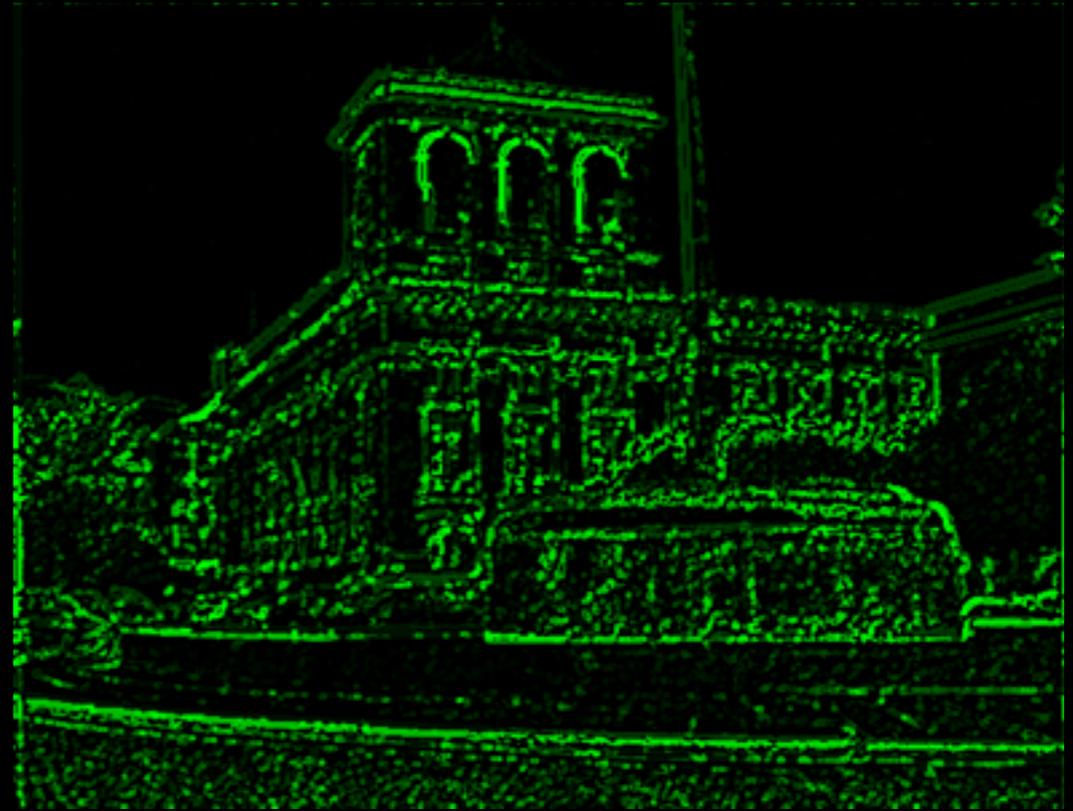
Siamo i personaggi di una realtà virtuale generata da un sistema superiore...



Realtà virtuale

Siamo i personaggi di una realtà virtuale generata da un sistema superiore...

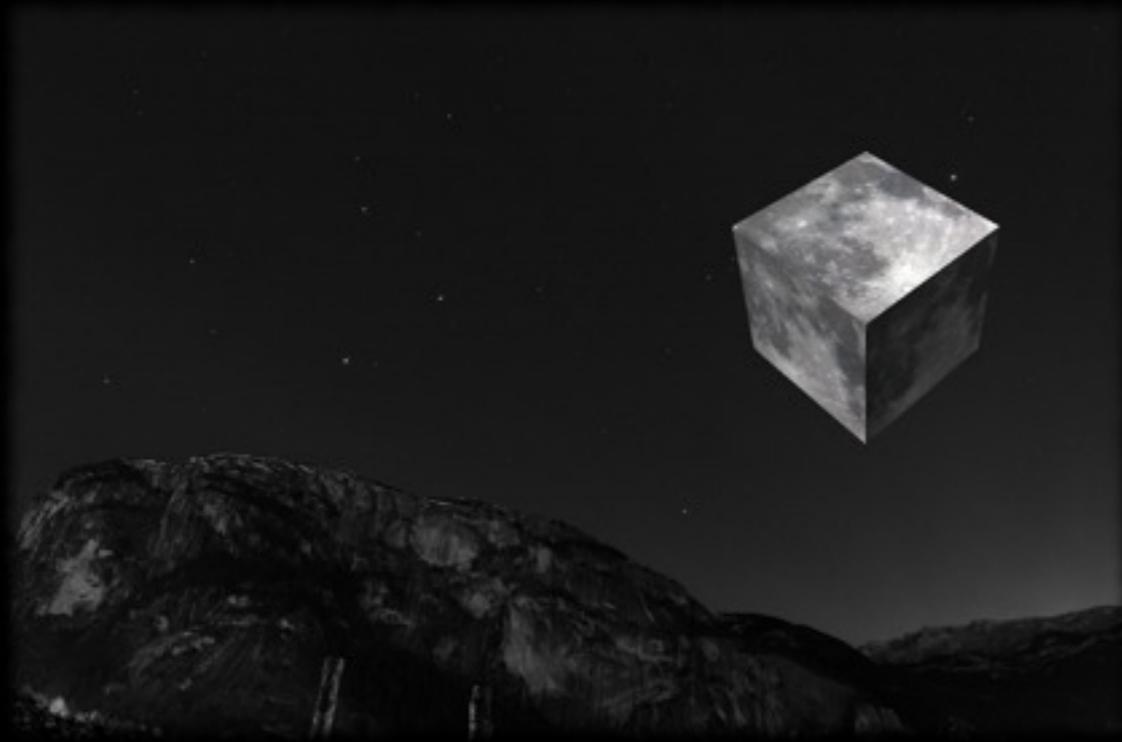
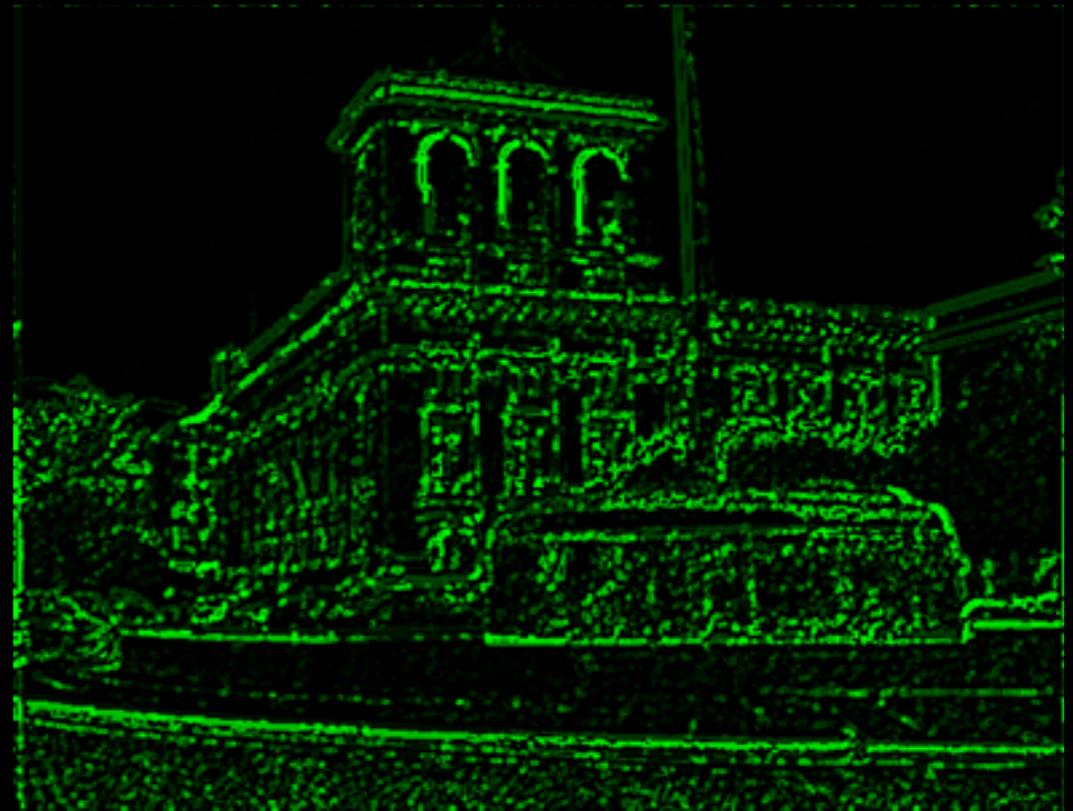
C'è un modo per rendersene conto?



Realtà virtuale

Siamo i personaggi di una realtà virtuale generata da un sistema superiore...

C'è un modo per rendersene conto?



Se le leggi imposte dal sistema fossero coerenti, non ci sarebbe alcuna possibilità di scoprire altre realtà dietro la simulazione.

Realismo dipendente dai modelli



Realisti

Secondo la fisica classica esiste un mondo esterno fatto di oggetti con proprietà fisiche ben definite, come massa e velocità. Pur potendo misurare e percepire tali oggetti, la loro esistenza così come i valori ottenuti dalle misurazioni sono indipendenti dall'esistenza dell'osservatore. Le teorie scientifiche descrivono la realtà perché funzionano!

Realismo dipendente dai modelli



Realisti

Secondo la fisica classica esiste un mondo esterno fatto di oggetti con proprietà fisiche ben definite, come massa e velocità. Pur potendo misurare e percepire tali oggetti, la loro esistenza così come i valori ottenuti dalle misurazioni sono indipendenti dall'esistenza dell'osservatore. Le teorie scientifiche descrivono la realtà perché funzionano!



Antirealisti

Gli antirealisti sostengono che conoscenza teorica ed empirica siano distinte. Le teorie scientifiche sono strumenti che, pur descrivendo i fenomeni, non contengono nessuna verità più profonda di quella empirica.

“Sebbene non abbiamo nessuna base razionale per credere in una realtà oggettiva, non abbiamo altra scelta che agire come se ci fosse”. D. Hume (1711-1776).

Realismo dipendente dai modelli



Realisti

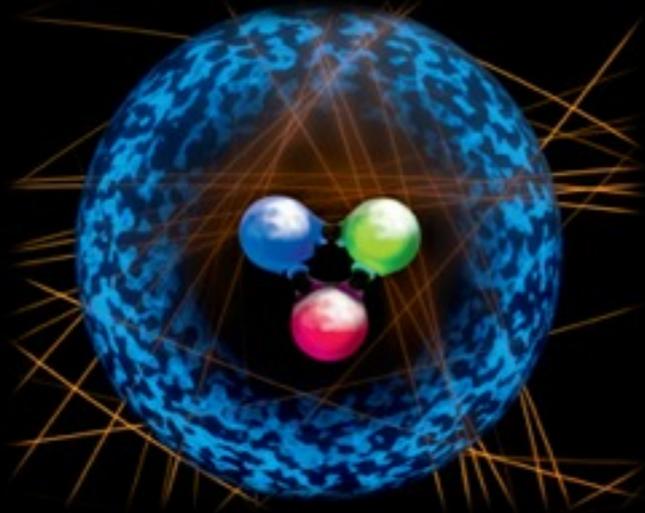
Secondo la fisica classica esiste un mondo esterno fatto di oggetti con proprietà fisiche ben definite, come massa e velocità. Pur potendo misurare e percepire tali oggetti, la loro esistenza così come i valori ottenuti dalle misurazioni sono indipendenti dall'esistenza dell'osservatore. Le teorie scientifiche descrivono la realtà perché funzionano!



Antirealisti

Gli antirealisti sostengono che conoscenza teorica ed empirica siano distinte. Le teorie scientifiche sono strumenti che, pur descrivendo i fenomeni, non contengono nessuna verità più profonda di quella empirica.

“Sebbene non abbiamo nessuna base razionale per credere in una realtà oggettiva, non abbiamo altra scelta che agire come se ci fosse”. D. Hume (1711-1776).



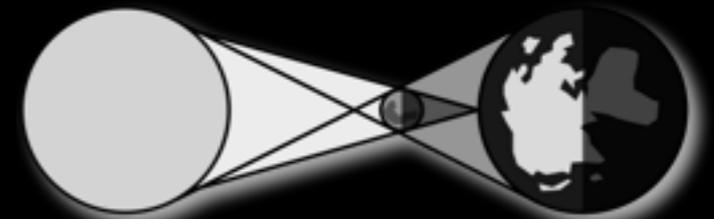
Realismo dipendente dai modelli

“According to model-dependent realism, it is pointless to ask whether a model is real, only whether it agrees with observation. If there are two models that both agree with observation, then one cannot say that one is more real than another”.

S. Hawking (1942).

Storia dei modelli...

Alcuni fenomeni ciclici (es.: eclissi) risultano assoggettabili a leggi, mentre la maggior parte di essi sfuggiva ad ogni tentativo di predizione (eruzioni vulcaniche, terremoti, ecc.).



Talete di Mileto (~550 a.C.), per primo, ha ipotizzato che la natura potesse essere descritta da leggi basate su **principi primi semplici**, più semplici dei fenomeni osservabili.



La prima legge fisica (qualitativa) attribuita a Pitagora (~500 a.C.), riguarda l'inversa proporzionalità tra la lunghezza di una corda vibrante e la frequenza di vibrazione, ovvero la tonalità delle note prodotte.



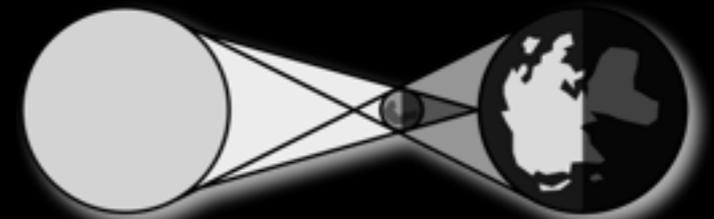
Archimede (~200 a.C.) formulò le prime leggi fisiche nella loro forma corretta: la legge della leva, la legge del galleggiamento e quella della riflessione della luce.



Democrito (~350 a.C.) ipotizzò che ogni cosa e anche gli esseri viventi fossero composti da entità infinitesimali e indivisibili, gli atomi. Ogni fenomeno è dunque prodotto dal moto e collisione di tali atomi. Un atomo si muove in avanti indefinitamente finché non subisce un'azione esterna \Rightarrow **principio d'inerzia**.

Storia dei modelli...

Alcuni fenomeni ciclici (es.: eclissi) risultano assoggettabili a leggi, mentre la maggior parte di essi sfuggiva ad ogni tentativo di predizione (eruzioni vulcaniche, terremoti, ecc.).



Talete di Mileto (~550 a.C.), per primo, ha ipotizzato che la natura potesse essere descritta da leggi basate su **principi primi semplici**, più semplici dei fenomeni osservabili.



La prima legge fisica (qualitativa) attribuita a Pitagora (~500 a.C.), riguarda l'inversa proporzionalità tra la lunghezza di una corda vibrante e la frequenza di vibrazione, ovvero la tonalità delle note prodotte.



Archimede (~200 a.C.) formulò le prime leggi fisiche nella loro forma corretta: la legge della leva, la legge del galleggiamento e quella della riflessione della luce.



Democrito (~350 a.C.) ipotizzò che ogni cosa e anche gli esseri viventi fossero composti da entità infinitesimali e indivisibili, gli atomi. Ogni fenomeno è dunque prodotto dal moto e collisione di tali atomi. Un atomo si muove in avanti indefinitamente finché non subisce un'azione esterna \Rightarrow **principio d'inerzia**.

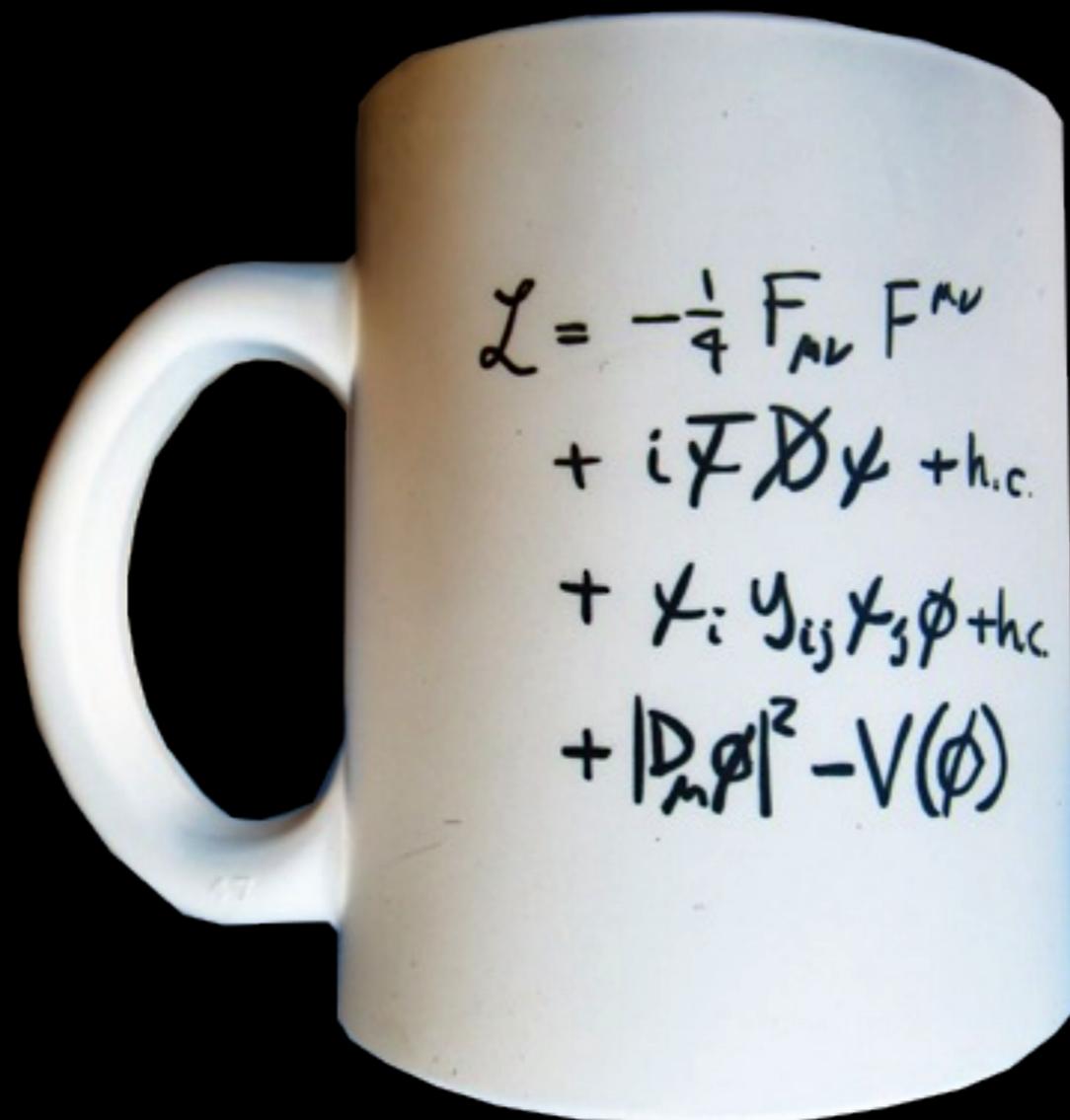
Nessuna verifica sperimentale!

La Fisica delle Particelle in poche righe

Il quadrante della natura le cui leggi si lasciano scrivere in una pagina 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 una pagina 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?

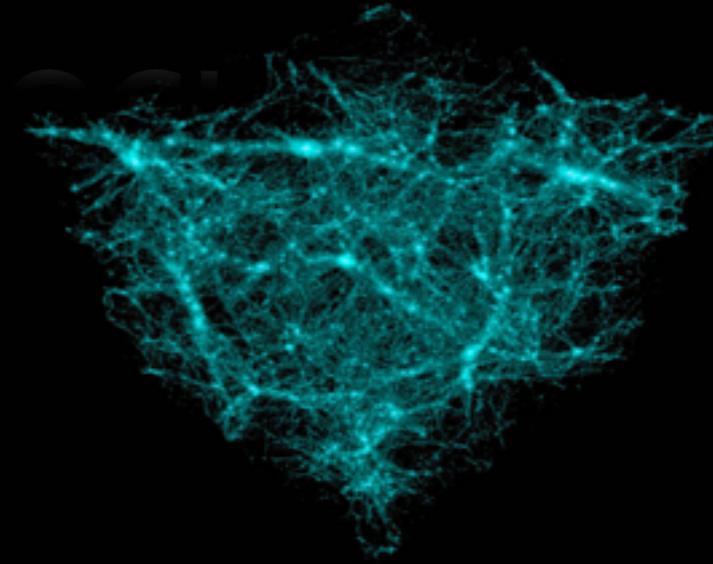
È un modello matematico non troppo complesso che descrive le interazioni tra i costituenti fondamentali della materia.

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!

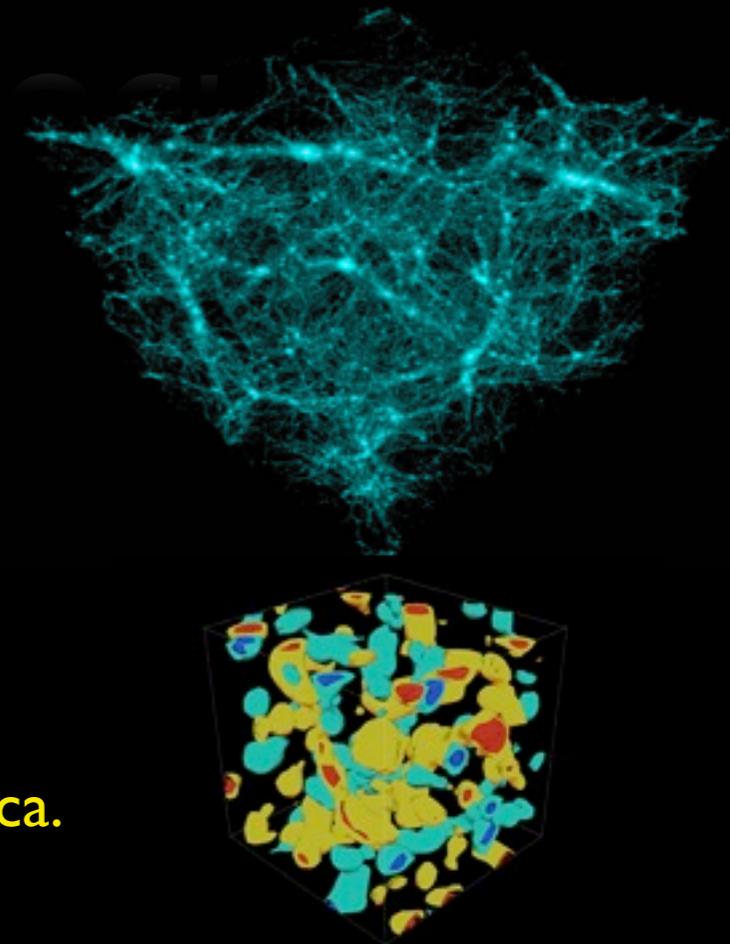
∞ Come fa ad essere così “completo”?

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?

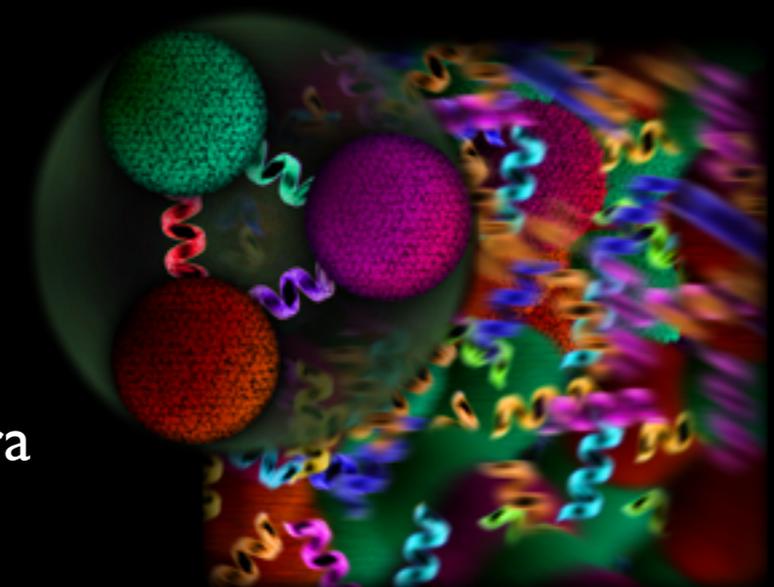
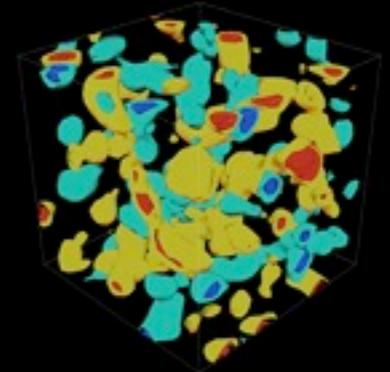
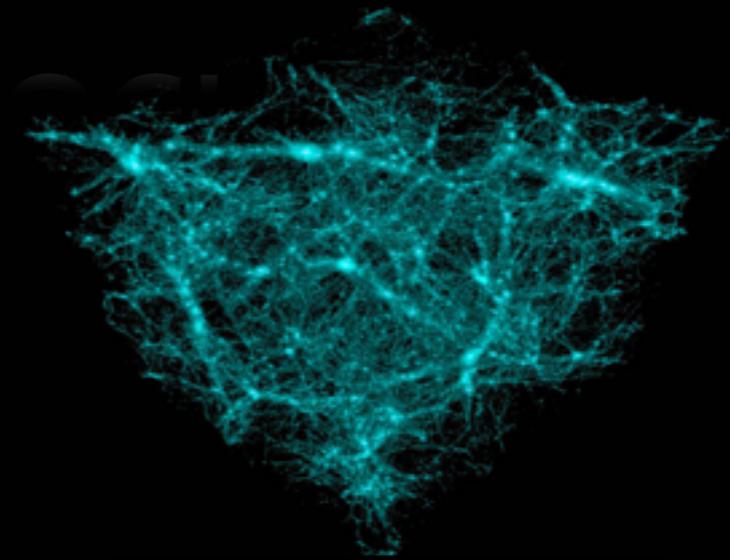
Tutte quelle note! Tre coppie di **quark** e tre di **leptoni**

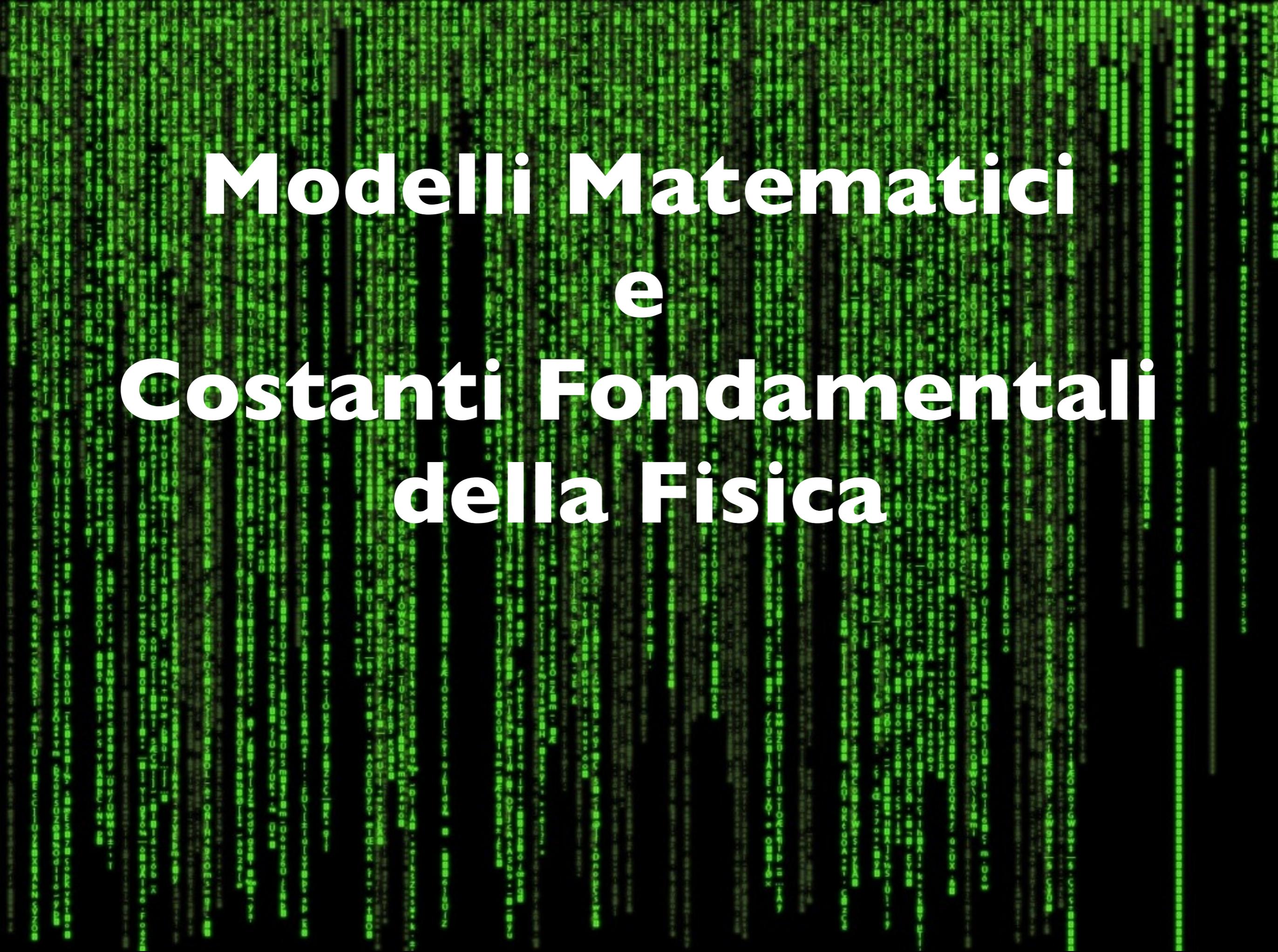
∞ ... e le interazioni?

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 $\left\{ \begin{array}{l} \text{spazio} \rightarrow \mathbf{L} \\ \text{tempo} \rightarrow \mathbf{T} \\ \text{energia} \rightarrow \mathbf{E} \end{array} \right.$

Ad esse “corrispondono” tre costanti fondamentali dimensionali



La velocità della luce nel vuoto $\mathbf{c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}}$
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.

A screenshot of a Google search page. The search bar contains the text "costante di planck". The search results show a snippet for "Planck's constant = $6.626068 \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ kg / s}$ " with a link to "Dettagli sulla calcolatrice". Below this is a link to the Wikipedia article "Planck constant - Wikipedia, the free encyclopedia" with the URL "en.wikipedia.org/wiki/Planck_constant" and a translation option. The snippet also includes the text: "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 ...". At the bottom of the snippet are links for "Value - Significance of the value - Origins - Dependent physical constants". The left sidebar of the search page lists various services: +Tu, Ricerca, Immagini, Maps, Play, YouTube, News, Gmail, Documenti, Calendar, Altro -.

Unità fondamentali

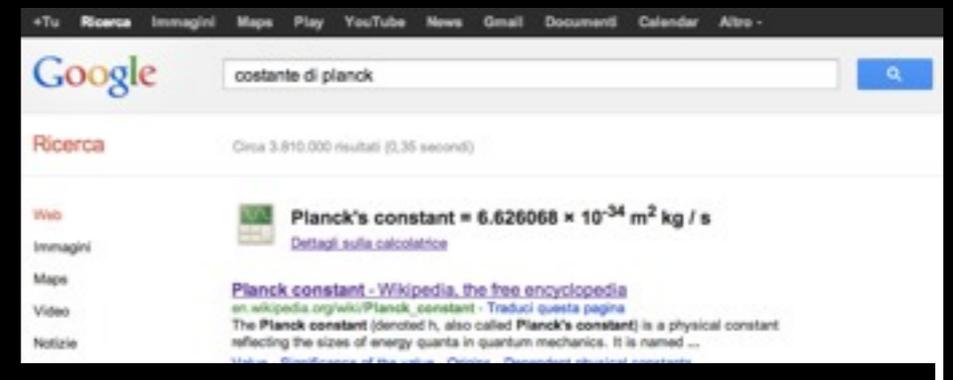
Le grandezze fondamentali sono $\left\{ \begin{array}{l} \text{spazio} \rightarrow \mathbf{L} \\ \text{tempo} \rightarrow \mathbf{T} \\ \text{energia} \rightarrow \mathbf{E} \end{array} \right.$

Ad esse “corrispondono” tre costanti fondamentali dimensionali



La velocità della luce nel vuoto $\mathbf{c = 2.99792458 \times 10^8 \text{ m/s}}$
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
 $\mathbf{G=6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1}}$

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.

Grandezze fondamentali

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.

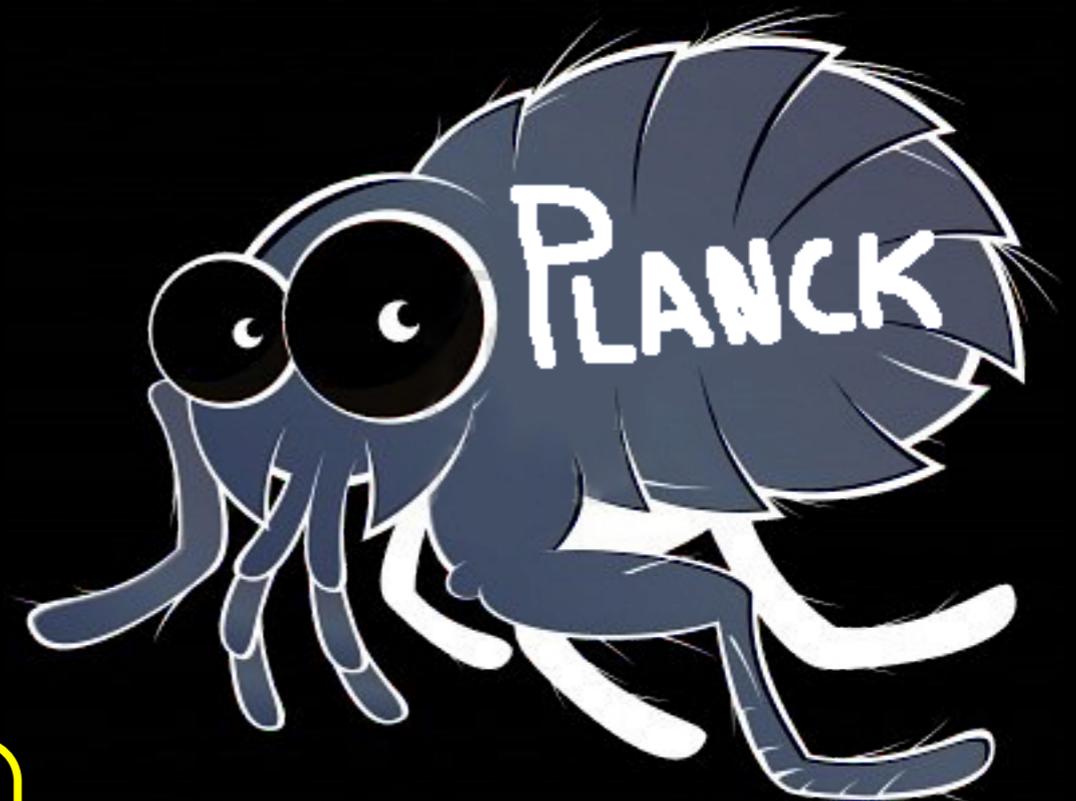
(George Gamow, Mr. Tompkins in paperback)

- I valori numerici delle tre costanti c , \hbar e G espressi nelle unità del Sistema Internazionale appaiono “inumani”, lontani dall’esperienza quotidiana...
- Ricombinando c , \hbar e G si ottengono tre nuove costanti con **dimensione pura**

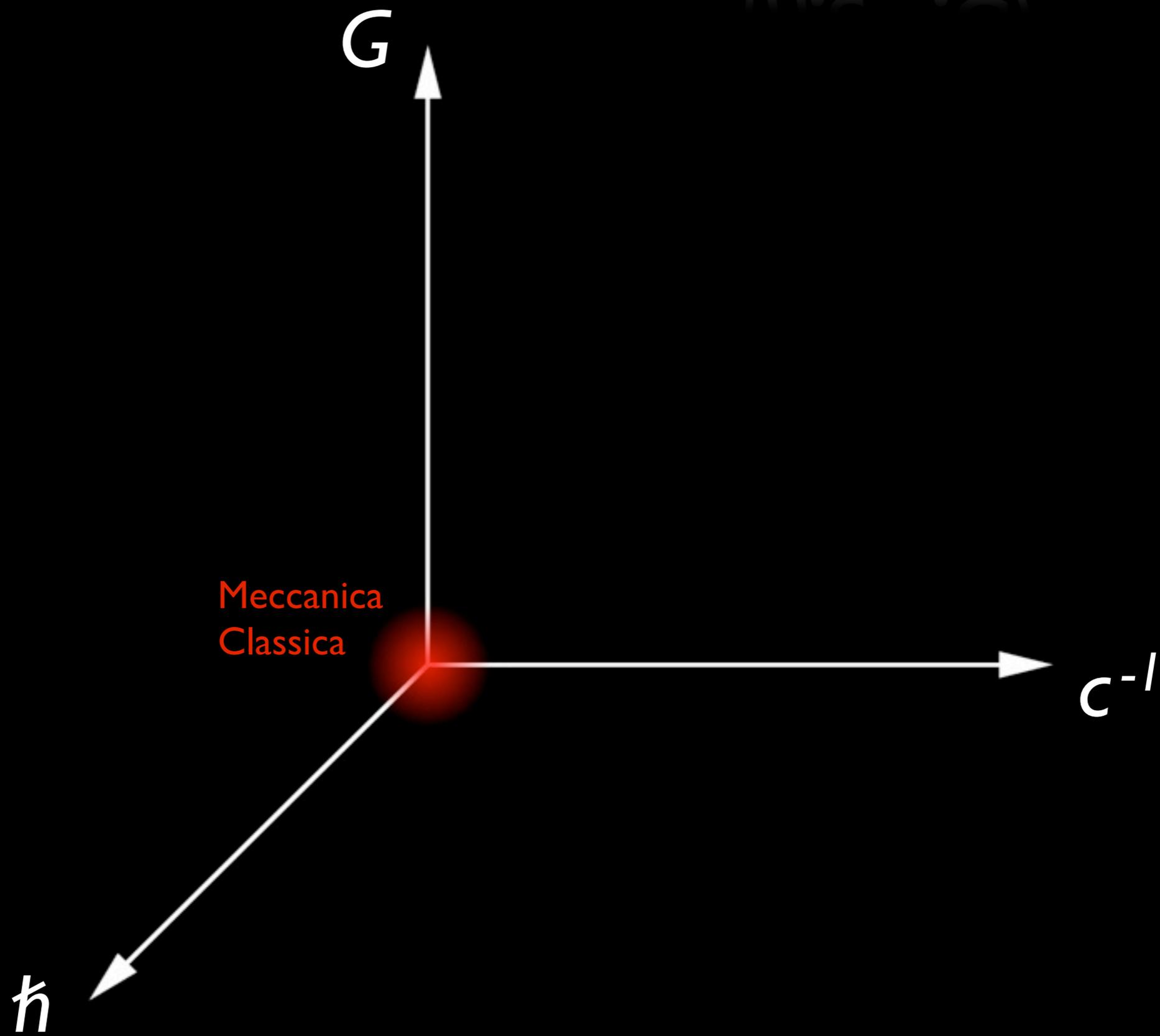
$$L_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar G/c^3} \sim 10^{-35} \text{ m}$$

$$T_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar G/c^5} \sim 10^{-43} \text{ s}$$

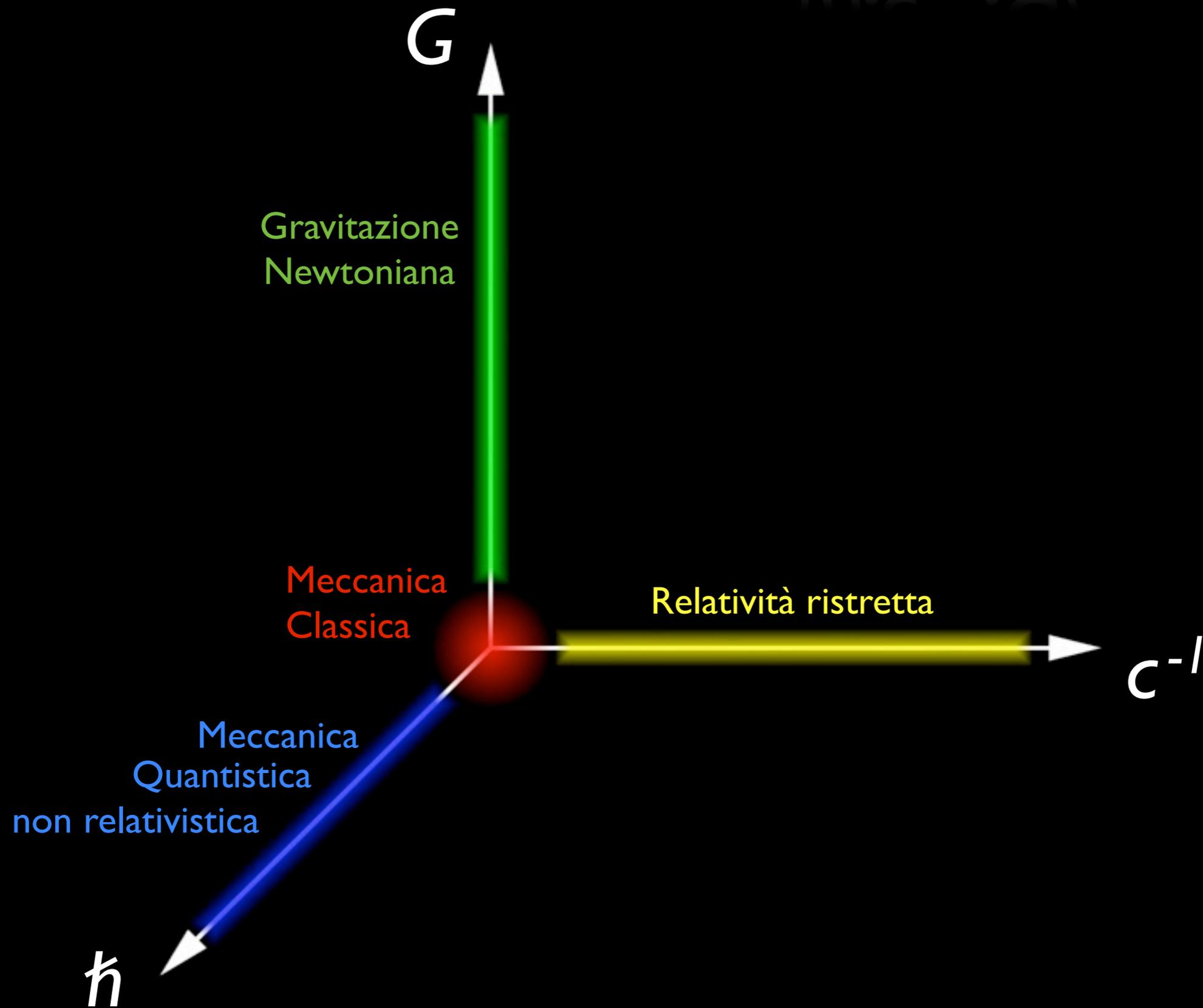
$$M_{\text{Planck}} = \sqrt{\hbar c/G} \sim 10^{19} M_{\text{protone}}$$



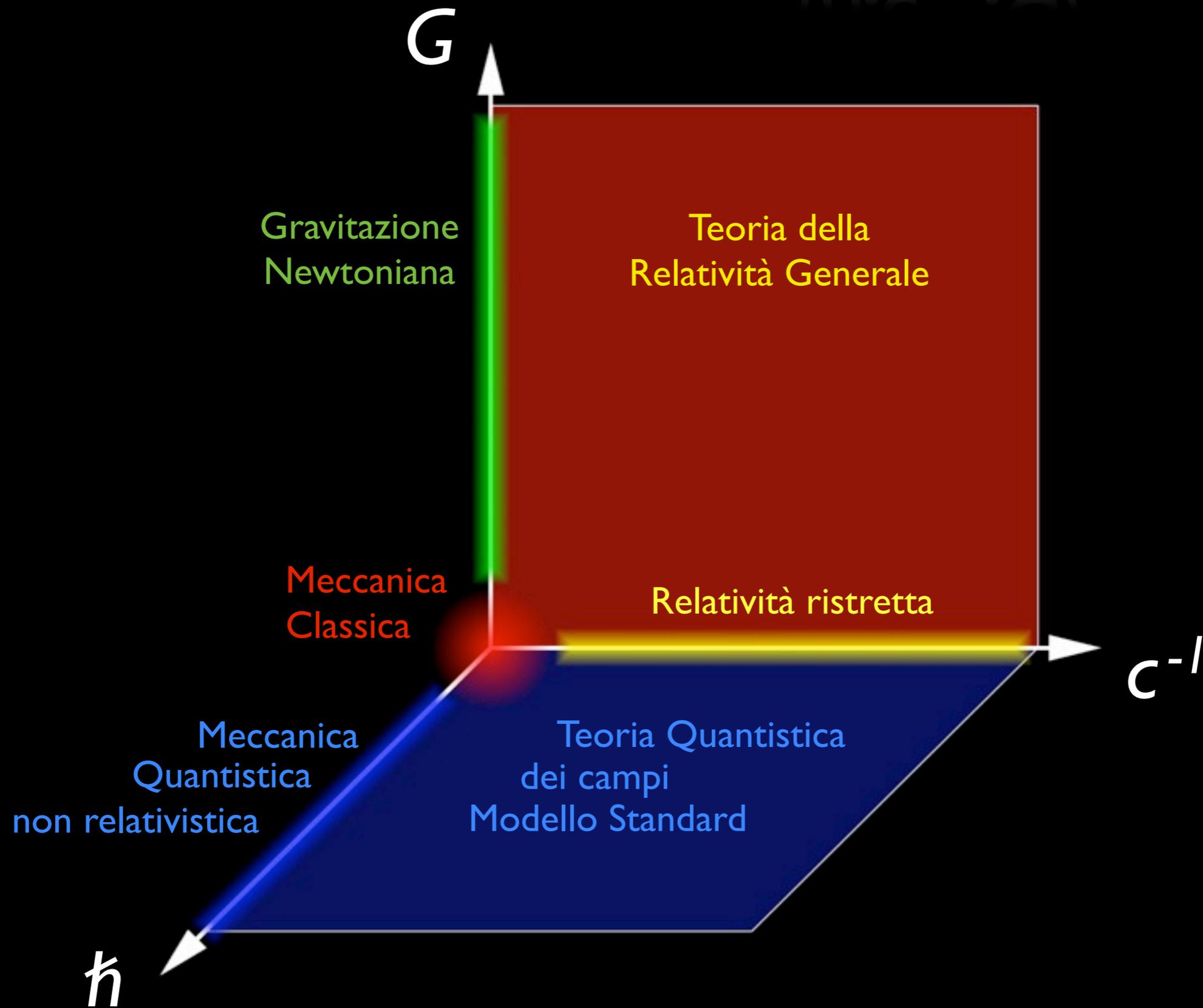
Le teoria cubica (\hbar, c^{-1}, G)



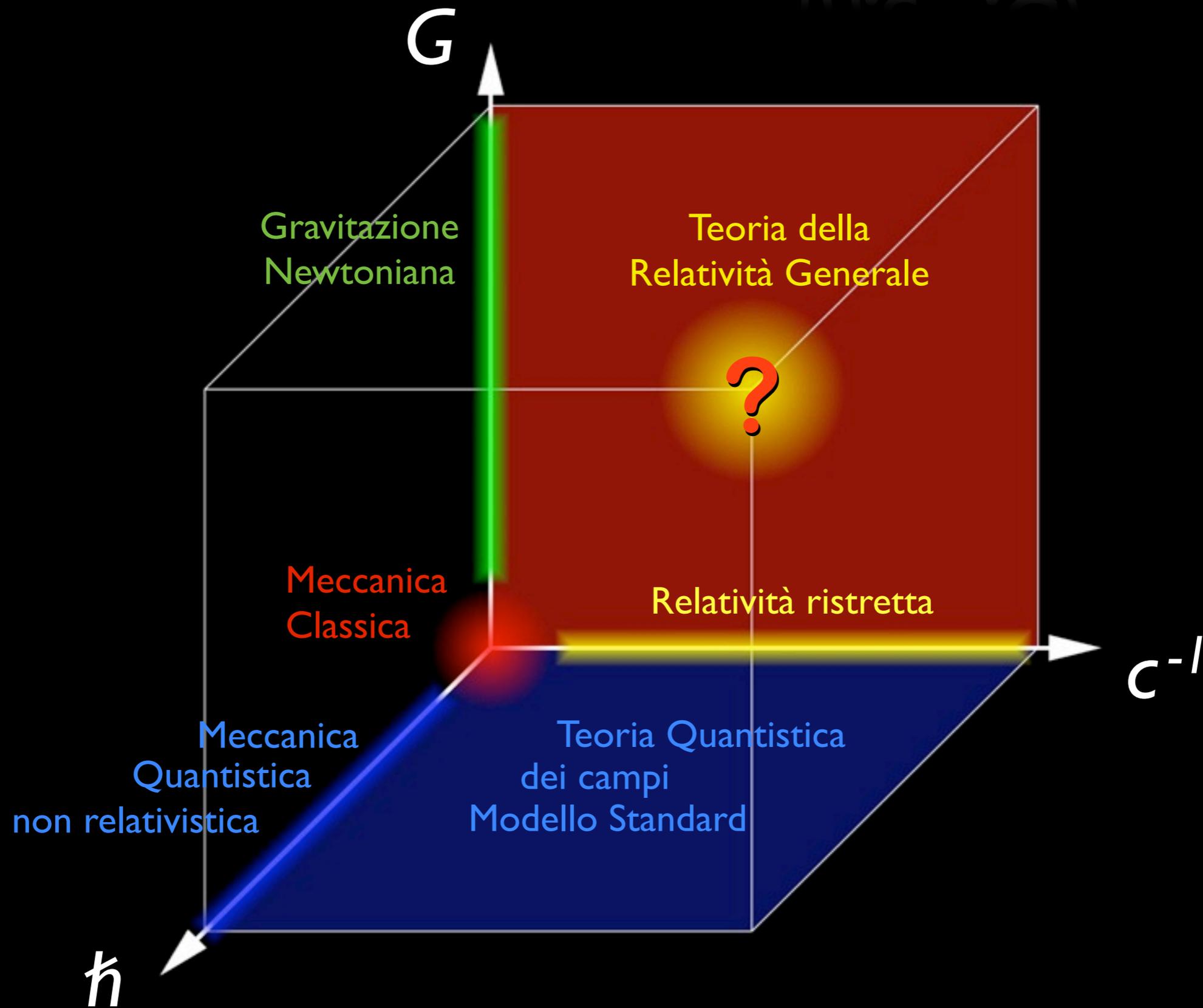
Le teoria cubica (\hbar, c^{-1}, G)



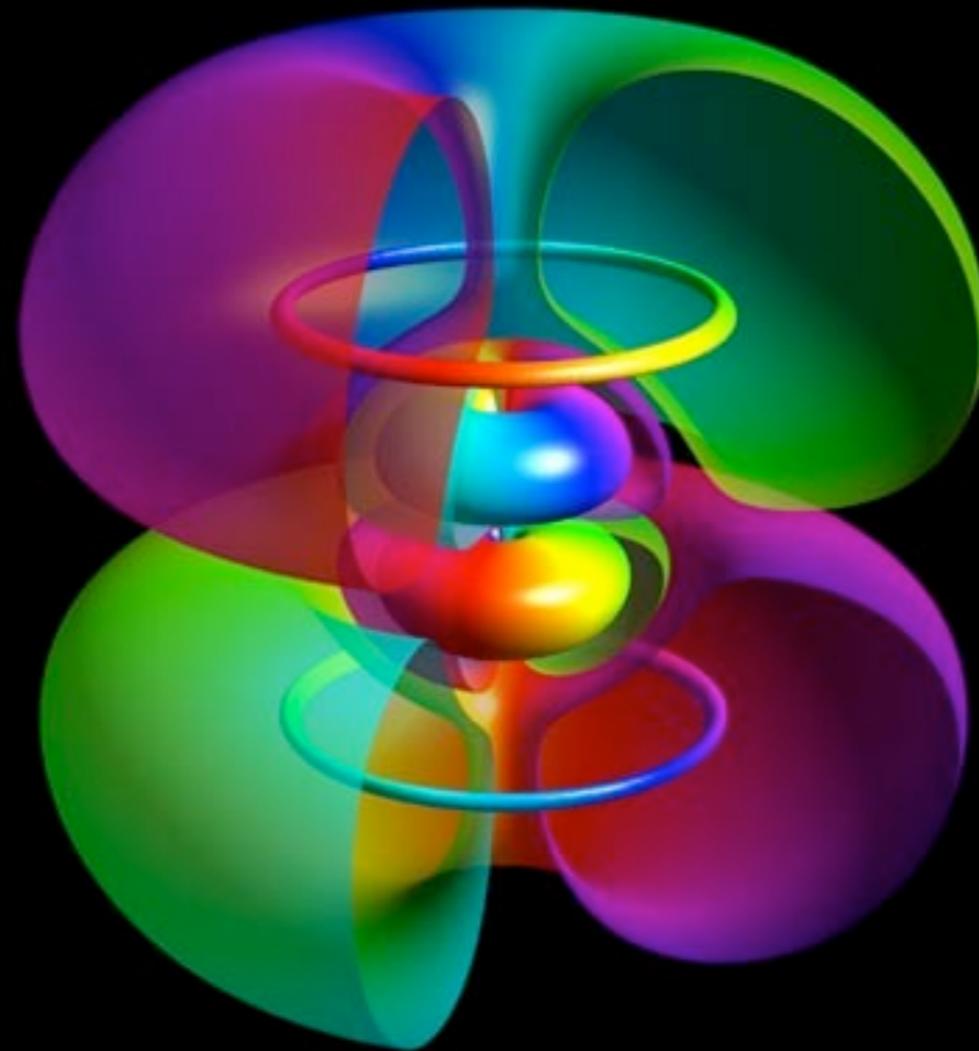
Le teoria cubica (\hbar, c^{-1}, G)

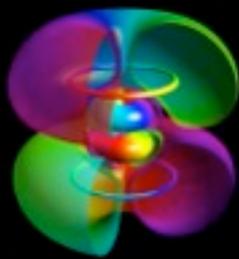


Le teoria cubica (\hbar, c^{-1}, G)



Meccanica Quantistica

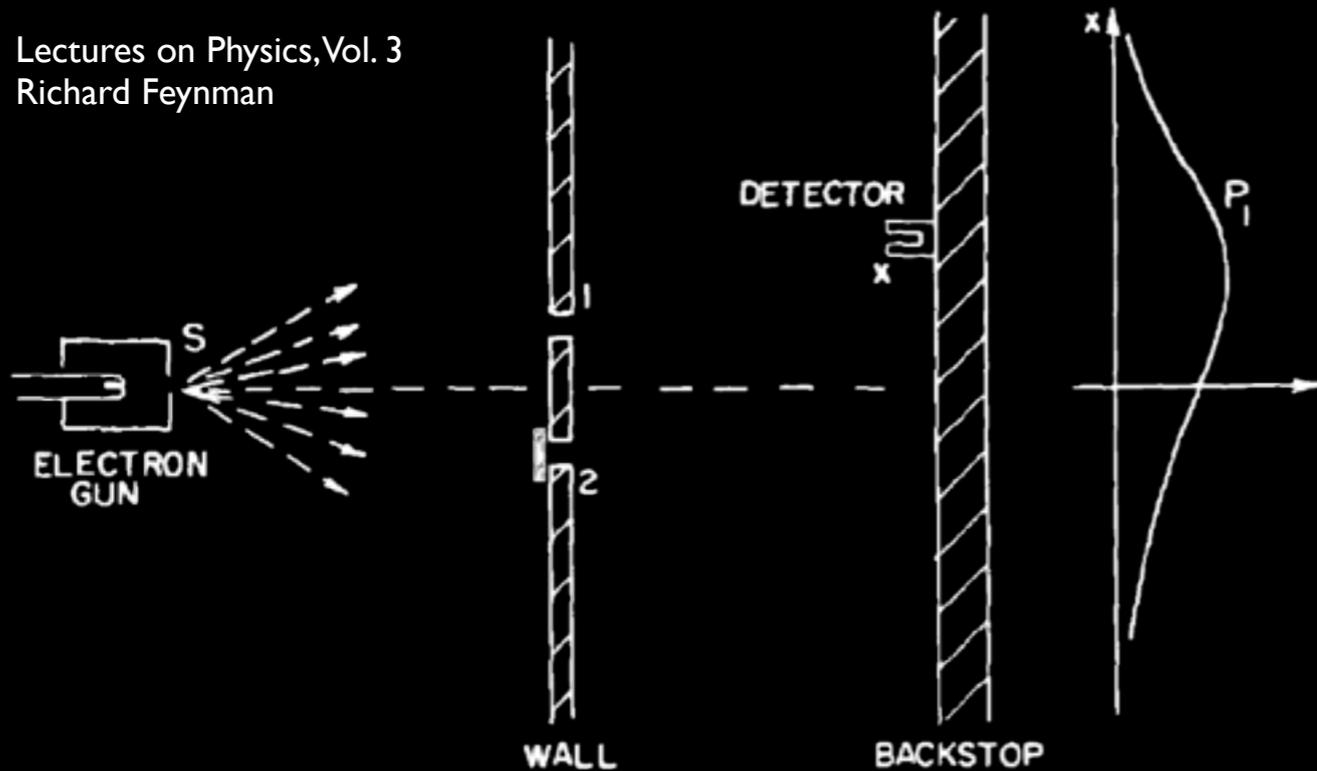




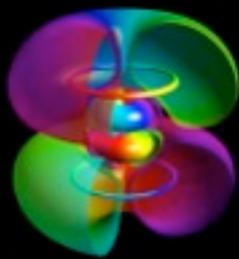
Meccanica Quantistica

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

Lectures on Physics, Vol. 3
Richard Feynman



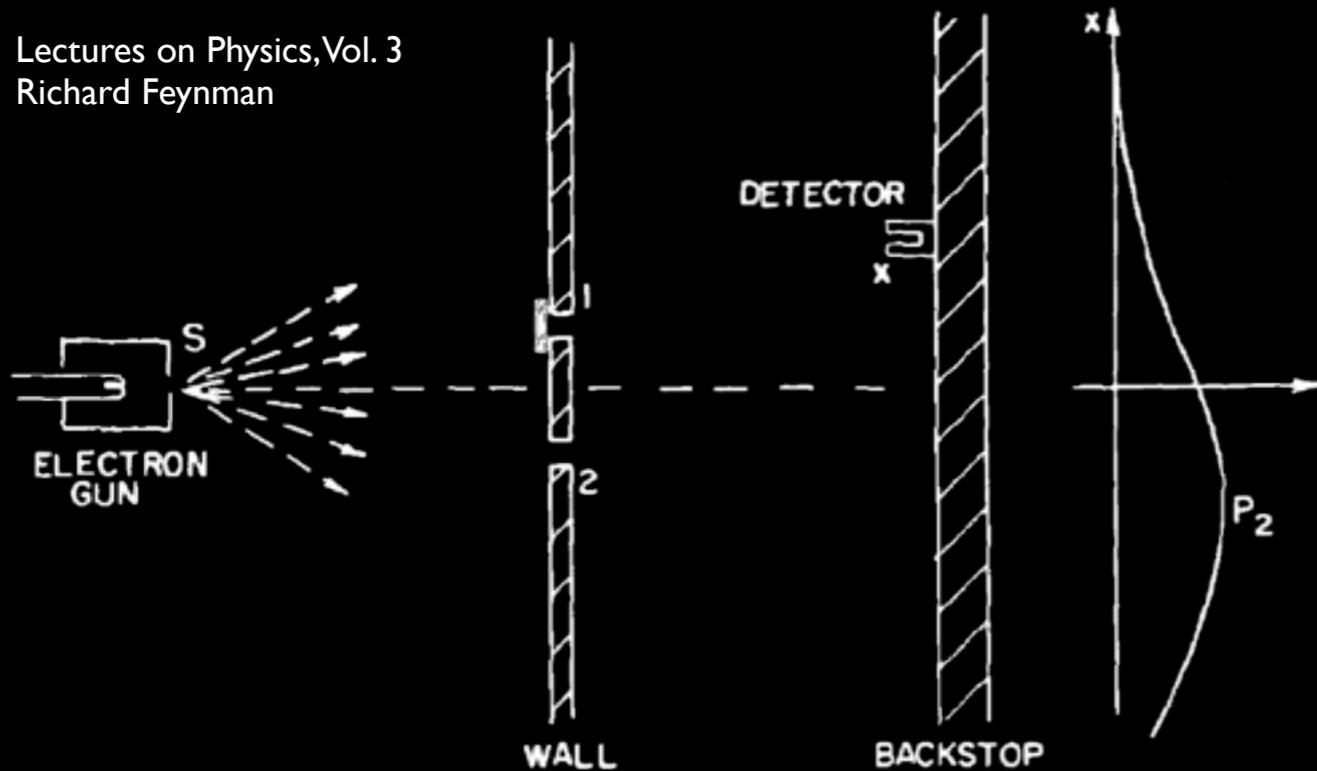
- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato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



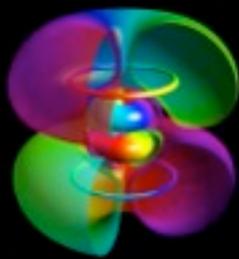
Meccanica Quantistica

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

Lectures on Physics, Vol. 3
Richard Feynman



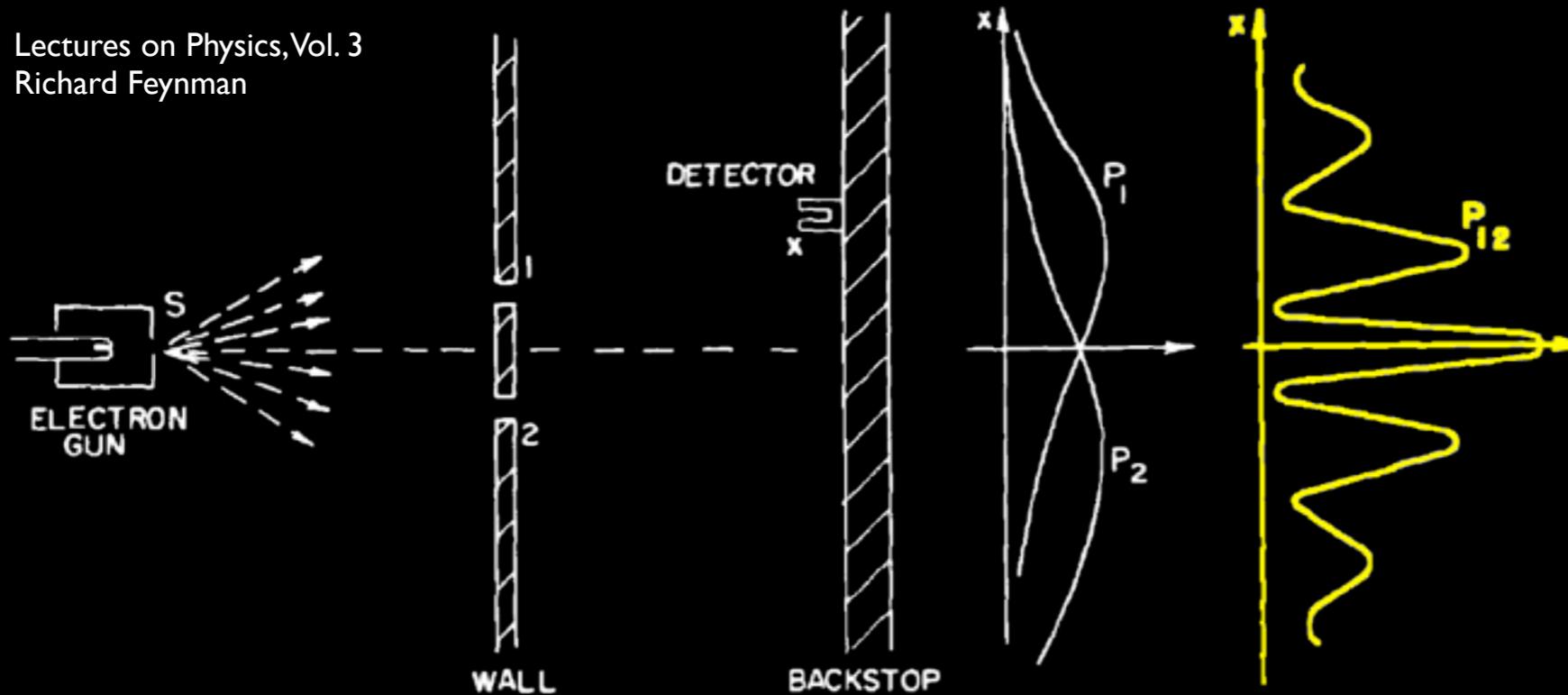
- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato 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

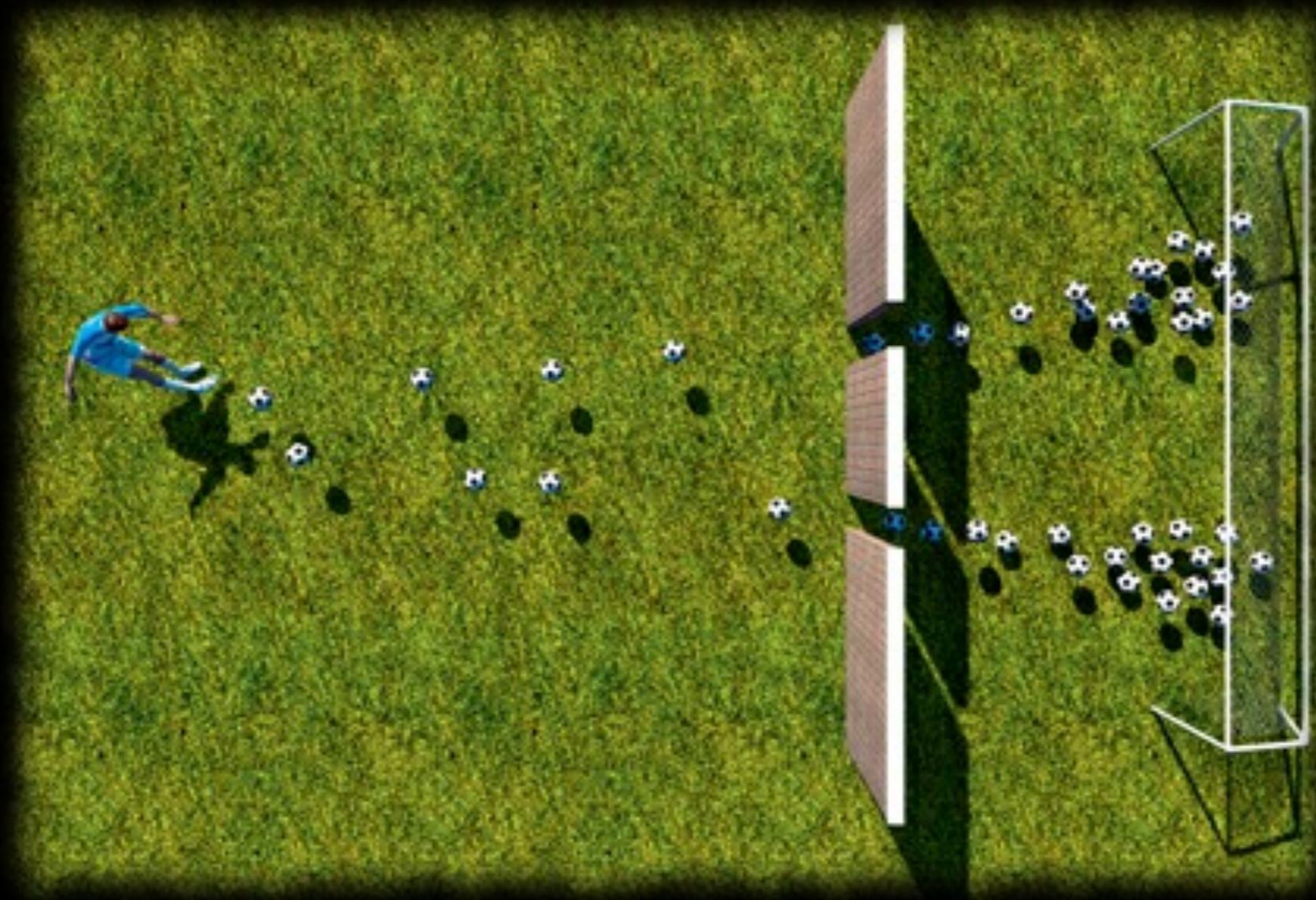


- Gli elettroni sono accelerati verso una parete con due fenditure oltre la quale c'è uno schermo con un detector
- Il detector misura **singoli** elettroni
- Il detector è mantenuto in ogni posizione, lungo x , per **uguali intervalli di tempo**
- Quando il numero di elettroni per unità di tempo misurato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

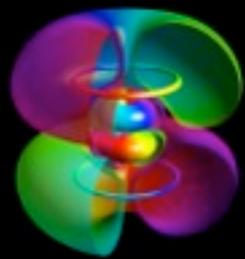
- Con una singola fenditura il comportamento è quello tipico di una **particella**
- Quando entrambe le fenditure sono aperte la distribuzione misurata non è semplicemente la somma: **$P_{12} = P_1 + P_2$!**
- Si osserva, sorprendentemente, una **figura di interferenza** tipica delle onde!



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 che 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 che 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.

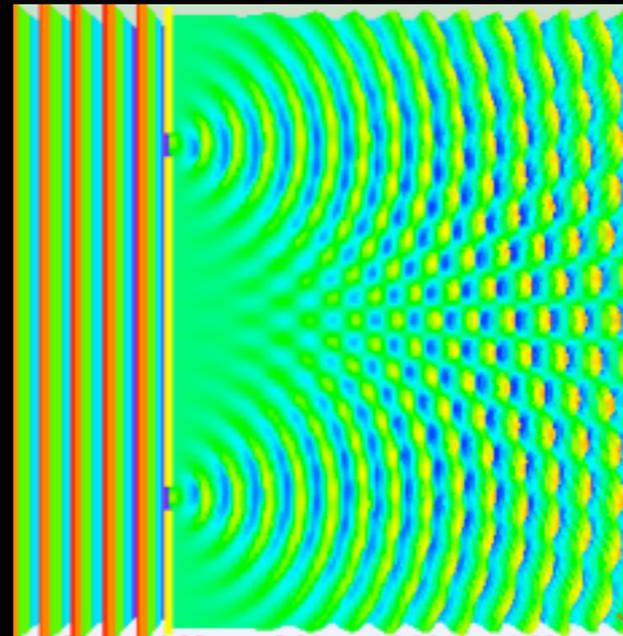


- Le particelle “sanno” così quali e quante fenditure sono aperte.
- Le diverse traiettorie interagiscono tra loro!



Meccanica Quantistica e R. Feynman

- In meccanica quantistica la particella **non ha una posizione definita** nell'intervallo di tempo che 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 Modello di R. Feynman

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

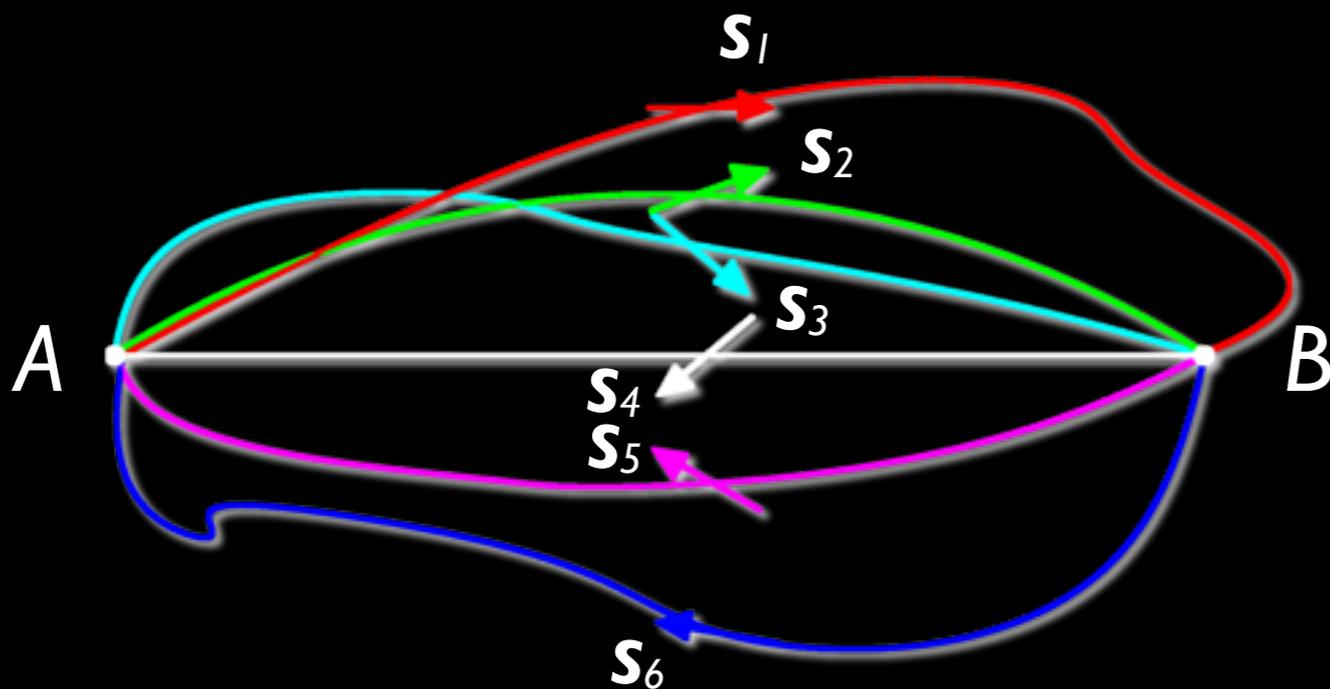
- Nel modello di Newton la traiettoria è quella **rettilinea**.
- Nel modello di Feynman la particella **“prova” tutte le traiettorie AB** .
- A ciascuna traiettoria è associata una **“fase”**, cioè una grandezza vettoriale, che dipende essenzialmente dall'energia del processo.
- La probabilità che la 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**.

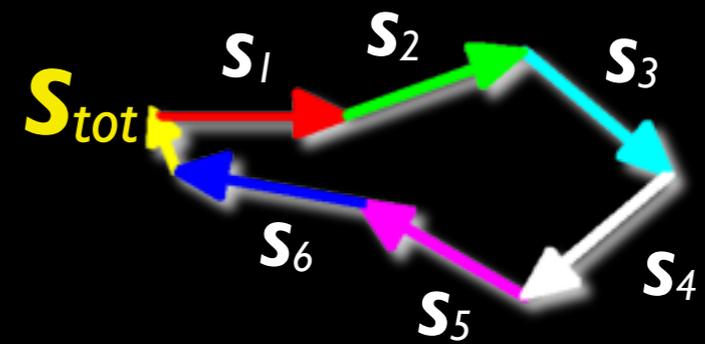
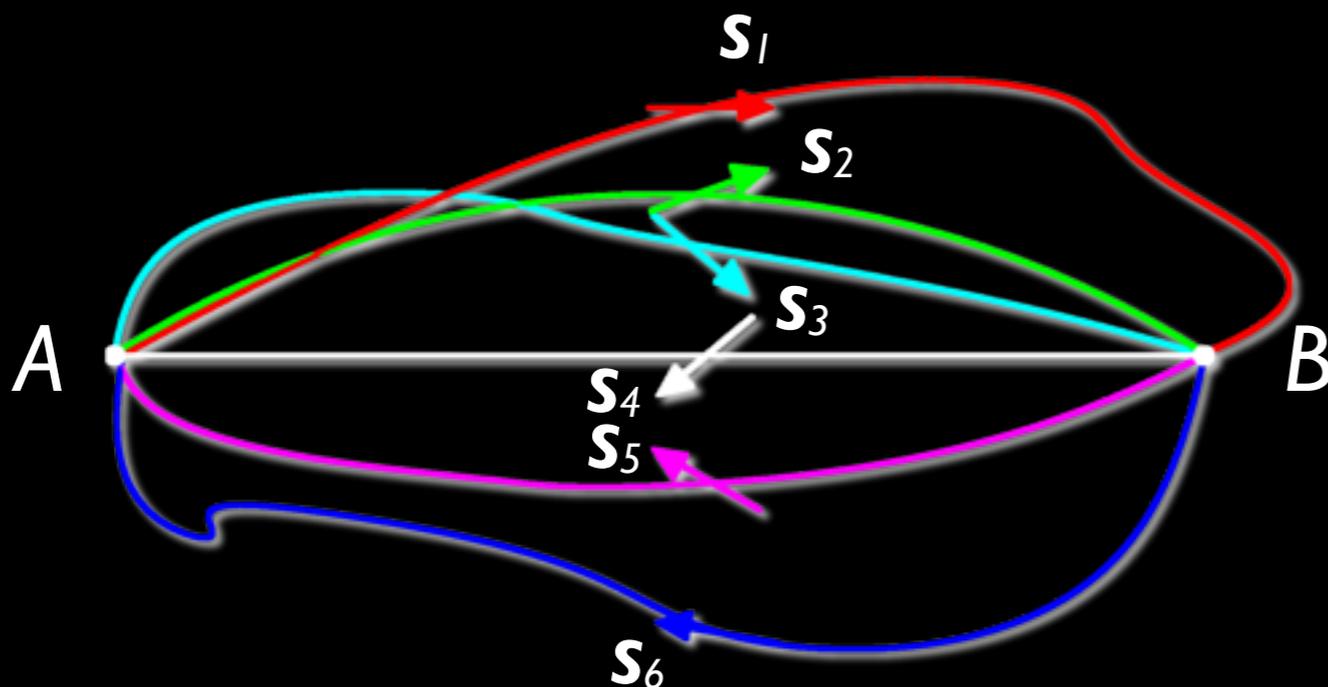




Il Modello di R. Feynman

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**.



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

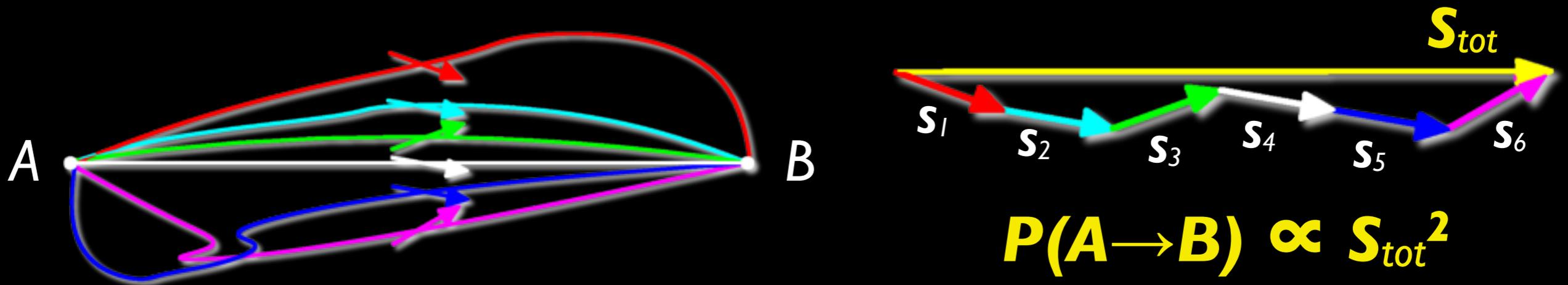
La probabilità è piccola!



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 **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**.



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 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

$$E \Delta t \gg \hbar$$

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**

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

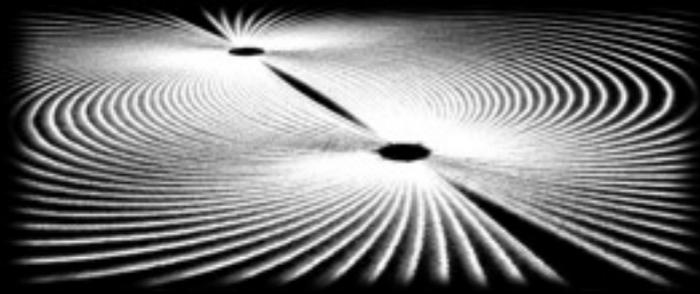
La teoria della Relatività





Un velocità “assoluta”

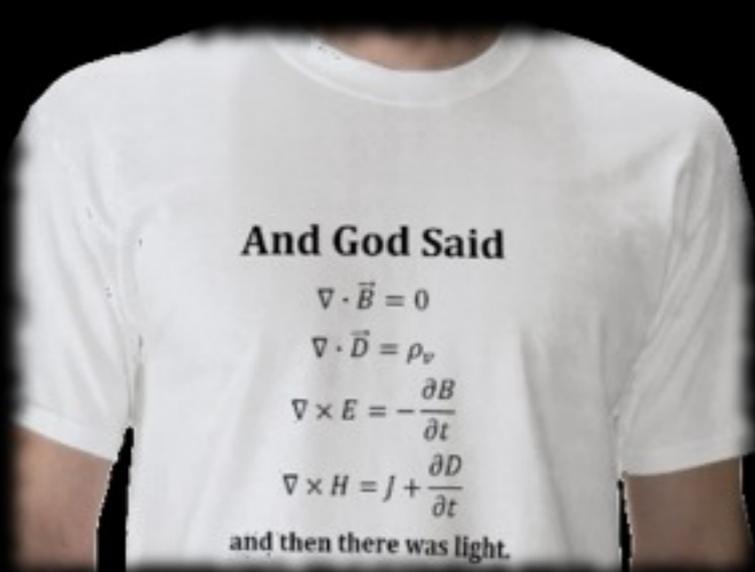
Richard Faraday (1791-1867) fu il primo scienziato ad introdurre il concetto di **campo di forza**. Lo fece “contro voglia” poiché era convinto che le forze agissero solo per contatto, non a distanza.



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 $\sim 3 \times 10^8$ m/s. Tale valore compare nelle equazioni come una costante fondamentale detta: **c**.

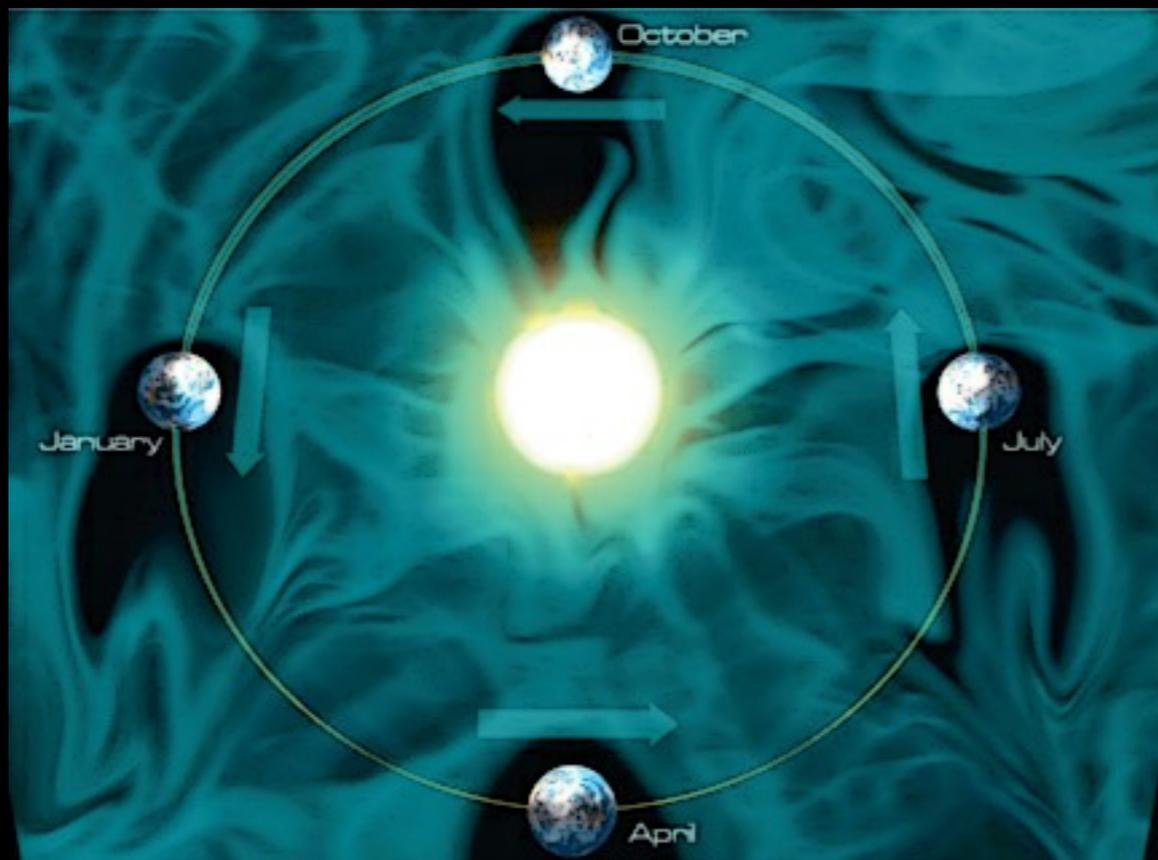


...Ma **c** è una velocità rispetto a cosa?



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.
- Dove 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...

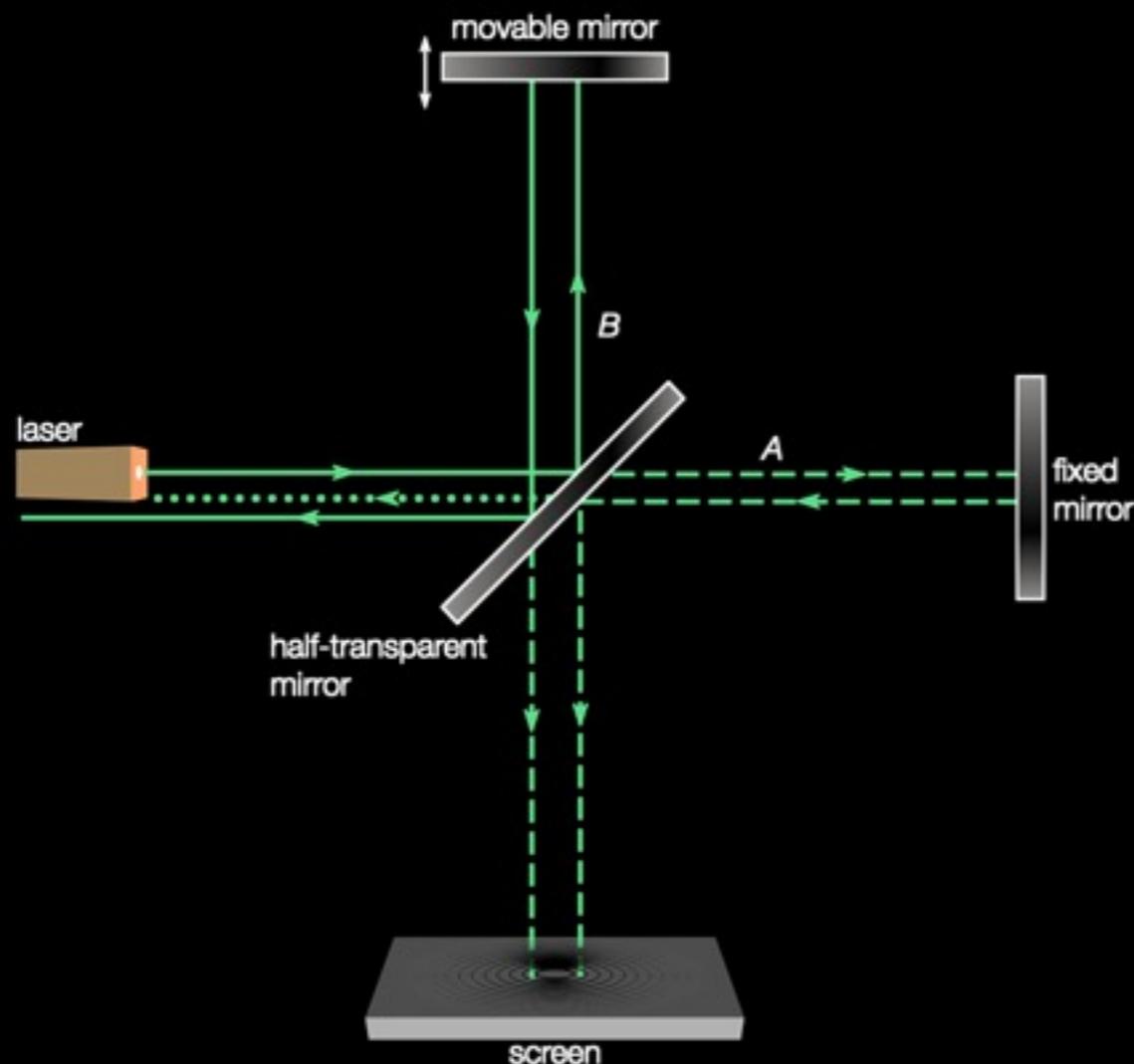


La terra si muove all'interno dell'etere è quindi possibile misurare la **velocità relativa terra-etere**.



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.
- Dove 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**.

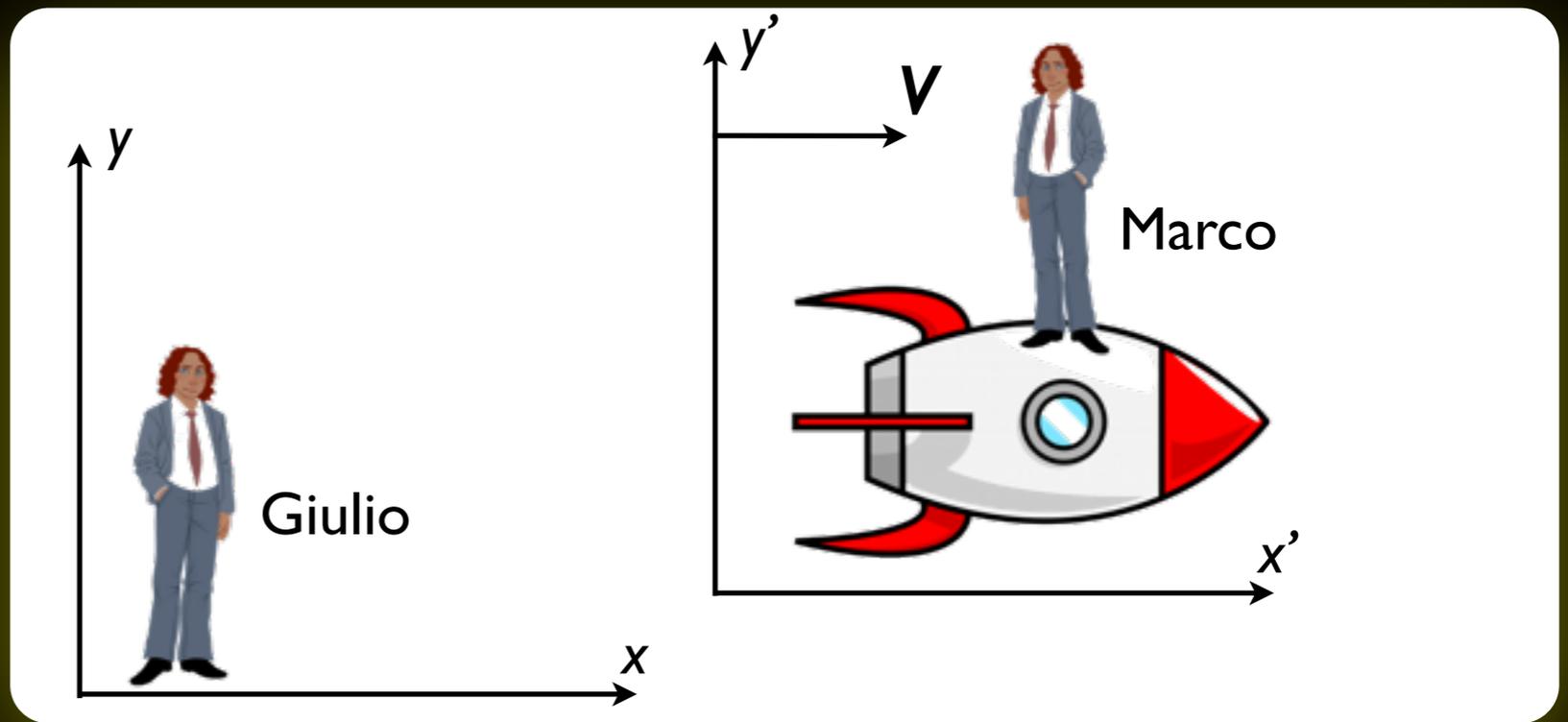
Due fisici americani Albert Michelson e Edward Morley eseguirono nel 1887, l'esperimento suggerito da Maxwell trovando una **velocità relativa nulla!**

La teoria della Relatività

Trasformazioni di Galileo

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

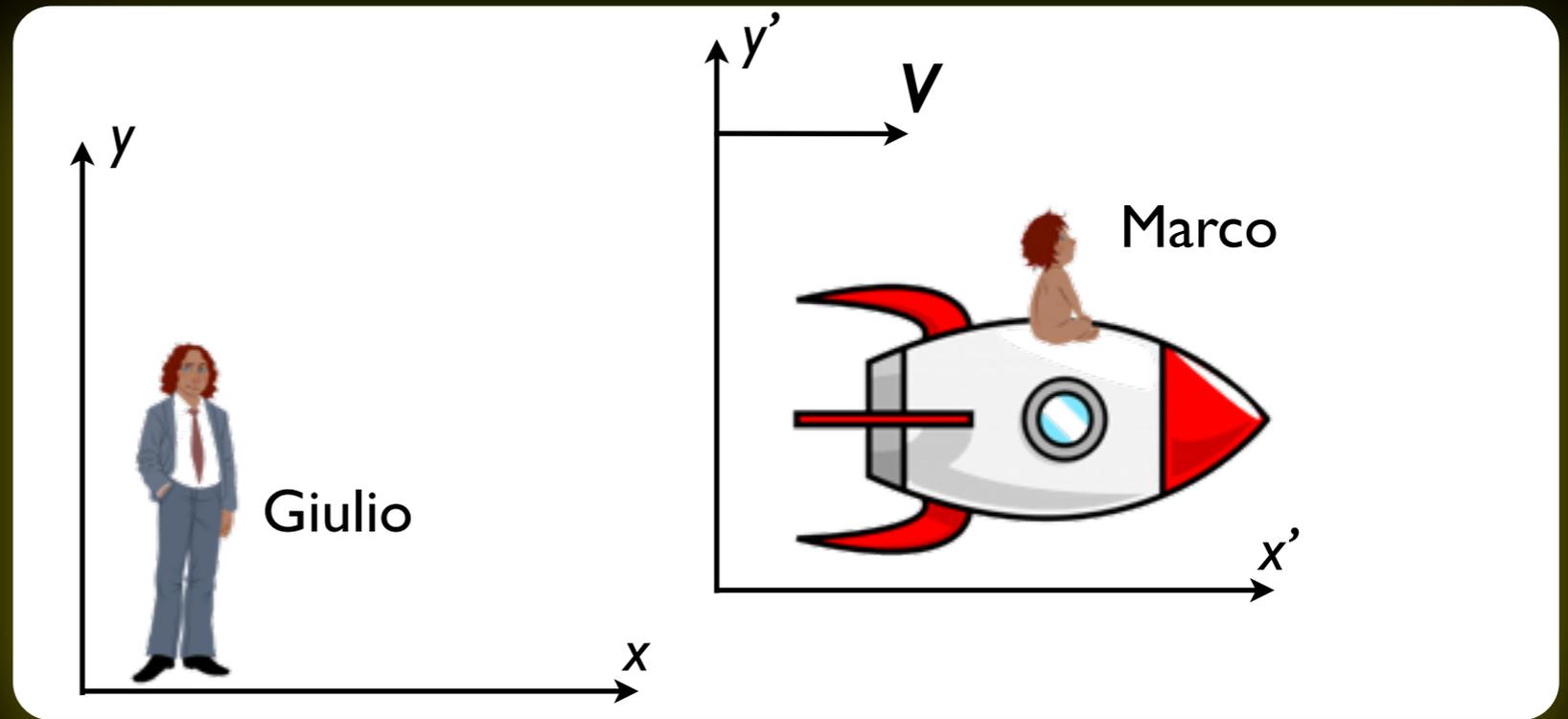
Velocità limite = ∞ m/s



La teoria della Relatività

Trasformazioni di Lorentz

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



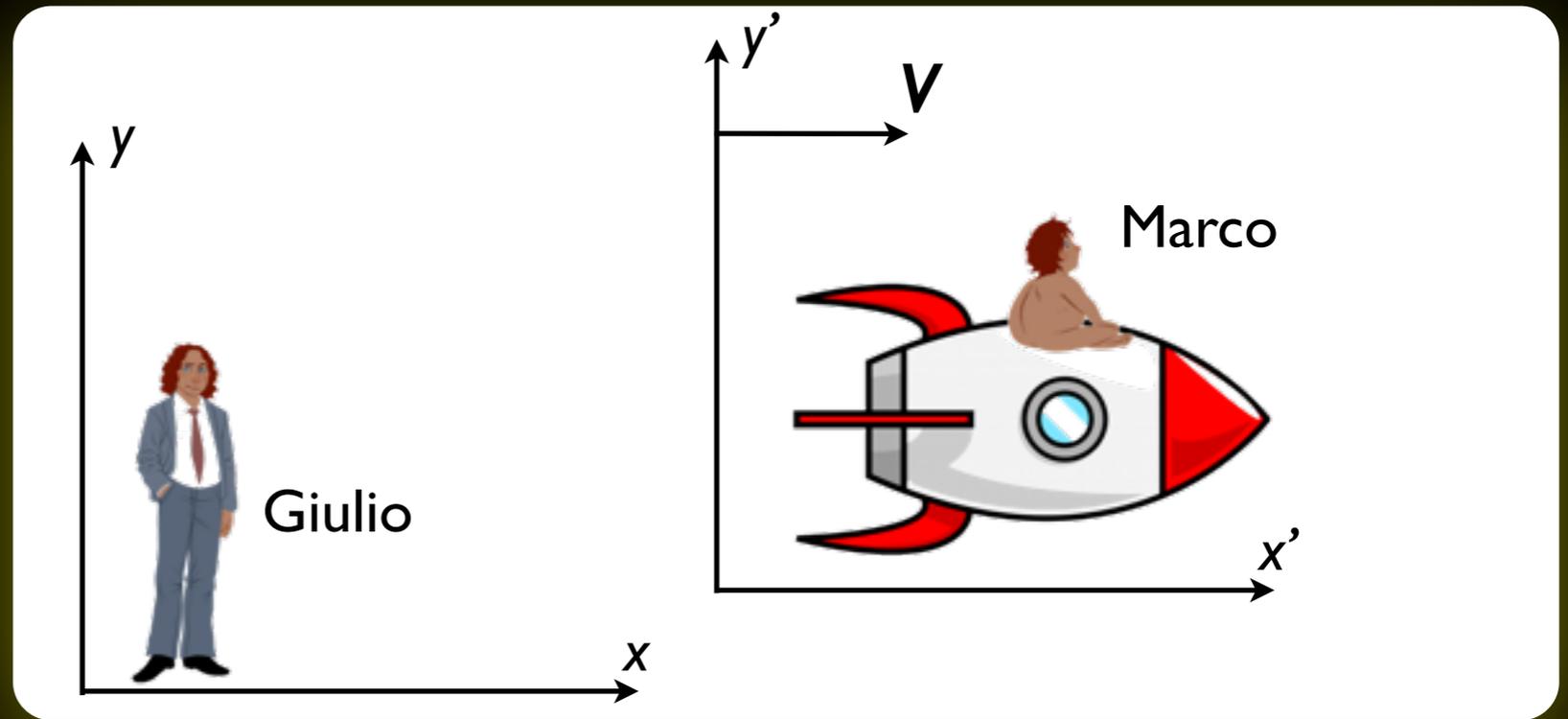
••• Dilatazione dei tempi:

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

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:

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

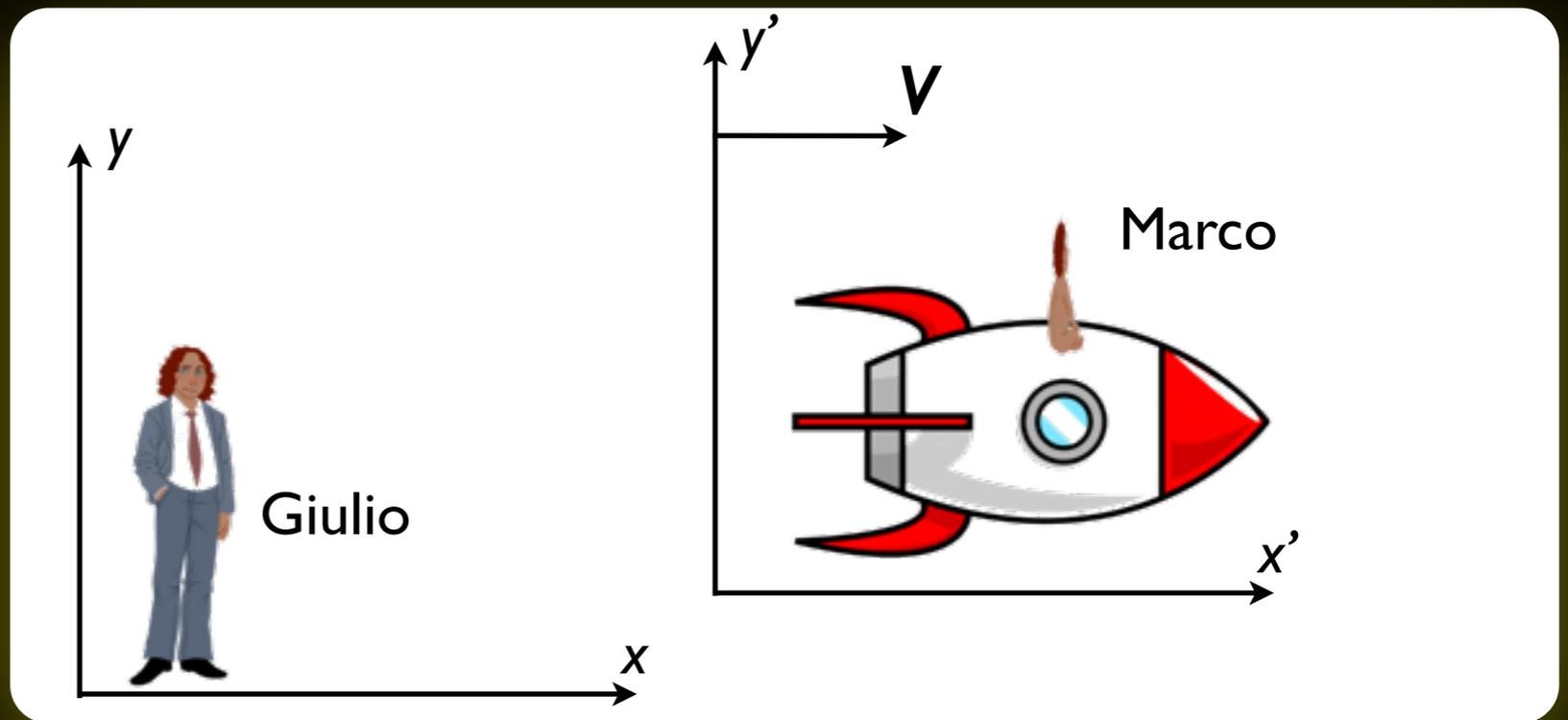
• Dilatazione della massa:

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

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

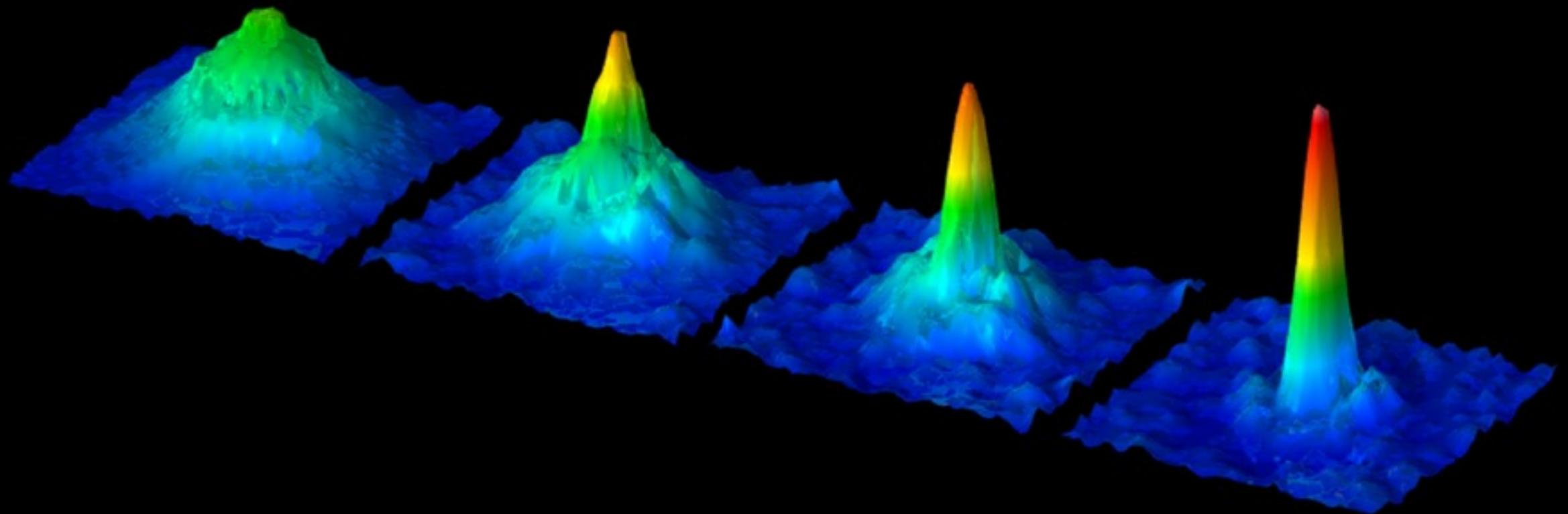
Nessuna contraddizione gli **intervalli di tempo** e **spazio** si trasformano entrambi in modo tale che la velocità della luce rimanga **invariata in ogni sistema di riferimento inerziale**

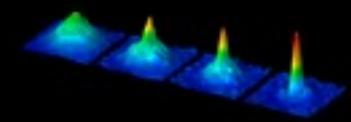
Tutte le leggi fisiche sono **invarianti** in sistemi di riferimento inerziali

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

$$E = mc^2$$

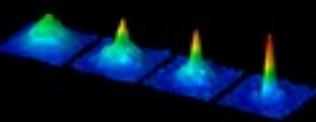
Teoria quantistica dei campi





Teoria quantistica dei campi

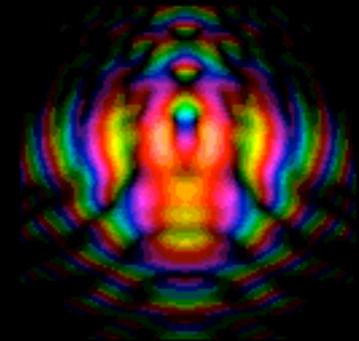
La meccanica quantistica è stata sviluppata in una approssimazione Galileiana!
Includendo la relatività ristretta si ottiene la Teoria Quantistica dei Campi

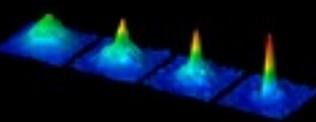


Teoria quantistica dei campi

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 Ψ , del fotone A_μ , ecc.

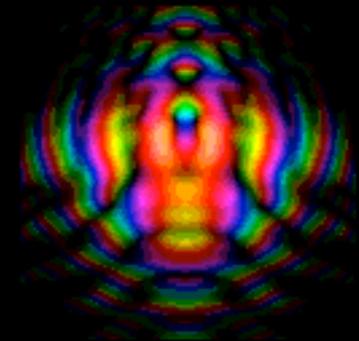




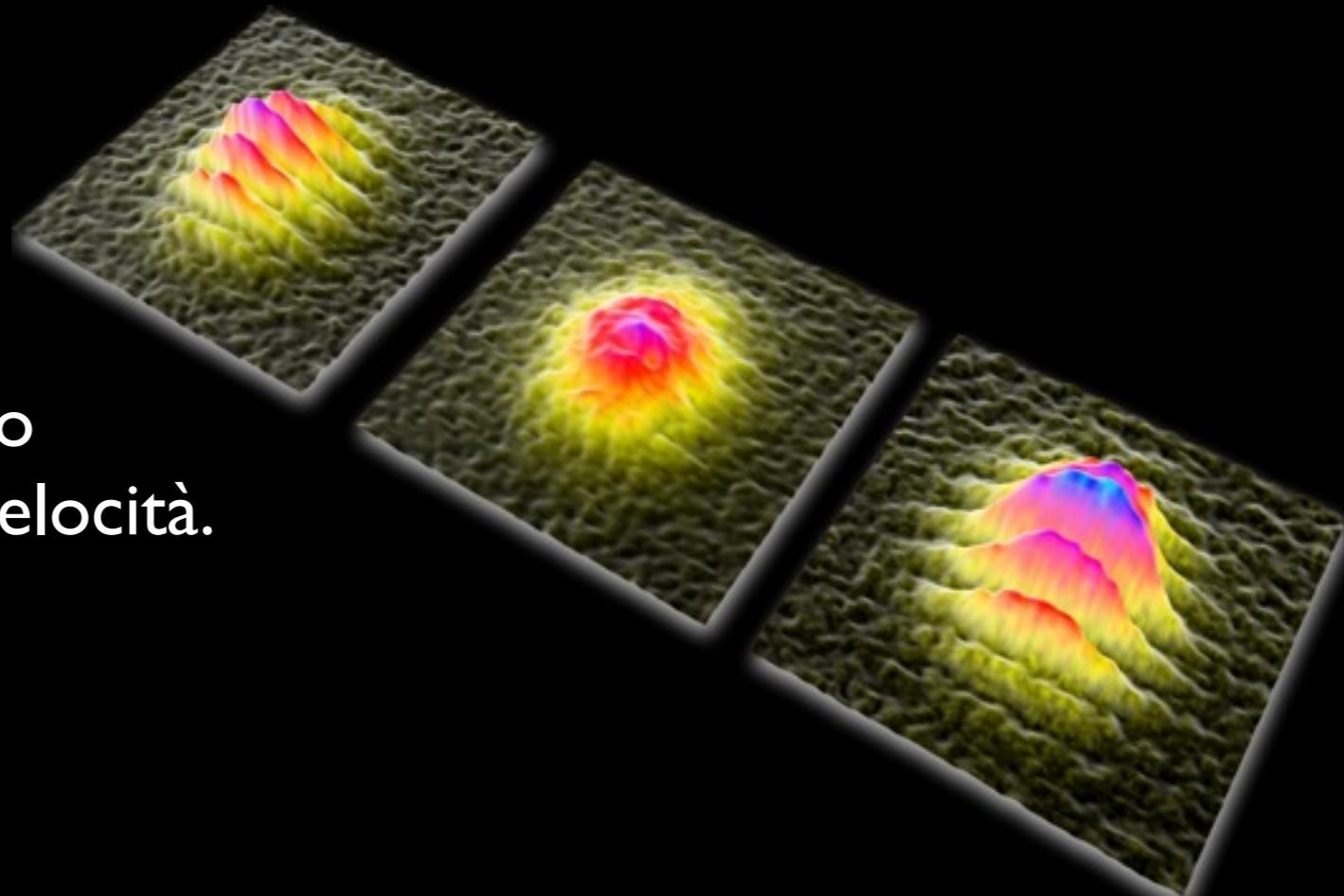
Teoria quantistica dei campi

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 Ψ , del fotone A_μ , 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

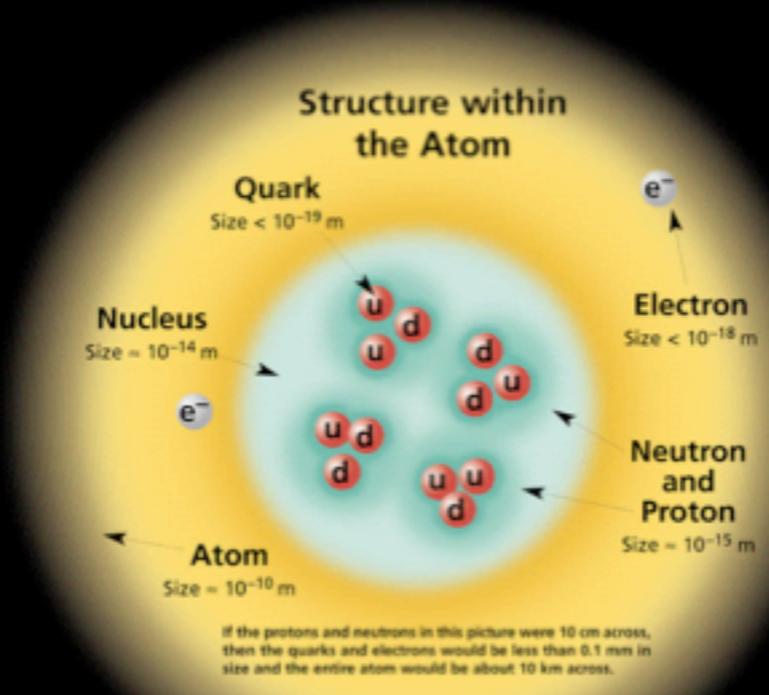
The Standard Model summarizes the current knowledge in Particle Physics. It is the quantum theory that includes the theory of strong interactions (quantum chromodynamics or QCD) and the unified theory of weak and electromagnetic interactions (electroweak). Gravity is included on this chart because it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

FERMIONS

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

Leptons spin = 1/2		
Flavor	Mass GeV/c ²	Electric charge
ν_e electron neutrino	$<1 \times 10^{-8}$	0
e electron	0.000511	-1
ν_μ muon neutrino	<0.0002	0
μ muon	0.106	-1
ν_τ tau neutrino	<0.02	0
τ tau	1.7771	-1

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

BOSONS

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

Unified Electroweak spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
γ photon	0	0
W^-	80.4	-1
W^+	80.4	+1
Z^0	91.187	0

Strong (color) spin = 1		
Name	Mass GeV/c ²	Electric charge
g 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 1.60×10^{-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 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 ²	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-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	γ	Gluons	Mesons
Strength relative to electromag for two u quarks at:		10^{-41}	0.8	1	25	Not applicable to quarks
	10^{-16} m	10^{-41}	10^{-4}	1	60	
	$3 \times 10^{-17} \text{ m}$	10^{-36}	10^{-7}	1	Not applicable to hadrons	20

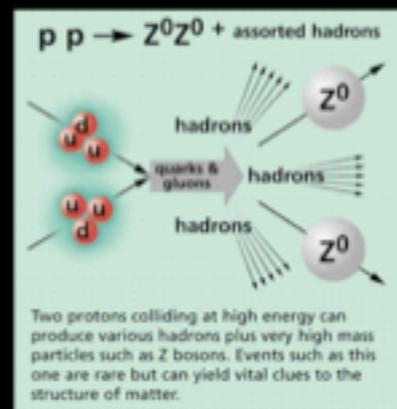
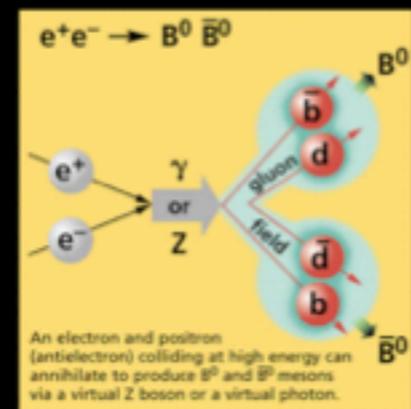
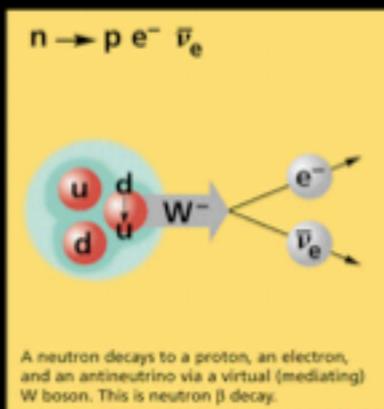
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c ²	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980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

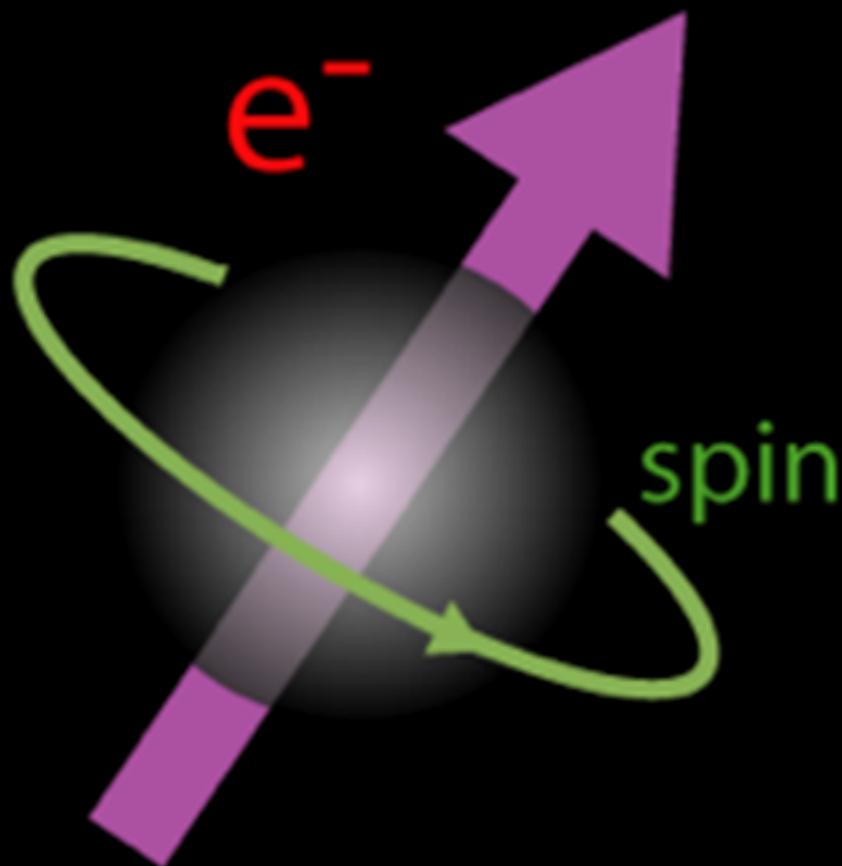
- U.S. Department of Energy
- U.S. National Science Foundation
- Lawrence Berkeley National Laboratory
- Stanford Linear Accelerator Center
- American Physical Society, Division of Particles and Fields
- BURLE INDUSTRIES, INC.**

©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	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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 γ 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	
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ 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 $\frac{1}{2}$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ -1 1 W^\pm 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 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	1.27 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	171.2 GeV/c ² 2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon	
		4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon	
		<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν _e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν _μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν _τ tau neutrino	91.2 GeV/c ² 0 1 Z ⁰ Z boson	
	leptoni	quark	0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	80.4 GeV/c ² -1 1 W [±] W boson

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

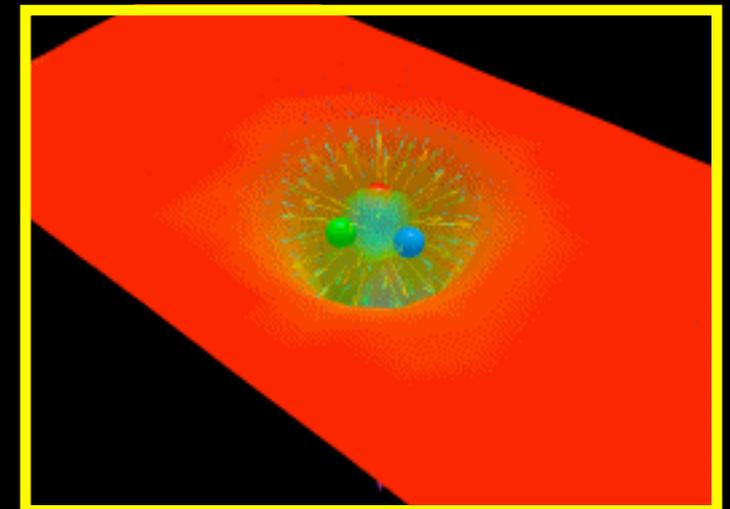
confinamento
dei quark



non esistono
quark liberi

Generazioni

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

Generazioni

	I	II	III		
leptoni	$2.4 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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 γ photon	portatori dell'interazione
	$4.8 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ 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	
	$<2.2 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e electron neutrino	$<0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ muon neutrino	$<15.5 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ 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 $\frac{1}{2}$ μ muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tau	$80.4 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W^\pm 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

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

Generazioni

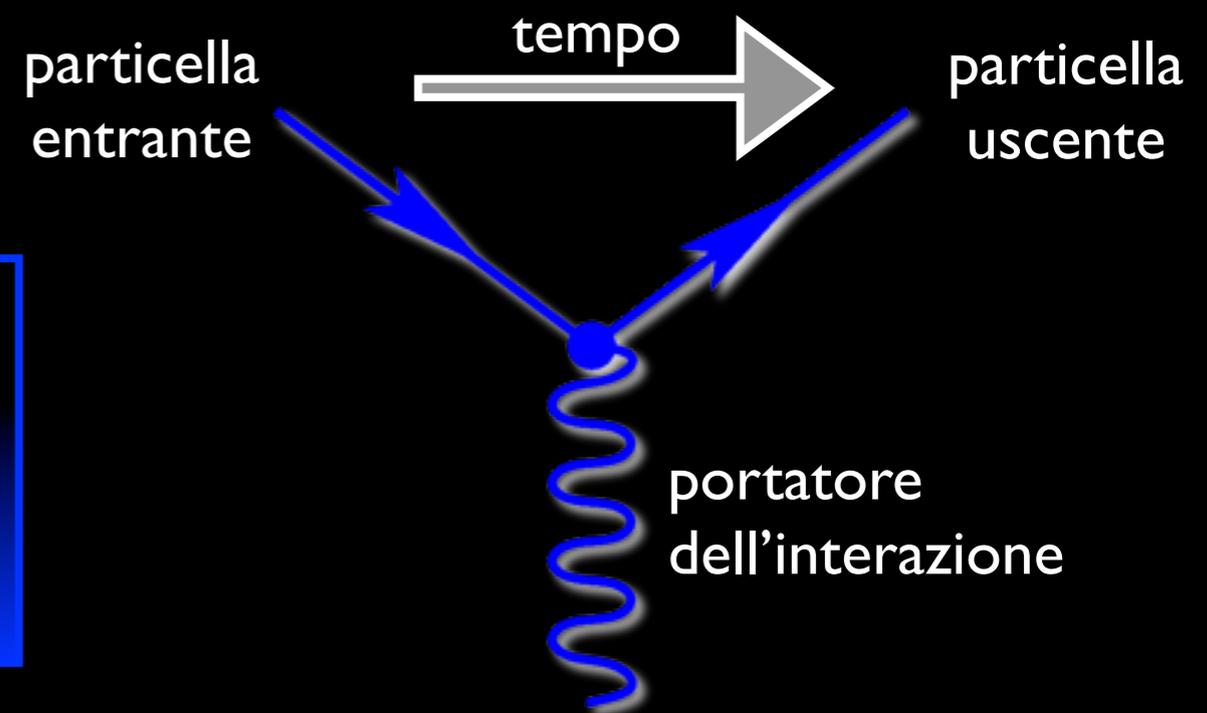
	I	II	III	
	2.4 MeV/c ² 2/3 1/2 u up	1.27 GeV/c ² 2/3 1/2 c charm	171.2 GeV/c ² 2/3 1/2 t top	0 0 1 γ photon
	4.8 MeV/c ² -1/3 1/2 d down	104 MeV/c ² -1/3 1/2 s strange	4.2 GeV/c ² -1/3 1/2 b bottom	0 0 1 g gluon
leptoni	<2.2 eV/c ² 0 1/2 ν_e electron neutrino	<0.17 MeV/c ² 0 1/2 ν_μ muon neutrino	<15.5 MeV/c ² 0 1/2 ν_τ tau neutrino	91.2 GeV/c ² 0 1 Z⁰ Z boson
	0.511 MeV/c ² -1 1/2 e electron	105.7 MeV/c ² -1 1/2 μ muon	1.777 GeV/c ² -1 1/2 τ tau	80.4 GeV/c ² -1 1 W[±] W boson

portatori dell'interazione

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

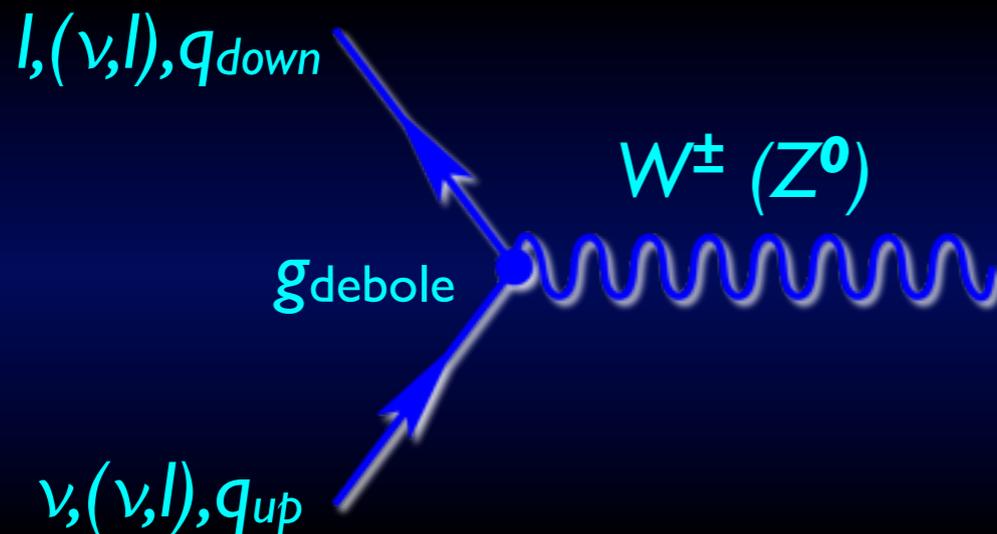


Intensità dell'interazione forte

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

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

Interazione debole

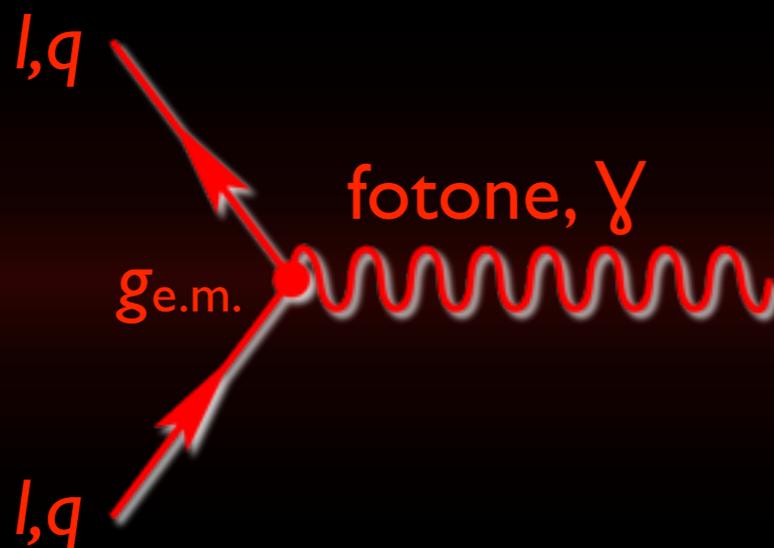


Intensità dell'interazione debole

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

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

Interazione elettromagnetica



Intensità dell'interazione elettromagnetica

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

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

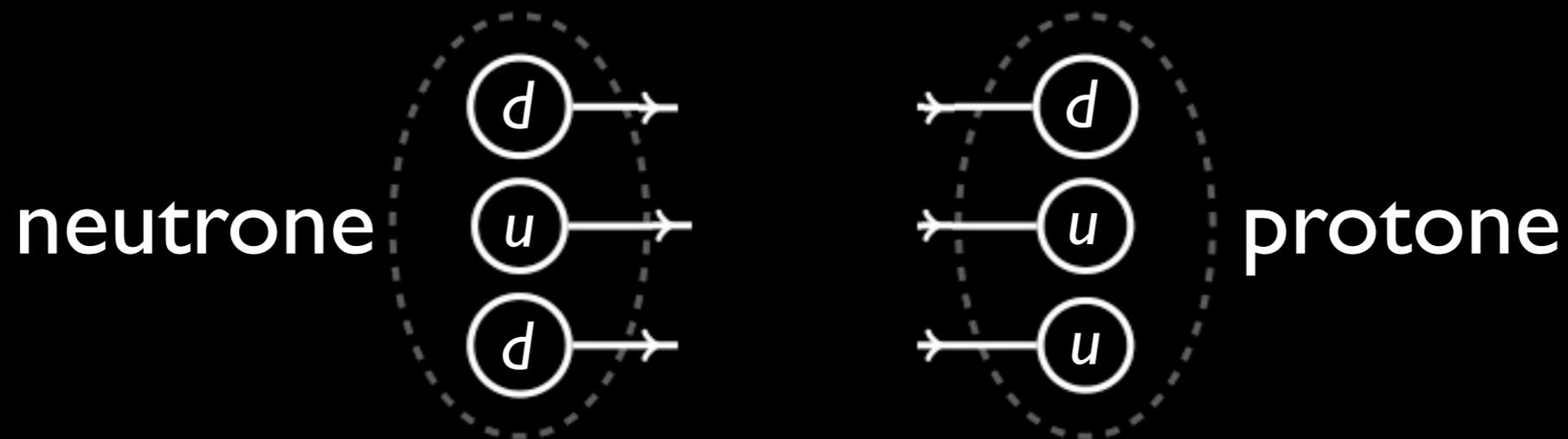
Come si usano...

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

Come si usano...

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

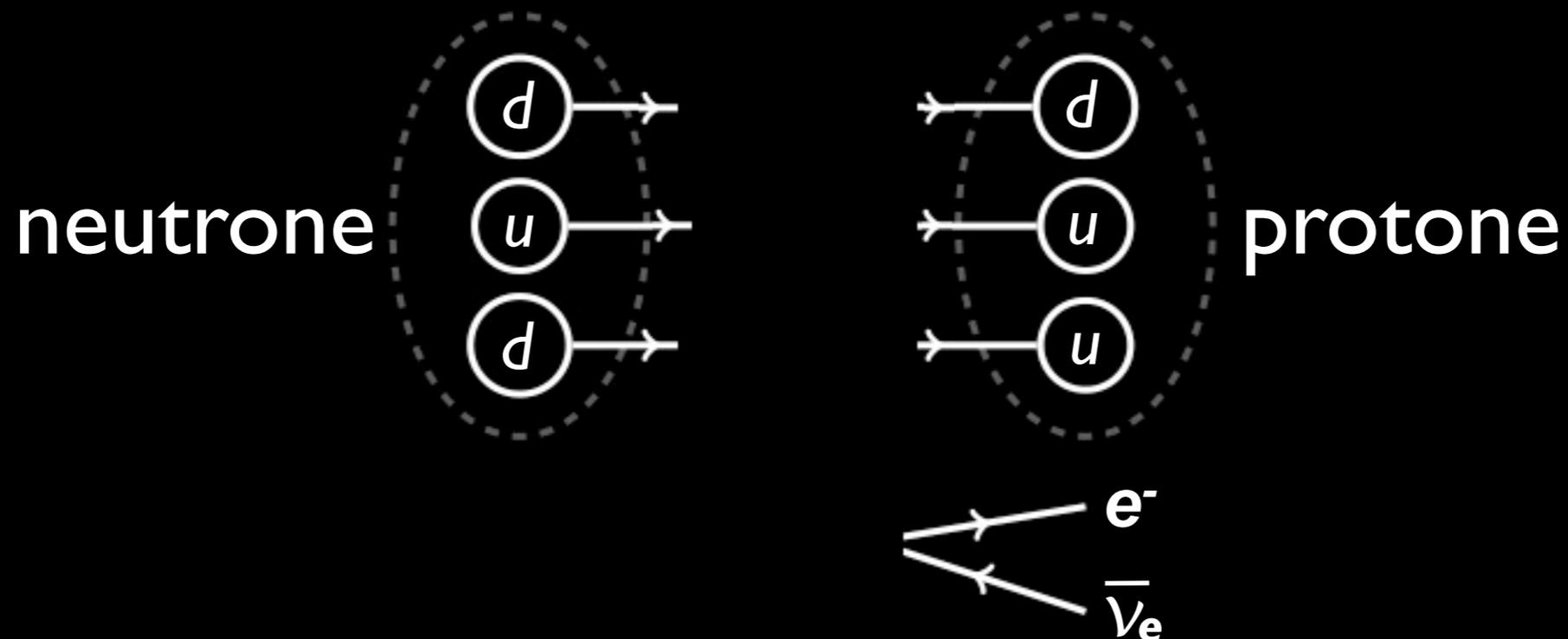
- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark: $p = |uud\rangle$ e $n = |udd\rangle$ (infatti sommando le cariche...)



Come si usano...

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

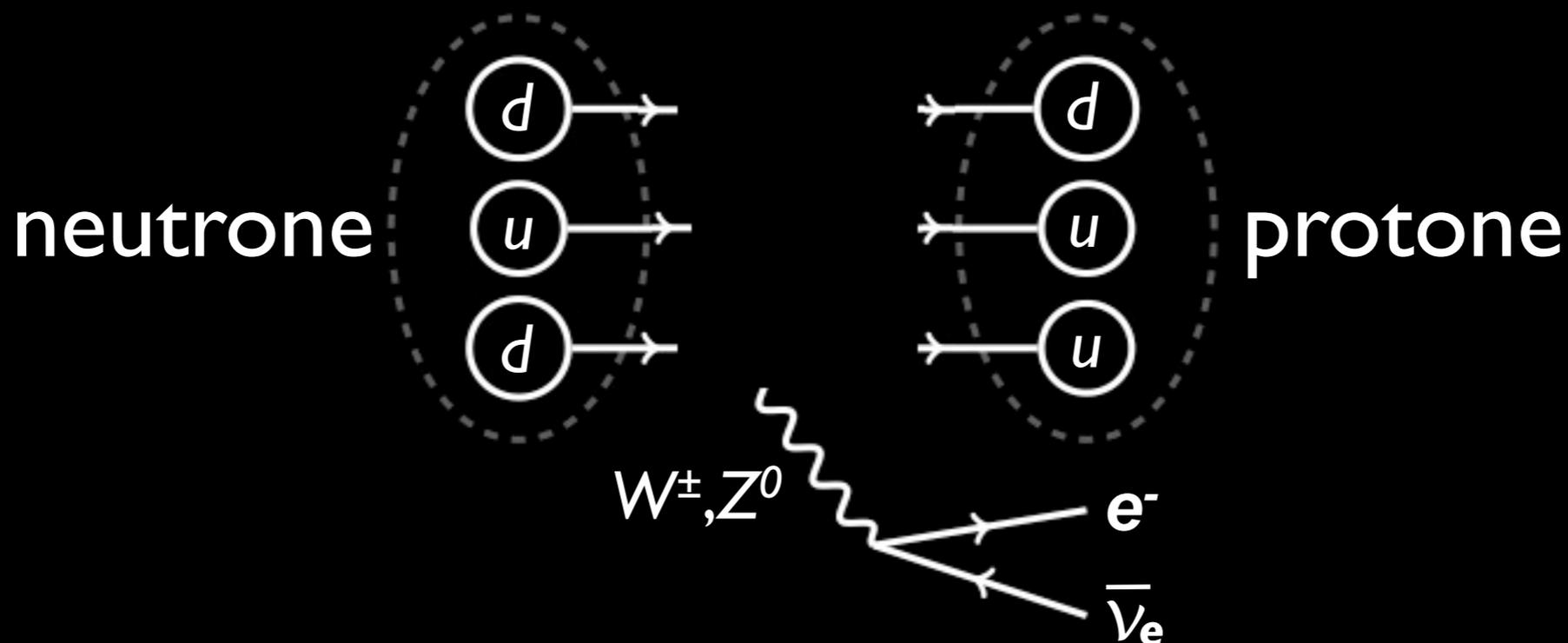
- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark: $p = |uud\rangle$ e $n = |udd\rangle$ (infatti sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino sono particelle elementari



Come si usano...

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

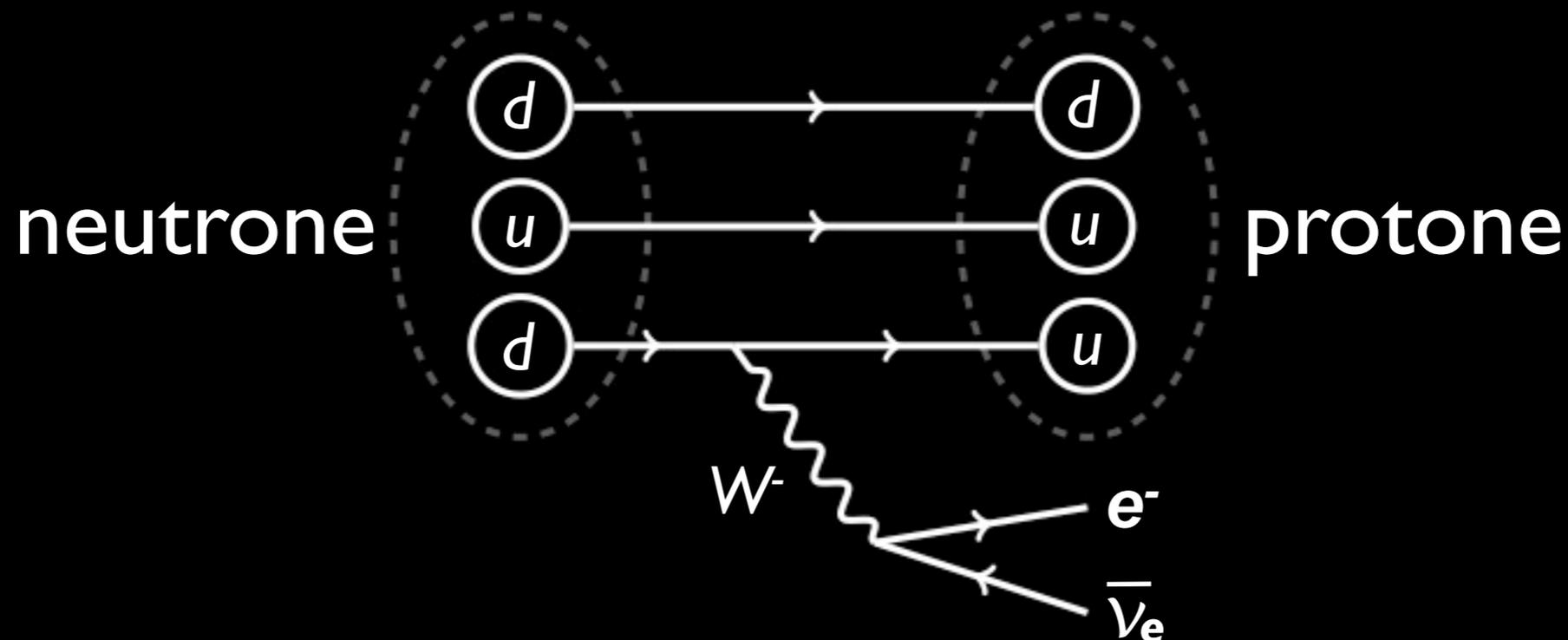
- Il protone ed il neutrone non sono particelle elementari, sono composti da quark: $p = |uud\rangle$ e $n = |udd\rangle$ (infatti sommando le cariche...)
- Sia l'elettrone che l'antineutrino sono particelle elementari
- Il neutrino interagisce **solo debolmente** l'interazione sarà caratterizzata dallo 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^-

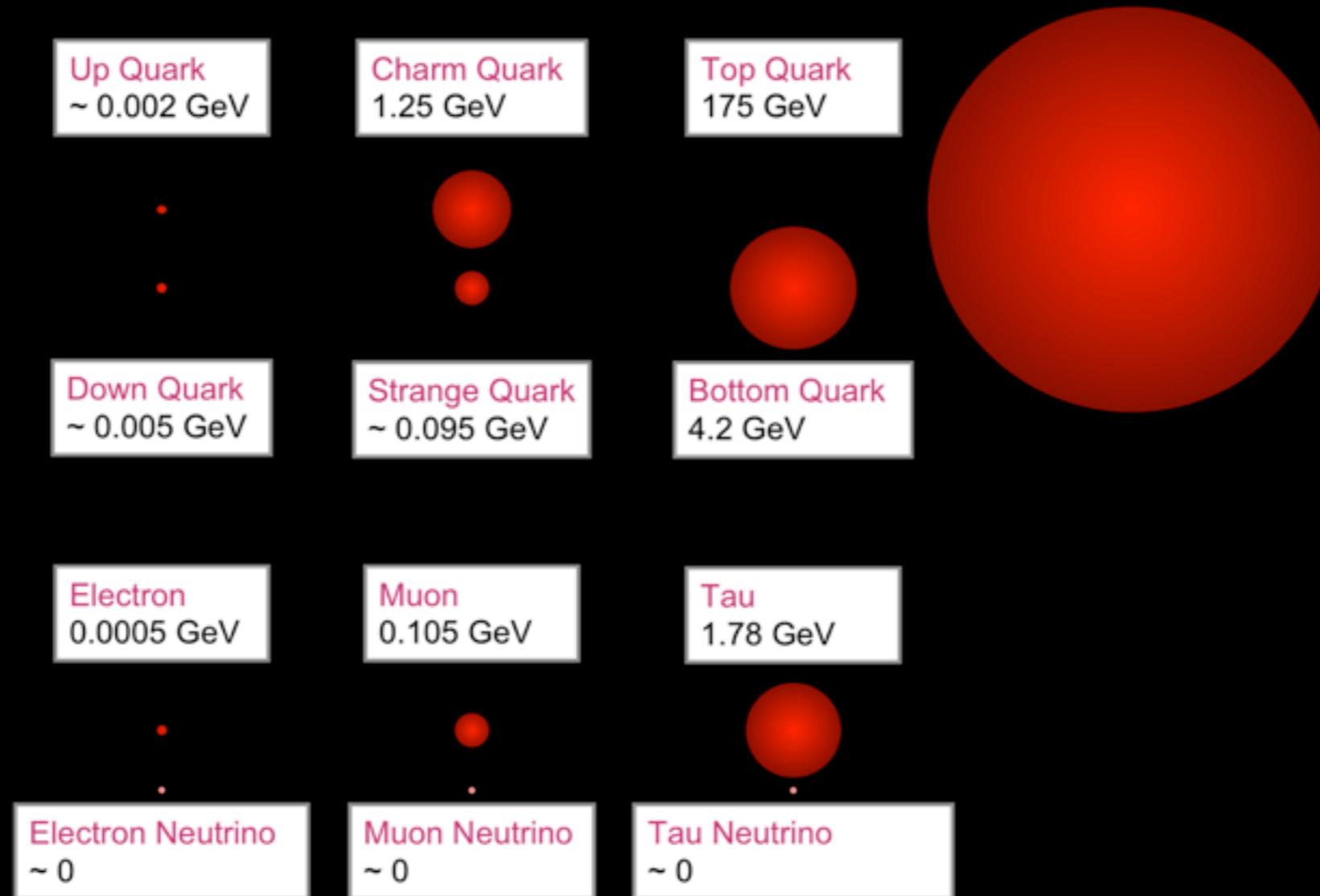


Il mistero delle masse

Le particelle del Modello Standard “nascono” con massa nulla

Il mistero delle masse

Le particelle del Modello Standard “nascono” con massa nulla

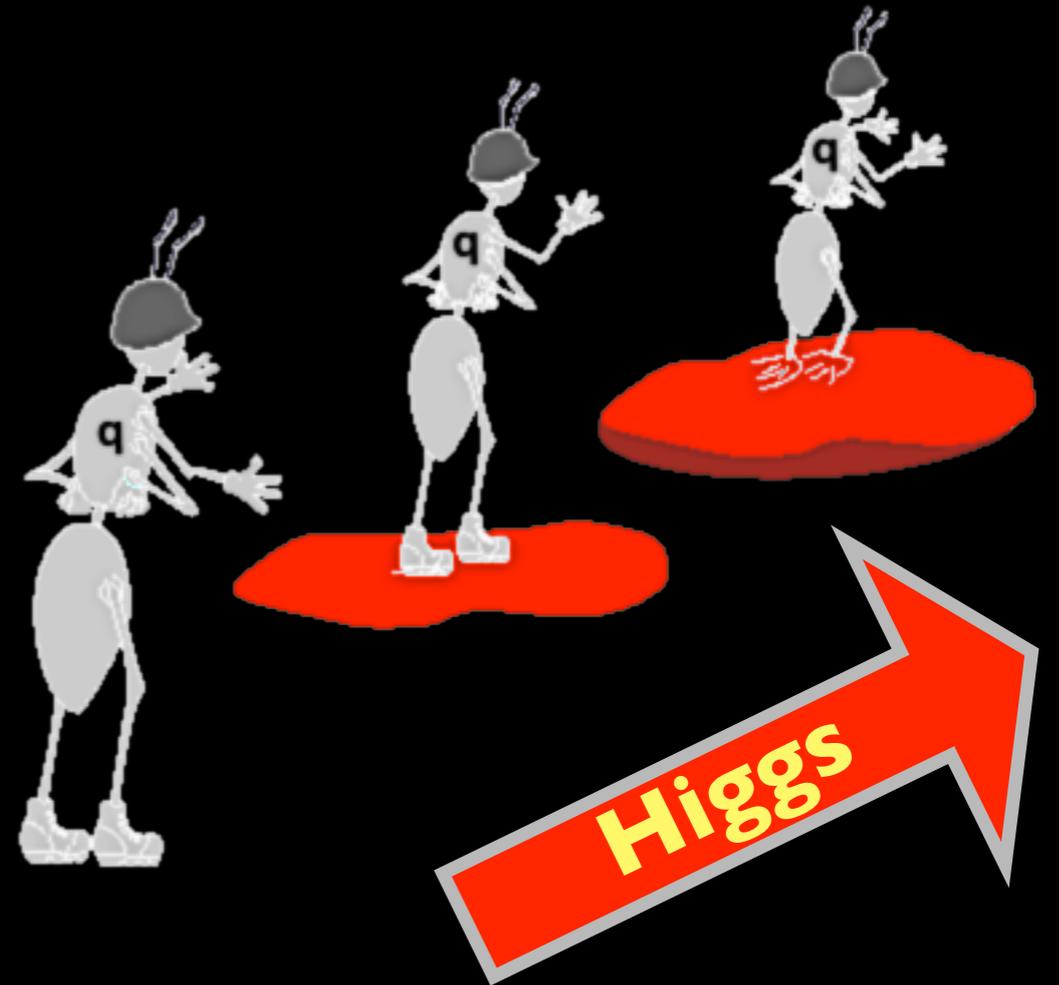
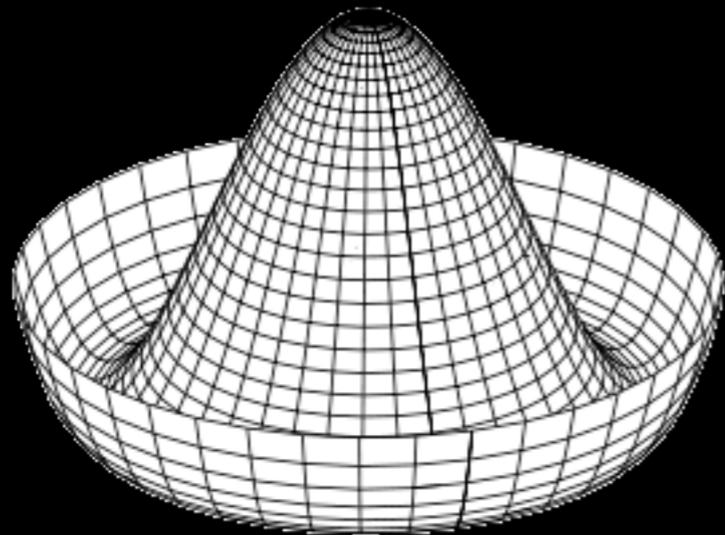


Sperimentalmente si osservano massa non nulle con differenza crescenti tra le generazione

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

Il campo di Higgs

- Il campo di Higgs è **scalare**, ha $spin = 0$, è l'**unico scalare del Modello Standard**.
- È un campo **diffuso** ed ha un valore costante in tutto lo spazio.
- Le particelle che si muovono “attraverso” tale campo interagiscono con esso come se fosse un **fluido resistente**.
- L'**inerzia** dovuta a tale interazione si traduce in massa.



$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

It is more important to have beauty in one's equations than to have them to fit experiment. . . because the discrepancy may be due to minor features that are not properly taken into account and that will get cleared up with further developments of the theory. . . It seems that if one is working from the point of view of getting beauty in one's equations, and if one has really a sound insight, one is on a sure line of progress.

P. A. M. Dirac

Bibliografia

