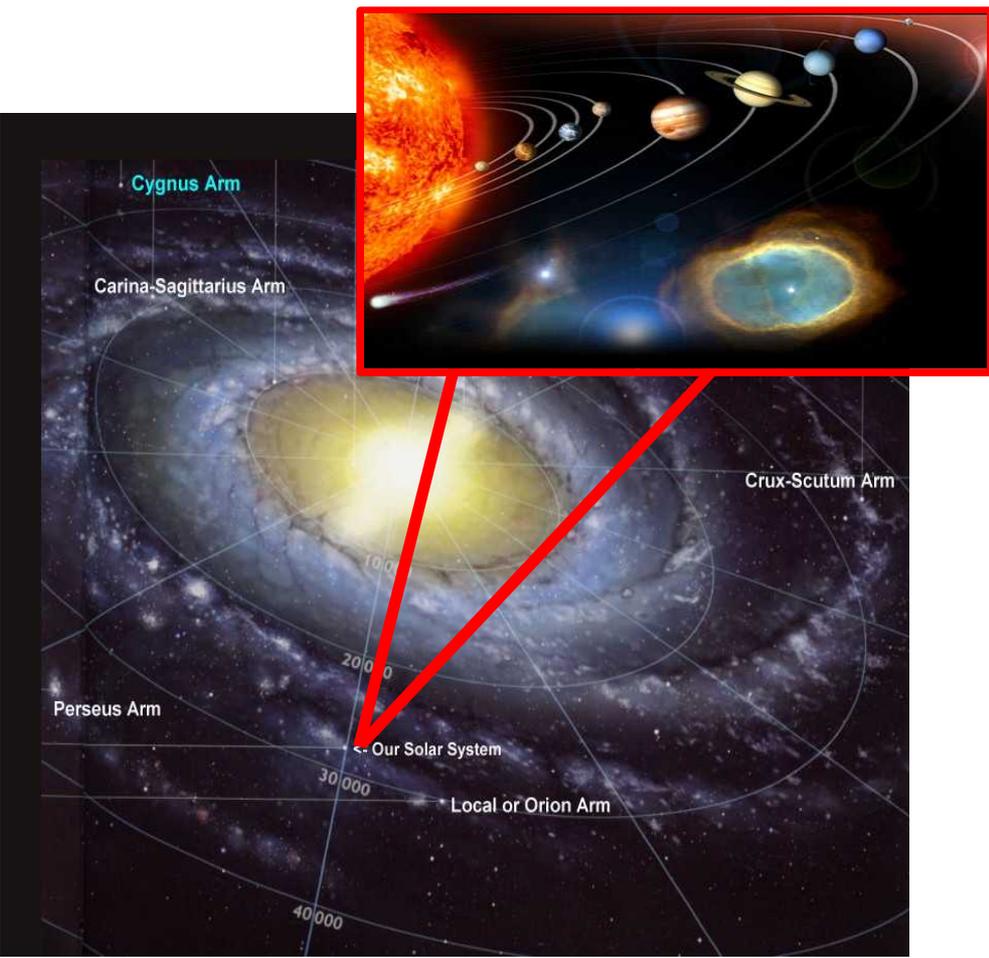
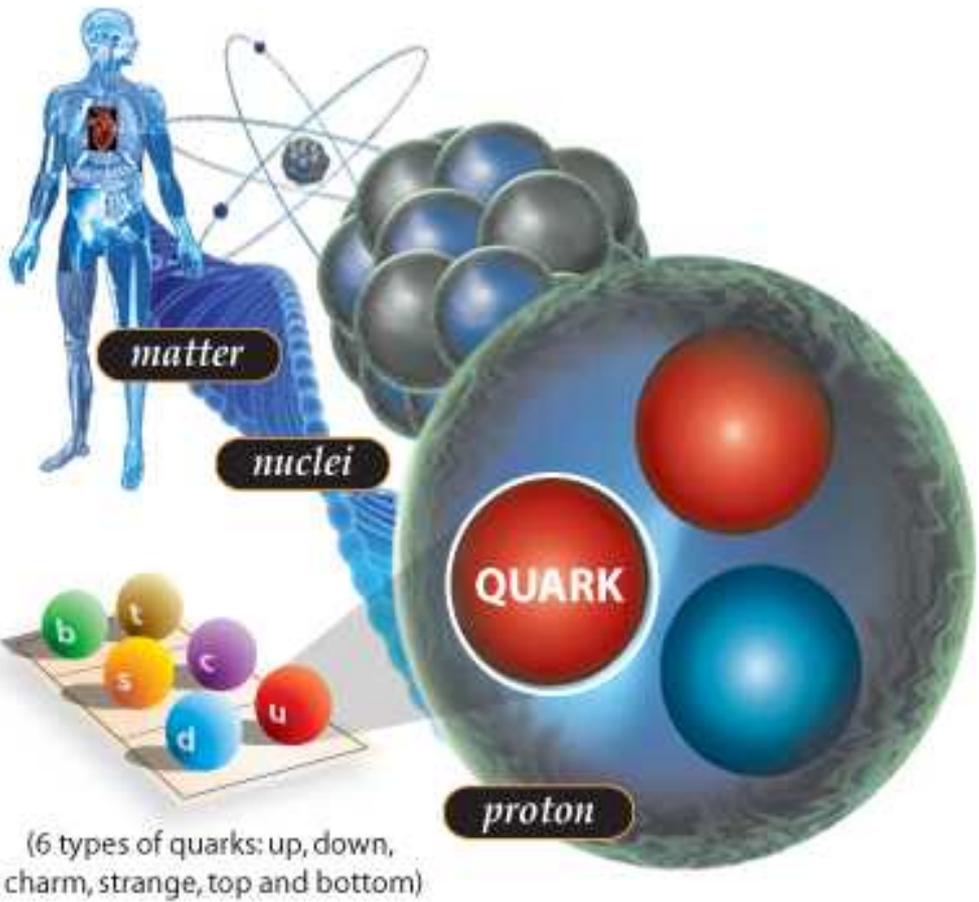


Introduzione al Modello Standard

Gino Isidori [*INFN-Frascati*]

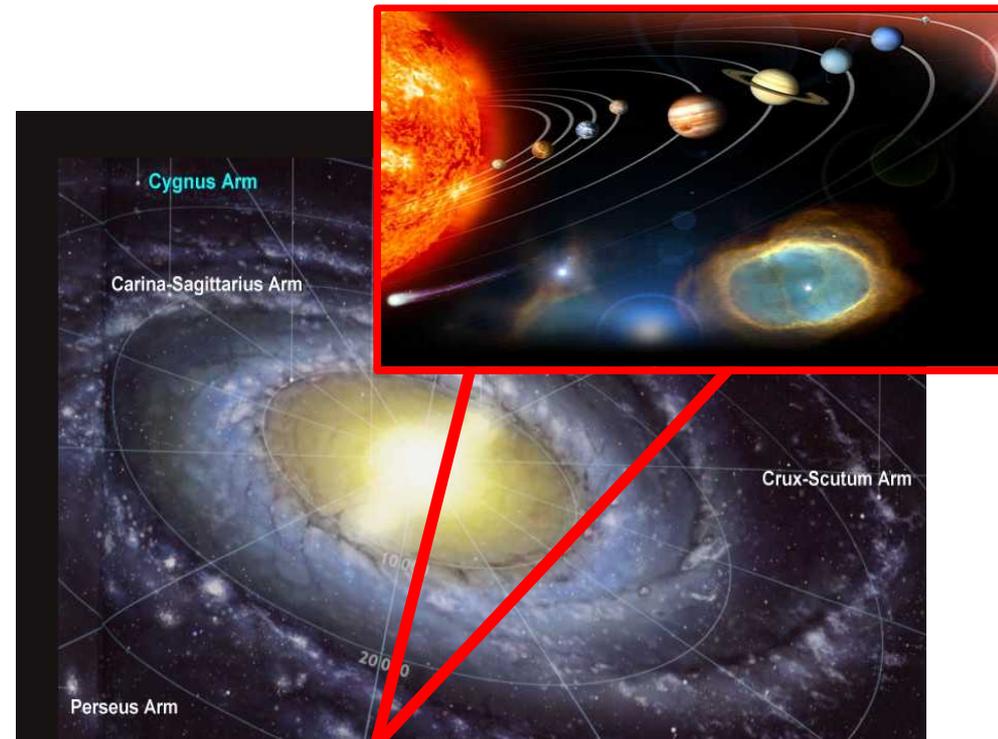
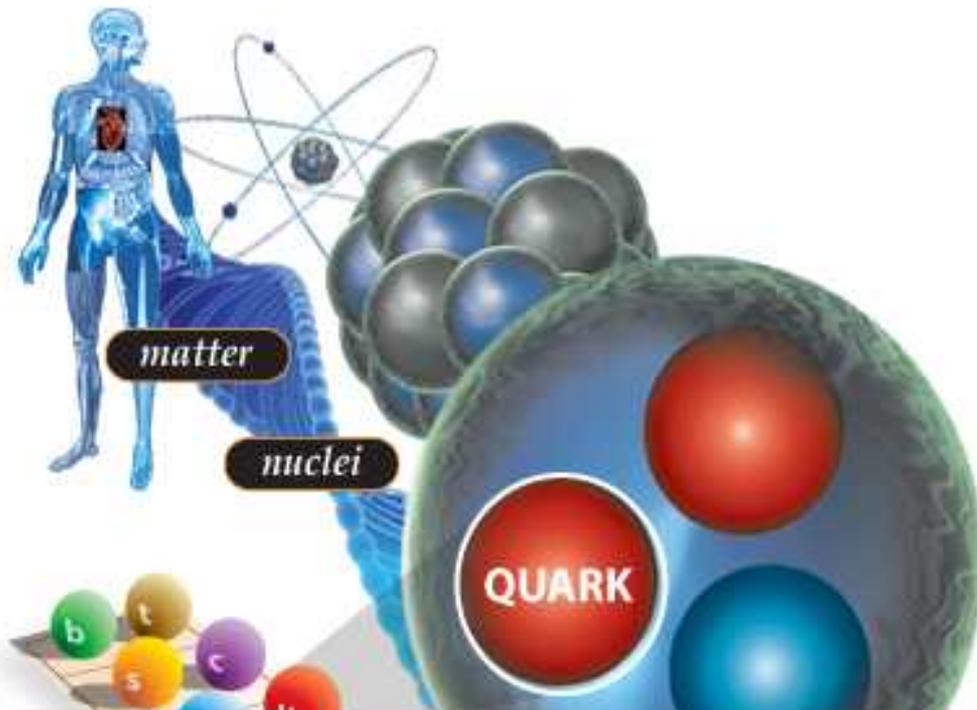
- ▶ Introduzione
- ▶ Modelli matematici e costanti fisiche
- ▶ La teoria della relatività
- ▶ La meccanica quantistica
- ▶ Campi e particelle
- ▶ Il Modello Standard
- ▶ Il bosone di Higgs
- ▶ Problemi aperti e nuove idee

I. Introduzione
[Cosa si intende per “Interazioni Fondamentali”?]



I. Introduzione

[*Cosa si intende per “Interazioni Fondamentali”?*]



Lo scopo di questo campo della fisica è comprendere la natura dei costituenti elementari della materia e la natura delle leggi universali che ne determinano il comportamento

► Introduzione

In questa ricerca negli ultimi 20 anni è emerso un modello matematico di grande successo che chiamiamo il Modello Standard

Il Modello Standard è un modello relativamente semplice, che descrive con successo (quasi) tutte le interazioni dei costituenti elementari della materia: dai nuclei atomici... alla struttura delle stelle!

► Introduzione

In questa ricerca negli ultimi 20 anni è emerso un modello matematico di grande successo che chiamiamo il Modello Standard

Il Modello Standard è un modello relativamente semplice, che descrive con successo (quasi) tutte le interazioni dei costituenti elementari della materia: dai nuclei atomici... alla struttura delle stelle!

In gergo tecnico, si tratta di:

- Una teoria di campo quantistica e relativistica, basata su
 - 2 Simmetrie fondamentali: simmetria di colore (interazioni forti) e simmetria elettrodebole (interazioni deboli ed elettromagnetiche)
 - 3 Costituenti fondamentali: le 3 famiglie di quarks e leptoni

► Introduzione

In questa ricerca negli ultimi 20 anni è emerso un modello matematico di grande successo che chiamiamo il Modello Standard

Il Modello Standard è un modello relativamente semplice, che descrive con successo (quasi) tutte le interazioni dei costituenti elementari della materia: dai nuclei atomici... alla struttura delle stelle!

In gergo tecnico, si tratta di:

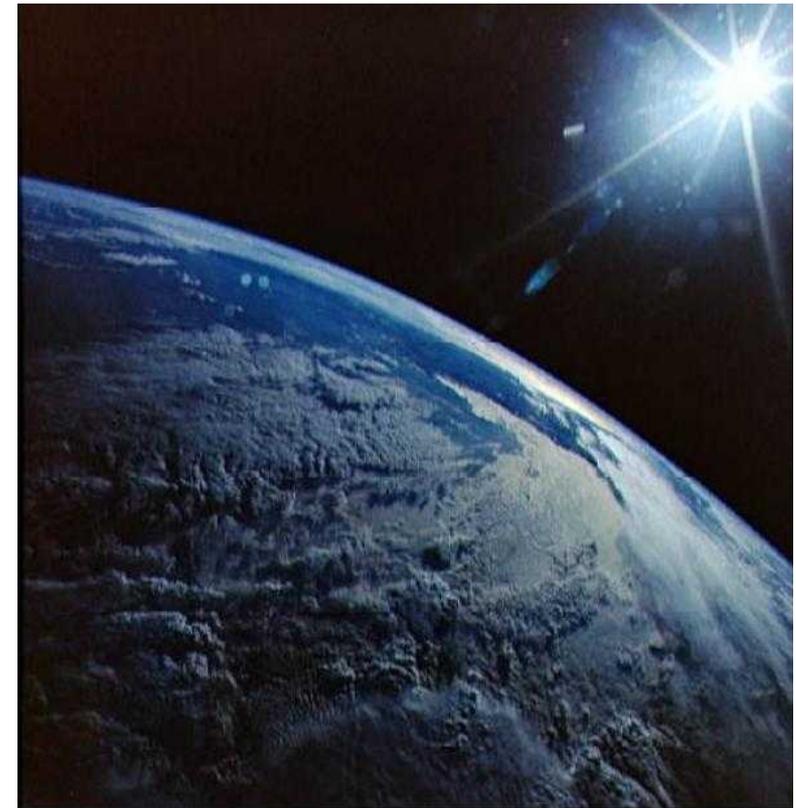
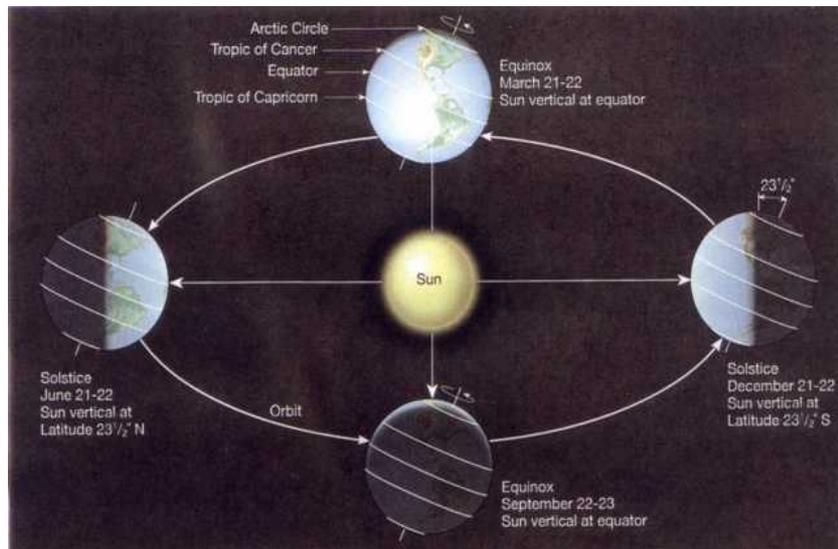
- Una teoria di campo quantistica e relativistica, basata su
 - 2 Simmetrie fondamentali: simmetria di colore (interazioni forti) e simmetria elettrodebole (interazioni deboli ed elettromagnetiche)
 - 3 Costituenti fondamentali: le 3 famiglie di quarks e leptoni

*Un gioco a squadre
con la palla...*

*...la palla si puo
toccare solo con i
piedi...*

*...11 giocatori per
squadra*

II. Modelli matematici e costanti fisiche



► Modelli matematici e costanti fisiche

Come ci ha insegnato Galileo, lo scopo della fisica è quello di trovare modelli matematici in grado di descrivere (e prevedere) i fenomeni naturali

Modello matematico = insieme di principi logici (leggi di simmetria, etc...)

⇒ serie di equazioni per *variabili adimensionali*

Unità
di misura

Fenomeni naturali [*grandezze dimensionali*]

► Modelli matematici e costanti fisiche

Come ci ha insegnato Galileo, lo scopo della fisica è quello di trovare modelli matematici in grado di descrivere (e prevedere) i fenomeni naturali

Modello matematico = insieme di principi logici (leggi di simmetria, etc...)

⇒ serie di equazioni per *variabili adimensionali*

Esempio: $h(t) = - \frac{1}{2} g t^2$

Coefficiente numerico
[fissato dalla teoria]

Costante fisica dimensionale
[determinata dagli esperimenti]

Unità
di misura

Fenomeni naturali [*grandezze dimensionali*]

► Modelli matematici e costanti fisiche

Come ci ha insegnato Galileo, lo scopo della fisica è quello di trovare modelli matematici in grado di descrivere (e prevedere) i fenomeni naturali

Modello matematico = insieme di principi logici (leggi di simmetria, etc...)

⇒ serie di equazioni per *variabili adimensionali*

In una teoria ideale tutti i **coefficienti numerici**
(costanti adimensionali) sono calcolabili

e le unità di misura sono automaticamente determinate
da **costanti fisiche dimensionali universali**

Unità
di misura

Fenomeni naturali [*grandezze dimensionali*]

► Modelli matematici e costanti fisiche

Come ci ha insegnato Galileo, lo scopo della fisica è quello di trovare modelli matematici in grado di descrivere (e prevedere) i fenomeni naturali

Modello matematico = insieme di principi logici (leggi di simmetria, etc...)

⇒ serie di equazioni per *variabili adimensionali*

In una teoria ideale tutti i **coefficienti numerici**
(costanti adimensionali) sono calcolabili

Unità
di misura

e le unità di misura sono automaticamente determinate
da **costanti fisiche dimensionali universali**

[spazio, tempo, energia] ⇒ *3 unità fondamentali*

Fenomeni naturali [*grandezze dimensionali*]

▶ Modelli matematici e costanti fisiche

La scelta più naturale per queste 3 unità (costanti) fondamentali è data da:

▶ La velocità della luce nel vuoto [c]

- Elettromagnetismo (eq.ⁿⁱ di Maxwell)
- Relatività ristretta ($E = m c^2, \dots$)

▶ La costante di Planck [\hbar]

- Meccanica quantistica (spin elettrone = $\hbar/2$,
principio di indeterminazione: $\Delta x \Delta p > \hbar$ & $\Delta E \Delta t > \hbar, \dots$)

▶ La costante di gravitazione universale [G]

- Legge gravitazione di Newton ($F = G m_1 m_2 / r^2$)
- Relatività generale

► Modelli matematici e costanti fisiche

La scelta più naturale per queste 3 unità (costanti) fondamentali è data da:

► La velocità della luce nel vuoto

$$c = 2.9979... \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad [\text{velocità} = \text{lunghezza} / \text{tempo}]$$

► La costante di Planck

$$\hbar = 1.0054... \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg} \quad [\text{azione} = \text{energia} \times \text{tempo}]$$

► La costante di gravitazione universale

$$G = 6.6742... \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad [\text{energia} \times \text{lunghezza} / \text{massa}^2]$$

Le 3 unità hanno valori molto poco naturali nel Sistema Internazionale (**m kg s**) poiché quest'ultimo è un sistema convenzionale, scelto *a misura d'uomo*.

Ma l'*universalità* di queste costanti fisiche ci segnala che in natura esistono delle unità fondamentali (non convenzionali)

► Modelli matematici e costanti fisiche

La scelta più naturale per queste 3 unità (costanti) fondamentali è data da:

► La velocità della luce nel vuoto

$$c = 2.9979... \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad [\text{velocità} = \text{lunghezza} / \text{tempo}]$$

► La costante di Planck

$$\hbar = 1.0054... \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg} \quad [\text{azione} = \text{energia} \times \text{tempo}]$$

► La costante di gravitazione universale

$$G = 6.6742... \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad [\text{energia} \times \text{lunghezza} / \text{massa}^2]$$

Nel *Modello Standard* c e \hbar sono perfettamente integrate come unità fondamentali, questo ci permette di misurare/descrivere tutti i fenomeni in unità di energia

$$\text{Esempio: } E = 1 \text{ GeV} \Rightarrow E/c^2 \approx 2 \times 10^{-27} \text{ Kg} \quad \hbar/E \approx 7 \times 10^{-25} \text{ s} \quad \hbar c/E \approx 2 \times 10^{-16} \text{ m}$$

tipica energia di
legame dei quarks
nei nuclei

Massa del protone

tempo tipico degli urti
fra quarks nei nuclei

“estensione spaziale”
del protone

► Modelli matematici e costanti fisiche

La scelta più naturale per queste 3 unità (costanti) fondamentali è data da:

► La velocità della luce nel vuoto

$$c = 2.9979... \times 10^8 \text{ m s}^{-1} \quad [\text{velocità} = \text{lunghezza} / \text{tempo}]$$

► La costante di Planck

$$\hbar = 1.0054... \times 10^{-34} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ kg} \quad [\text{azione} = \text{energia} \times \text{tempo}]$$

► La costante di gravitazione universale

$$G = 6.6742... \times 10^{-11} \text{ m}^3 \text{ s}^{-2} \text{ kg}^{-1} \quad [\text{energia} \times \text{lunghezza} / \text{massa}^2]$$

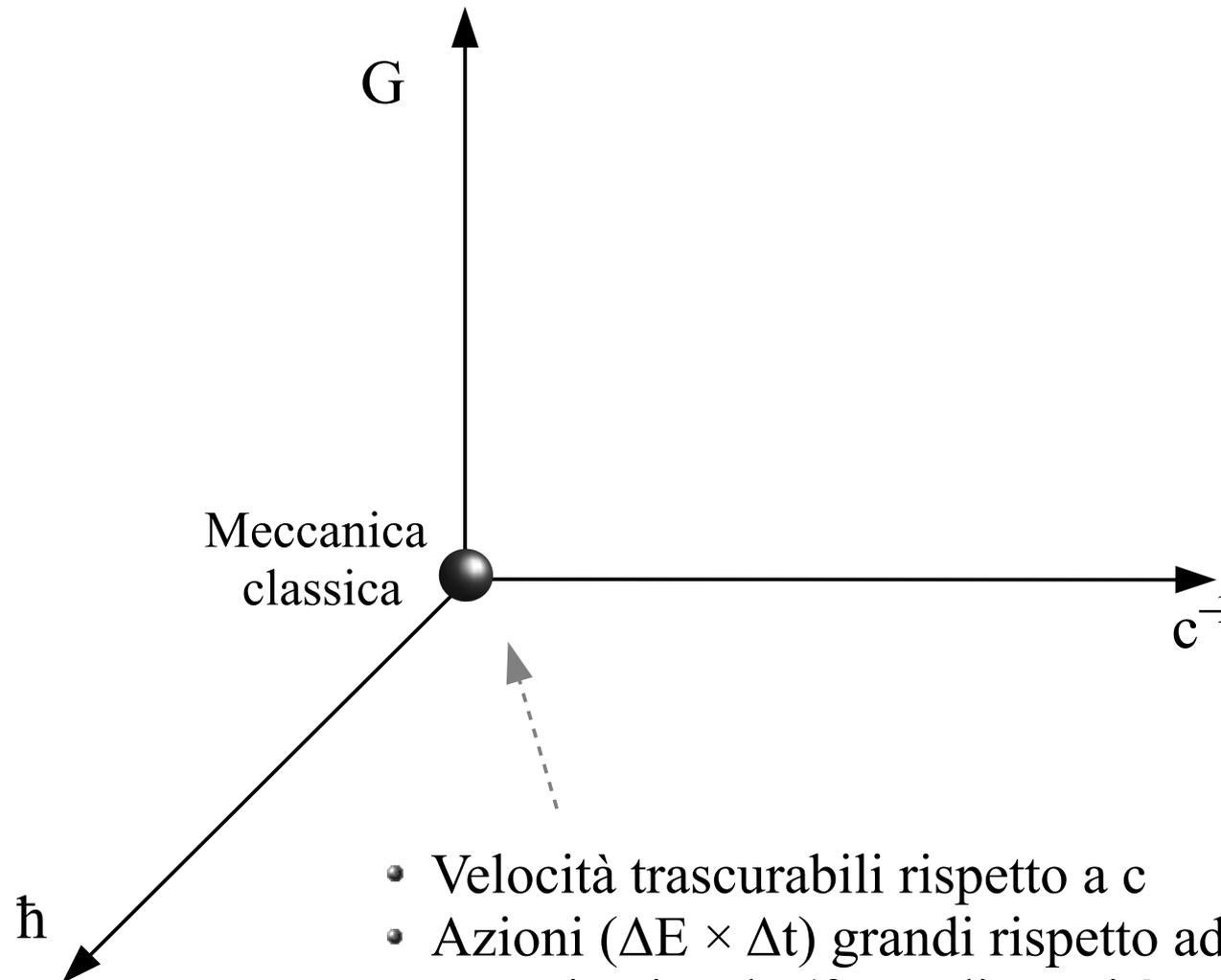
Nel *Modello Standard* c e \hbar sono perfettamente integrate come unità fondamentali, questo ci permette di misurare/descrivere tutti i fenomeni in unità di energia

Ma non abbiamo ancora capito se esiste una scala fondamentale di energia.

L'indicazione “naturale” (ottenuta combinando le 3 costanti) porta ad ipotizzare l'esistenza di una scala di energia molto alta:

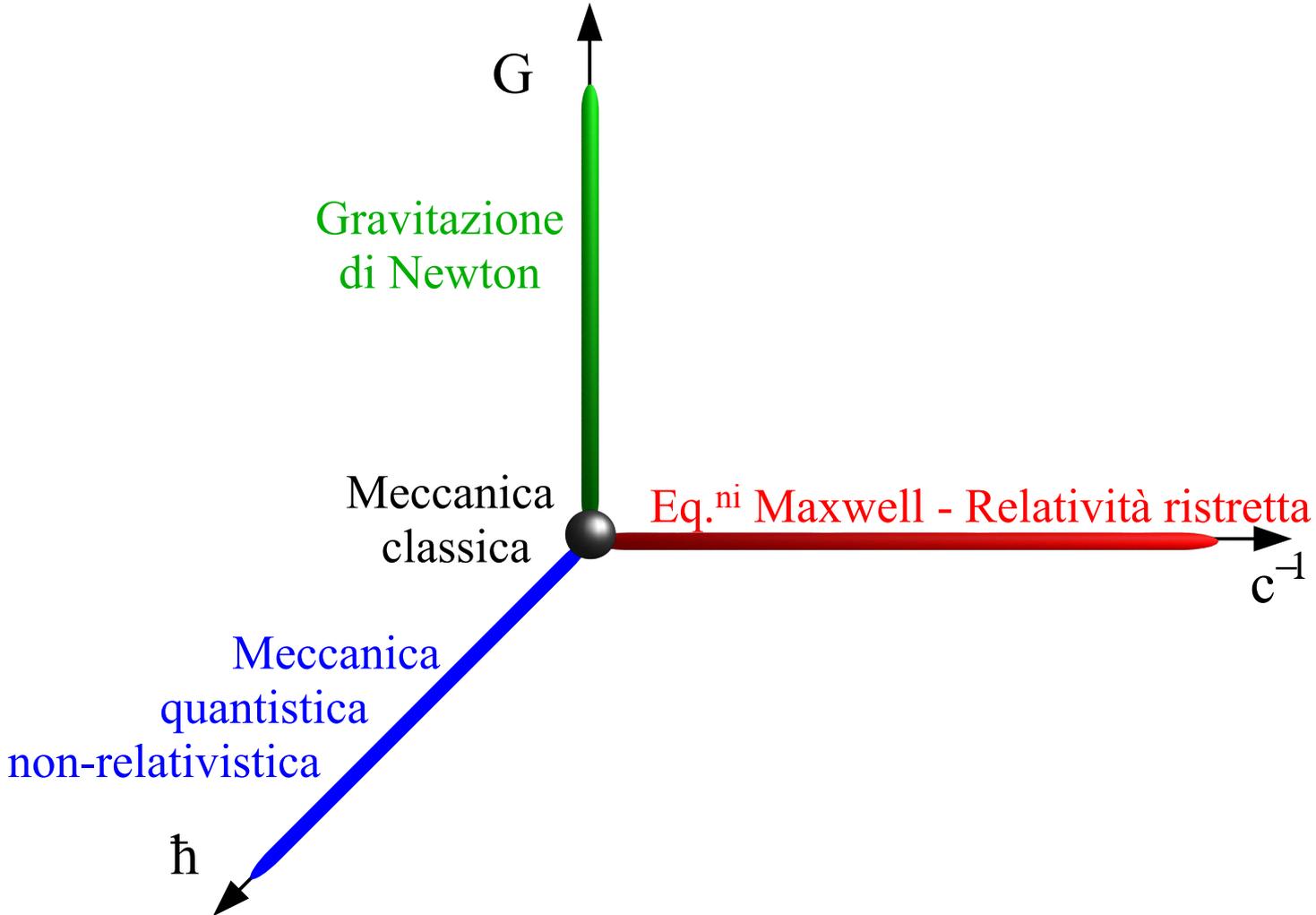
$$M_{\text{Planck}} = (\hbar c / G)^{1/2} \approx 10^{19} M_{\text{proton}}$$

► Modelli matematici e costanti fisiche

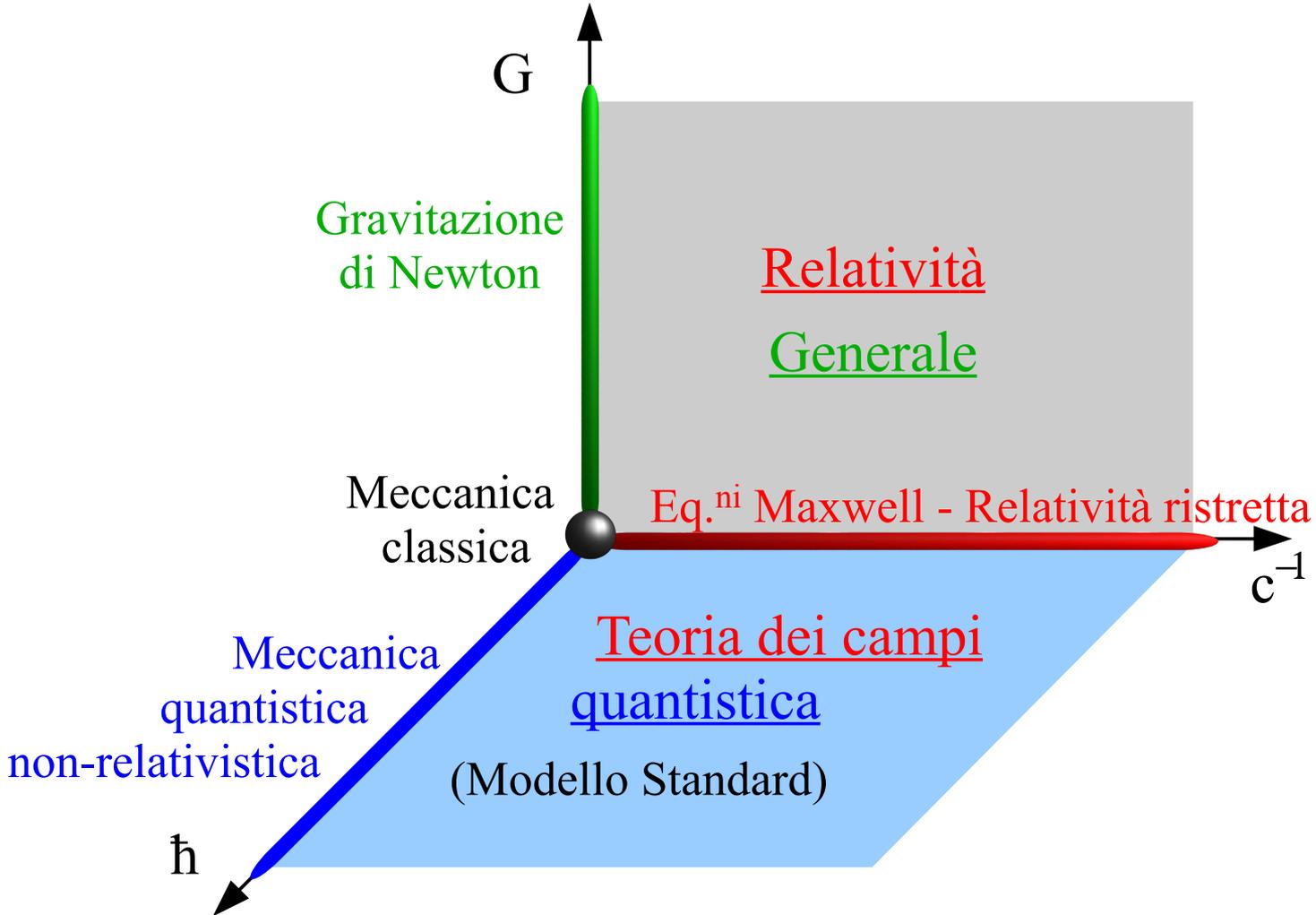


- Velocità trascurabili rispetto a c
- Azioni ($\Delta E \times \Delta t$) grandi rispetto ad \hbar
- Energia piccola (forza di gravità trascurabile)

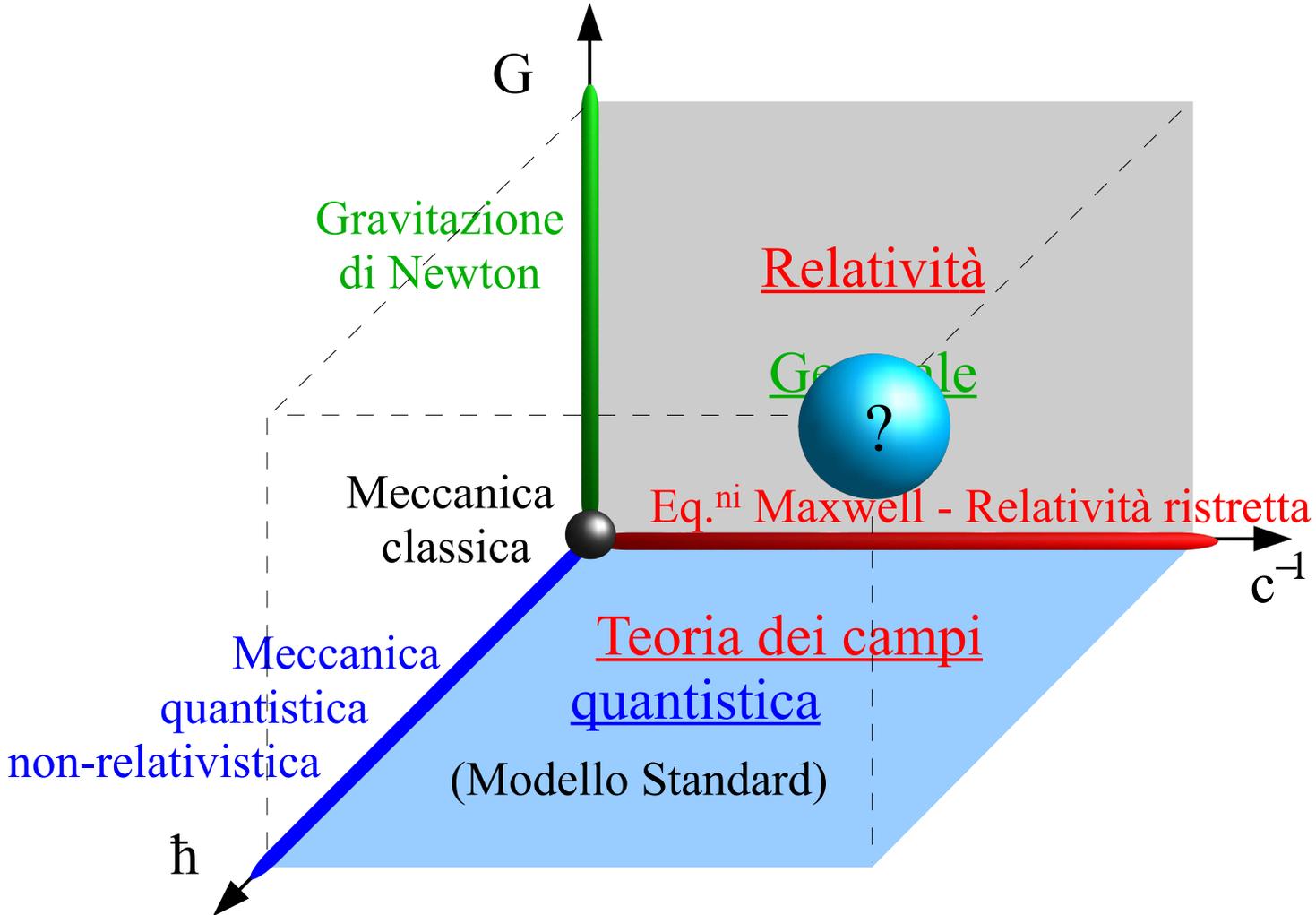
► Modelli matematici e costanti fisiche



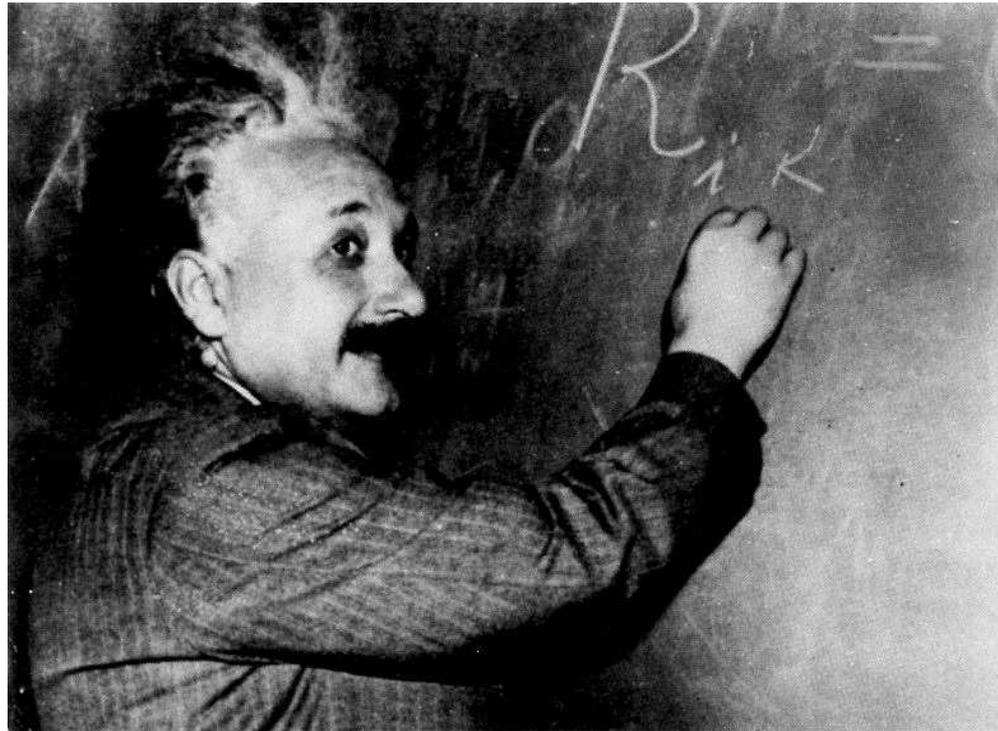
► Modelli matematici e costanti fisiche



► Modelli matematici e costanti fisiche



III. La Teoria della relatività



► La teoria della relatività

La teoria della relatività ristretta [Einstein 1905, ma anche Lorentz, Poincare e Minkowski] nasce dall'esigenza di conciliare due principi molto semplici, apparentemente in contraddizione fra loro:

- Invarianza delle leggi fisiche per sistemi di riferimento in moto uniforme [relatività Galileiana]
 - ➔ Non esiste un sistema di riferimento privilegiato
 - ➔ La velocità $v = \Delta x / \Delta t$ è una grandezza relativa (dipende dall'osservatore)
- Invarianza della velocità della luce nel vuoto [vari esperimenti ad inizio '900 + eq.ⁿⁱ di Maxwell]

► La teoria della relatività

La teoria della relatività ristretta [Einstein 1905, ma anche Lorentz, Poincare e Minkowski] nasce dall'esigenza di conciliare due principi molto semplici, apparentemente in contraddizione fra loro:

- Invarianza delle leggi fisiche per sistemi di riferimento in moto uniforme [relatività Galileiana]

- ➔ Non esiste un sistema di riferimento privilegiato
- ➔ La velocità $v = \Delta x / \Delta t$ è una grandezza relativa (dipende dall'osservatore)

- Invarianza della velocità della luce nel vuoto [vari esperimenti ad inizio '900 + eq.ⁿⁱ di Maxwell]

- ➔ Anche le misure di spazio e tempo (Δx & Δt) sono grandezze relative (dipendono dall'osservatore)
- ➔ La variazione delle misure di spazio e tempo è tale che tutti gli osservatori vedono la luce viaggiare alla stessa velocità (c)

Non c'è alcuna contraddizione !

► La teoria della relatività

Le tre coordinate spaziali ed il tempo costituiscono uno spazio vettoriale a quattro dimensioni [**spazio-tempo**]:



Nel caso classico queste trasformazioni conservano separatamente gli intervalli di spazio e tempo: Δt & $(\Delta \vec{X})^2$.

Nel caso relativistico si conserva solo la combinazione:

$$\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta \vec{X})^2$$

► La teoria della relatività

Le tre coordinate spaziali ed il tempo costituiscono uno spazio vettoriale a quattro dimensioni [**spazio-tempo**]:



Nel caso classico queste trasformazioni conservano separatamente gli intervalli di spazio e tempo: Δt & $(\Delta \vec{X})^2$.

Nel caso relativistico si conserva solo la combinazione:

$$\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta \vec{X})^2$$

L'invarianza delle eq.ⁿⁱ del moto sotto tali trasformazioni implica:

- ➔ Conservazione impulso
- ➔ Conservazione energia
- ➔ Conservazione momento angolare
- ➔ Equivalenza massa energia [$E=mc^2$]

► La teoria della relatività

Le tre coordinate spaziali ed il tempo costituiscono uno spazio vettoriale a quattro dimensioni [**spazio-tempo**]:



Nel caso classico queste trasformazioni conservano separatamente gli intervalli di spazio e tempo: Δt & $(\Delta \vec{x})^2$.

Nel caso relativistico si conserva solo la combinazione:

$$\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta \vec{x})^2$$

La luce si muove in questo spazio seguendo traiettorie caratterizzate da $\Delta s=0$

► La teoria della relatività

La quantità Δs^2 che resta invariante sotto trasformazioni spazio-temporali definisce la *metrica* (o la geometria) dello spazio tempo

Il (grande!) salto logico necessario per passare dalla relatività ristretta alla **relatività generale** è abbandonare anche l'ipotesi che esista una geometria prestabilita.

► La teoria della relatività

La quantità Δs^2 che resta invariante sotto trasformazioni spazio-temporali definisce la *metrica* (o la geometria) dello spazio tempo

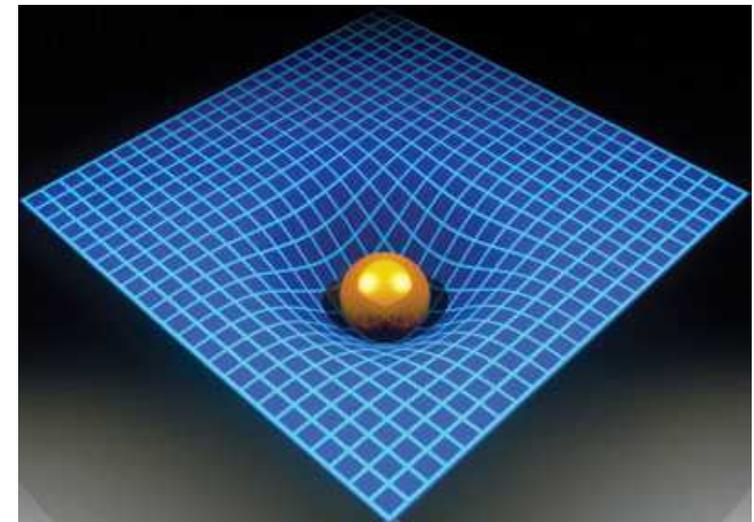
Il (grande!) salto logico necessario per passare dalla relatività ristretta alla **relatività generale** è abbandonare anche l'ipotesi che esista una geometria prestabilita. In questo modo è possibile interpretare la gravità non come una forza esterna, ma come una deformazione dello spazio tempo:

$$\Delta s^2 = c^2 (\Delta t)^2 - (\Delta \vec{x})^2 \quad \longrightarrow \quad \Delta s^2 = f(x,t)$$

sistema
inerziale

f = funzione che dipende dalla
distribuzione di energia
tramite **G**

La distribuzione di materia ed energia nello spazio non induce una forza, ma deforma lo spazio-tempo: i corpi (e la luce) si muovono sempre secondo le traiettorie di minima energia, che tuttavia in generale non sono più delle rette.



► La teoria della relatività

La quantità Δs^2 che resta invariante sotto trasformazioni spazio-temporali definisce la *metrica* (o la geometria) dello spazio tempo

Il (grande!) salto logico necessario per passare dalla relatività ristretta alla **relatività generale** è abbandonare anche l'ipotesi che esista una geometria prestabilita. In questo modo è possibile interpretare la gravità non come una forza esterna, ma come una deformazione dello spazio tempo:

N.B.: questa interpretazione “geometrica” della forza di gravità è possibile grazie all'equivalenza fra massa *inerziale* e massa *gravitazionale*

$$a = F_{\text{generica}} / m$$

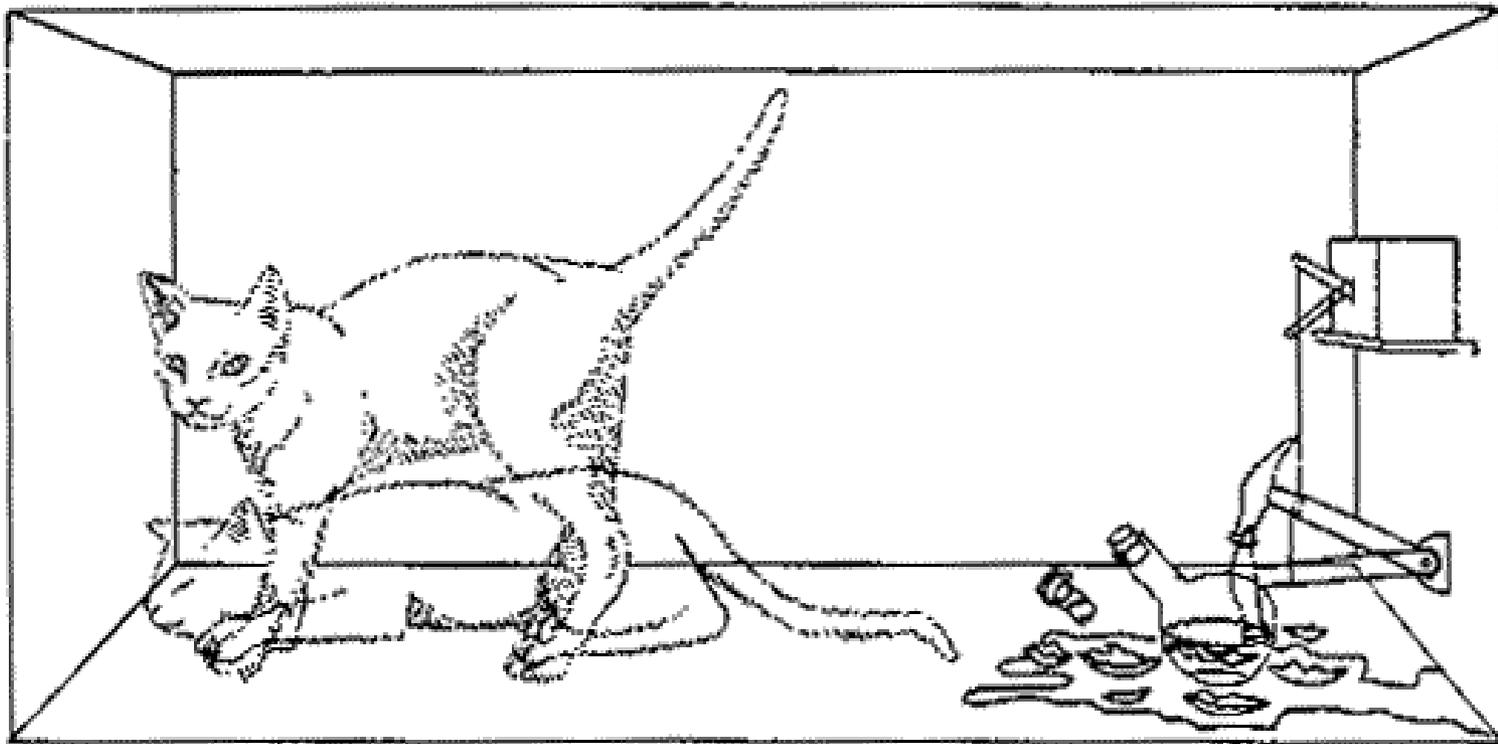
$$F_{\text{gravity}} = G m M / r^2$$

→

particelle con masse diverse hanno la stessa accelerazione in uno stesso campo gravitazionale

Difficile (impossibile?) generalizzazione nel caso delle altre interazioni

IV. La meccanica quantistica



► La meccanica quantistica

Storicamente, la formulazione matematica della meccanica quantistica (e della teoria quantistica dei campi) è stato un processo molto diverso (per molti aspetti più tormentato) rispetto alla formulazione della teoria della relatività.

Probabilmente anche per questo motivo la meccanica quantistica viene spesso introdotta in modo semi-storico, partendo dai vari fenomeni (non facilmente collegabili fra loro) che dimostrarono l'inadeguatezza della meccanica classica:

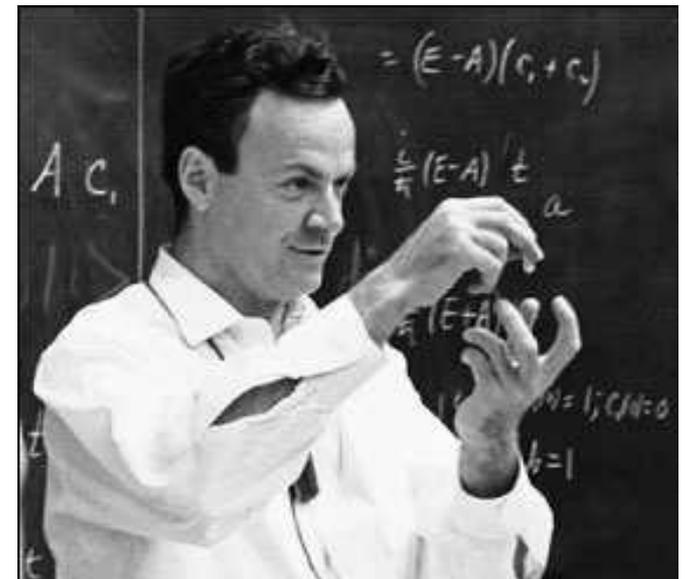
- **Quantizzazione dell'energia** [radiazione corpo nero, effetto fotoelettrico,...]
- **Principio di indeterminazione** [$\Delta x \Delta p > \hbar$ & $\Delta E \Delta t > \hbar$]
- **Dualismo onda particella** [esperimenti di diffrazione degli elettroni]

► La meccanica quantistica

Storicamente, la formulazione matematica della meccanica quantistica (e della teoria quantistica dei campi) è stato un processo molto diverso (per molti aspetti più tormentato) rispetto alla formulazione della teoria della relatività.

Probabilmente anche per questo motivo la meccanica quantistica viene spesso introdotta in modo semi-storico, partendo dai vari fenomeni (non facilmente collegabili fra loro) che dimostrarono l'inadeguatezza della meccanica classica:

Un approccio più moderno -basato sul cosiddetto metodo dell'*integrale sui cammini* [Feynman 1942]- ci permette di evidenziare meglio il limite classico della teoria, il carattere unitario dei fenomeni quantistici, e la naturale connessione con la teoria quantistica dei campi.



► La meccanica quantistica

Nella meccanica classica, le eq.ⁿⁱ che ci permettono di descrivere la traiettoria di una particella (ovvero determinare *posizione* & *velocità*) possono essere dedotte da un principio variazionale: il *principio di minima azione*

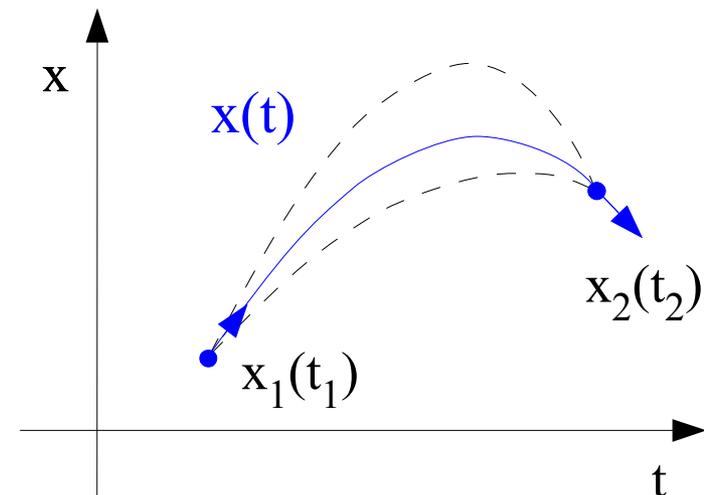
► La meccanica quantistica

Nella meccanica classica, le eq.ⁿⁱ che ci permettono di descrivere la traiettoria di una particella (ovvero determinare *posizione* & *velocità*) possono essere dedotte da un principio variazionale: il *principio di minima azione*

$$\text{Azione}[x(t)] = \int dt \left[\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right]$$

Somma su tutti gli intervalli di tempo di
 $[E_{\text{cinetica}} - E_{\text{potenziale}}] \times \Delta t$

Fra tutte le traiettorie possibili, la particella
 “*sceglie*” quella che minimizza l'azione



► La meccanica quantistica

Nella meccanica classica, le eq.ⁿⁱ che ci permettono di descrivere la traiettoria di una particella (ovvero determinare *posizione* & *velocità*) possono essere dedotte da un principio variazionale: il *principio di minima azione*

$$\text{Azione}[x(t)] = \int dt \left[\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right]$$

Somma su tutti gli intervalli di tempo di

$$\left[E_{\text{cinetica}} - E_{\text{potenziale}} \right] \times \Delta t$$

Fra tutte le traiettorie possibili, la particella “*sceglie*” quella che minimizza l'azione

Minimizzazione
dell'Azione



$$F = m a$$

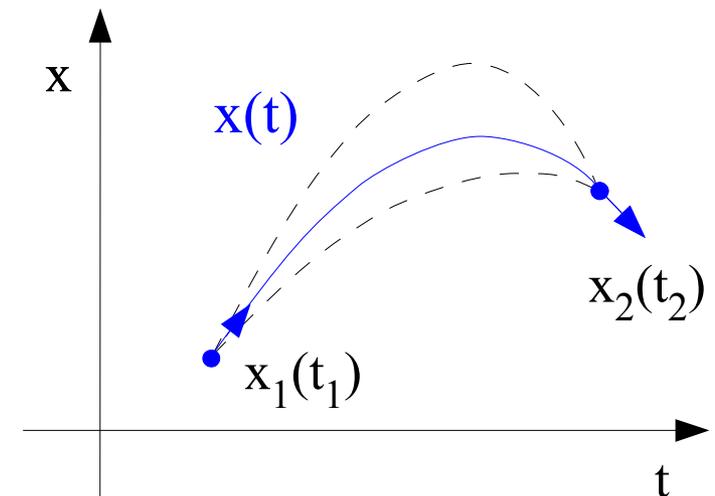
► La meccanica quantistica

Nella meccanica classica, le eq.ⁿⁱ che ci permettono di descrivere la traiettoria di una particella (ovvero determinare *posizione* & *velocità*) possono essere dedotte da un principio variazionale: il *principio di minima azione*

$$\text{Azione}[x(t)] = \int dt \left[\frac{1}{2} m v^2 - V(x) \right]$$

Somma su tutti gli intervalli di tempo di
 $\left[E_{\text{cinetica}} - E_{\text{potenziale}} \right] \times \Delta t$

Fra tutte le traiettorie possibili, la particella
 “*sceglie*” quella che minimizza l'azione



Mentre il concetto di eq.ⁿⁱ del moto perde di significato nell'ambito della meccanica quantistica, quello di azione (e traiettoria) continuano a rivestire un ruolo molto importante.

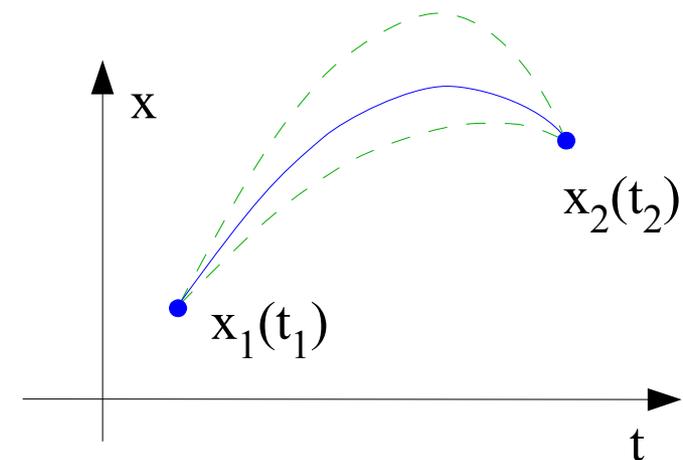
► La meccanica quantistica

I principi fondamentali della meccanica quantistica possono essere formulati nel modo seguente:

- A livello fondamentale [o meglio per processi fisici la cui azione complessiva è confrontabile con la costante di Planck] è impossibile determinare l'evoluzione di un sistema in modo deterministico. Tuttavia, ad ogni processo possiamo associare - e calcolare con precisione - un'*ampiezza di probabilità*, ovvero una quantità che determina la probabilità con cui il processo avviene.
- L'ampiezza di probabilità si ottiene sommando su tutte le possibili traiettorie, ciascuna pesata per un "*fattore di fase*" determinato dall'*azione della traiettoria in unità della costante di Planck*

"fattore di fase" ⇒ le diverse traiettorie interferiscono fra loro come delle onde

la traiettoria classica risulta l'unica permessa nel limite in cui $\Delta E \times \Delta t \gg \hbar$



► La meccanica quantistica

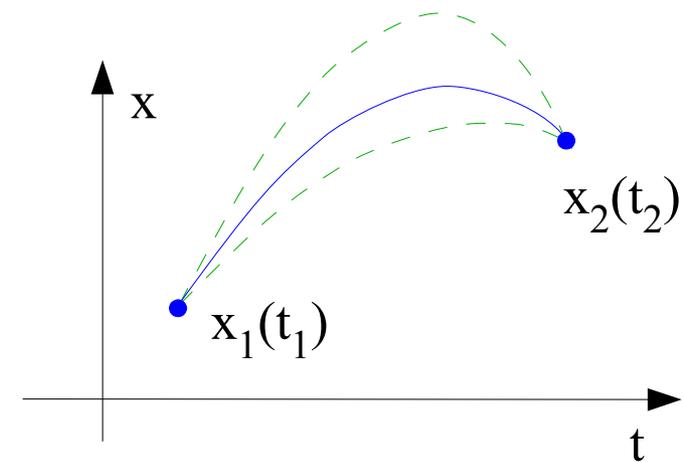
I principi fondamentali della meccanica quantistica possono essere formulati nel modo seguente:

- A livello fondamentale [o meglio per processi fisici la cui azione complessiva è confrontabile con la costante di Planck] è impossibile determinare l'evoluzione di un sistema in modo deterministico. Tuttavia, ad ogni processo possiamo associare - e calcolare con precisione - un'*ampiezza di probabilità*, ovvero una quantità che determina la probabilità con cui il processo avviene.
- L'ampiezza di probabilità si ottiene sommando su tutte le possibili traiettorie, ciascuna pesata per un "*fattore di fase*" determinato dall'*azione della traiettoria in unità della costante di Planck*

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = | A_{12} |^2$$

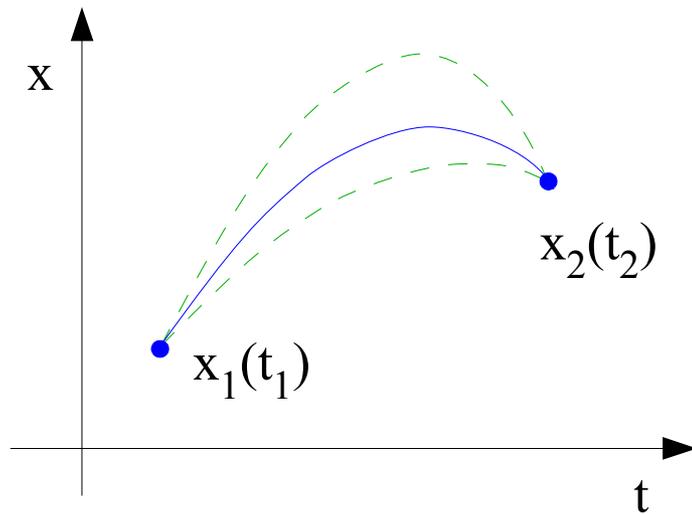
$$A_{12} = \int D[x] \exp \left\{ \frac{i}{\hbar} \text{Azione}[x(t)] \right\}$$

somma su tutte le
possibili traiettorie $x(t)$



► La meccanica quantistica

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = |A_{12}|^2$$



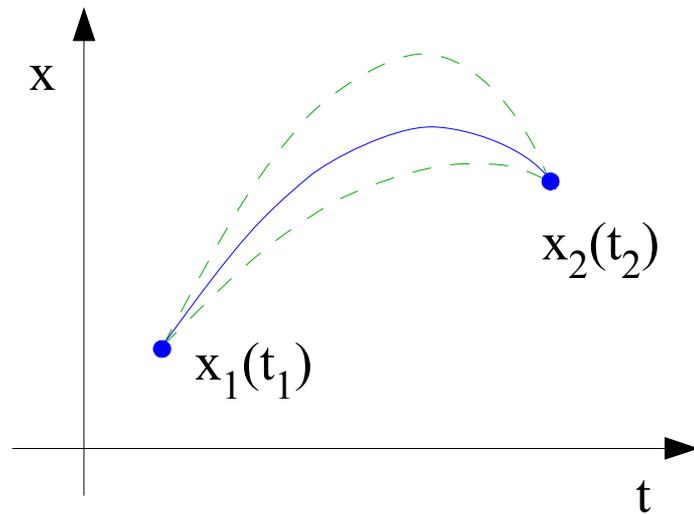
$$A_{12} = \int D[x(t)] \exp\left\{ i \frac{\text{Azione}[x(t)]}{\hbar} \right\}$$

somma su tutte le
possibili traiettorie $x(t)$

► La meccanica quantistica

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = |A_{12}|^2$$

$$A_{12} = \int D[x(t)] \exp\left\{ i \frac{\text{Azione}[x(t)]}{\hbar} \right\}$$



I processi “classici”
sono quelli per cui

$$\text{Azione}[x(t)] \gg \hbar$$

*limite
classico*

Appena ci “spostiamo” dalla
traiettoria classica il fattore di
fase varia molto rapidamente
→ contributo nullo in media.
L'unico termine che conta e'
quello della traiettoria che
minimizza l'azione (la fase
non cambia per piccole
perturbazioni della traiettoria)

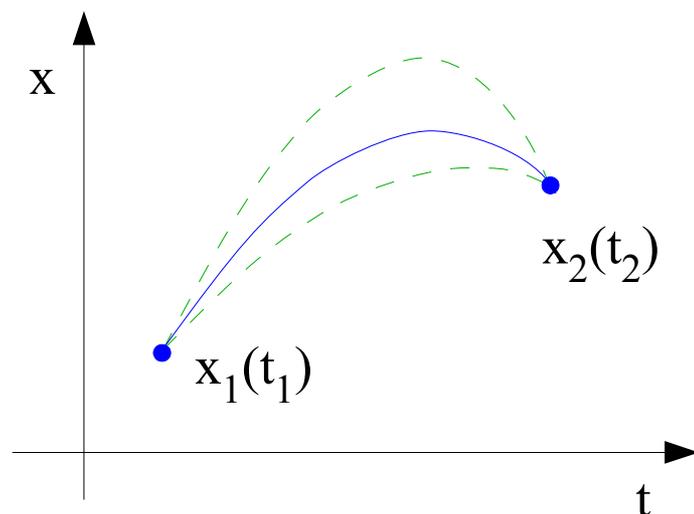
$$A_{12} \rightarrow 1 \quad \text{traiettoria classica } x(t)$$

$$A_{12} \rightarrow 0 \quad \text{altre traiettorie}$$

► La meccanica quantistica

$$P[x_1 \rightarrow x_2] = |A_{12}|^2$$

$$A_{12} = \int D[x(t)] \exp\left\{ i \frac{\text{Azione}[x(t)]}{\hbar} \right\}$$



I processi “classici”
sono quelli per cui

$$\text{Azione}[x(t)] \gg \hbar$$

*limite
classico*

Appena ci “spostiamo” dalla
traiettoria classica il fattore di
fase varia molto rapidamente
→ contributo nullo in media.
L'unico termine che conta e'
quello della traiettoria che
minimizza l'azione (la fase
non cambia per piccole
perturbazioni della traiettoria)

$$A_{12} \rightarrow 1 \quad \text{traiettoria classica } x(t)$$

$$A_{12} \rightarrow 0 \quad \text{altre traiettorie}$$

Viceversa se $\text{Azione}[x(t)] \sim \hbar$ non possiamo
più definire una traiettoria nel senso classico.

$$[\text{N.B.: Azione} \sim \Delta E \Delta t \sim \Delta x \Delta p]$$



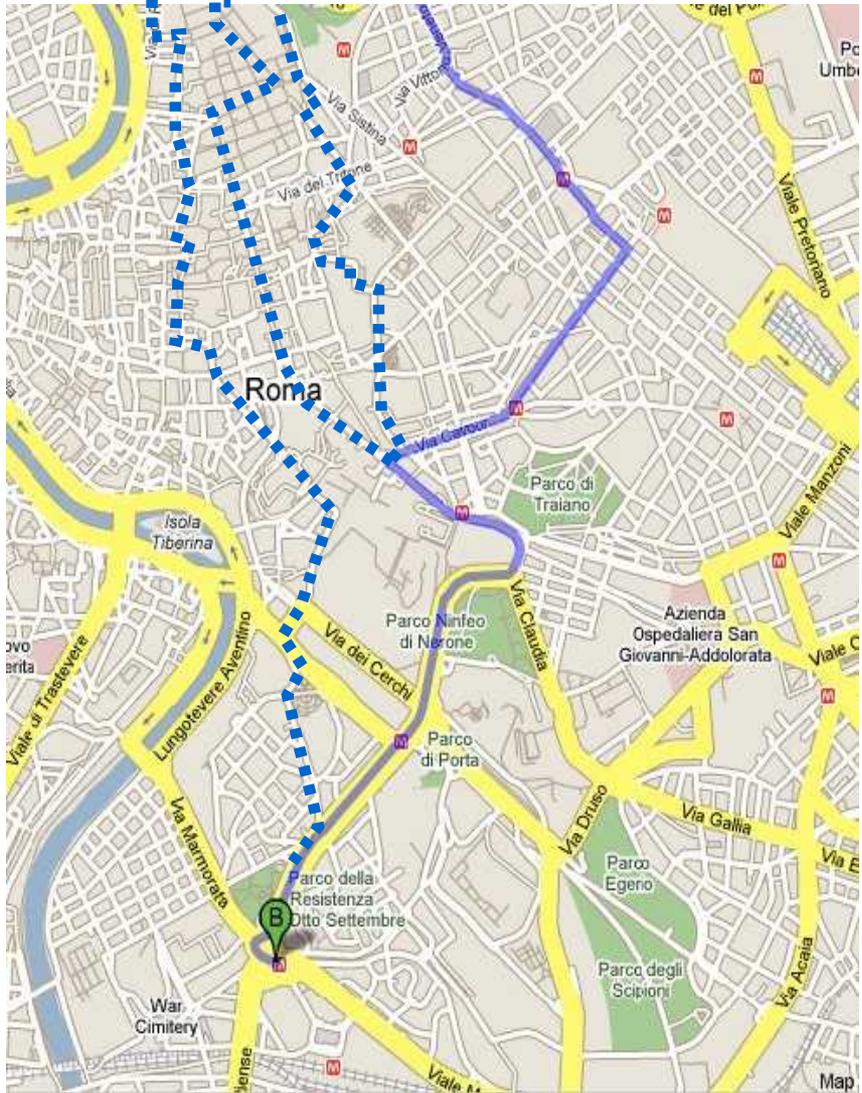
principio di
indeterminazione

► La meccanica quantistica

traiettoria classica...

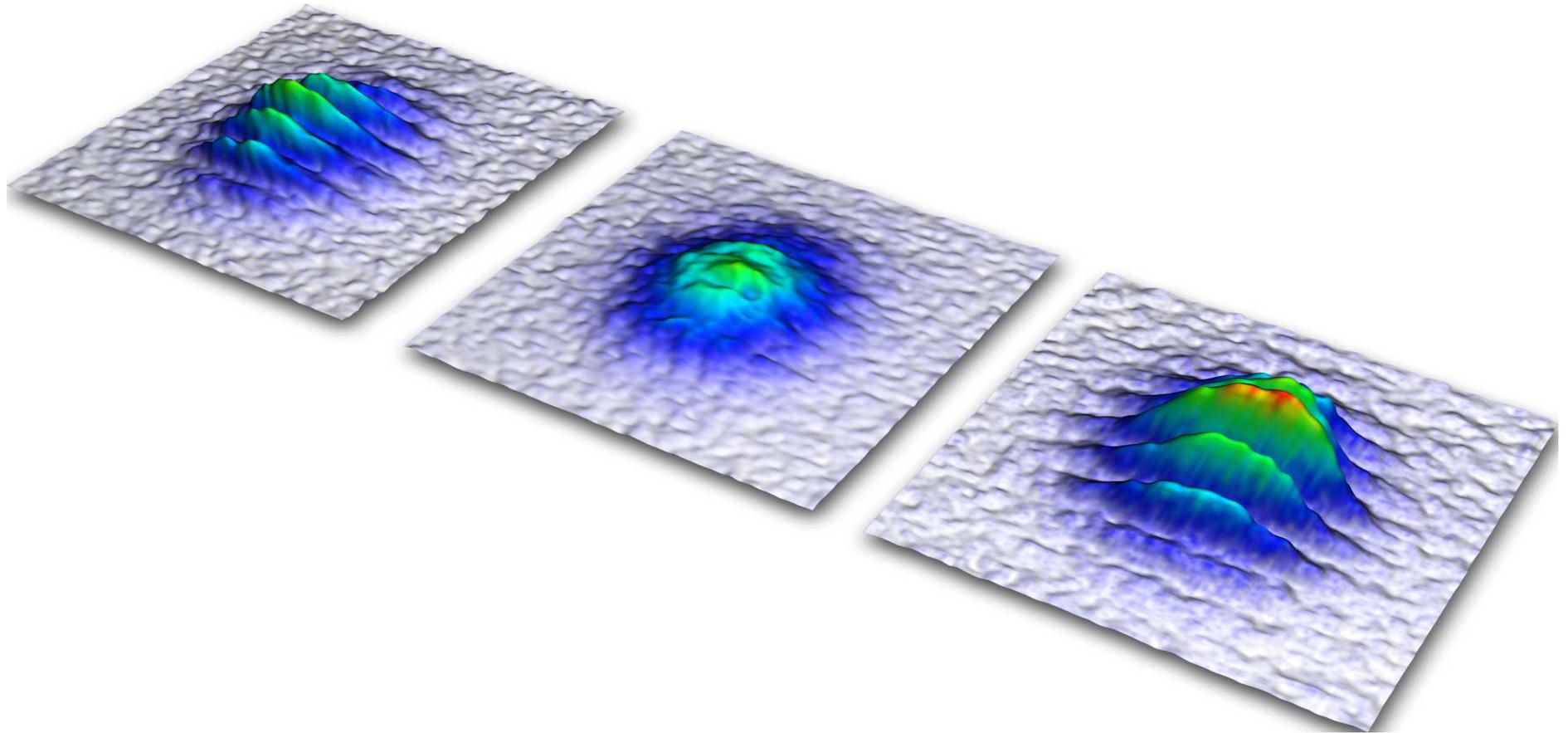


...e fluttuazioni quantistiche



Ma attenzione a non prendere l'analogia troppo sul serio: mancano i fattori di fase !!

V. Campi e Particelle



► Campi e Particelle

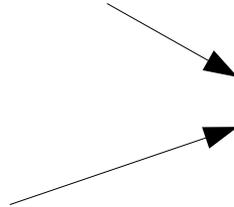
I due pilastri su cui si basa la *teoria quantistica dei campi* sono le due “rivoluzioni” rispetto alla fisica classica avvenute all'inizio del secolo scorso: la meccanica quantistica e la teoria della relatività ristretta

meccanica quantistica

[principio di indeterminazione $\Delta E \Delta t > \hbar$]

relatività ristretta

[equivalenza massa energia $E = m c^2$]



teoria quantistica dei campi

► Campi e Particelle

I due pilastri su cui si basa la *teoria quantistica dei campi* sono le due “rivoluzioni” rispetto alla fisica classica avvenute all'inizio del secolo scorso: la meccanica quantistica e la teoria della relatività ristretta

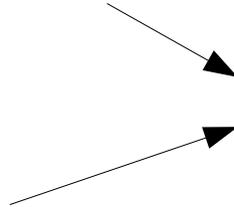
meccanica quantistica

[principio di indeterminazione $\Delta E \Delta t > \hbar$]

relatività ristretta

[equivalenza massa energia $E = m c^2$]

teoria quantistica dei campi



Per mettere insieme questi due pilastri, l'ultimo concetto classico che dobbiamo abbandonare è l'idea che esistano delle particelle indistruttibili (ovvero che il numero di costituenti elementari della materia si conservi).

Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi* (*un po' come le onde sono le eccitazioni della superficie del mare*)

► Campi e Particelle

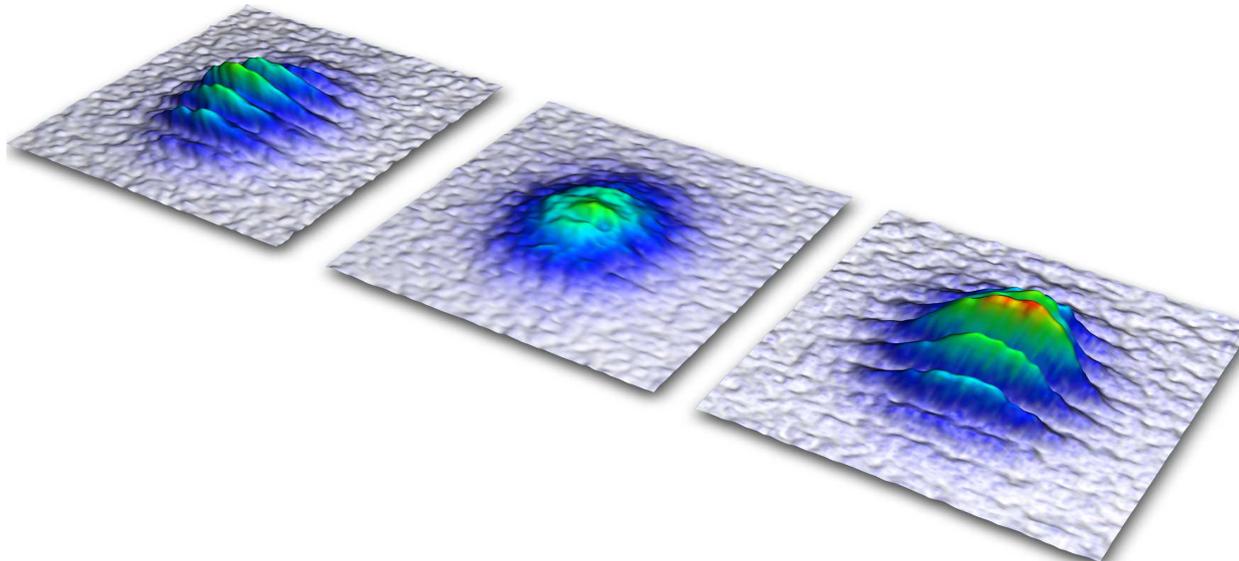
Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi* (*un po' come le onde sono le eccitazioni della superficie del mare*)

fotone \longleftrightarrow campo elettromagnetico

elettrone \longleftrightarrow campo dell'elettrone

⋮

⋮



► Campi e Particelle

Le particelle elementari non sono altro che delle *eccitazioni* di particolari *campi* (*un po' come le onde sono le eccitazioni della superficie del mare*)

fotone ↔ campo elettromagnetico
elettrone ↔ campo dell'elettrone
⋮ ⋮

- La teoria quantistica dei campi è lo strumento matematico che ci permette di descrivere come i campi (*ovvero come i costituenti elementari della materia*) interagiscono fra loro: non è altro che un'applicazione dei principi probabilistici della meccanica quantistica ai campi invece che alle particelle.
- In principio esistono molte teorie quantistiche di campo, che differiscono per la forma dell'azione [ovvero per il modo in cui i campi interagiscono fra loro] e per la natura dei campi: il famoso Modello Standard è una di queste.

► Campi e Particelle

In stretta analogia a ciò che accade in meccanica quantistica, l'evoluzione di un sistema fisico (ovvero il passaggio da una configurazione dei campi ad un'altra) è determinato da:

$$P[\varphi_{\text{in}}(\mathbf{x}) \rightarrow \varphi_{\text{fin}}(\mathbf{x})] = |A|^2 \quad A = \int \mathbf{D}[\varphi(\mathbf{x})] \exp\left\{\frac{i}{\hbar} S[\varphi]\right\}$$



somma su tutte le configurazioni di campo che connettono la configurazione iniziale $\varphi_{\text{in}}(\mathbf{x})$ alla configurazione finale $\varphi_{\text{fin}}(\mathbf{x})$

La richiesta di simmetria [*invarianza per trasformazioni spazio-temporali, e simmetrie interne*] e consistenza della teoria [*principio di causalità*] restringe molto la forma dell'azione, che in genere ha una struttura molto semplice. Ciononostante, spesso è molto difficile calcolare esattamente gli integrali che definiscono le ampiezze di probabilità della teoria...

... ma in tutti i casi in cui riusciamo ad ottenere predizioni precise, la teoria si è rivelata incredibilmente affidabile