

Dalla nascita della meccanica quantistica alle ricerche di frontiera al CERN

Lorenzo Capriotti



**Università
degli Studi
di Ferrara**

LHCb Masterclass 2025

Ferrara

24/02/2025

- Crisi della fisica classica e nascita della meccanica quantistica
- Luce, particelle, onde ed interferenza
- Materia e antimateria: l'equazione di Dirac
- Il Modello Standard delle particelle elementari
- Il CERN e il Large Hadron Collider

LA NASCITA DELLA MECCANICA QUANTISTICA

Tra la fine del XIX secolo e l'inizio del XX secolo la comunità scientifica si rese conto che c'erano diverse anomalie in fenomeni su scala *microscopica*

- La catastrofe ultravioletta del corpo nero (Planck 1900)
- Problema del collasso atomico (Rutherford 1911)
- Effetto fotoelettrico (Righi 1888 - Einstein 1905 - Millikan 1916)
- Effetto Compton (1922)
- Esperimento di Stern-Gerlach (1922)
- Esperimento della doppia fenditura (Davisson, Germer 1927)

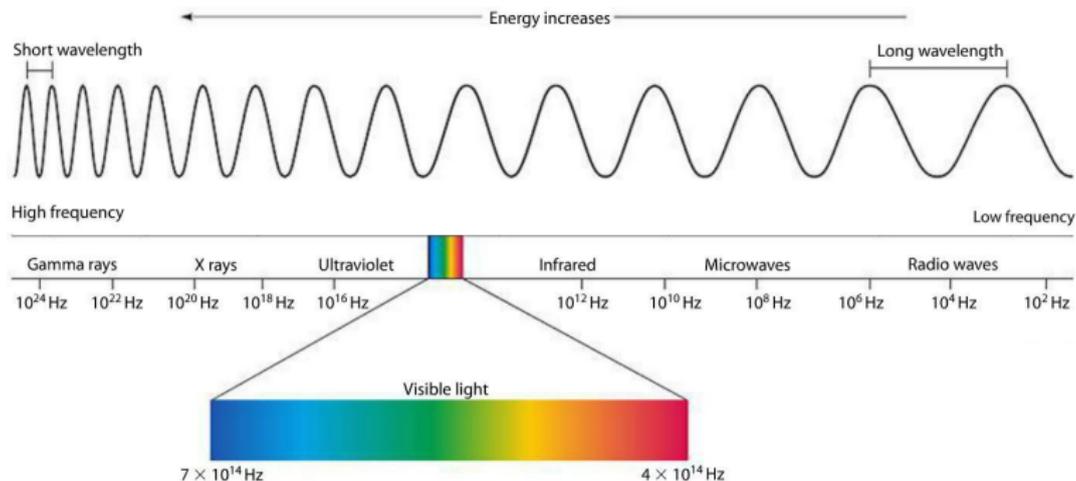
Ma prima è necessario fare una piccola digressione sulla **teoria della luce**.

Luce e colori, onde elettromagnetiche



Le onde elettromagnetiche si differenziano per la loro **energia**, ossia la loro **frequenza** di oscillazione. Ogni colore possiede una frequenza caratteristica.

Lo spettro elettromagnetico



I nostri occhi si sono evoluti per essere sensibili ad un piccolo intervallo di frequenza della luce.

I raggi UV o i raggi X sono più energetici (hanno frequenza più alta) rispetto alle microonde o alla luce infrarossa.

- Quale barra di ferro è **più calda**?





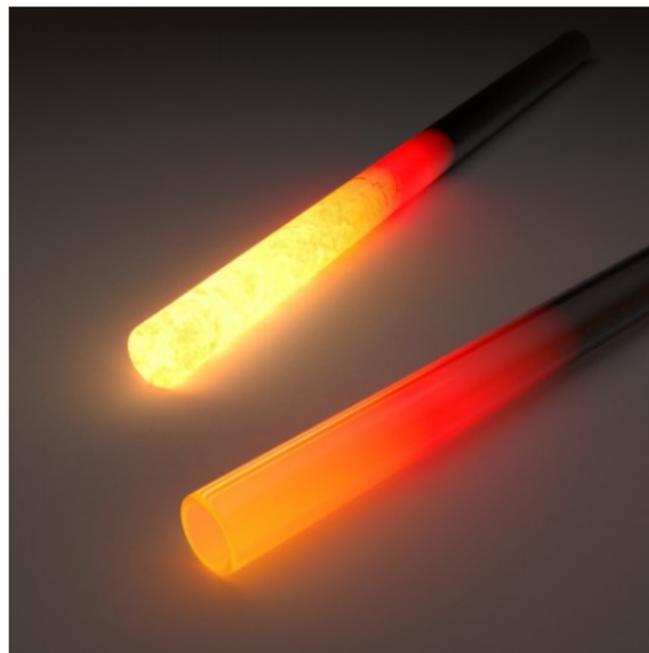
- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo



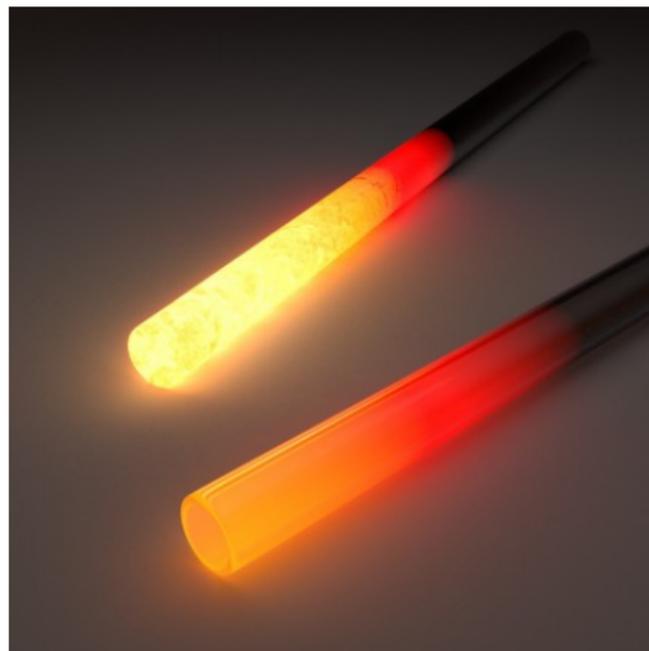
- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo
- Un corpo ad alta temperatura **emette luce** e, nel farlo, si raffredda



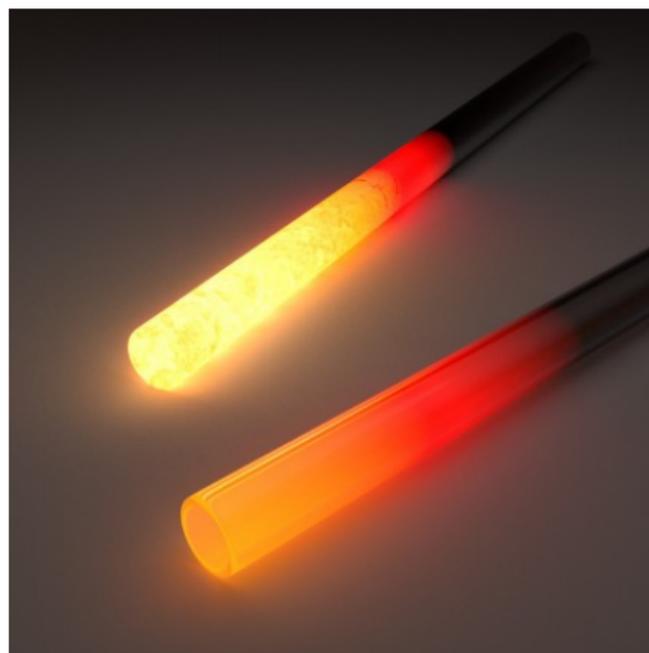
- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo
- Un corpo ad alta temperatura **emette luce** e, nel farlo, si raffredda
- Più il corpo è caldo, maggiore è la quantità di energia emessa sotto forma di onde elettromagnetiche



- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo
- Un corpo ad alta temperatura **emette luce** e, nel farlo, si raffredda
- Più il corpo è caldo, maggiore è la quantità di energia emessa sotto forma di onde elettromagnetiche
- Quindi un corpo caldo (con molta energia) emette luce più energetica, o con frequenza più alta



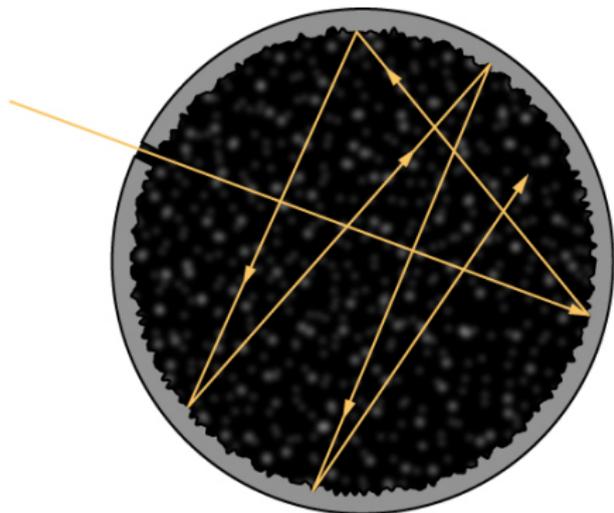
- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo
- Un corpo ad alta temperatura **emette luce** e, nel farlo, si raffredda
- Più il corpo è caldo, maggiore è la quantità di energia emessa sotto forma di onde elettromagnetiche
- Quindi un corpo caldo (con molta energia) emette luce più energetica, o con frequenza più alta
- Analogamente si può riscaldare un corpo con onde elettromagnetiche



- Quale barra di ferro è **più calda**?
- La temperatura è una **misura di energia** di un corpo
- Un corpo ad alta temperatura **emette luce** e, nel farlo, si raffredda
- Più il corpo è caldo, maggiore è la quantità di energia emessa sotto forma di onde elettromagnetiche
- Quindi un corpo caldo (con molta energia) emette luce più energetica, o con frequenza più alta
- Analogamente si può riscaldare un corpo con onde elettromagnetiche
- Quindi riscaldando il ferro questo diventerebbe verde e poi blu?

Un **corpo nero** è un oggetto **ipotetico** capace di assorbire tutta la radiazione elettromagnetica che lo colpisce e con resistenza al calore infinita (non fonde)

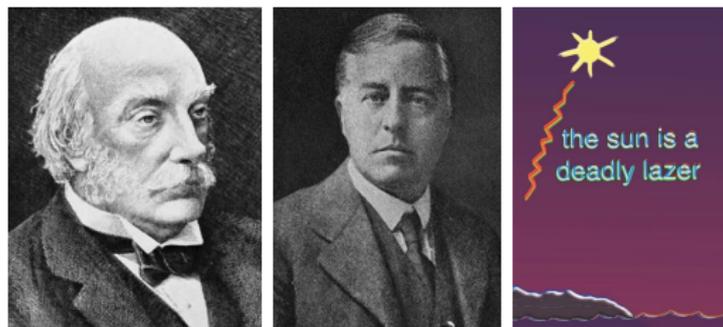
- Buona approssimazione di oggetti caldi che emettono luce (es. il sole)
- Scaldandolo si può calcolare la frequenza della luce **emessa**
- Secondo le leggi della fisica dell'epoca, l'energia media di tutte le onde con frequenza f è $\bar{E} = kT$
- Teorema di equipartizione dell'energia considerando statisticamente la luce come un gas
- k è la costante di Boltzmann



La catastrofe ultravioletta



Descrizione della radiazione di corpo nero (1900): **legge di Rayleigh-Jeans**



Energia totale della luce emessa da un corpo nero a temperatura T :

$$E_{tot} = \int_0^{\infty} \left(\frac{8\pi kT}{c^3} \right) f^2 df = \lim_{f \rightarrow \infty} \left(\frac{8\pi kT}{3c^3} \right) f^3 = \infty$$

Quindi un corpo nero, **a qualsiasi temperatura**, emetterebbe una quantità **infinitamente grande** di energia tramite luce di frequenza **infinitamente grande**!

\Rightarrow evidentemente c'era **qualcosa di sbagliato** nelle leggi della fisica del 1900

Quantizzazione della luce

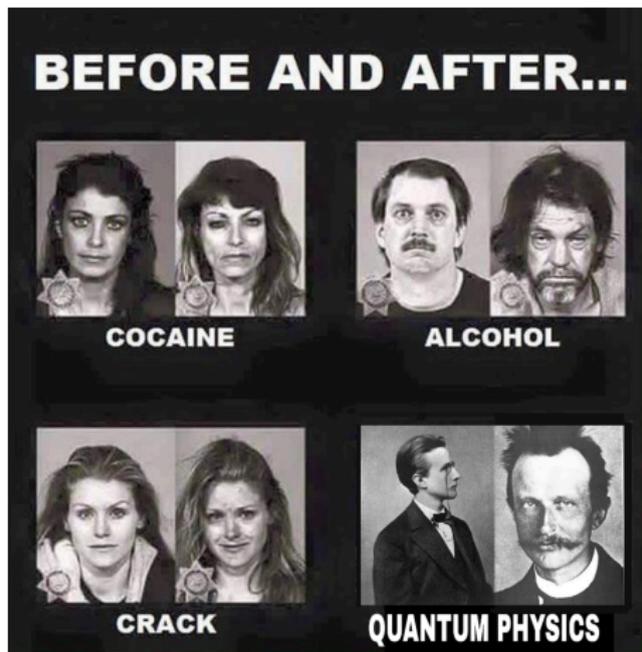
La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$



Quantizzazione della luce

La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$

Ripetendo il calcolo non si trovano più energie infinite: **problema risolto!**



Quantizzazione della luce

La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$

Ripetendo il calcolo non si trovano più energie infinite: **problema risolto!**

Questo però implica che la luce sia formata da piccoli pacchetti distinti



Quantizzazione della luce

La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$

Ripetendo il calcolo non si trovano più energie infinite: **problema risolto!**

Questo però implica che la luce sia formata da piccoli pacchetti distinti

Ognuno di questi pacchetti ha energia e frequenza ben definiti



Quantizzazione della luce



La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$

Ripetendo il calcolo non si trovano più energie infinite: **problema risolto!**

Questo però implica che la luce sia formata da piccoli pacchetti distinti

Ognuno di questi pacchetti ha energia e frequenza ben definiti

Queste unità fondamentali si chiamano quanti (da cui fisica quantistica)



Quantizzazione della luce

La soluzione fu proposta da **Max Planck**: l'energia della luce è multipla della sua frequenza $\rightarrow E_f = nhf$

Ripetendo il calcolo non si trovano più energie infinite: **problema risolto!**

Questo però implica che la luce sia formata da piccoli pacchetti distinti

Ognuno di questi pacchetti ha energia e frequenza ben definiti

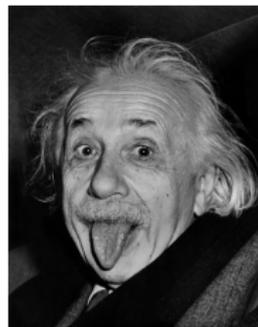
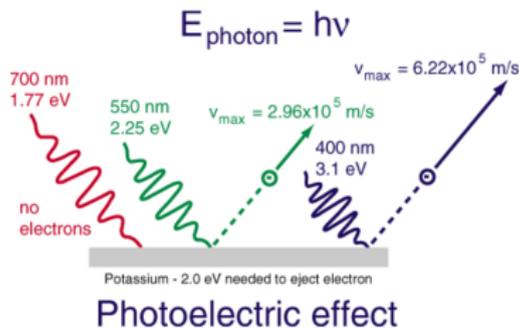
Queste unità fondamentali si chiamano quanti (da cui fisica quantistica)

Oggi chiamiamo i quanti di luce **fotoni**

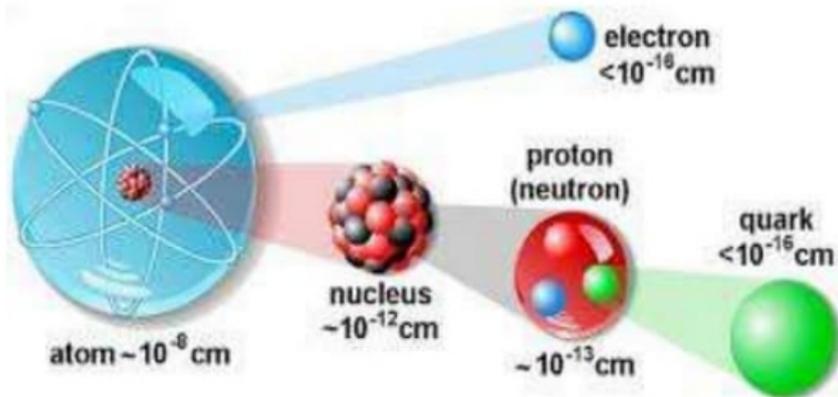


L'effetto fotoelettrico e l'idea di Einstein

Nel 1888 Augusto Righi utilizzò per primo il termine "effetto fotoelettrico" per descrivere un nuovo fenomeno: illuminando una lastra di potassio con luce UV si genera una corrente elettrica.



- Soluzione: se applichiamo la teoria di Planck, possiamo immaginare singoli fotoni che interagiscono con i singoli elettroni degli atomi di potassio e li strappano via dal nucleo
- Gli elettroni sono legati al nucleo e hanno bisogno di una energia minima (**energia di soglia**) per poter essere estratti



Negli atomi troviamo **elettroni**, **protoni** e **neutroni**. Questi sono a loro volta composti da tre **quark**. Elettroni, quark, fotoni sono **particelle fondamentali**.

LUCE
PARTICELLE
ONDE
ED
INTERFERENZA

Diffrazione di un'onda

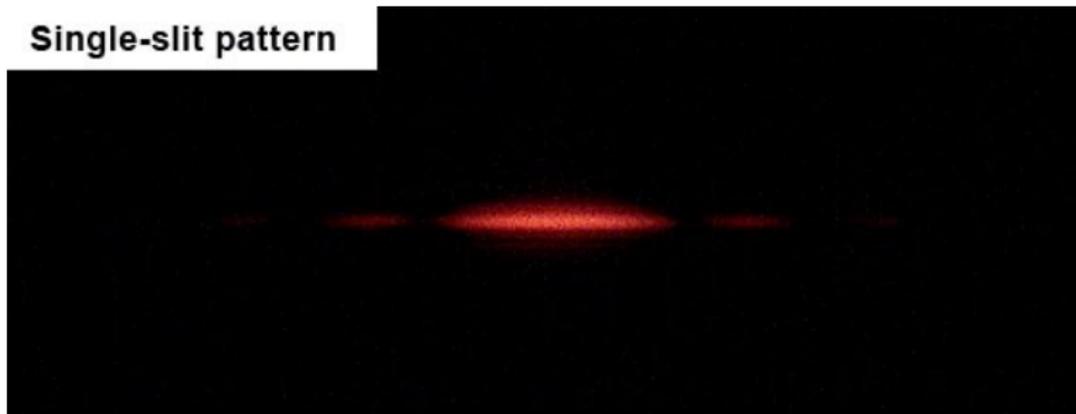


Diffrazione e interferenza

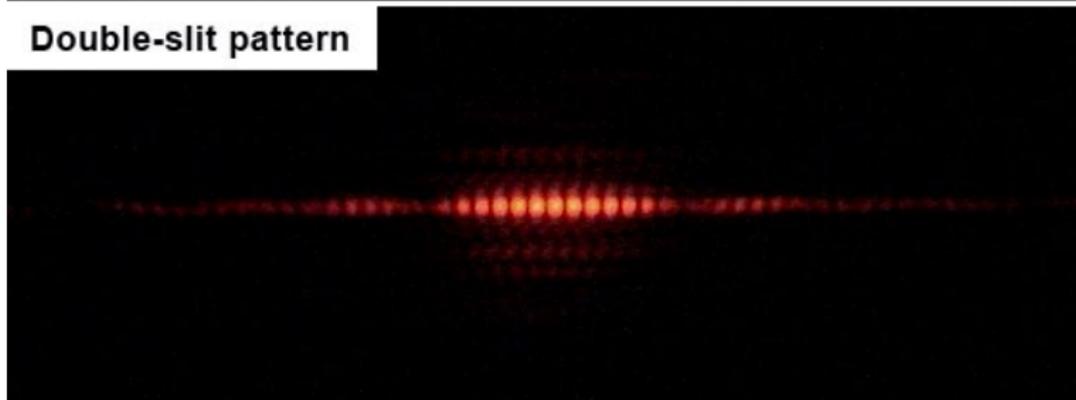


Pattern di interferenza

Single-slit pattern

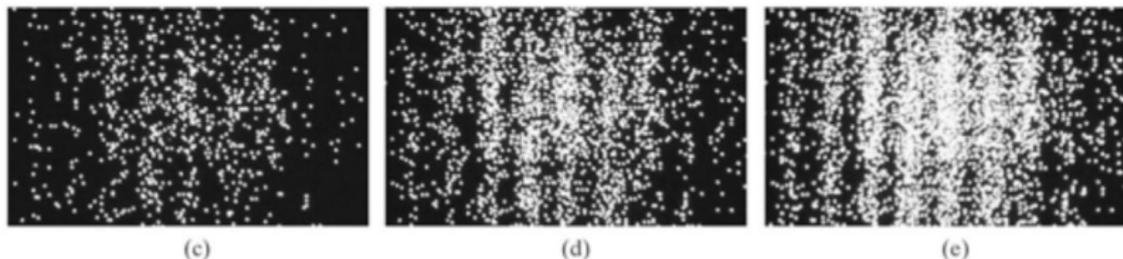
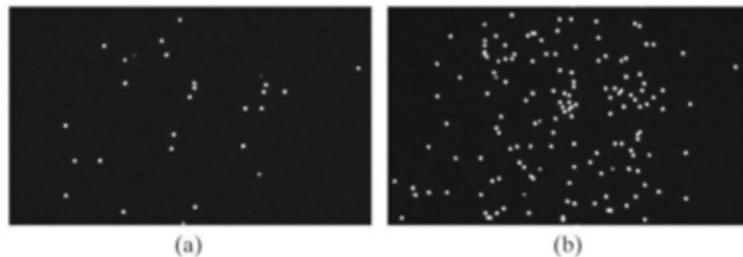


Double-slit pattern



L'esperimento della doppia fenditura

Ripetendo l'esperimento della doppia fenditura con **elettroni** si osserva lo stesso pattern di interferenza che ci si aspetterebbe dalle **onde**!



Per concludere: la luce è un'onda ma anche una particella.

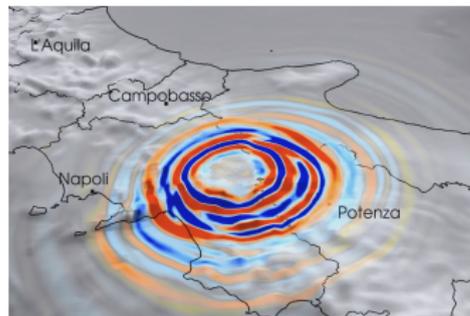
Gli elettroni sono particelle ma anche onde.

Ma quindi sono particelle o onde?

E cosa vuol dire esattamente "essere un'onda"?

Dualità onda-particella

La risposta semplice è: **nessuna delle due**. O meglio: quelle che noi chiamiamo "particelle" sono oggetti dalla natura molto complessa (tecnicamente **campi quantistici**) che hanno sia proprietà delle onde sia proprietà di piccole palline.



Le onde descrivono sempre la propagazione di qualcosa: le onde associate alle particelle sono di natura **probabilistica**!

Principio di indeterminazione di Heisenberg



Ogni misura di una grandezza quantistica presenta un'incertezza intrinseca.

- Non dipende dalla precisione degli strumenti!
- In fisica classica, la **traiettoria** si costruisce a partire dalla posizione e velocità di un punto
- In MQ invece: **principio di indeterminazione**

$$\Delta x \Delta p > \frac{h}{4\pi}$$

- Non si possono misurare contemporaneamente posizione e velocità di una particella
- Quindi **non si può prevedere la sua traiettoria**
- Il moto di una particella è descritto tramite una funzione $\psi(x)$ che è legata alla **probabilità** che una particella sia in un certo punto



"Le leggi naturali non conducono quindi a una completa determinazione di ciò che accade nello spazio e nel tempo"

Funzione d'onda



$\psi(x)$ si propaga nel tempo con le stesse equazioni matematiche usate per descrivere le onde, per cui la chiamiamo **funzione d'onda**.

Funzione d'onda

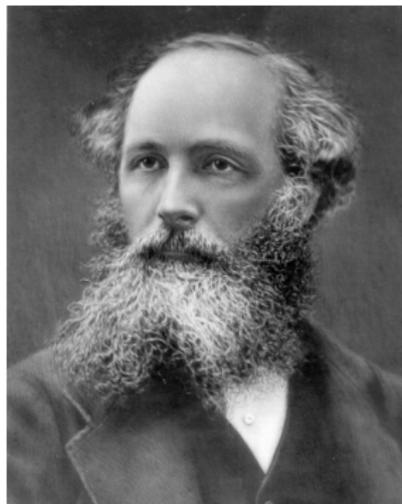


La velocità della luce (piccola digressione)

L'elettromagnetismo culmina nel 1895 con le famose equazioni di Maxwell

- La luce si propaga come un'onda
- La velocità della luce è **costante**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m/s}$$



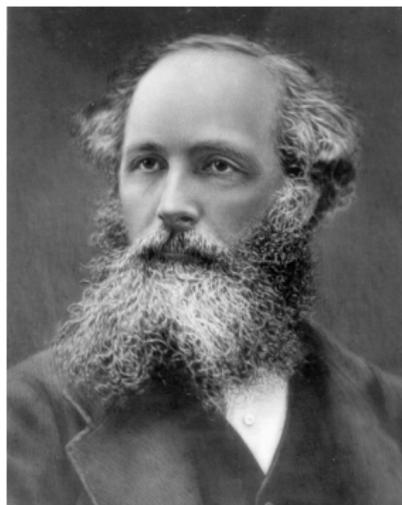
La velocità della luce (piccola digressione)

L'elettromagnetismo culmina nel 1895 con le famose equazioni di Maxwell

- La luce si propaga come un'onda
- La velocità della luce è **costante**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m/s}$$

- Se ho una macchina che si muove alla velocità della luce e accendo i fari, cosa succede?



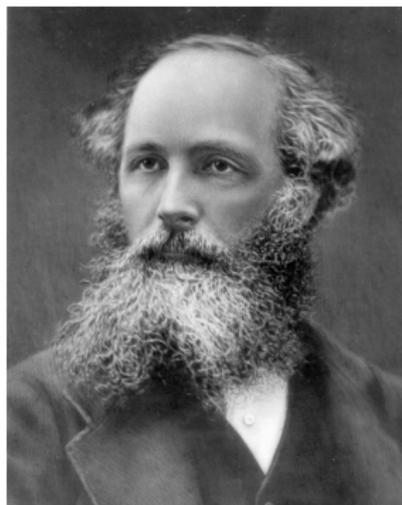
La velocità della luce (piccola digressione)

L'elettromagnetismo culmina nel 1895 con le famose equazioni di Maxwell

- La luce si propaga come un'onda
- La velocità della luce è **costante**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m/s}$$

- Se ho una macchina che si muove alla velocità della luce e accendo i fari, cosa succede?
- Spazio e tempo non sono più indipendenti



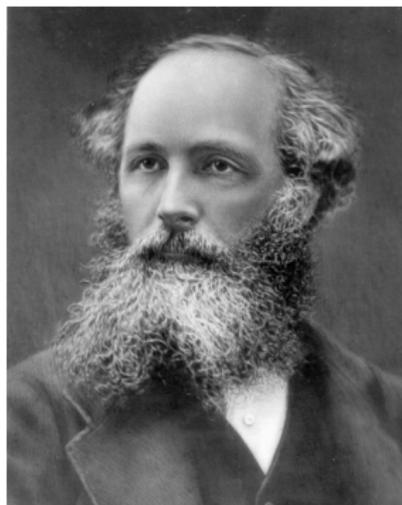
La velocità della luce (piccola digressione)

L'elettromagnetismo culmina nel 1895 con le famose equazioni di Maxwell

- La luce si propaga come un'onda
- La velocità della luce è **costante**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m/s}$$

- Se ho una macchina che si muove alla velocità della luce e accendo i fari, cosa succede?
- Spazio e tempo non sono più indipendenti
- Il tempo scorre diversamente per due osservatori che si muovono (**paradosso dei gemelli**)



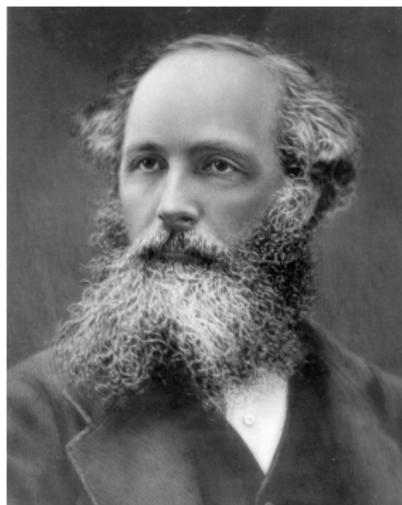
La velocità della luce (piccola digressione)

L'elettromagnetismo culmina nel 1895 con le famose equazioni di Maxwell

- La luce si propaga come un'onda
- La velocità della luce è **costante**

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299792458 \text{ m/s}$$

- Se ho una macchina che si muove alla velocità della luce e accendo i fari, cosa succede?
- Spazio e tempo non sono più indipendenti
- Il tempo scorre diversamente per due osservatori che si muovono (**paradosso dei gemelli**)

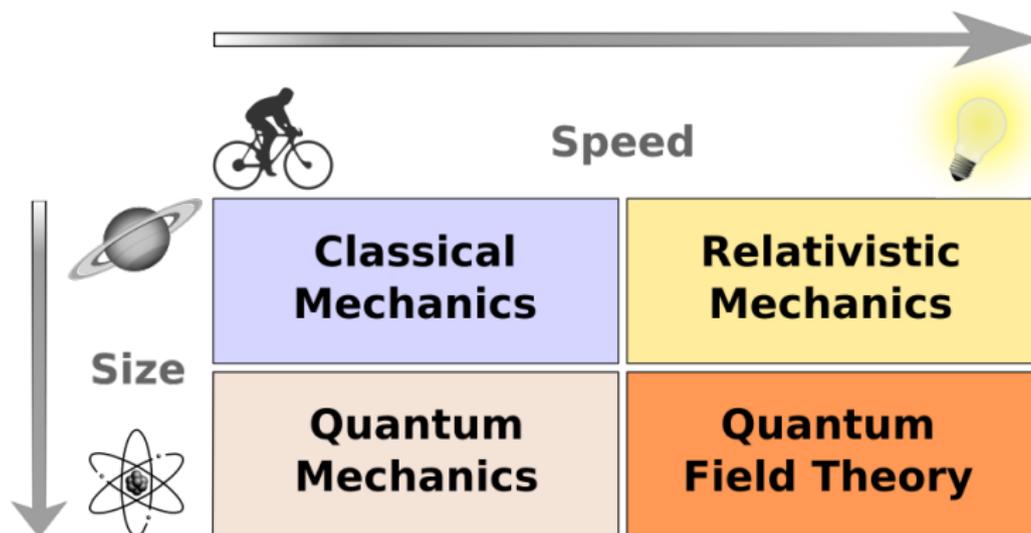


Nel contesto dello spaziotempo, l'energia di un corpo è data da:

$$E = \frac{mc^2}{\sqrt{(1 - \frac{v^2}{c^2})}} = \sqrt{m^2c^4 + pc^2}$$

e se un corpo è fermo ($v = 0$ quindi anche $p = 0$), otteniamo la famosa equazione di Einstein $E = mc^2$

MATERIA ANTIMATERIA E PARTICELLE



Lei disse: "Dimmi qualcosa di bello"

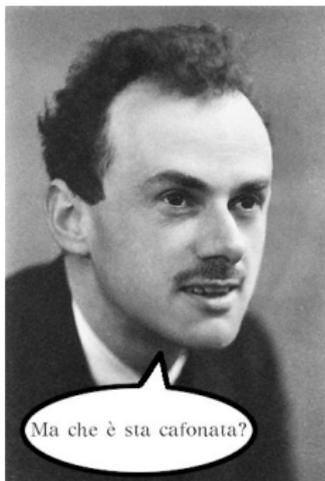
Lui rispose: " $(\partial + m) \psi = 0$ "

L'equazione qui sopra è quella di Dirac ed è la più bella equazione conosciuta della fisica. Grazie a questa si descrive il fenomeno dell'entanglement quantistico, il quale afferma che: "Se due sistemi interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separati, non possiamo più descriverli come due sistemi distinti, ma in qualche modo sottile diventano un unico sistema. Quello che accade a uno di loro continua ad influenzare l'altro, anche se distanti chilometri o anni luce".

L'equazione di Dirac



La vera equazione di Dirac (1928)



Lei disse: "Dimmi qualcosa di bello"

Lui rispose: " $(\partial + m) \psi = 0$ "

L'equazione qui sopra è quella di Dirac ed è la più bella equazione conosciuta della fisica. Grazie a questa si descrive il fenomeno dell'entanglement quantistico, il quale afferma che: "Se due sistemi interagiscono tra loro per un certo periodo di tempo e poi vengono separati, non possiamo più descriverli come due sistemi distinti, ma in qualche modo sottile diventano un unico sistema. Quello che accade a uno di loro continua ad influenzare l'altro, anche se distanti chilometri o anni luce".

Unione tra la meccanica quantistica e la relatività speciale

$$(i\gamma_{\mu}\partial^{\mu} - m)\psi(x) = 0$$

La funzione d'onda $\psi(x)$ che risolve questa equazione contiene una somma di due onde, una per particelle con **carica positiva** e l'altra con **carica negativa**. Quindi un elettrone può avere carica positiva? Un protone può avere carica negativa? **Che vuol dire?**

L'equazione di Dirac prevede l'esistenza dell'antimateria!

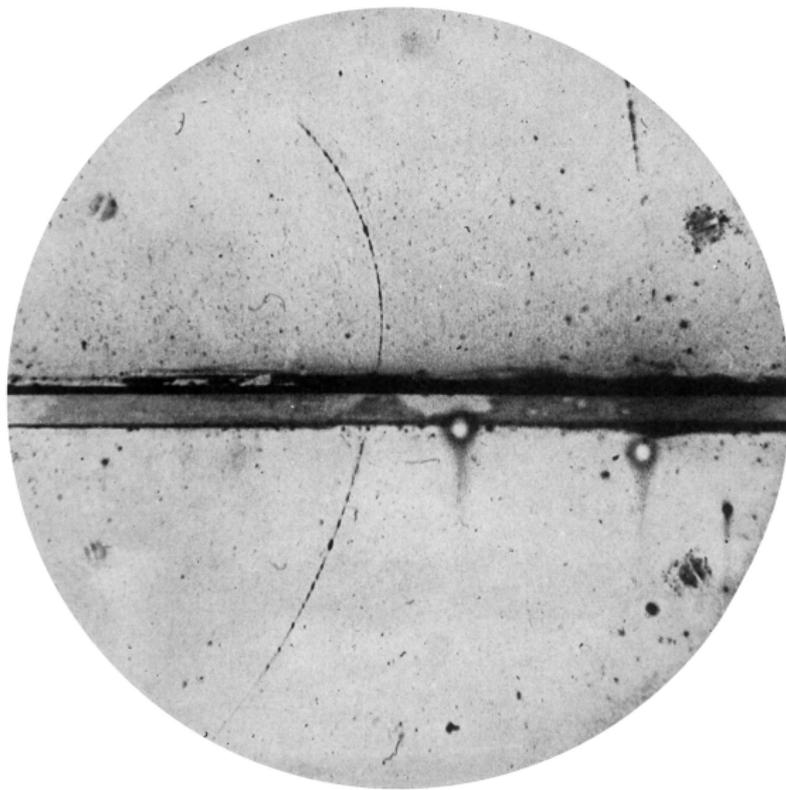
Antimateria: per ogni particella carica esiste una **antiparticella** con stessa massa, stesse caratteristiche fisiche ma carica opposta

$$\begin{aligned} \text{Protone } p &\iff \text{Antiprotone } \bar{p} \\ \text{Neutrone } n &\iff \text{Antineutrone } \bar{n} \\ \text{Elettrone } e^- &\iff \text{Positrone } e^+ \\ \text{Neutrino } \nu_e &\iff \text{Antineutrino } \bar{\nu}_e \\ \text{Quark up } u &\iff \text{Antiquark up } \bar{u} \end{aligned}$$

Alcune particelle non hanno carica, e pertanto sono antiparticelle di sé stesse:

$$\begin{aligned} \text{Fotone } \gamma &\iff \text{Fotone } \gamma \\ \text{Pione neutro } \pi^0 &\iff \text{Pione neutro } \pi^0 \\ \text{Bosone debole } Z^0 &\iff \text{Bosone debole } Z^0 \\ \text{Bosone di Higgs } H^0 &\iff \text{Bosone di Higgs } H^0 \end{aligned}$$

La scoperta dell'antimateria (1932)



Positroni: la prima particella di antimateria mai osservata sperimentalmente

IL MODELLO STANDARD DELLE PARTICELLE ELEMENTARI

Il Modello Standard

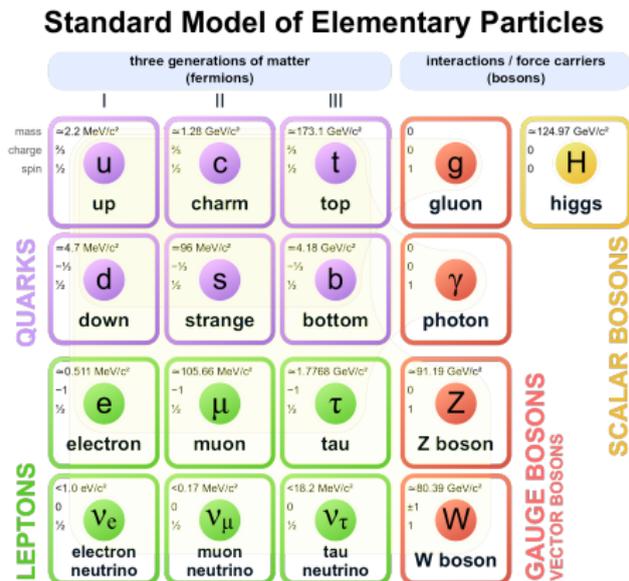
Il Modello Standard (MS) descrive tutte le particelle elementari, le particelle composite e le loro interazioni

Particella fondamentale: una particella che non può essere suddivisa in costituenti più piccoli (puntiforme)

Particella composta: una particella composta da due, tre o più particelle fondamentali (quark)

Interazioni fondamentali: forza forte, forza debole, forza elettromagnetica; mediate da alcune particelle speciali (bosoni)

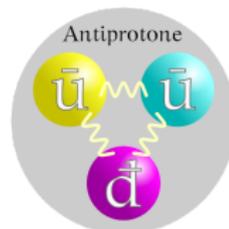
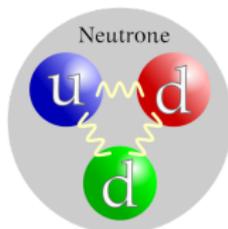
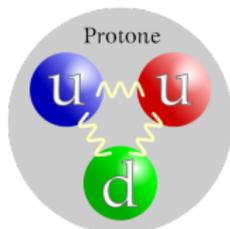
La **gravità** non fa parte del MS e ad oggi non sappiamo come descriverla in termini quantistici!



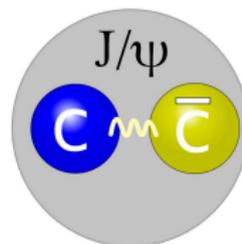
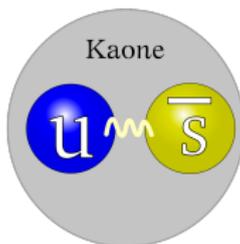
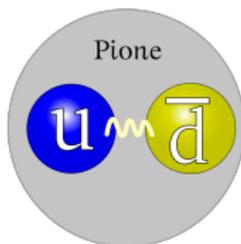
Particelle composite (adroni)

Particelle composte da **tre quark** sono dette **barioni**. Esempi: p (protone), n (neutrone), Λ_b^0 , Σ_c^+ , Ξ_{cc}^{++} , Ω^- ...

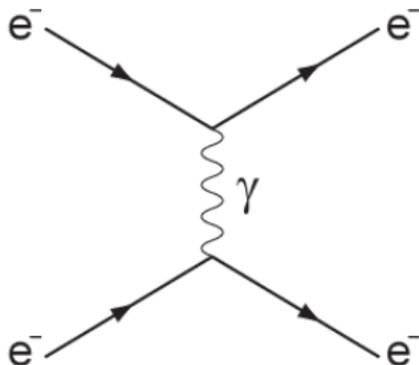
Particelle composte da **tre antiquark** sono dette **antibarioni**. Esempi: \bar{p} (antiprotone), \bar{n} (antineutrone), $\bar{\Lambda}_b^0$, Σ_c^- , Ξ_{cc}^{--} , Ω^+ ...



Particelle composte da **un quark e un antiquark** sono dette **mesoni**. Esempi: π^+ (pione), K^+ (kaone), ρ^0 , B^0 , D_s^+ , Υ , J/ψ ...

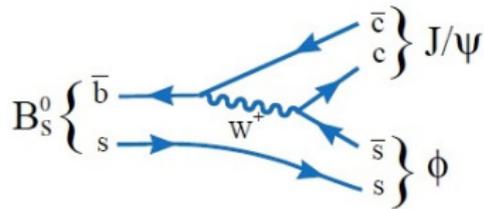
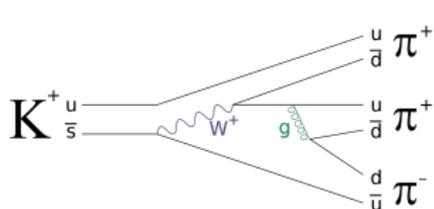


Le particelle interagiscono tra di loro tramite scambio di mediatori

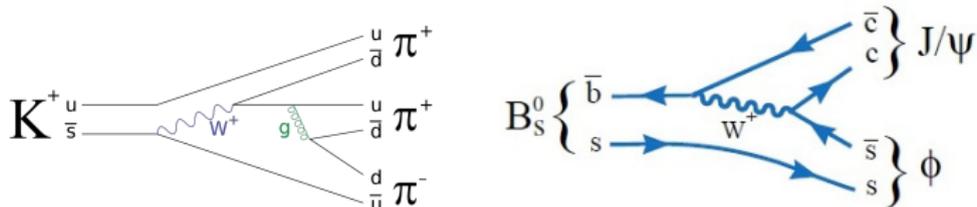


Le particelle mediatrici, dette anche **portatori di forza** o **bosoni mediatori**, danno vita a quelle che macroscopicamente descriviamo come **forze**.
Ad esempio, lo scambio di **fotoni** a livello microscopico viene descritto nella vita vera dalla **forza di Coulomb** e dalla **forza di Lorentz**!

Quasi tutte le particelle composite sono **instabili** e **decadono** in particelle più leggere con tempi solitamente brevissimi ($10^{-25} - 10^{-12}$ secondi)

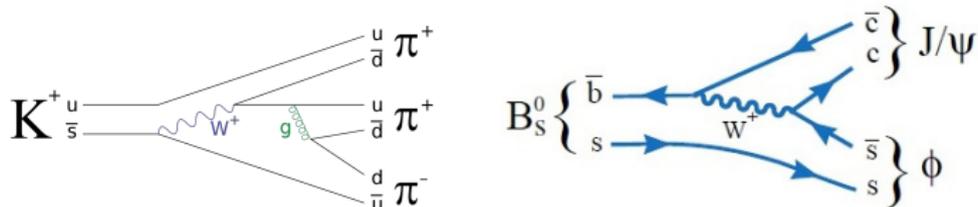


Quasi tutte le particelle composite sono **instabili** e **decadono** in particelle più leggere con tempi solitamente brevissimi ($10^{-25} - 10^{-12}$ secondi)



Come facciamo a sapere che le particelle instabili esistono davvero se non siamo in grado di osservarle?

Quasi tutte le particelle composite sono **instabili** e **decadono** in particelle più leggere con tempi solitamente brevissimi ($10^{-25} - 10^{-12}$ secondi)



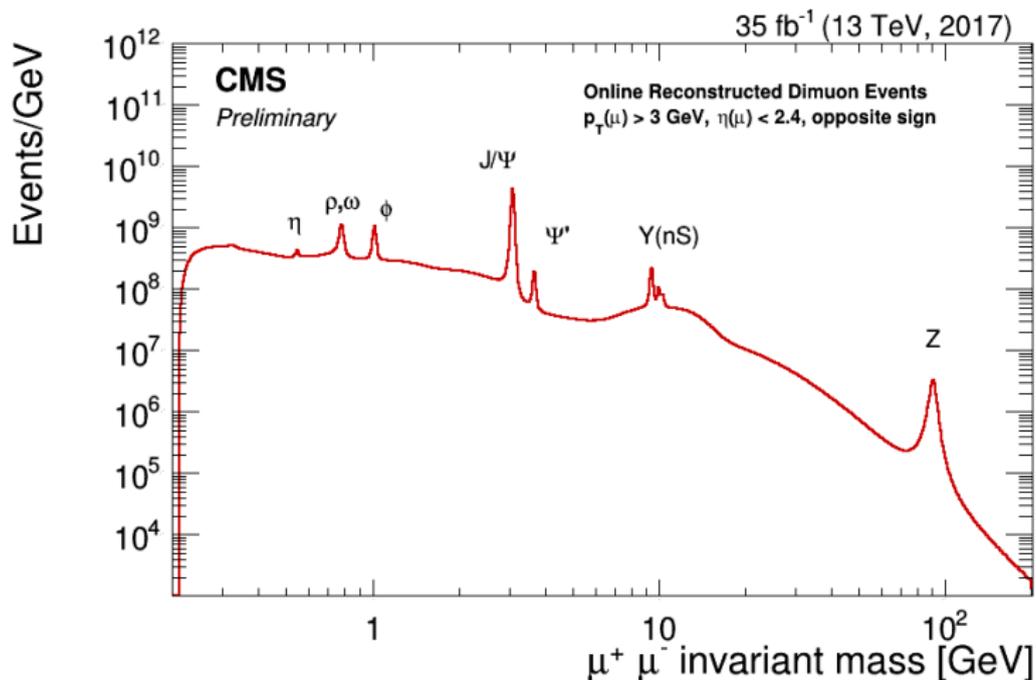
Come facciamo a sapere che le particelle instabili esistono davvero se non siamo in grado di osservarle?

Usiamo **l'equazione di Einstein** + **conservazione energia e impulso**:

$$E = \sqrt{m^2 c^4 + p c^2} \implies m c^2 = \sqrt{(E_1 + E_2 + E_3 + \dots)^2 - (p_1 + p_2 + p_3 + \dots)^2} c^4$$

Chiamiamo **m** la **massa invariante** della particella madre e E_i, p_i l'energia e l'impulso della i -esima particella figlia stabile.

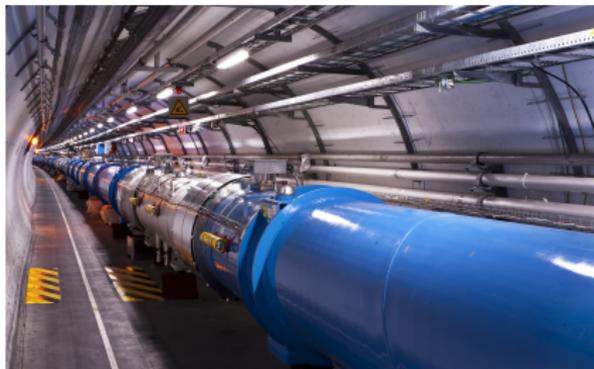
Massa invariante e picchi



GeV = Gigaelettronvolt = 10^3 MeV, tipica unità di misura di energia, massa invariante e impulso in fisica delle particelle

IL LARGE HADRON COLLIDER AL CERN

Il Large Hadron Collider



- La più grande macchina costruita dall'uomo
- Accelera protoni fino a $0.999999 c$
- Anello di 27 km di circonferenza, scavato a 100 metri di profondità
- Più freddo dello spazio siderale (1.9 K)
- 1600 magneti superconduttori
- Quattro punti di collisione dei protoni in corrispondenza dei grandi esperimenti

Il Large Hadron Collider

