

# *Alla scoperta dei costituenti fondamentali della materia*

Marco Panero

Università di Torino & INFN, Torino

[marco.panero@unito.it](mailto:marco.panero@unito.it)

*Scuola di Fisica 2017*  
Torino, 11.04.2017

# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 *Relatività*
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

## Di che cosa parleremo – I

In questa presentazione parlerò della ricerca *teorica* nella *fisica delle particelle elementari*:

- Motivazione
- Concetti fondamentali: Fisica *quantistica* e *relatività*
- Il *Modello Standard* delle particelle elementari
- Simulazioni numeriche delle particelle elementari
- Conclusioni

## Di che cosa parleremo – I

In questa presentazione parlerò della ricerca *teorica* nella *fisica delle particelle elementari*:

- Motivazione
- Concetti fondamentali: Fisica *quantistica* e *relatività*
- Il *Modello Standard* delle particelle elementari
- Simulazioni numeriche delle particelle elementari
- Conclusioni

Gli aspetti *sperimentali* della fisica delle particelle elementari verranno trattati da Nicola Amapane, nella sua presentazione di domani

Alcune importanti premesse:

- Questa è una presentazione a carattere *divulgativo*
- Lo scopo è principalmente quello di introdurre alcuni concetti a livello *intuitivo* e *qualitativo*
- Il rigore scientifico sarà spesso sacrificato alla chiarezza
- La lezione è concepita per essere *interattiva*: interventi, domande, commenti, ecc. sono incoraggiati *in ogni momento*
- Dopo la lezione, le slides saranno rese disponibili: se le trovate utili, scaricatele e condividetele!

Lo scopo della fisica delle particelle elementari consiste nel capire le leggi fondamentali che governano i costituenti più semplici di tutta la materia  
(Esempio di particella elementare: l'elettrone)

- Anche se il mondo che vediamo intorno a noi è *estremamente* complesso, esso è costituito da un numero molto limitato di tipi di particelle elementari
- Qui, *elementari* significa “che non si possono scomporre in costituenti più semplici” e “che non hanno struttura” (in particolare, possono essere considerate *puntiformi*)
- Capire le leggi fisiche fondamentali che caratterizzano le particelle elementari e il modo in cui interagiscono, permette di prevedere *anche* il comportamento dei sistemi più complessi che esse formano
- In questo senso, la fisica è la più fondamentale delle scienze naturali: da essa deriva tutta la chimica, da cui deriva tutta la biologia, ecc.
- Prima di elencare quali sono le particelle elementari e descrivere come interagiscono fra loro, occorre descrivere due concetti molto importanti per capire il comportamento delle particelle elementari: la *fisica quantistica* e la *relatività*
  - ▶ Concetti “difficili da capire”, perché *lontani dall'esperienza quotidiana*
  - ▶ La fisica quantistica è importante per fenomeni che avvengono su distanze molto corte (es. dell'ordine di un milionesimo di metro)
  - ▶ La relatività riguarda fenomeni con velocità molto elevate (es. centinaia di migliaia di chilometri al secondo)

# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 *Relatività*
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

## Il principio di indeterminazione

La fisica quantistica, introdotta agli inizi del XX secolo, si basa sul *principio di indeterminazione di Heisenberg*:

### Principio di indeterminazione di Heisenberg

È impossibile conoscere con precisione arbitrariamente grande *tutte* le grandezze fisiche che caratterizzano lo stato di un oggetto; ad esempio:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

dove  $\Delta x$  è l'incertezza sulla *posizione* dell'oggetto,  $\Delta p$  è l'incertezza sulla sua *quantità di moto* (massa per velocità), e  $\hbar \simeq 1.05 \cdot 10^{-34}$  kg·m<sup>2</sup>/s è una costante



Osservazioni:

- Siccome  $\hbar$  è una quantità molto piccola, nell'esperienza quotidiana non ci accorgiamo dell'esistenza di questo limite sulla precisione con cui è possibile misurare contemporaneamente diverse grandezze
- Questo principio non fa riferimento ai limiti tecnologici degli strumenti di misura, bensì ad una *proprietà fondamentale* della natura
- Una importante conseguenza di questo principio è che nella fisica quantistica *non è più possibile seguire la traiettoria di un oggetto*: determinare accuratamente la sua posizione ad un certo istante comporta avere una grande incertezza sulla sua velocità (e quindi sulla sua posizione ad istanti successivi)



- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ *Non* ha una velocità ben definita
  - ▶ *Non* ha una posizione ben definita nello spazio
  - ▶ *Non* ha una posizione ed una velocità ben definite contemporaneamente
- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un "corpuscolo", la *probabilità* di trovarla in un certo punto ad un dato istante è legata ad una quantità (chiamata *funzione d'onda*) che si propaga come un'onda
- La fisica quantistica non è più *deterministica*, bensì *probabilistica*

## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio



- ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:

- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un "corpuscolo", la *probabilità* di

## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse



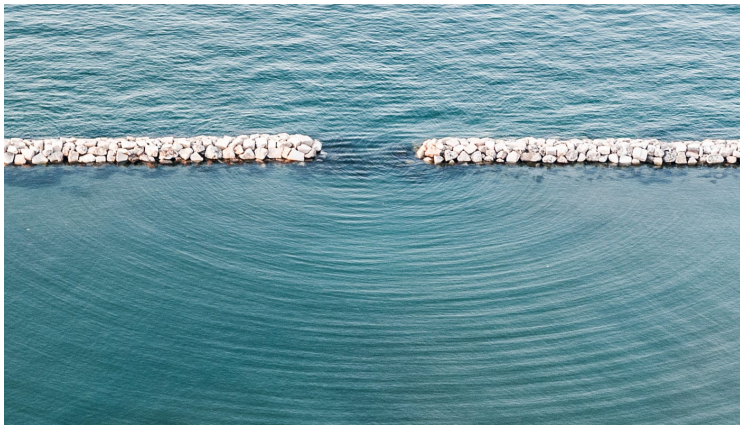
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:

▶ Può "aggirare gli ostacoli"

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può "aggirare gli ostacoli"
  - ▶ Può "passare simultaneamente lungo due percorsi diversi"
  - ▶ Porzioni di onda che si incontrano "arrivando da due percorsi diversi" possono "interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro"
- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un "corpuscolo", la *probabilità* di trovarla in un certo punto ad un dato istante è legata ad una quantità (chiamata *funzione d'onda*) che si propaga come un'onda
- La fisica quantistica non è più *deterministica*, bensì *probabilistica*

## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può "aggirare gli ostacoli"



- ▶ Può "passare simultaneamente lungo due percorsi diversi"
- ▶ Porzioni di onda che si incontrano "arrivando da due percorsi diversi" possono "interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro"

## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può "aggirare gli ostacoli"
  - ▶ Può "passare simultaneamente lungo due percorsi diversi"
  - ▶ Porzioni di onda che si incontrano "arrivando da due percorsi diversi" possono "interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro"
- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un "corpuscolo", la *probabilità* di trovarla in un certo punto ad un dato istante è legata ad una quantità (chiamata *funzione d'onda*) che si propaga come un'onda
- La fisica quantistica non è più *deterministica*, bensì *probabilistica*

## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può "aggirare gli ostacoli"
  - ▶ Può "passare simultaneamente lungo due percorsi diversi"
  - ▶ Porzioni di onda che si incontrano "arrivando da due percorsi diversi" possono "interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro"



## Dualismo onda-particella

- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può “aggirare gli ostacoli”
  - ▶ Può “passare simultaneamente lungo due percorsi diversi”
  - ▶ Porzioni di onda che si incontrano “arrivando da due percorsi diversi” possono “interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro”
- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un “corpuscolo”, la *probabilità* di trovarla in un certo punto ad un dato istante è legata ad una quantità (chiamata *funzione d'onda*) che si propaga come un'onda
- La fisica quantistica non è più *deterministica*, bensì *probabilistica*



- Il principio di indeterminazione suggerisce una analogia con le onde:
  - ▶ Un'onda periodica e regolare, che ha velocità ben definita, è *infinitamente estesa* nello spazio
  - ▶ Un'onda che ha una posizione ben definita nello spazio, è generalmente formata dalla sovrapposizione di onde con velocità diverse
- Nella fisica quantistica, il modo in cui ogni particella si propaga nello spazio ha caratteristiche tipiche delle onde:
  - ▶ Può "aggirare gli ostacoli"
  - ▶ Può "passare simultaneamente lungo due percorsi diversi"
  - ▶ Porzioni di onda che si incontrano "arrivando da due percorsi diversi" possono "interferire (sommarsi o sottrarsi) fra loro"
- Più precisamente, anche se la particella continua ad essere un "corpuscolo", la *probabilità* di trovarla in un certo punto ad un dato istante è legata ad una quantità (chiamata *funzione d'onda*) che si propaga come un'onda
- La fisica quantistica non è più *deterministica*, bensì *probabilistica*

# Quantizzazione

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*

## Quantizzazione

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
  - ▶ Esempio: la corda di una chitarra di lunghezza fissata produce *solo* alcune note ben definite



- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*

# Quantizzazione

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
  - Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per cadere sul nucleo

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
  - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*
  - ▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo

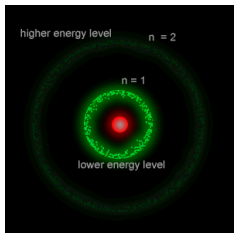
## Quantizzazione

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
  - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*

▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo

## Quantizzazione

- Quando un'onda si propaga in una regione di spazio in cui deve soddisfare certe condizioni ai bordi, può farlo solo in un numero *discreto* di modi diversi
- Analogamente, il fatto che la propagazione delle particelle sia descritta da *onde* implica che alcune grandezze fisiche siano *quantizzate*, vale a dire che possano assumere solo certi valori *discreti* (e fissati)
- L'esistenza di grandezze fisiche discrete, cioè *quantizzate*, è il motivo per cui la fisica basata sul principio di Heisenber è detta "quantistica"
- L'esistenza di grandezze fisiche quantizzate ha implicazioni molto importanti: per esempio, permette agli atomi di essere *stabili*
  - ▶ Se gli elettroni si muovessero su traiettorie intorno al nucleo degli atomi, perderebbero progressivamente energia, e finirebbero per *cadere sul nucleo*
  - ▶ La fisica quantistica prevede invece che gli elettroni possano trovarsi solo a distanze fissate e ben definite dal nucleo





# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 **Relatività**
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

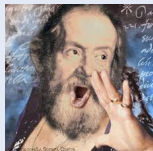
- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei

### Teoria della relatività secondo Galileo Galilei

- ▶ Esempio: coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = x - vt$

Il tempo è lo stesso per tutti (tempo assoluto):  $t' = t$

Le velocità si compongono *sommandole*



[[www.lascienza.coatta.it](http://www.lascienza.coatta.it)]

- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

## Principi fondamentali della relatività moderna

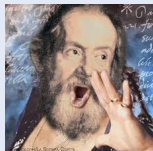
In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei

### Teoria della relatività secondo Galileo Galilei

- ▶ Esempio: coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = x - vt$
- ▶ Il tempo è lo stesso per tutti (tempo *assoluto*):  $t' = t$

Le velocità si compongono *sommandole*



[[www.lascienza.coatta.it](http://www.lascienza.coatta.it)]

- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

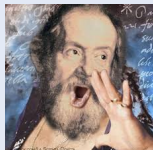
## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei

### Teoria della relatività secondo Galileo Galilei

- ▶ Esempio: coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = x - vt$
- ▶ Il tempo è lo stesso per tutti (tempo *assoluto*):  $t' = t$
- ▶ Le velocità si compongono *sommandole*



[[www.lascienza.coatta.it](http://www.lascienza.coatta.it)]

- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei, ma tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, lo studio dei fenomeni elettromagnetici mise in crisi questa teoria
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei, ma tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, lo studio dei fenomeni elettromagnetici mise in crisi questa teoria
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)



## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all’altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all’inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei, ma tra la fine del XIX e l’inizio del XX secolo, lo studio dei fenomeni elettromagnetici mise in crisi questa teoria
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

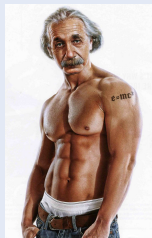
### Teoria della relatività secondo Albert Einstein

- ▶ Le coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} (x - vt)$

Anche i *tempi* misurati da osservatori diversi sono diversi:

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

La differenza rispetto alle formule di Galileo è trascurabile quando  $v \ll c$



## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all'altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all'inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei, ma tra la fine del XIX e l'inizio del XX secolo, lo studio dei fenomeni elettromagnetici mise in crisi questa teoria
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

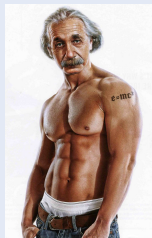
### Teoria della relatività secondo Albert Einstein

▶ Le coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} (x - vt)$

▶ Anche *i tempi* misurati da osservatori diversi sono diversi:

$$t' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$$

La differenza rispetto alle formule di Galileo è trascurabile quando  $v \ll c$



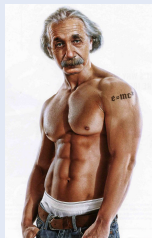
## Principi fondamentali della relatività moderna

In fisica, la “relatività” esprime il legame tra le coordinate misurate da osservatori diversi (in particolare: osservatori in moto a velocità costante  $v$  uno rispetto all’altro). Si richiede che le formule che descrivono un certo fenomeno abbiano *la stessa forma* per tutti gli osservatori

- Fino all’inizio del XX secolo, la fisica era basata sui principi della relatività di Galileo Galilei, ma tra la fine del XIX e l’inizio del XX secolo, lo studio dei fenomeni elettromagnetici mise in crisi questa teoria
- Nel 1905 Albert Einstein propose una nuova teoria della relatività, basata sul principio che *la velocità della luce nel vuoto sia la stessa in tutti i sistemi di riferimento* ( $c \simeq 3 \cdot 10^8$  m/s)

### Teoria della relatività secondo Albert Einstein

- ▶ Le coordinate misurate da un osservatore fermo ( $x$ ) e uno in movimento ( $x'$ ) legate fra loro da  $x' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} (x - vt)$
- ▶ Anche *i tempi* misurati da osservatori diversi sono diversi:  
 $t' = \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \left( t - \frac{v}{c^2} x \right)$
- ▶ La differenza rispetto alle formule di Galileo è trascurabile quando  $v \ll c$



# Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*

# Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*

# Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*

## Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*



Esempio: In una sequenza del film *Interstellar*, l'astronauta protagonista Cooper parte per un viaggio a velocità vicine a quella della luce

## Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*



Esempio: In una sequenza del film *Interstellar*, l'astronauta protagonista Cooper parte per un viaggio a velocità vicine a quella della luce e al suo ritorno incontra la figlia



## Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*



Esempio: In una sequenza del film *Interstellar*, l'astronauta protagonista Cooper parte per un viaggio a velocità vicine a quella della luce e al suo ritorno incontra la figlia

## Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*



Esempio: In una sequenza del film *Interstellar*, l'astronauta protagonista Cooper parte per un viaggio a velocità vicine a quella della luce e al suo ritorno incontra la figlia

## Implicazioni controintuitive della teoria della relatività di Einstein

La teoria della relatività di Einstein ha alcune implicazioni *radicali*:

- Le velocità misurate da osservatori diversi *non* si compongono semplicemente sommandole; in particolare, è impossibile *superare* la velocità della luce
- Osservatori in moto relativo uno rispetto all'altro misurano *tempi diversi*



Questo effetto non è solo una ipotesi teorica: è stato *verificato sperimentalmente* da Joseph C. Hafele e Richard E. Keating già nel 1971

## *I limiti di validità della relatività galileiana*

Le implicazioni della relatività di Einstein sembrano essere in netto conflitto con l'esperienza.  
*Perché sono state accettate?*

- In realtà, le implicazioni della relatività di Einstein sono *confermate* dagli esperimenti—mentre quelle della relatività di Galileo (cioè quelle “intuitive” della nostra vita quotidiana) sono *smentite* dagli esperimenti
- La differenza tra le previsioni della relatività di Einstein e quelle della relatività di Galileo diventa apprezzabile solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della luce
- Questo non succede praticamente mai nei fenomeni della vita nostra quotidiana, per la quale le leggi della relatività galileiana danno una approssimazione molto accurata
- Al contrario, le particelle elementari vengono spesso accelerate fino a velocità prossime a quelle della luce negli esperimenti che le studiano, quindi la teoria della relatività di Einstein (insieme alla fisica quantistica) è un ingrediente fondamentale per spiegare il comportamento delle particelle elementari

## *I limiti di validità della relatività galileiana*

Le implicazioni della relatività di Einstein sembrano essere in netto conflitto con l'esperienza.  
*Perché sono state accettate?*

- In realtà, le implicazioni della relatività di Einstein sono *confermate* dagli esperimenti—mentre quelle della relatività di Galileo (cioè quelle “intuitive” della nostra vita quotidiana) sono *smentite* dagli esperimenti
- La differenza tra le previsioni della relatività di Einstein e quelle della relatività di Galileo diventa apprezzabile solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della luce
- Questo non succede praticamente mai nei fenomeni della vita nostra quotidiana, per la quale le leggi della relatività galileiana danno una approssimazione molto accurata
- Al contrario, le particelle elementari vengono spesso accelerate fino a velocità prossime a quelle della luce negli esperimenti che le studiano, quindi la teoria della relatività di Einstein (insieme alla fisica quantistica) è un ingrediente fondamentale per spiegare il comportamento delle particelle elementari

## *I limiti di validità della relatività galileiana*

Le implicazioni della relatività di Einstein sembrano essere in netto conflitto con l'esperienza.  
*Perché* sono state accettate?

- In realtà, le implicazioni della relatività di Einstein sono *confermate* dagli esperimenti—mentre quelle della relatività di Galileo (cioè quelle “intuitive” della nostra vita quotidiana) sono *smentite* dagli esperimenti
- La differenza tra le previsioni della relatività di Einstein e quelle della relatività di Galileo diventa apprezzabile solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della luce
- Questo non succede praticamente mai nei fenomeni della vita nostra quotidiana, per la quale le leggi della relatività galileiana danno una approssimazione molto accurata
- Al contrario, le particelle elementari vengono spesso accelerate fino a velocità prossime a quelle della luce negli esperimenti che le studiano, quindi la teoria della relatività di Einstein (insieme alla fisica quantistica) è un ingrediente fondamentale per spiegare il comportamento delle particelle elementari

## *I limiti di validità della relatività galileiana*

Le implicazioni della relatività di Einstein sembrano essere in netto conflitto con l'esperienza.  
*Perché sono state accettate?*

- In realtà, le implicazioni della relatività di Einstein sono *confermate* dagli esperimenti—mentre quelle della relatività di Galileo (cioè quelle “intuitive” della nostra vita quotidiana) sono *smentite* dagli esperimenti
- La differenza tra le previsioni della relatività di Einstein e quelle della relatività di Galileo diventa apprezzabile solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della luce
- Questo non succede praticamente mai nei fenomeni della vita nostra quotidiana, per la quale le leggi della relatività galileiana danno una approssimazione molto accurata
- Al contrario, le particelle elementari vengono spesso accelerate fino a velocità prossime a quelle della luce negli esperimenti che le studiano, quindi la teoria della relatività di Einstein (insieme alla fisica quantistica) è un ingrediente fondamentale per spiegare il comportamento delle particelle elementari

## *I limiti di validità della relatività galileiana*

Le implicazioni della relatività di Einstein sembrano essere in netto conflitto con l'esperienza.  
*Perché* sono state accettate?

- In realtà, le implicazioni della relatività di Einstein sono *confermate* dagli esperimenti—mentre quelle della relatività di Galileo (cioè quelle “intuitive” della nostra vita quotidiana) sono *smentite* dagli esperimenti
- La differenza tra le previsioni della relatività di Einstein e quelle della relatività di Galileo diventa apprezzabile solo quando le velocità in gioco sono confrontabili con quella della luce
- Questo non succede praticamente mai nei fenomeni della vita nostra quotidiana, per la quale le leggi della relatività galileiana danno una approssimazione molto accurata
- Al contrario, le particelle elementari vengono spesso accelerate fino a velocità prossime a quelle della luce negli esperimenti che le studiano, quindi la teoria della relatività di Einstein (insieme alla fisica quantistica) è un ingrediente fondamentale per spiegare il comportamento delle particelle elementari



# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 *Relatività*
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

# Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
  - ▶ Esempio 1: Le formule che descrivono il moto di un oggetto su un piano orizzontale non dovrebbero dipendere dal *punto* in cui lo si considera: ci aspettiamo che il moto dell'oggetto sia lo stesso in tutti i punti del piano
  - ▶ Esempio 2: Le formule che descrivono la caduta di un oggetto non dovrebbero dipendere dall'*istante* in cui l'oggetto cade: ci aspettiamo che l'oggetto cada *sempre* nella stessa maniera
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
  - ▶ Esempio 1: Le formule che descrivono il moto di un oggetto su un piano orizzontale non dovrebbero dipendere dal *punto* in cui lo si considera: ci aspettiamo che il moto dell'oggetto sia lo stesso in tutti i punti del piano
  - ▶ Esempio 2: Le formule che descrivono la caduta di un oggetto non dovrebbero dipendere dall'*istante* in cui l'oggetto cade: ci aspettiamo che l'oggetto cada *sempre* nella stessa maniera
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*

### Teorema di Noether

Se le equazioni di un certo sistema fisico sono invarianti rispetto a un gruppo continuo di trasformazioni, esistono alcune quantità fisiche *conservate*, cioè che si mantengono costanti nel tempo



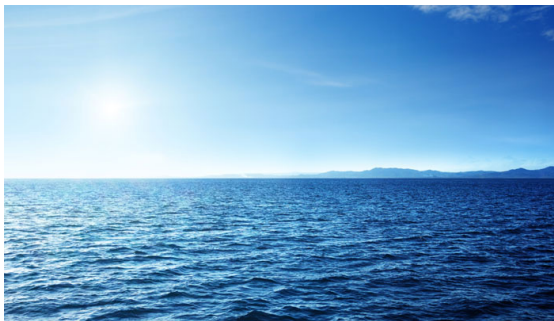
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*.
  - In una teoria quantistica dei campi, ogni tipo di particella è associata ad una grandezza (campo), che può variare in ogni punto dello spazio e ad ogni istante nel tempo—analogo con l'altezza dell'acqua in ogni punto sulla superficie del mare.

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una **teoria quantistica dei campi**:
  - ▶ In una teoria quantistica dei campi, ogni tipo di particella è associata ad una grandezza (*campo*), che può variare in ogni punto dello spazio e ad ogni istante nel tempo—analogia con l'altezza dell'acqua in ogni punto sulla superficie del mare
  - ▶ Il "vuoto" può essere interpretato come un campo che è costante sia nello spazio che nel tempo
  - ▶ Una "particella" è una "increspatura" nel campo che la rappresenta

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una **teoria quantistica dei campi**:
  - ▶ In una teoria quantistica dei campi, ogni tipo di particella è associata ad una grandezza (*campo*), che può variare in ogni punto dello spazio e ad ogni istante nel tempo—analogia con l'altezza dell'acqua in ogni punto sulla superficie del mare



- ▶ Il "vuoto" può essere interpretato come un campo che è costante sia nello spazio che nel tempo
- ▶ Una "particella" è una "increspatura" nel campo che la rappresenta



## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:
  - ▶ In una teoria quantistica dei campi, ogni tipo di particella è associata ad una grandezza (*campo*), che può variare in ogni punto dello spazio e ad ogni istante nel tempo—analogia con l'altezza dell'acqua in ogni punto sulla superficie del mare
  - ▶ Il “vuoto” può essere interpretato come un campo che è costante sia nello spazio che nel tempo



▶ Una “particella” è una “increspatura” nel campo che la rappresenta

## Teoria quantistica dei campi

- Siccome le particelle elementari sono piccole e possono muoversi a velocità paragonabili a quelle della luce, per studiarle è necessario tenere conto sia della fisica quantistica che della relatività di Einstein
- Un altro importante aspetto della teoria delle particelle elementari è la *simmetria*: in generale, ci si aspetta che le leggi fisiche siano *invarianti* rispetto ad alcune *trasformazioni*
- Combinando insieme fisica quantistica e relatività in un modo che rispetti le invarianze che ci si aspetta per un dato sistema fisico, si ottiene una *teoria quantistica dei campi*:
  - ▶ In una teoria quantistica dei campi, ogni tipo di particella è associata ad una grandezza (*campo*), che può variare in ogni punto dello spazio e ad ogni istante nel tempo—analogia con l'altezza dell'acqua in ogni punto sulla superficie del mare
  - ▶ Il "vuoto" può essere interpretato come un campo che è costante sia nello spazio che nel tempo
  - ▶ Una "particella" è una "*increspatura*" nel campo che la rappresenta



## Implicazioni della teoria quantistica dei campi

- È possibile *creare* particelle dal “vuoto”, eccitando i campi con dell’energia; la relatività di Einstein prevede che l’energia minima necessaria per creare una particella di massa  $m$  sia

$$E = mc^2$$

- Oltre alle particelle, esistono anche *antiparticelle*, con caratteristiche uguali e opposte; solitamente, esse vengono create dal vuoto insieme alle particelle
- Anche il processo opposto (trasformazione di particelle e antiparticelle in energia) è possibile
- Il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che anche nello stato di “vuoto” possano esistere *fluttuazioni momentanee dell’energia* che permettono la creazione temporanea di *particelle virtuali*
- L’imposizione che la teoria rispetti le invarianze che ci si aspetta implica che possano esistere *solo alcuni tipi di particelle elementari*

## Implicazioni della teoria quantistica dei campi

- È possibile *creare* particelle dal “vuoto”, eccitando i campi con dell’energia; la relatività di Einstein prevede che l’energia minima necessaria per creare una particella di massa  $m$  sia

$$E = mc^2$$

- Oltre alle particelle, esistono anche *antiparticelle*, con caratteristiche uguali e opposte; solitamente, esse vengono create dal vuoto insieme alle particelle
- Anche il processo opposto (trasformazione di particelle e antiparticelle in energia) è possibile
- Il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che anche nello stato di “vuoto” possano esistere *fluttuazioni momentanee dell’energia* che permettono la creazione temporanea di *particelle virtuali*
- L’imposizione che la teoria rispetti le invarianze che ci si aspetta implica che possano esistere *solo alcuni tipi di particelle elementari*

## Implicazioni della teoria quantistica dei campi

- È possibile *creare* particelle dal “vuoto”, eccitando i campi con dell’energia; la relatività di Einstein prevede che l’energia minima necessaria per creare una particella di massa  $m$  sia

$$E = mc^2$$

- Oltre alle particelle, esistono anche *antiparticelle*, con caratteristiche uguali e opposte; solitamente, esse vengono create dal vuoto insieme alle particelle
- Anche il processo opposto (trasformazione di particelle e antiparticelle in energia) è possibile
- Il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che anche nello stato di “vuoto” possano esistere *fluttuazioni momentanee dell’energia* che permettono la creazione temporanea di *particelle virtuali*
- L’imposizione che la teoria rispetti le invarianze che ci si aspetta implica che possano esistere *solo alcuni tipi di particelle elementari*

## Implicazioni della teoria quantistica dei campi

- È possibile *creare* particelle dal “vuoto”, eccitando i campi con dell’energia; la relatività di Einstein prevede che l’energia minima necessaria per creare una particella di massa  $m$  sia

$$E = mc^2$$

- Oltre alle particelle, esistono anche *antiparticelle*, con caratteristiche uguali e opposte; solitamente, esse vengono create dal vuoto insieme alle particelle
- Anche il processo opposto (trasformazione di particelle e antiparticelle in energia) è possibile
- Il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che anche nello stato di “vuoto” possano esistere *fluttuazioni momentanee dell’energia* che permettono la creazione temporanea di *particelle virtuali*



- L'imposizione che la teoria rispetti le invarianze che ci si aspetta implica che possano esistere *solo alcuni tipi di particelle elementari*

## Implicazioni della teoria quantistica dei campi

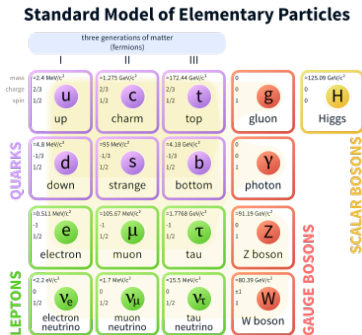
- È possibile *creare* particelle dal “vuoto”, eccitando i campi con dell’energia; la relatività di Einstein prevede che l’energia minima necessaria per creare una particella di massa  $m$  sia

$$E = mc^2$$

- Oltre alle particelle, esistono anche *antiparticelle*, con caratteristiche uguali e opposte; solitamente, esse vengono create dal vuoto insieme alle particelle
- Anche il processo opposto (trasformazione di particelle e antiparticelle in energia) è possibile
- Il principio di indeterminazione di Heisenberg implica che anche nello stato di “vuoto” possano esistere *fluttuazioni momentanee dell’energia* che permettono la creazione temporanea di *particelle virtuali*
- L’imposizione che la teoria rispetti le invarianze che ci si aspetta implica che possano esistere *solo alcuni tipi di particelle elementari*

# Il Modello Standard delle particelle elementari – I

Questo schema mostra le particelle del *Modello Standard delle particelle elementari*



In particolare, osserviamo:

- l'elettrone (e vari altri tipi di particelle ad esso simili)
- vari tipi di *quark*, che compongono i protoni e i neutroni nei nuclei atomici
- il *fotone* (una particella che viene scambiata nelle interazioni elettromagnetiche come forze elettriche, forze magnetiche, ma anche luce, calore, molti tipi di radiazioni, ecc.) e altre particelle responsabili delle forze nucleari
- il bosone di Higgs (l'ultima di queste particelle ad essere stata scoperta, nel 2012 negli esperimenti al CERN di Ginevra)



## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero ("costante di accoppiamento") che indica "quanto forte è l'interazione"
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di "dare massa" ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di "misterioso" o di "mistico"

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero ("costante di accoppiamento") che indica "quanto forte è l'interazione"
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di "dare massa" ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di "misterioso" o di "mistico"

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero ("costante di accoppiamento") che indica "quanto forte è l'interazione"
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di "dare massa" ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di "misterioso" o di "mistico"

## *Il Modello Standard delle particelle elementari – II*

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l' *interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”

## *Il Modello Standard delle particelle elementari – II*

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”
  - ▶ Se la particella elementare associata a un campo  $X$  ha massa  $m$ , nelle equazioni che la descrivono devono comparire dei termini della forma

$$\begin{array}{ll} \frac{1}{2} m^2 X^2 & \text{per le particelle scambiate nelle interazioni (fotone, gluone, } W, Z) \\ m \bar{X} X & \text{per elettroni, quark, ecc.} \end{array}$$

- ▶ Nel Modello Standard, compaiono equazioni con dei termini

$$\begin{array}{ll} \frac{g^2}{8} H^2 X^2 & \text{per alcune particelle scambiate nelle interazioni (le particelle } W \text{ e } Z) \\ g H \bar{X} X & \text{per gli elettroni, i quark, ecc.} \end{array}$$

dove  $H$  indica il valore campo associato al bosone di Higgs (e  $g$  è un numero)

- ▶ Quindi, quando il campo  $H$  ha mediamente un valore diverso da zero in tutto lo spazio, esso ha lo stesso effetto che avrebbe una massa  $m = gH/2$  (per le particelle  $W$  e  $Z$ ) o  $m = gH$  (per elettroni, quark, ecc.)

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”: è un fatto puramente matematico
  - ▶ Se la particella elementare associata a un campo  $X$  ha massa  $m$ , nelle equazioni che la descrivono devono comparire dei termini della forma

$$\begin{array}{ll} \frac{1}{2} m^2 X^2 & \text{per le particelle scambiate nelle interazioni (fotone, gluone, } W, Z) \\ m \bar{X} X & \text{per elettroni, quark, ecc.} \end{array}$$

- ▶ Nel Modello Standard, compaiono equazioni con dei termini

$$\begin{array}{ll} \frac{g^2}{8} H^2 X^2 & \text{per alcune particelle scambiate nelle interazioni (le particelle } W \text{ e } Z) \\ g H \bar{X} X & \text{per gli elettroni, i quark, ecc.} \end{array}$$

dove  $H$  indica il valore campo associato al bosone di Higgs (e  $g$  è un numero)

- ▶ Quindi, quando il campo  $H$  ha mediamente un valore diverso da zero in tutto lo spazio, esso ha lo stesso effetto che avrebbe una massa  $m = gH/2$  (per le particelle  $W$  e  $Z$ ) o  $m = gH$  (per elettroni, quark, ecc.)

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”: è un fatto puramente matematico
  - ▶ Se la particella elementare associata a un campo  $X$  ha massa  $m$ , nelle equazioni che la descrivono devono comparire dei termini della forma

$$\begin{array}{ll} \frac{1}{2}m^2X^2 & \text{per le particelle scambiate nelle interazioni (fotone, gluone, } W, Z) \\ m\bar{X}X & \text{per elettroni, quark, ecc.} \end{array}$$

- ▶ Nel Modello Standard, compaiono equazioni con dei termini

$$\begin{array}{ll} \frac{g^2}{8}H^2X^2 & \text{per alcune particelle scambiate nelle interazioni (le particelle } W \text{ e } Z) \\ gH\bar{X}X & \text{per gli elettroni, i quark, ecc.} \end{array}$$

dove  $H$  indica il valore campo associato al bosone di Higgs (e  $g$  è un numero)

- ▶ Quindi, quando il campo  $H$  ha mediamente un valore diverso da zero in tutto lo spazio, esso ha lo stesso effetto che avrebbe una massa  $m = gH/2$  (per le particelle  $W$  e  $Z$ ) o  $m = gH$  (per elettroni, quark, ecc.)



## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”: è un fatto puramente matematico
  - ▶ Se la particella elementare associata a un campo  $X$  ha massa  $m$ , nelle equazioni che la descrivono devono comparire dei termini della forma

$$\begin{array}{ll} \frac{1}{2} m^2 X^2 & \text{per le particelle scambiate nelle interazioni (fotone, gluone, } W, Z) \\ m \bar{X} X & \text{per elettroni, quark, ecc.} \end{array}$$

- ▶ Nel Modello Standard, compaiono equazioni con dei termini

$$\begin{array}{ll} \frac{g^2}{8} H^2 X^2 & \text{per alcune particelle scambiate nelle interazioni (le particelle } W \text{ e } Z) \\ g H \bar{X} X & \text{per gli elettroni, i quark, ecc.} \end{array}$$

dove  $H$  indica il valore campo associato al bosone di Higgs (e  $g$  è un numero)

- ▶ Quindi, quando il campo  $H$  ha mediamente un valore diverso da zero in tutto lo spazio, esso ha lo stesso effetto che avrebbe una massa  $m = gH/2$  (per le particelle  $W$  e  $Z$ ) o  $m = gH$  (per elettroni, quark, ecc.)

## Il Modello Standard delle particelle elementari – II

Oltre all'elenco delle particelle elementari, il Modello Standard descrive anche *come* queste interagiscono tra loro:

- Ad esempio, due elettroni possono interagire fra loro (mediante la forza elettrica) scambiandosi un fotone, che viene *emesso* da un elettrone e poi *assorbito* dall'altro
- Analogamente, all'interno di un protone i vari quark interagiscono fra loro tramite l'*interazione nucleare forte* scambiandosi dei *gluoni*
- La probabilità che un elettrone emetta un fotone (o un quark emetta un gluone) è legata a un numero (“costante di accoppiamento”) che indica “quanto forte è l'interazione”
- Il bosone di Higgs ha un ruolo particolare: quello di “dare massa” ad altre particelle elementari
- Contariamente a quanto viene detto e ripetuto nei media generalisti, questo fenomeno non ha assolutamente *nulla* di “misterioso” o di “mistico”: è un fatto puramente matematico
  - ▶ Se la particella elementare associata a un campo  $X$  ha massa  $m$ , nelle equazioni che la descrivono devono comparire dei termini della forma

$$\begin{array}{ll} \frac{1}{2}m^2X^2 & \text{per le particelle scambiate nelle interazioni (fotone, gluone, } W, Z) \\ m\bar{X}X & \text{per elettroni, quark, ecc.} \end{array}$$

- ▶ Nel Modello Standard, compaiono equazioni con dei termini

$$\begin{array}{ll} \frac{g^2}{8}H^2X^2 & \text{per alcune particelle scambiate nelle interazioni (le particelle } W \text{ e } Z) \\ gH\bar{X}X & \text{per gli elettroni, i quark, ecc.} \end{array}$$

dove  $H$  indica il valore campo associato al bosone di Higgs (e  $g$  è un numero)

- ▶ Quindi, quando il campo  $H$  ha mediamente un valore diverso da zero in tutto lo spazio, esso ha lo stesso effetto che avrebbe una massa  $m = gH/2$  (per le particelle  $W$  e  $Z$ ) o  $m = gH$  (per elettroni, quark, ecc.)

# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 *Relatività*
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
  - La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
  - Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
  - ▶ Gli elettroni hanno una massa molto più piccola rispetto a protoni e neutroni
  - ▶ I protoni e i neutroni sono formati da gluoni (privi di massa) e da tre quark di tipo *u* e *d*
  - ▶ La massa di un protone (o di un neutrone) è circa  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg
  - ▶ La massa di tre quark *u* e *d* è circa  $1.2 \cdot 10^{-29}$  kg, cioè circa *cento volte più piccola* rispetto alla massa di un protone
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
  - ▶ Gli elettroni hanno una massa molto più piccola rispetto a protoni e neutroni
  - ▶ I protoni e i neutroni sono formati da gluoni (privi di massa) e da tre quark di tipo *u* e *d*
  - ▶ La massa di un protone (o di un neutrone) è circa  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg
  - ▶ La massa di tre quark *u* e *d* è circa  $1.2 \cdot 10^{-29}$  kg, cioè circa *cento volte più piccola* rispetto alla massa di un protone
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?



## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
  - ▶ Gli elettroni hanno una massa molto più piccola rispetto a protoni e neutroni
  - ▶ I protoni e i neutroni sono formati da gluoni (privi di massa) e da tre quark di tipo *u* e *d*
  - ▶ La massa di un protone (o di un neutrone) è circa  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg
    - ▶ La massa di tre quark *u* e *d* è circa  $1.2 \cdot 10^{-29}$  kg, cioè circa *cento volte più piccola* rispetto alla massa di un protone
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni
  - ▶ Gli elettroni hanno una massa molto più piccola rispetto a protoni e neutroni
  - ▶ I protoni e i neutroni sono formati da gluoni (privi di massa) e da tre quark di tipo *u* e *d*
  - ▶ La massa di un protone (o di un neutrone) è circa  $1.67 \cdot 10^{-27}$  kg
  - ▶ La massa di tre quark *u* e *d* è circa  $1.2 \cdot 10^{-29}$  kg, cioè circa *cento volte più piccola* rispetto alla massa di un protone
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni, ma la massa di protoni e neutroni è *molto maggiore* di quella delle particelle elementari che li formano
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Quanta massa deriva dal bosone di Higgs?

- Abbiamo visto che la presenza del campo associato alla particella di Higgs ha l'effetto di dare una massa ad alcune altre *particelle elementari*
- La materia che conosciamo è formata da protoni, neutroni e elettroni. La massa di protoni e neutroni è *molto maggiore* di quella delle particelle elementari che li formano
- La maggior parte della massa dei protoni e dei neutroni (e, quindi, degli atomi e di tutti gli oggetti che conosciamo) *non* deriva dall'effetto del campo di Higgs
- Da dove deriva, allora, la massa dei protoni e dei neutroni?

## Massa dall'interazione nucleare “forte”

- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein

$$E = mc^2$$

che ci dice che la massa è *una forma di energia*

- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Massa dall'interazione nucleare “forte”

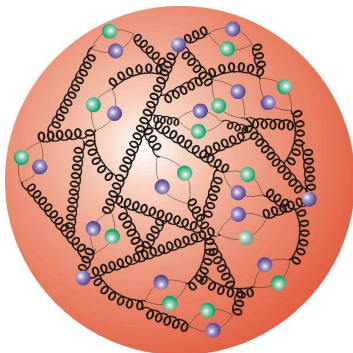
- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Massa dall'interazione nucleare “forte”

- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*: i quark interagiscono fra loro *scambiandosi dei gluoni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Massa dall'interazione nucleare "forte"

- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*: i quark interagiscono fra loro *scambiandosi dei gluoni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) "tendono ad emettere un gluone molto facilmente"



- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra



## Massa dall'interazione nucleare “forte”

- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*: i quark interagiscono fra loro *scambiandosi dei gluoni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Massa dall'interazione nucleare “forte”

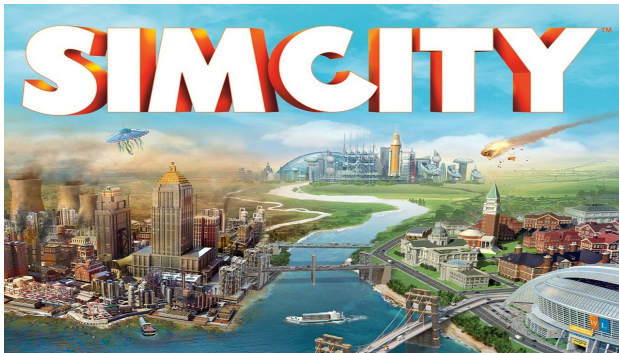
- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*: i quark interagiscono fra loro *scambiandosi dei gluoni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Massa dall'interazione nucleare “forte”

- Per capire l'origine della (maggior parte della) massa di un protone, torniamo all'equazione di Einstein  $E = mc^2$ , che ci dice che la massa è una forma di energia
- Quindi, per calcolare la massa complessiva di un protone dobbiamo tenere conto non solo della massa dei quark che lo costituiscono, ma anche dell'*energia complessiva associata alle loro interazioni*: i quark interagiscono fra loro *scambiandosi dei gluoni*
- Questo è *più facile a dirsi che a farsi*: questo tipo di interazione nucleare è detta *forte* proprio perché i quark (e i gluoni stessi) “tendono ad emettere un gluone molto facilmente”
- Inoltre, la forza che lega fra loro i quark *non diminuisce* quando li si allontana uno dall'altro
- La necessità di tenere conto degli effetti dovute a tutte le possibili *fluttuazioni quantistiche*, in combinazione con il fatto che la forza non diventa debole quando i quark sono distanti fra loro, rende *impossibile* calcolare analiticamente (cioè “con carta e penna”) l'energia totale che ci darebbe la massa di un protone
- Come possiamo, quindi, verificare se la nostra teoria (il Modello Standard) dà le previsioni giuste per il valore della massa dei protoni (e, di conseguenza, degli atomi, e di tutta la materia)?

## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche



- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo

## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*



- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo

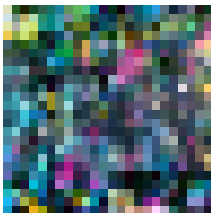
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

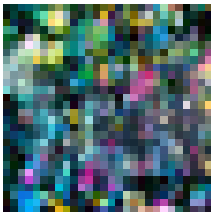
- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo





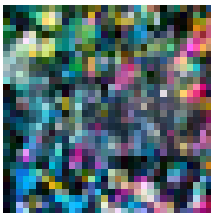
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



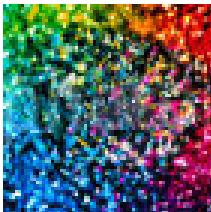
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



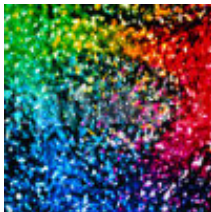
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



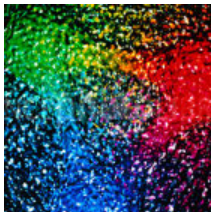
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



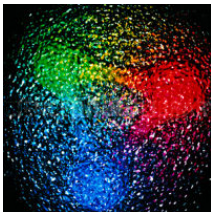
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



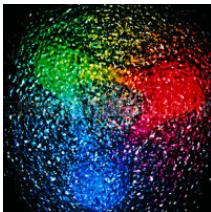
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo



## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – I

- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo





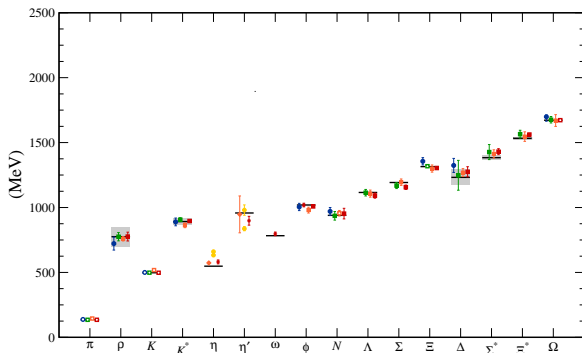
- La soluzione consiste nell'istruire (cioè programmare) un computer per fargli *simulare* un mondo “virtuale” basato sulla nostra teoria, in cui i quark interagiscono *come noi pensiamo avvenga realmente in natura*, comprese le fluttuazioni quantistiche
- Per fare questo, è necessario “discretizzare” lo spazio: i campi sono definiti in ogni punto dello spazio, ovvero in un numero *infinito* di punti, ma ogni computer può tenere in memoria solo un numero *finito* di variabili
- Quindi si sostituisce lo spazio *continuo* con un *reticolo*, cioè si definiscono i campi *solo sui punti di una griglia*
- Se questa griglia è sufficientemente *fine*, otteniamo una buona approssimazione dello spazio continuo (per fare questo, serve un *supercomputer*, abbastanza potente da tenere in memoria il valore dei campi in un grande numero di punti)

- Lasciamo girare la simulazione sufficientemente a lungo, e andiamo ripetutamente a “misurare” l’energia del protone in questo mondo virtuale
- Il valore medio di queste misurazioni dell’energia nel mondo virtuale che abbiamo simulato ci dà una stima (che può essere resa sempre più accurata) del valore della massa del protone (e di altre particelle) previsto dal Modello Standard
- Le masse previste dalla teoria sono in ottimo accordo con i risultati sperimentali

- Lasciamo girare la simulazione sufficientemente a lungo, e andiamo ripetutamente a “misurare” l’energia del protone in questo mondo virtuale
- Il valore medio di queste misurazioni dell’energia nel mondo virtuale che abbiamo simulato ci dà una stima (che può essere resa sempre più accurata) del valore della massa del protone (e di altre particelle) previsto dal Modello Standard
- Le masse previste dalla teoria sono in ottimo accordo con i risultati sperimentali

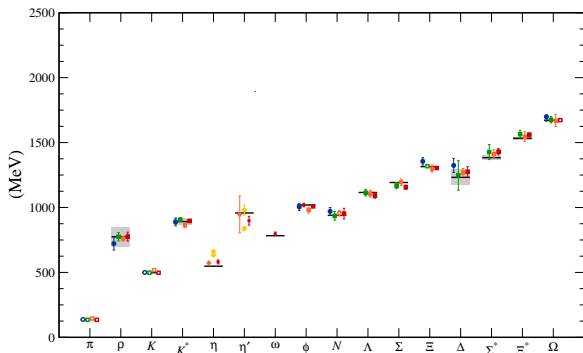
## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – II

- Lasciamo girare la simulazione sufficientemente a lungo, e andiamo ripetutamente a “misurare” l’energia del protone in questo mondo virtuale
- Il valore medio di queste misurazioni dell’energia nel mondo virtuale che abbiamo simulato ci dà una stima (che può essere resa sempre più accurata) del valore della massa del protone (e di altre particelle) previsto dal Modello Standard
- Le masse previste dalla teoria sono in ottimo accordo con i risultati sperimentali



## Discretizzazione su reticolo e simulazioni al computer – II

- Lasciamo girare la simulazione sufficientemente a lungo, e andiamo ripetutamente a “misurare” l’energia del protone in questo mondo virtuale
- Il valore medio di queste misurazioni dell’energia nel mondo virtuale che abbiamo simulato ci dà una stima (che può essere resa sempre più accurata) del valore della massa del protone (e di altre particelle) previsto dal Modello Standard
- Le masse previste dalla teoria sono in ottimo accordo con i risultati sperimentali: questo significa che il Modello Standard ci dà una corretta descrizione del mondo naturale



# Traccia

- 1 *Introduzione e motivazione*
- 2 *La fisica quantistica*
- 3 *Relatività*
- 4 *Il Modello Standard delle particelle elementari*
- 5 *Studiare le interazioni nucleari forti con i supercomputer*
- 6 *Conclusioni*

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)



## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)

## Riassumendo ...

- Studiare come si comportano le particelle elementari è fondamentale per capire anche tutti i fenomeni degli oggetti più complessi che esse formano—e, quindi, tutto il mondo naturale
- La fisica delle particelle elementari è dominata da fenomeni *quantistici* e *relativistici*
- Questi fenomeni sono *controintuitivi*, perché sono lontani dalla nostra esperienza quotidiana, ma sono verificati sperimentalmente
- Il Modello Standard delle particelle elementari è un modello teorico che ci dà una descrizione relativamente semplice delle varie particelle e delle loro interazioni
- Studiare le implicazioni del Modello Standard non è banale, e talvolta richiede l'uso di computer molto sofisticati; i risultati che ne derivano sono *in ottimo accordo con i risultati sperimentali*
- (Questa, tuttavia, non è la fine della storia...)