

I pilastri della fisica moderna:
Meccanica Quantistica e Relatività
Masterclass 2022 @ Roma Tre - Esperimento Belle II

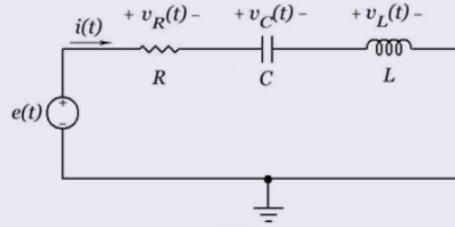
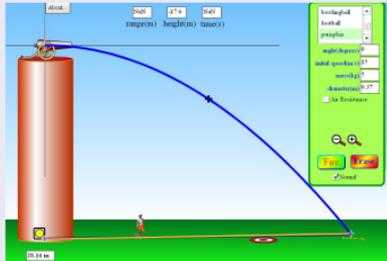
Francesco Sanfilippo



7 Febbraio 2022

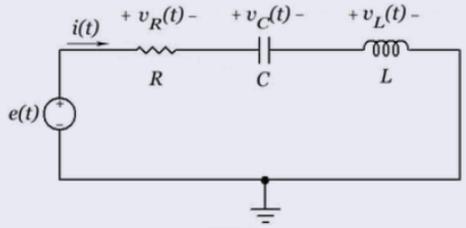
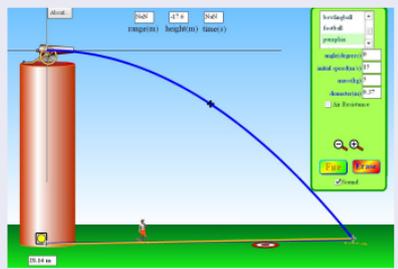
Fisica classica VS. Fisica moderna

Fisica classica



Fisica classica VS. Fisica moderna

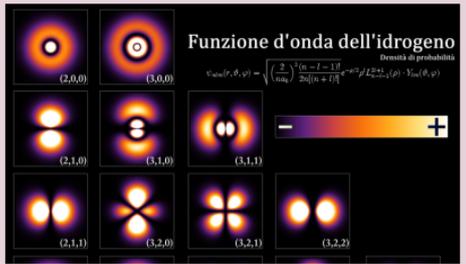
Fisica classica



Fisica moderna

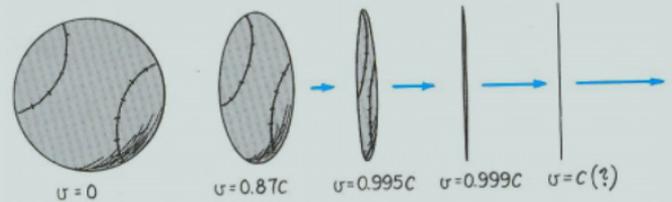
Cosa succede quando osserviamo particelle **molto piccole** o **molto veloci**?

Meccanica quantistica



Principio di indeterminazione
Dualismo onda-corpuscolo...

Relatività



Dilatazione degli intervalli temporali
Contrazione delle lunghezze
Conversione di massa in energia...

Il primo pilastro: Meccanica quantistica

Stato di una particella

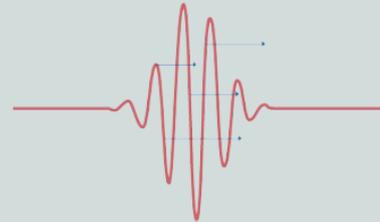
Dalla meccanica classica...

Particella descritta da: posizione, velocità



...alla meccanica quantistica

Particella descritta da: funzione d'onda



In meccanica quantistica ogni particella ha una *distribuzione* di velocità e di posizione

Stato di una particella

Dalla meccanica classica...

Particella descritta da: posizione, velocità



...alla meccanica quantistica

Particella descritta da: funzione d'onda



In meccanica quantistica ogni particella ha una *distribuzione* di velocità e di posizione

Principio di indeterminazione

- Non tutte le proprietà di una particella sono simultaneamente misurabili
- Esempio: posizione e velocità non possono essere definite con precisione arbitraria

Stato di una particella

Dalla meccanica classica...

Particella descritta da: posizione, velocità



...alla meccanica quantistica

Particella descritta da: funzione d'onda



In meccanica quantistica ogni particella ha una *distribuzione* di velocità e di posizione

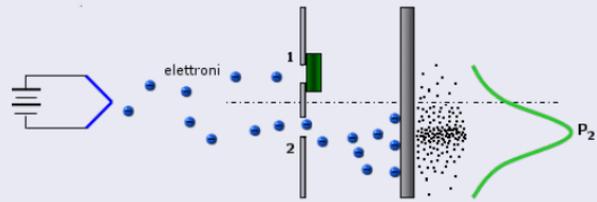
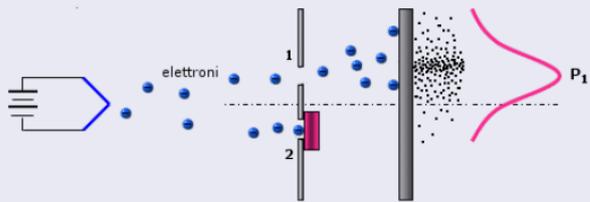
Principio di indeterminazione

- Non tutte le proprietà di una particella sono simultaneamente misurabili
- Esempio: posizione e velocità non possono essere definite con precisione arbitraria

Vediamolo in un **famoso esempio...**

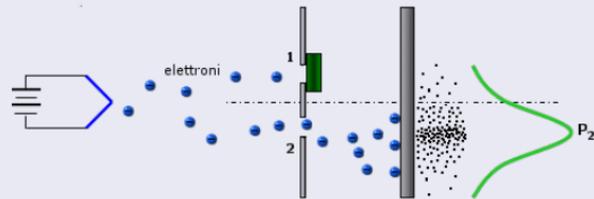
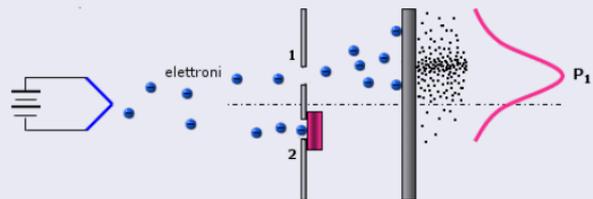
Esperimento delle due fenditure

Lanciamo elettroni verso una o l'altra fenditura

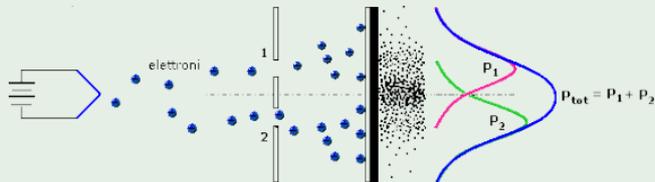


Esperimento delle due fenditure

Lanciamo elettroni verso una o l'altra fenditura

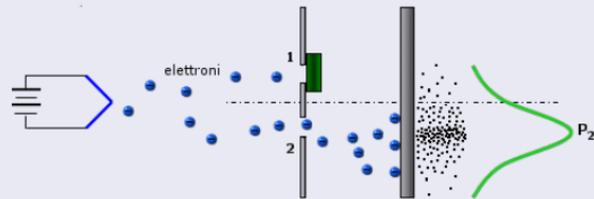
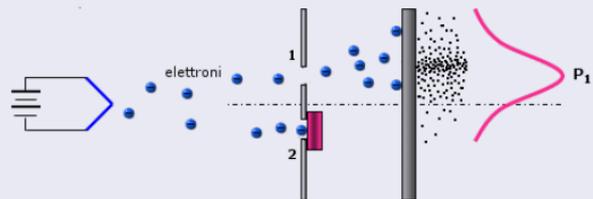


Quando le apriamo tutte e due, osserviamo la somma dei due passaggi?

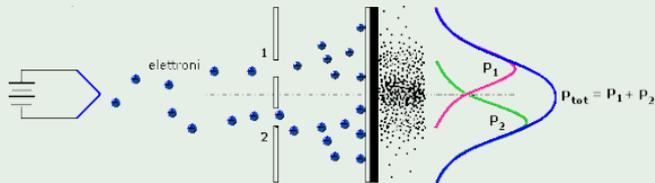


Esperimento delle due fenditure

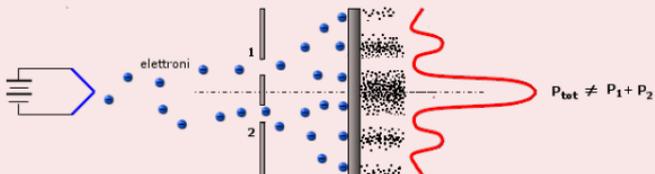
Lanciamo elettroni verso una o l'altra fenditura



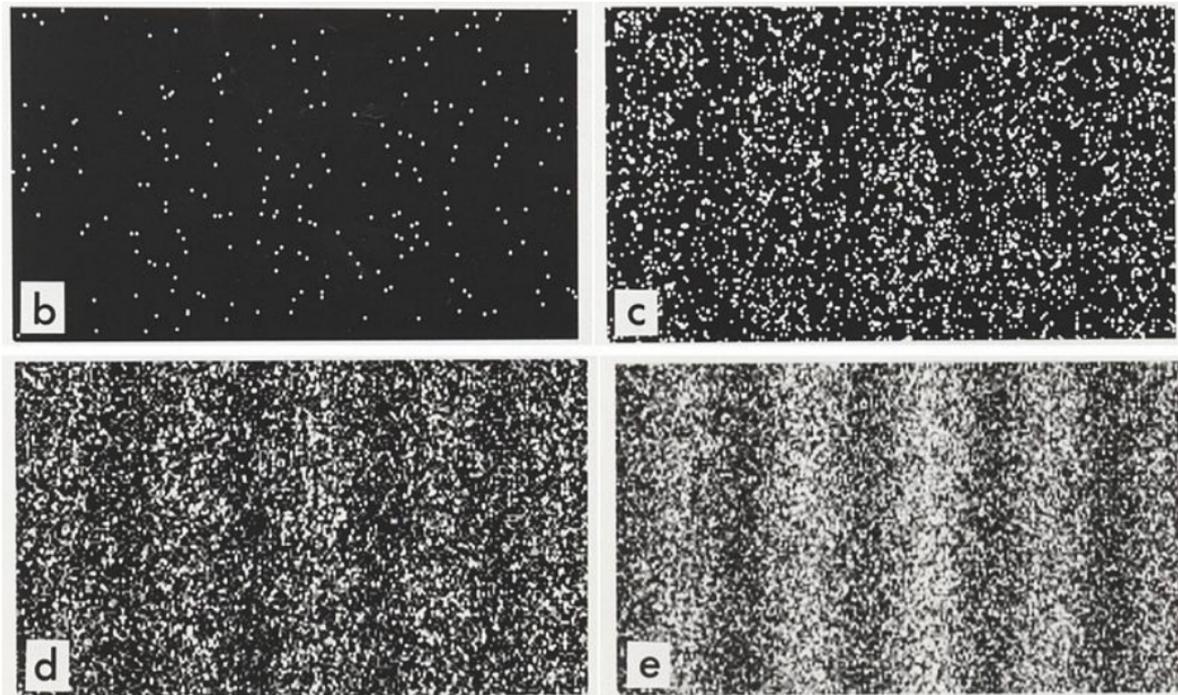
Quando le apriamo tutte e due, osserviamo la somma dei due passaggi?



NO!!! Si osserva una figura di interferenza



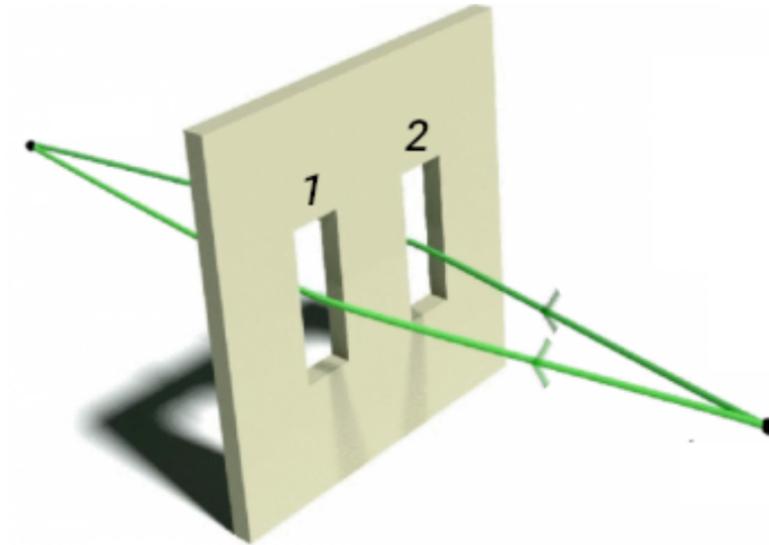
Esperimento delle due fenditure (Tanamura 1989)



Posizione di arrivo di 200 elettroni (b), 6000 (c), 40000 (d), 140000 (e).

L'elettrone passa attraverso entrambe le fenditure!

Posizione e velocità non sono misurabili con arbitraria precisione simultaneamente
→ non si può parlare di *traiettoria* della particella



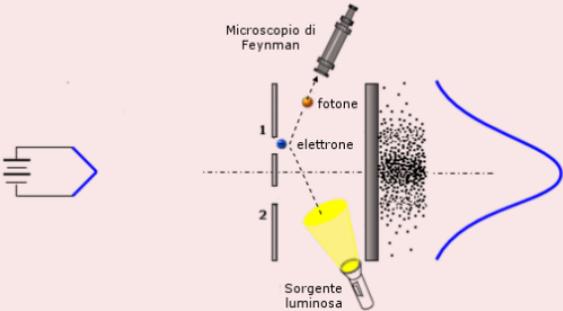
Ogni singola particella arriva al bersaglio seguendo tutti i percorsi possibili simultaneamente!

“Attraversare simultaneamente due porte”



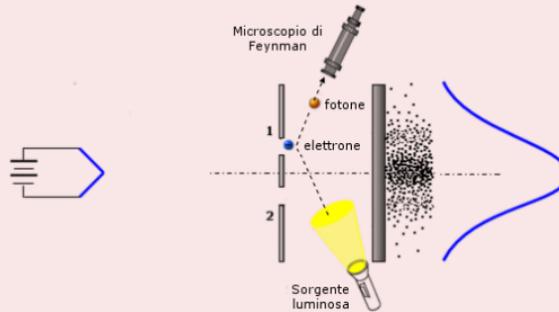
Perché non si passa da due porte allo stesso tempo?

Osservare la particella vincola univocamente il tragitto percorso!

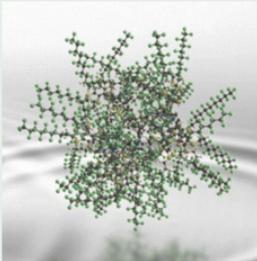


Perché non si passa da due porte allo stesso tempo?

Osservare la particella vincola univocamente il tragitto percorso!



I limiti di rivelabilità degli effetti quantistici



- Più è grande (massiva) la particella, più è difficile che passi "inosservata"
- Ad oggi sono stati rilevati **effetti di interferenza** in molecole grandi fino a $\simeq 2000$ **atomi**

Stato di una particella

- Descritto dalla sua funzione d'onda
- Principio di indeterminazione
- Ostacolo a conoscibilità simultanea di posizione e impulso



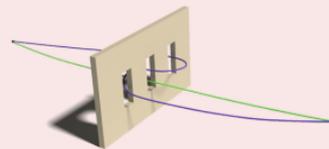
Stato di una particella

- Descritto dalla sua funzione d'onda
- Principio di indeterminazione
- Ostacolo a conoscibilità simultanea di posizione e impulso



La traiettoria di una particella non è ben definita

- Interferenza dei percorsi
- Anche i percorsi "impossibili" sono possibili (ma poco probabili!)



Meccanica quantistica (riepilogo)

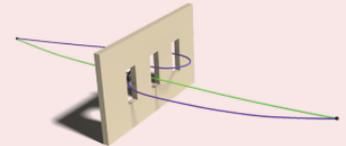
Stato di una particella

- Descritto dalla sua funzione d'onda
- Principio di indeterminazione
- Ostacolo a conoscibilità simultanea di posizione e impulso



La traiettoria di una particella non è ben definita

- Interferenza dei percorsi
- Anche i percorsi "impossibili" sono possibili (ma poco probabili!)

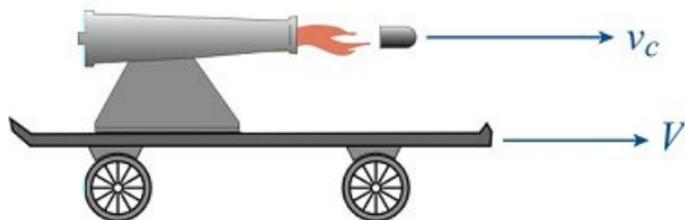


Fino a quale scala possiamo vedere chiaramente gli effetti quantistici?

- Ostacolo a miniaturizzare dispositivi elettronici "classici"
- Portare i fenomeni quantistici ad una scala macroscopica?
- Quantum computer?



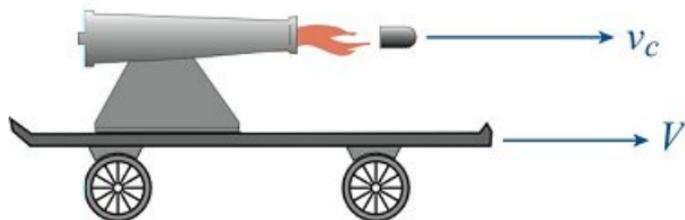
Il secondo pilastro: Relatività



Relatività Galileiana

- Il tempo trascorso fra due eventi è lo stesso per ogni osservatore
- La distanza fra due punti è la stessa per ogni osservatore
- Le velocità si sommano linearmente: $v_T = v_c + V$

Il secondo pilastro: Relatività



Relatività Galileiana

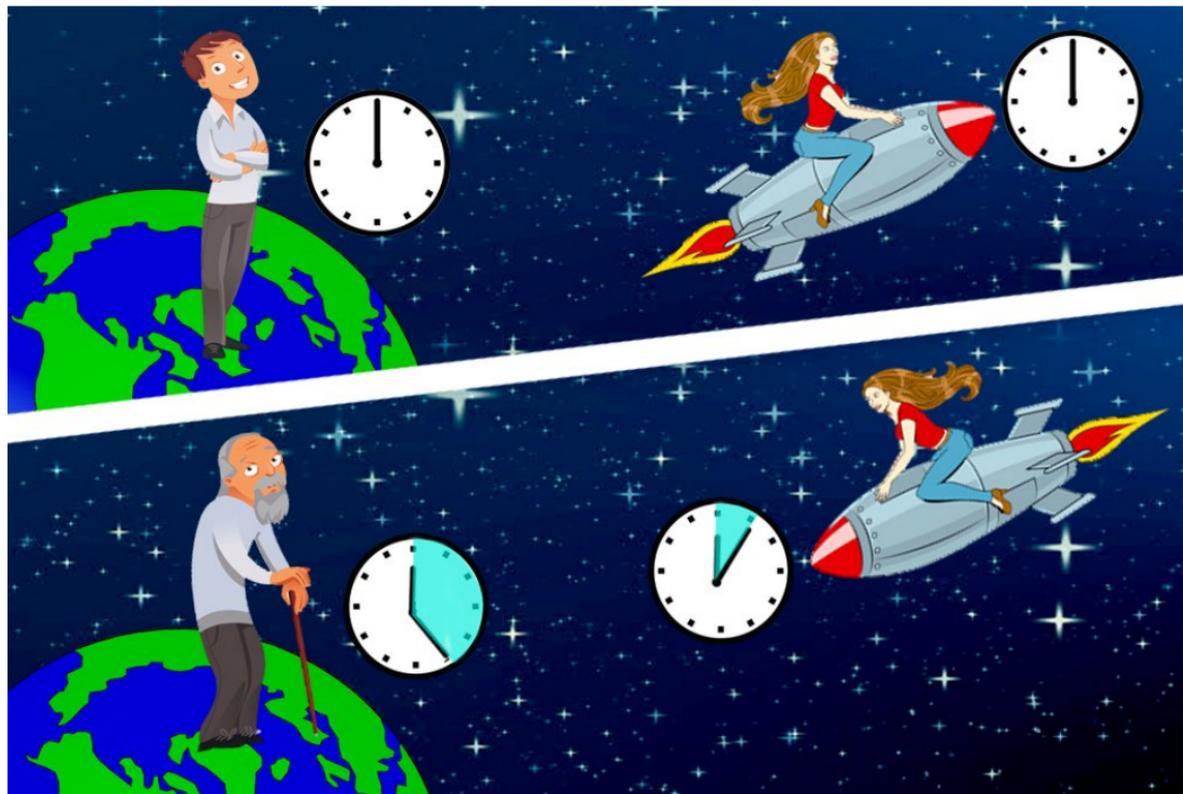
- Il tempo trascorso fra due eventi è lo stesso per ogni osservatore
- La distanza fra due punti è la stessa per ogni osservatore
- Le velocità si sommano linearmente: $v_T = v_c + V$

Relatività ristretta di Einstein

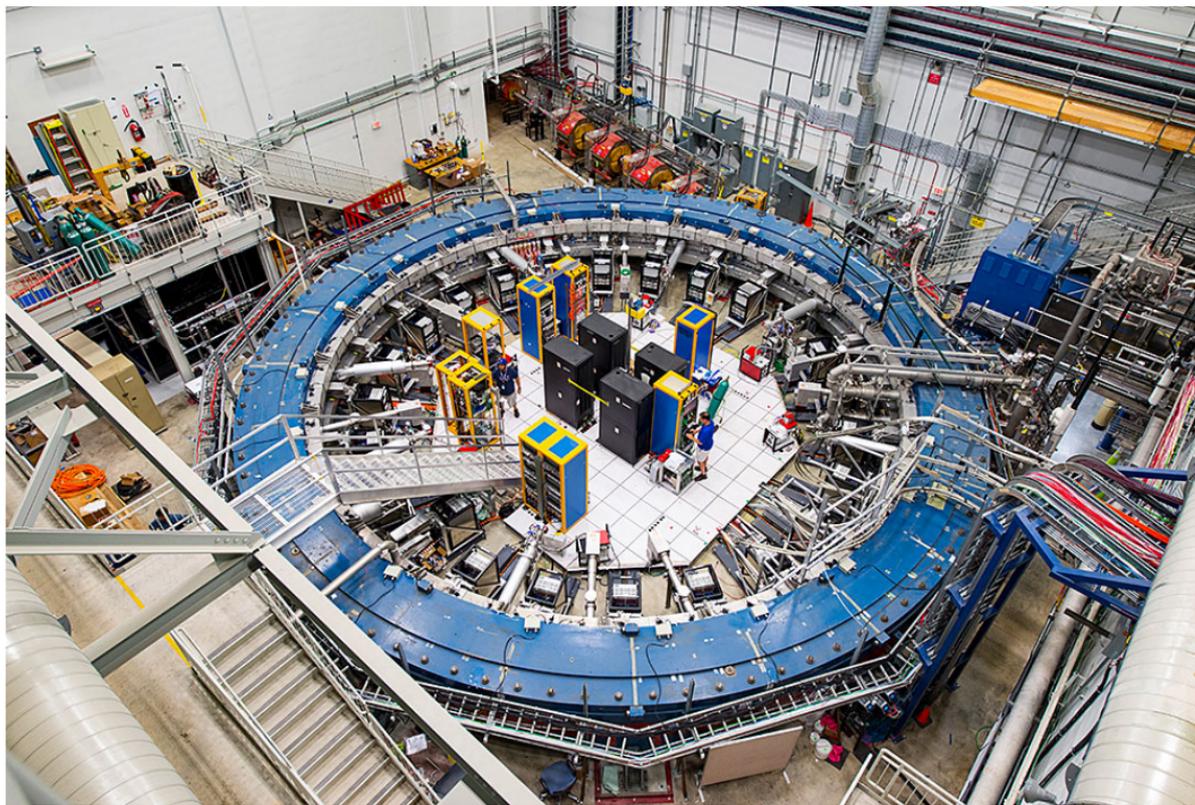
- Il tempo trascorso fra due eventi **NON** è lo stesso per ogni osservatore
→ **dilatazione del tempo**
- La distanza fra due punti **NON** è la stessa per ogni osservatore
→ **contrazione delle lunghezze**
- Le velocità **NON** si sommano linearmente: $v_T = \frac{v_c + V}{1 + v_c V / c^2}$

Questo fa sì che la velocità della luce sia la stessa per ogni osservatore

Dilatazione degli intervalli temporali

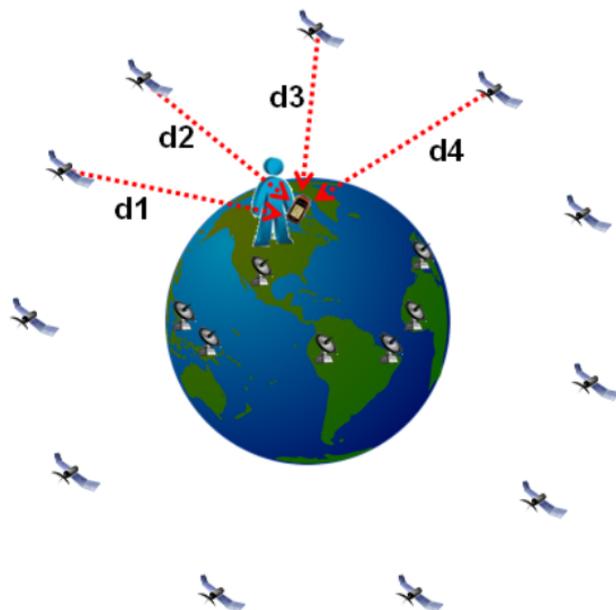


Allungamento della vita media delle particelle instabili



- Vita media di un muone a riposo: 2.2 milionesimi di secondo
- Vita media di un muone all'esperimento $g_\mu - 2$ di Brookhaven: 64 milionesimi di secondo

Un esempio nella vita di tutti i giorni: il GPS

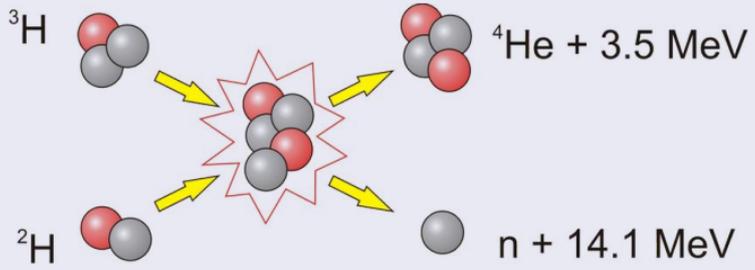


Ne va della precisione!!!

- I satelliti GPS viaggiano a circa **4 km/s**, fattore di dilatazione del tempo: $\gamma = 1 + 9 \cdot 10^{-11}$
- 1 secondo dell'orologio GPS dura **9 centomiliardesimi** di secondo in più visto da terra
- 1 giorno sui satelliti GPS dura **7 milionesimi di secondo** in più sulla terra
- Se l'effetto non fosse tenuto in conto, si accumulerebbero ogni giorno **2 km** di errore!

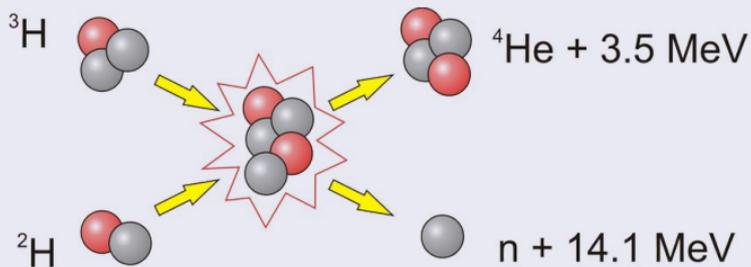
Conversione di massa in energia

Liberazione di energia nella fusione nucleare

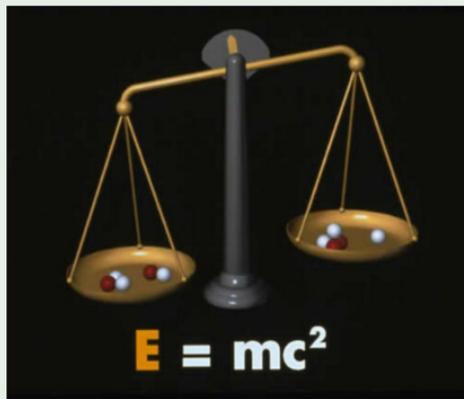


Conversione di massa in energia

Liberazione di energia nella fusione nucleare



La differenza di energia è una differenza di massa!



Le particelle restano le stesse, la massa totale cambia!

La velocità della luce (~ 300 mila km/s) è la stessa per tutti gli osservatori

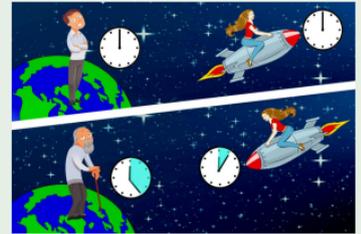
- Velocità **limite** alla propagazione delle informazioni
- Osservatori in moto reciproco vedono il tempo scorrere e misurano le distanze in maniera **diversa**
- Il concetto di **contemporaneità** smette di avere senso



Relatività (riepilogo)

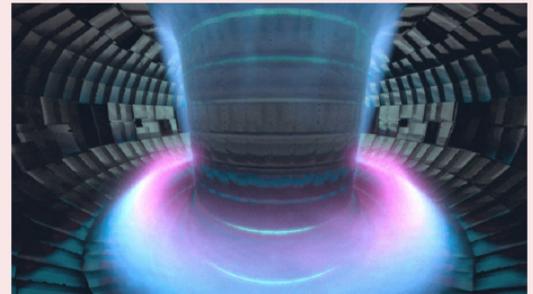
La velocità della luce (~ 300 mila km/s) è la stessa per tutti gli osservatori

- Velocità **limite** alla propagazione delle informazioni
- Osservatori in moto reciproco vedono il tempo scorrere e misurano le distanze in maniera **diversa**
- Il concetto di **contemporaneità** smette di avere senso



La massa e l'energia si possono trasformare l'una nell'altra

- L'energia di legame delle particelle fondamentali **costituisce** gran parte della massa della materia
- Liberazione di energia a seguito di cambio di configurazione delle particelle
- Energia pulita **inesauribile**?



Relatività (riepilogo)

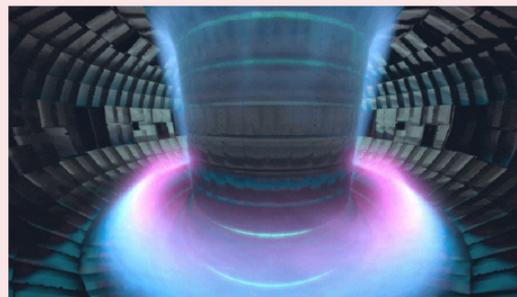
La velocità della luce (~ 300 mila km/s) è la stessa per tutti gli osservatori

- Velocità **limite** alla propagazione delle informazioni
- Osservatori in moto reciproco vedono il tempo scorrere e misurano le distanze in maniera **diversa**
- Il concetto di **contemporaneità** smette di avere senso



La massa e l'energia si possono trasformare l'una nell'altra

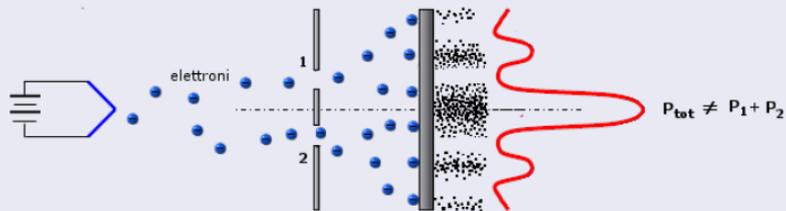
- L'energia di legame delle particelle fondamentali **costituisce** gran parte della massa della materia
- Liberazione di energia a seguito di cambio di configurazione delle particelle
- Energia pulita **inesauribile**?



E fino a qui, forse, **non diciamo cose troppe inattese...**

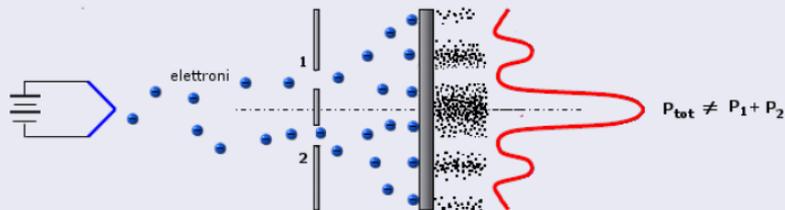
Due teorie, due ambiti di applicazione diversi

Meccanica quantistica: descrive il comportamento delle particelle **microscopiche**

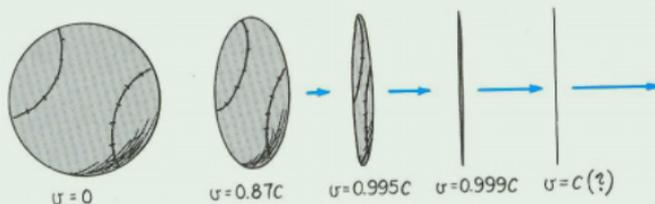


Due teorie, due ambiti di applicazione diversi

Meccanica quantistica: descrive il comportamento delle particelle **microscopiche**

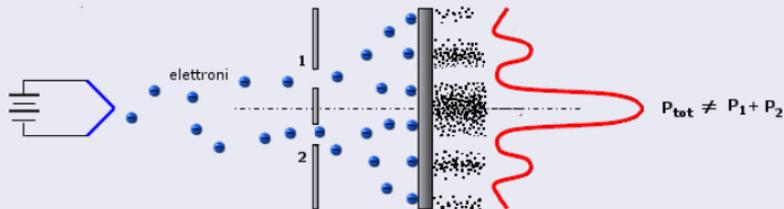


Relatività ristretta: descrive il moto relativo a **velocità prossime a quelle della luce**

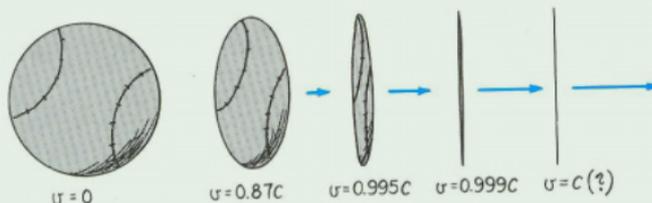


Due teorie, due ambiti di applicazione diversi

Meccanica quantistica: descrive il comportamento delle particelle **microscopiche**



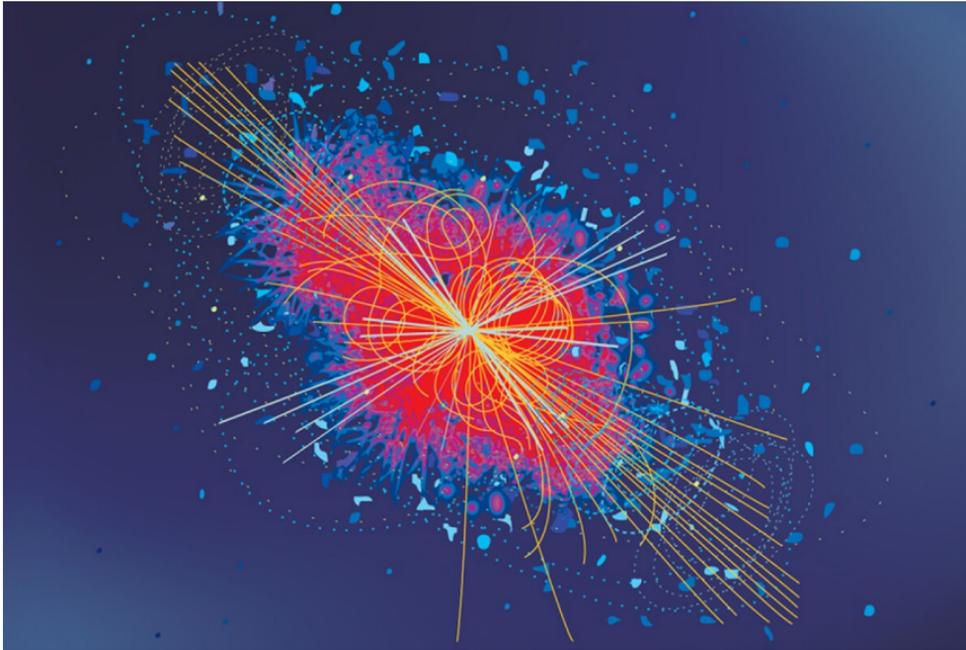
Relatività ristretta: descrive il moto relativo a **velocità prossime a quelle della luce**



Meccanica quanto-relativistica?

Cosa succede quando osserviamo **particelle microscopiche** che si muovono a velocità **prossime a quella della luce**?

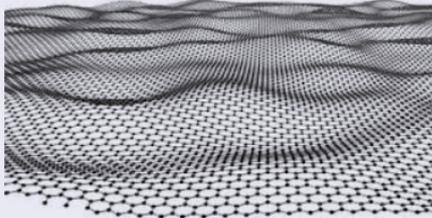
Interazione microscopica di particelle relativistiche



Fenomeni ancora più inattesi!

- Il *numero* di particelle non si conserva
- Il *tipo* di particelle non si conserva: nuove particelle create
- L'energia di una particella si converte nell'energia di altre particelle

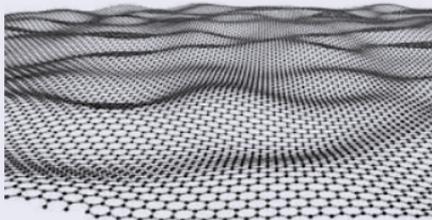
Entità fondamentale: CAMPI che permeano lo spazio



- Cos'è un campo? Funzione del punto
- Un tipo di campo diverso per ogni tipo di particella
Campo elettromagnetico → fotoni
Campo dell'elettrone → elettroni

Meccanica quantistica + relatività = Teoria quantistica dei campi

Entità fondamentale: CAMPI che permeano lo spazio



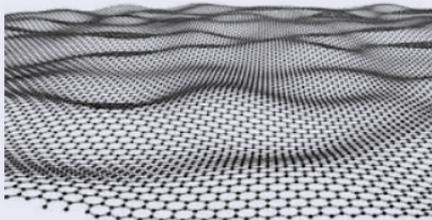
- Cos'è un campo? Funzione del punto
- Un tipo di campo diverso per ogni tipo di particella
Campo elettromagnetico → fotoni
Campo dell'elettrone → elettroni

Come differisce da meccanica quantistica?

| | Entità fondamentale | Descrizione |
|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Meccanica quantistica | Particella | Funzione d'onda |
| Teoria dei campi | Campo | Particella |

Meccanica quantistica + relatività = Teoria quantistica dei campi

Entità fondamentale: CAMPI che permeano lo spazio



- Cos'è un campo? Funzione del punto
- Un tipo di campo diverso per ogni tipo di particella
Campo elettromagnetico → fotoni
Campo dell'elettrone → elettroni

Come differisce da meccanica quantistica?

| | Entità fondamentale | Descrizione |
|-----------------------|---------------------|-----------------|
| Meccanica quantistica | Particella | Funzione d'onda |
| Teoria dei campi | Campo | Particella |

Modello standard

La teoria dei campi è il quadro teorico per formulazione del

Modello Standard della fisica delle Particelle Fondamentali

(L'argomento della prossima presentazione...)