

Le grandi idee della Fisica moderna

Danilo Babusci



I maggiori progressi nella comprensione della natura sono stati resi possibile dalla formulazione (1900 - 1930) di 2 teorie generali:

Teoria della Relatività

&

Meccanica Quantistica



Rappresentazione del mondo **antitetica** a quella fornita dalla **fisica classica** (pre-XX secolo) : il "buon senso" affinato tramite le esperienze sensoriali ha poco a che fare con la struttura profonda della materia

Meccanica Quantistica (M.Q.) fornisce spiegazione degli eventi relativi al mondo dell'infinitamente piccolo:

- ✓ Moto delle particelle
- ✓ Forze tra particelle

Teoria della Relatività (T.R.) svolge duplice ruolo

1. teoria delle teorie: impone a tutte le altre teorie il vincolo di essere indipendente dallo stato di moto dell'osservatore
2. teoria del moto ad alta velocità, sia di particelle materiali (e.g. elettroni), sia di quelle non materiali (e.g. fotoni)

Fisica delle Particelle Elementari (FdP)

Si interessa del comportamento fisico dei costituenti fondamentali del mondo, i.e. di oggetti al contempo molto piccoli e molto veloci



è l'arena naturale per l'esibizione simultanea della Meccanica Quantistica e la Teoria della Relatività (Speciale)

Relatività Speciale

(1900 ÷ 1905)

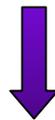
Einstein, Lorentz, Poincaré

Principio di Newton (1687)



Corpo in moto rettilineo uniforme: **non** esiste effetto meccanico (all'interno del corpo) che può essere usato per misurarne la velocità

la velocità assoluta è priva di significato



La **velocità non può intervenire** nelle equazioni della **Meccanica**: eq. **covarianti** (non cambiano forma) per trasformazioni tra **Riferimenti Inerziali (R.I.)**

Fenomeni Elettromagnetici

Maxwell (1860) - equazioni di campo che dipendono esplicitamente da una velocità: quella della luce →

equazioni di campo non covarianti

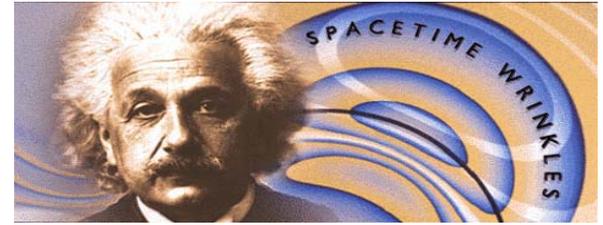
Analogia meccanica → esiste mezzo di supporto alla propagazione della luce: *etere*

Ipotesi : eq. di Maxwell valide soltanto nel riferimento dell'etere



esiste riferimento privilegiato che riempie tutto lo spazio

Einstein



Non covarianza delle eq. di Maxwell è molto più sgradevole dell'assenza di un riferimento assoluto



Postulati della **Relatività Speciale**

Le leggi della natura sono le stesse in tutti i R.I.

preservato dalle eq. di Maxwell solo se

La velocità della luce è la stessa in tutti i R.I.

→ eq. di Maxwell \equiv in tutti i R.I. : **etere non esiste**

Conseguenze costanza di c (I)

Esempio - un osservatore sulla Terra (O_1) e uno (O_2) all'interno di un razzo che si allontana dalla Terra con velocità $v \rightarrow O_2$ invia impulso di luce lungo la direzione di moto del razzo.

O_1 : la luce si allontana dal razzo con velocità $< c$

O_2 : la luce si allontana con velocità c

Accordo tra O_1 e O_2 : la separazione razzo - impulso all'Astronauta deve apparire più piccola di quanto appaia al Terrestre

Fattore di Contrazione
Spaziale

$$\delta_d = \frac{1}{\gamma} = \sqrt{1 - (v/c)^2}$$

Conseguenze costanza di c (II)

Contrazione della distanza → all'**Astronauta** il viaggio deve apparire **più breve** di quanto appaia al **Terrestre**: **scala dei tempi si dilata**

Fattore di Dilatazione
Temporale

$$\delta_t = \gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - (v/c)^2}}$$

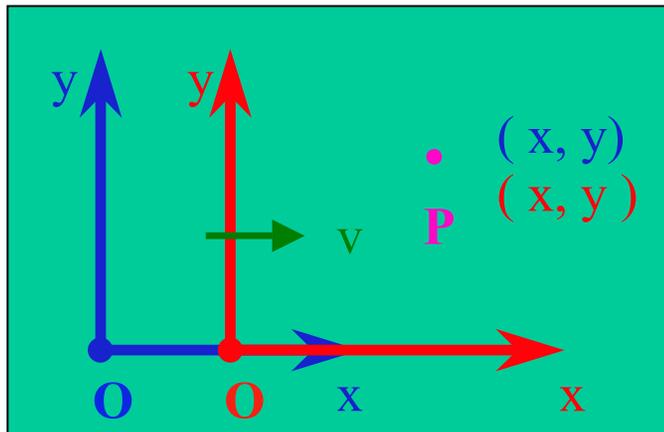
Contrazione Lunghezze
+
Dilatazione Tempi



Spazio e Tempo
sono elastici

Conseguenze costanza di c (III)

Trasformazioni tra R.I. sotto cui leggi della fisica sono **covarianti**: trasformazioni di **Lorentz**



$$\begin{aligned}x &= \gamma (x' - v t') \\y &= y' \\t &= \gamma (t' - v \cdot x' / c^2)\end{aligned}$$

$$(t = 0 : O \equiv O')$$

Variabili spaziale e temporale mescolate tra loro
→ spazio e tempo confluiscono in nuova entità:

spazio-tempo

Spazio-Tempo

Spazio-tempo: varietà 4-dim. → 4-vettori

4-vettore posizione $\mathbf{x} = (t, x, y, z)$ è l'oggetto che si trasforma correttamente: la sua **lunghezza** non cambia sotto trasformazioni di **Lorentz**

Particella a riposo: **solo massa**. Osservatore in moto rispetto alla particella: **massa + energia cinetica**



oggetto che si trasforma correttamente sotto trasf. di **Lorentz**: 4-vettore **energia-impulso** $\mathbf{P} = (E, p_x, p_y, p_z)$

Meccanica Quantistica

(1900 ÷ 1930)

Planck, Einstein, Bohr, Sommerfeld
Heisenberg, De Broglie, Compton,
Schrödinger, Born, Pauli, Jordan, Kramers,
Dirac, Wigner, ...

Probabilità (I)

Le leggi fondamentali della natura sono leggi di probabilità, non leggi di certezza



La M.Q. è una teoria

- chiara e quantitativa : le probabilità possono essere calcolate esattamente
- indefinita e indeterminata : posso conoscere solo la probabilità che accada qualcosa, mai ciò che, di fatto, accadrà

Probabilità (II)

Esempio : eccitazione di un atomo di H

Intervallo di tempo durante il quale l'atomo permane nello stato eccitato prima di emettere un fotone è completamente indeterminato e non calcolabile.

Studio N ($\gg 1$) atomi \rightarrow definisco **tempo medio** di decadimento: determina la **probabilità** di decadimento relativa ad un solo atomo (può essere calcolata con precisione arbitrariamente grande aumentando N)

Ripetendo molte volte la misura ottengo sempre la stessa vita media

(Analogia: lancio di una moneta)

Probabilità (III)

Dov' è la novità rispetto al lancio della moneta ??

La probabilità è :

- d'ignoranza nel mondo macroscopico (fisica classica)
- intrinseca alla struttura fondamentale della natura nel mondo microscopico

Non importa con quanta precisione conosco le condizioni iniziali: è (in linea di principio) impossibile prevedere quando decadrà l'atomo di H !!

Probabilità (IV)

La natura probabilistica si manifesta in 2 modi :

1. Casualità degli eventi

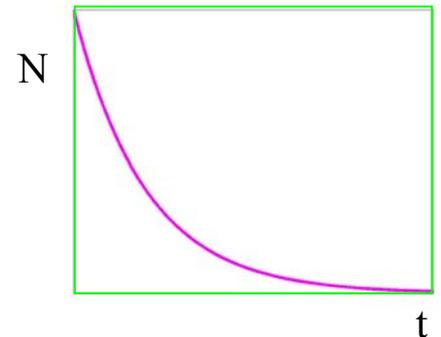
indipendenza degli intervalli di tempo tra eventi →
statistica di Poisson

2. Legge esponenziale di decadimento

andamento temporale del n. di decadimenti

$$N(t) = N_0 e^{-\lambda t}$$

$\tau = \lambda^{-1}$: vita media del livello eccitato



Probabilità (V)

Solo comportamento temporale ?? NO

1. Probabilità relativa dei modi di decadimento

Esempio: decadimenti più frequenti del K^+

K^+	$\rightarrow \mu^+ \nu_\mu$	(63.43 %)
	$\rightarrow \pi^+ \pi^0$	(21.13 %)
	$\rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-$	(5.576 %)
	$\rightarrow e^+ \nu_e \pi^0$	(4.87 %)
	$\rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^0$	(3.27 %)
	$\rightarrow \pi^+ \pi^0 \pi^0$	(1.73 %)

Probabilità (VI)

2. Probabilità d'urto

urto tra particelle → distribuzione di probabilità per l'angolo di deflessione delle traiettorie → concetto di sezione d'urto

$$\sigma = \frac{N \text{ part. deflesse} \times s^{-1}}{N \text{ part. incidenti} \times \text{cm}^{-2} \times s^{-1}}$$

3. Effetto Tunnel

probabilità $\neq 0$ per il superamento di una barriera classicamente impenetrabile (e.g. decadimento α dei nuclei)

Probabilità (VII)

- ✓ Non ogni aspetto della natura è probabilistico
(e.g. massa delle particelle stabili è definita in modo preciso)
- ✓ La probabilità di un evento può essere così prossima a 0 (1) che l'evento può considerarsi **impossibile** (certo)
 - effetto tunnel macroscopico : $P \approx 10^{-50}$
 - vita media protone $> 1.6 \times 10^{25}$ anni
- ✓ L'aspetto probabilistico del mondo microscopico è **reale** o nasce da una struttura della materia **più profonda** e ancora misteriosa ?? **Nessuno lo sa !!**

Annichilazione & Creazione (I)

Chimica del XIX secolo → 2 leggi di conservazione:
massa & energia

T.R. : conversione $m \leftrightarrow E$ → legge di conservazione
della massa-energia

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

M.Q. : struttura matematica per trattare $m \leftrightarrow E$

- p. instabile → decadimento spontaneo
- p. stabile → annichilazione con anti-p.

Annichilazione & Creazione (II)

➤ Processi di decadimento

$$1) \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

$$2) \quad \pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$$

➤ Processi di annichilazione

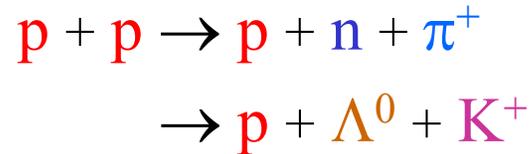
$$3) \quad e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$$

N.B. - 2 & 3 : conversione completa $m \rightarrow E$

- $m_{\text{finale}} < m_{\text{iniziale}}$

Annichilazione & Creazione (III)

➤ Processi d'urto



N.B. - $\sum m_{\text{iniziali}} < \sum m_{\text{finali}}$: il surplus di massa è creato a scapito dell'energia cinetica delle particelle iniziali

Eliminazione legge di conservazione di m → particelle stabili non sono indistruttibili: **mondo instabile ??**

NO !!

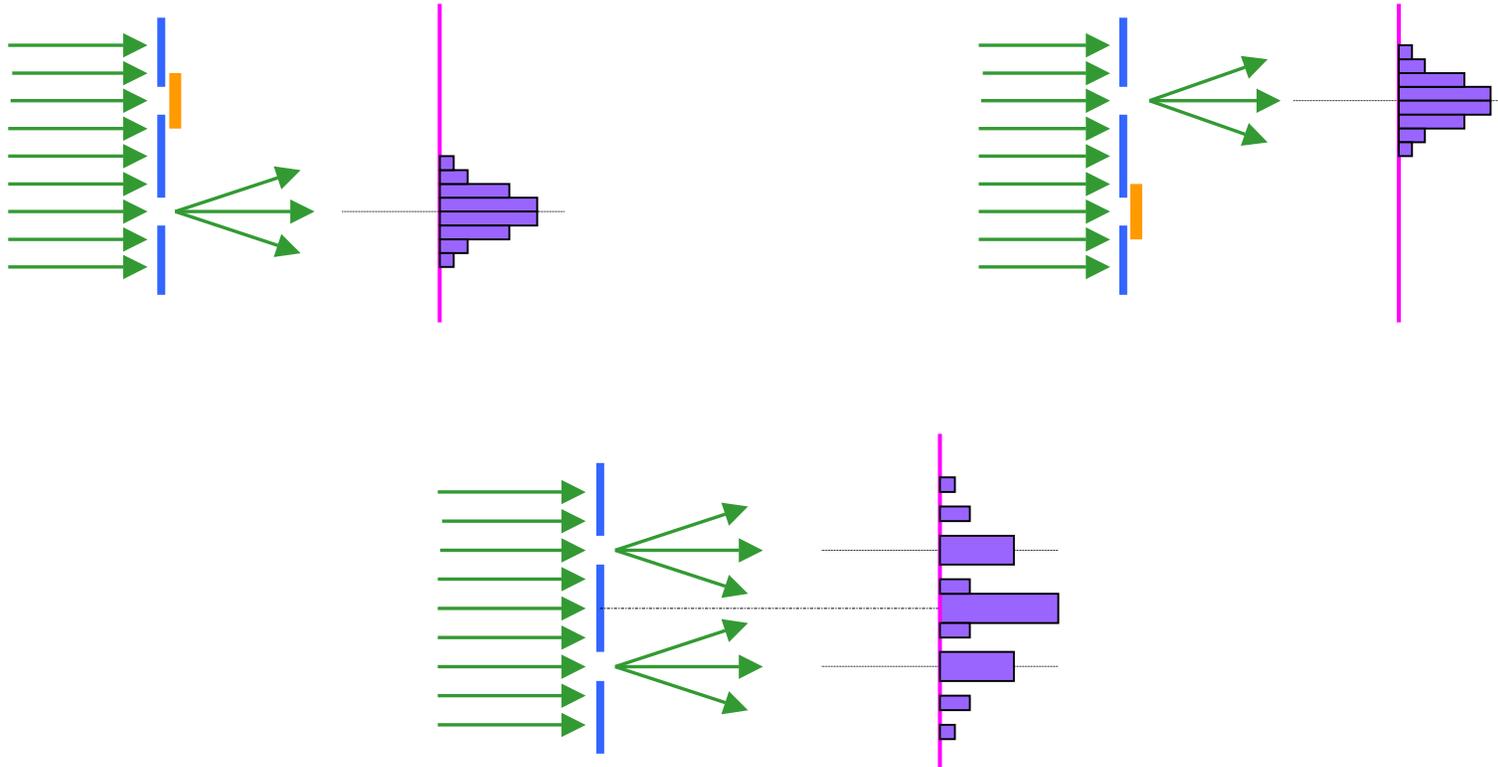
Nell' angolo di universo in cui viviamo c'è **molta materia** e **poca antimateria**

Onde & Particelle (I)

Mondo microscopico: onde e particelle appaiono come aspetti differenti della stessa cosa

- Onda come Particella → effetto fotoelettrico
Einstein (1905) : assorbimento di onde in pacchetti discreti di energia (fotoni)
- Particella come Onda → fenomeni d'interferenza
Davisson & Germer (1927) : esperimenti di interferenza e diffrazione con fasci di elettroni

Onde & Particelle (II)



N.B. - Luce : effetti diffrattivi solo se **apertura fenditura $\approx \lambda$**

Onde & Particelle (III)

Particella

- possiede massa
- localizzata in un punto
→ dimensioni finite
- caratterizzata da E

??



Onda

- priva di massa
- diffusa nello spazio →
dimensioni mal definite
- caratterizzata da:
{ampiezza A , lunghezza
d'onda λ , frequenza ν }

Similitudine: trasporto d'energia tra 2 punti

(anche se le particelle lo possono fare con velocità diverse a seconda della loro energia)

Onde & Particelle (IV)

de Broglie : ad ogni particella di massa m ed impulso $p (= mv)$ corrisponde un' onda con

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

costante di Planck

$$(= 6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s})$$

i. $m = 80 \text{ kg}$ con velocità $v = 5 \text{ km/h} (\cong 1.4 \text{ m/s})$

$$\lambda \cong 6 \times 10^{-36} \text{ m} \quad \rightarrow \text{particella}$$

ii. elettrone nell'atomo di H: $v \cong 3 \times 10^6 \text{ m/s}$

$$\lambda \cong 2.4 \times 10^{-10} \text{ m} \quad \approx \text{dimensioni atomo} \\ \rightarrow \text{onda}$$

Onde & Particelle (V)

h piccola \rightarrow aspetto ondulatorio emerge soltanto nel mondo microscopico, i.e. quando λ della particella è \approx le dimensioni del sistema fisico

N.B. T.R. : massa \leftrightarrow energia $E = m c^2$
M.Q. : particella \leftrightarrow onda $\lambda = h/p$

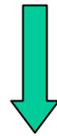
2 costanti fondamentali della natura : c grande ed h piccola (relativamente alla scala umana) \rightarrow abbiamo dovuto aspettare il XX secolo per la formulazione delle 2 teorie:

tecnologia

Onde & Particelle (VI)

Natura ondulatoria → non localizzabilità:

la posizione di una particella non può essere nota con una accuratezza maggiore della sua lunghezza d'onda



∞ conseguenze : e.g. dimensioni dell'atomo di H !!

N.B. - Ha ancora senso parlare di particelle ?? SI !!

"nascita" e "morte" sono eventi corpuscolari: accadono improvvisamente in un definito punto dello spazio-tempo. È la "vita" delle particelle ad essere ondulatoria !!

Onde & Particelle (VII)

Con che tipo di onde abbiamo a che fare ??

Esempio : atomo di H

e^- distribuito in una regione di estensione λ : come posso rivelarlo ?? Invio e^+ di alta energia contro l'atomo : annichilazione $e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$. Determino posizione e^- dallo studio delle traiettorie dei 2 fotoni

Come e' possibile ?? Ho localizzato l'elettrone !!

La soluzione del paradosso è nell' aspetto probabilistico del mondo microscopico

Onde & Particelle (VIII)

(prima dell'annichilazione) elettrone deve essere interpretato come un'onda di probabilità

Ripetendo l'esperimento su un gran numero di atomi di H i risultati non saranno gli stessi: in qualche caso l'elettrone risulterà vicino al protone, in qualche altro lontano: quasi sempre entro 10^{-8} cm da questo.

Non localizzabilità → distribuzione di probabilità relativa alla posizione dell'elettrone → concetto di funzione d'onda $\psi(x)$ dell'elettrone:

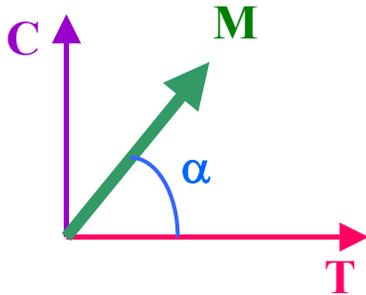
$$\text{Prob.}(e^- \in [x, x + dx]) = |\psi(x)|^2 dx$$

Onde & Particelle (IX)

Analogia : lancio di una moneta

Fisica Classica - lo stato è **testa** o **croce**

M.Q. - lo stato è specificato da un **vettore 2-dim.**



$$|M\rangle = \cos \alpha |T\rangle + \sin \alpha |C\rangle$$

Lancio → moneta transisce in **T** o **C** con

$$\text{Prob.}(T) = \cos^2 \alpha$$

$$\text{Prob.}(C) = \sin^2 \alpha$$

N.B. - descrizione posizione e^- : vettore ∞ -dim.

Onde & Particelle (X)

Esempio : organo a canne

Dove si trova l'onda sonora ? Ovunque entro la canna
→ lunghezza della canna = incertezza nella posizione dell'onda sonora: $\Delta x \geq \lambda$

→ se le onde fossero corpuscolari: $\Delta x = h / p$

(in realtà, per questo tipo di onde $p \rightarrow 2\pi \Delta p$)



$$\Delta x \Delta p \geq \frac{h}{2\pi} (= \hbar)$$

Principio di Indeterminazione
(Heisenberg)

Onde & Particelle (XI)

P. d'I. : è impossibile conoscere contemporaneamente e con precisione arbitraria la posizione e la velocità di una particella : $\Delta x \rightarrow 0 \Rightarrow \Delta p \rightarrow \infty$

i.e.

L'atto di misura perturba sempre ed in modo definitivo lo stato di un sistema: l'osservatore è parte del sistema complessivo

o in modo + raffinato e + rigoroso

Allo stato di un sistema non corrispondono posizione e velocità definite: questi concetti classici non possono coesistere nel mondo microscopico

Onde & Particelle (XII)

Esiste una relazione d'indeterminazione anche tra le variabili **energia** e tempo

$$\Delta p = m \Delta v$$

$$\Delta x = v \Delta t$$



$$\Delta p \Delta x = m v \Delta v \Delta t$$

$$v \Delta v = \Delta v^2 / 2$$



$$\Delta p \Delta x = \Delta E \Delta t$$

$$\Delta E \Delta t \geq \hbar$$

conoscenza accurata dell'istante in cui avviene un evento (Δt **piccolo**) \rightarrow conoscenza imprecisa della sua energia (ΔE **piccolo**)

Conclusioni

- L'aspetto probabilistico sembra essere l'essenza ultima delle leggi fondamentali della natura
 - La fusione dei concetti di onda e particella richiedono l'abbandono di alcune idee classiche:
 - Onda: rinuncia all'idea di un mezzo materiale che vibra e fornisce supporto alla propagazione
 - Particella: rinuncia all'idea della localizzabilità
-  onda - particella \equiv campo quantistico

Campi Quantistici & Interazioni

(1930 ÷ 1950)

Dirac, Yukawa, Fermi, Feynman, Schwinger,
Tomonaga, Dyson, ...

Concetto di Campo (I)

Faraday & Maxwell

Concetto fondamentale: **etere** = sostanza impalpabile che riempie tutto lo spazio

Concetto ausiliario: **campo** = disturbo, stato di tensione, disomogeneità dell'etere

(benché ausiliario è il solo ente suscettibile di misura)

Einstein (1) : rivoluzione relativistica

etere non misurabile → **non esiste**: equazioni della teoria e.m. inalterate ma il **campo** diviene **entità reale** residente in spazio altrimenti vuoto

Concetto di Campo (II)

Einstein (2) : rivoluzione quantistica

campo come entità corpuscolare che può essere creato o distrutto in pacchetti discreti (quanti)



campo = disturbo in un fluido → campo = fluido diffuso in una regione definita dello spazio + propagazione ondosa da un punto all'altro

N.B. anche in eventi di assorbimento/emissione si ha comportamento ondoso quando agiscono coerentemente un n. sufficiente di campi → continuità del mondo macroscopico

Concetto di Campo (III)

Fusione M.Q. - T.R. : (per motivi puramente matematici)
solo se tutte le particelle sono campi quantistici



Concetto Moderno di Campo

Entità fisica che si propaga sotto forma di onda attraverso lo spazio trasportando E e p (ed altre quantità fisiche misurabili)

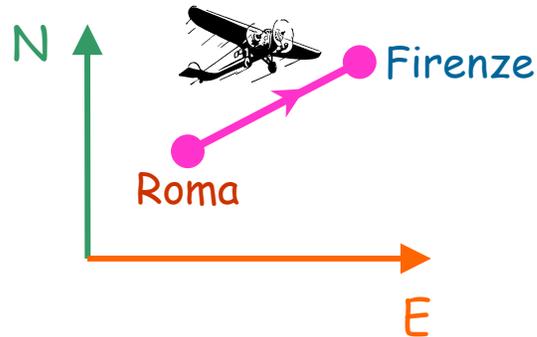
Entra/esce dall'esistenza istantaneamente in un punto definito dello spazio-tempo

Ad esso risulta associata una massa ben precisa

il campo e^- può essere creato con E (o p) qualsiasi,
ma ha sempre $mc^2 = 511 \text{ keV}$

Interazioni tra Campi (I)

Carte geografiche 2-dimensionali

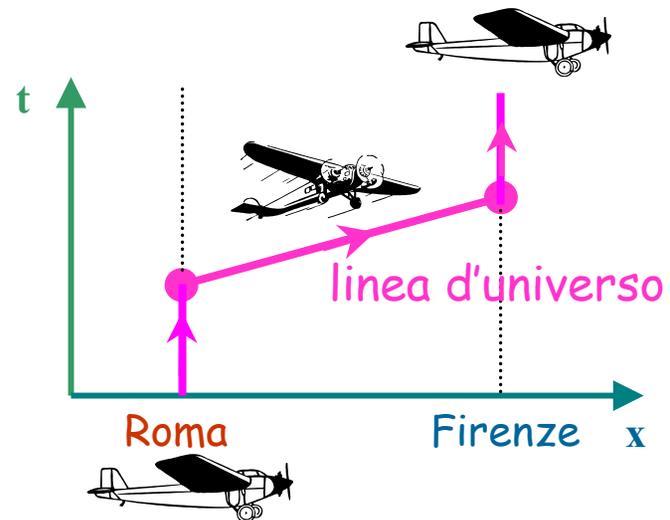


Solo ordinamento temporale degli eventi: nulla **sull'istante** in cui accadono

Raffinamento: aggiungo **3^a dimensione**
→ conosco l'altezza dell'aereo rispetto al suolo

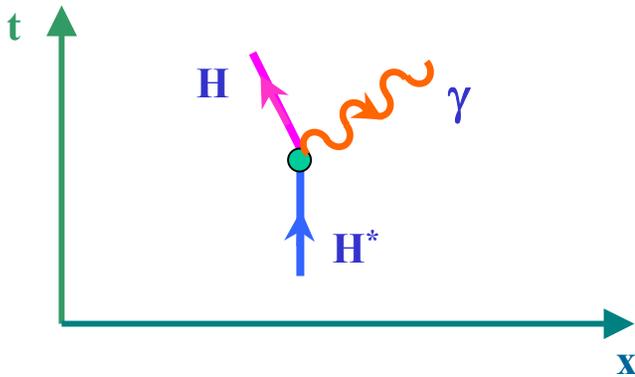
T.R. : spazio-tempo →
geografia 4-dim.

impossibile da rappresentare
→ surrogato 2-dim.

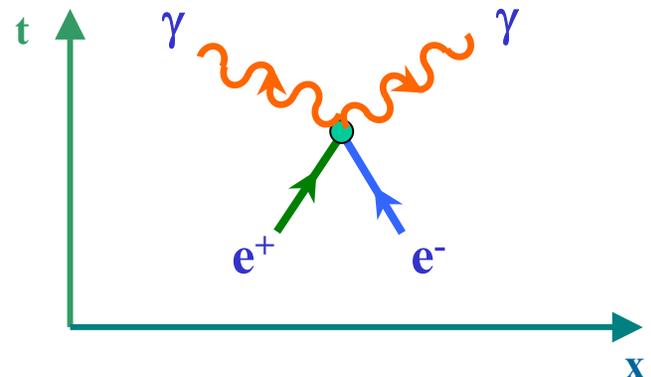


Interazioni tra Campi (II)

Processi tra particelle: diagrammi di Feynman



diseccitazione atomo H

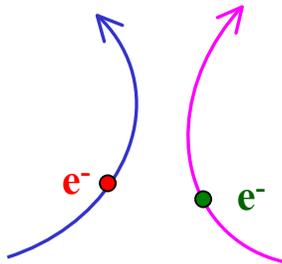


$e^+ e^- \rightarrow \gamma \gamma$

- ✓ Inclinazione linea d'universo rispetto asse $t =$
velocità della particella
- ✓ **Vertice** $\bullet \equiv$ particella cessa di esistere e nello
stesso punto dello spaziotempo ne nascono altre

Interazioni tra Campi (III)

Fisica Classica

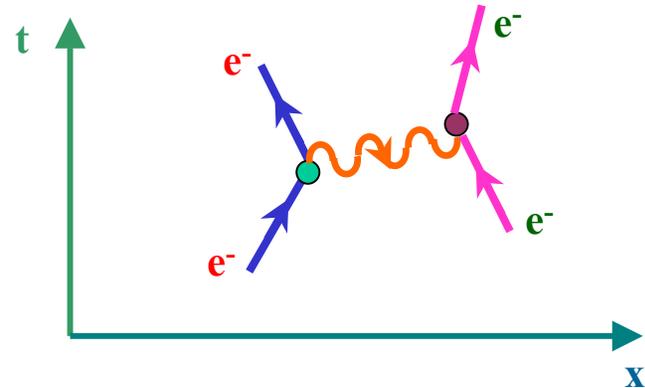


elettroni si avvicinano
→ mutua repulsione
→ rallentati e deviati



Azione a distanza

Fisica Quantistica



- e^- emette γ → cambia velocità
- e^- assorbe γ → cambia velocità



Interazione = scambio del γ

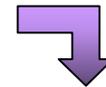
Particelle Virtuali (I)

Interazione base non è tra i 2 e^- , ma tra ciascuno di essi ed il γ → sostituisco azione a distanza con l'idea di interazione locale: e^- localmente (i.e. dove si trova) interagisce con il γ



ruolo chiave dei vertici

Problema: nei vertici è impossibile conservare allo stesso tempo energia ed impulso* → il γ in volo tra i vertici non può essere reale !!



*conservazione simultanea di E e p

$$\Rightarrow \cos \Theta_{ey} > 1 \quad !!$$

particelle virtuali

Particelle Virtuali (II)

Cos'è una particella virtuale ??

$\Delta E \Delta t \geq \hbar \rightarrow$ indulgenza nella legge di conservazione di E

è consentita una violazione di entità ΔE della legge di conservazione dell'energia, purché duri per un tempo

$$\Delta t \leq \frac{\hbar}{\Delta E}$$

Esempio : $\Delta E = 1 \text{ MeV}$ $\hbar = 7 \times 10^{-22} \text{ MeV} \cdot \text{s}$ $\rightarrow \Delta t = 7 \times 10^{-22} \text{ s}$

\rightarrow spazio percorso dal fotone durante una violazione di energia di 1 MeV $= c \Delta t \cong 2 \times 10^{-13} \text{ m}$

Particelle Virtuali (III)



Immagine moderna delle interazioni

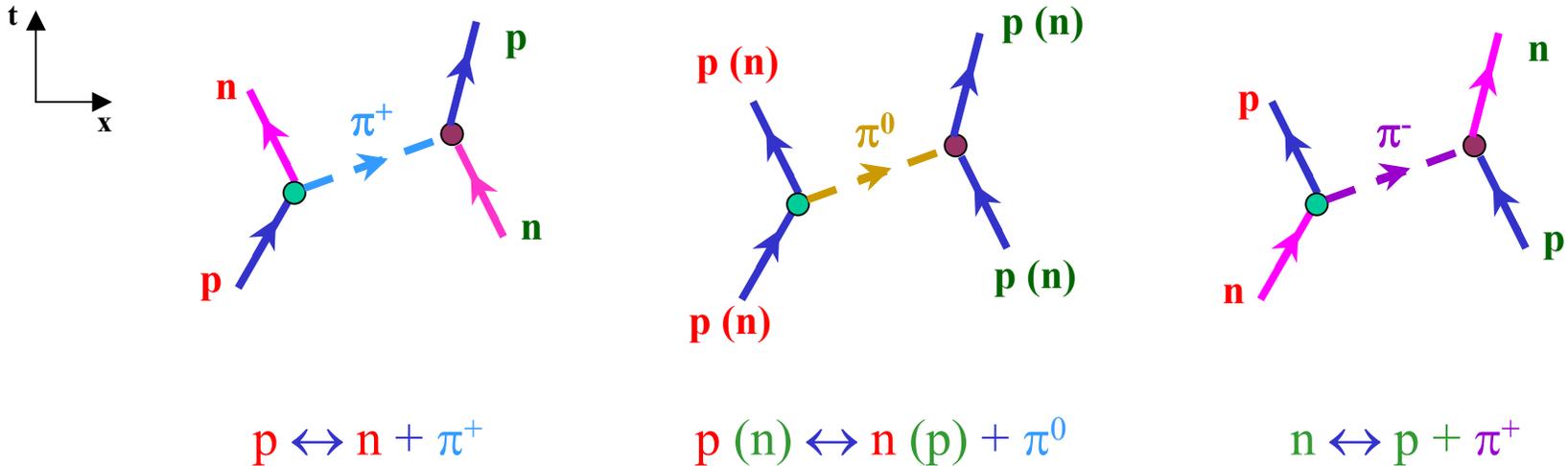
e^- anche quando è solo **non è inerte**: continuamente emette e **riassorbe** (entro il Δt consentito dal P.d'I.) dei γ **virtuali** che percorrono distanze tanto maggiori quanto minore è la loro energia, ma che **non** hanno alcuna possibilità di divenire reali (quindi rivelabili)

Ogni elettrone è circondato da una nuvola fotonica

2 **elettroni** che si avvicinano: **scambio dei fotoni** delle rispettive nuvole → **repulsione**

Particelle Virtuali (IV)

Esempio : interazione nucleare (Yukawa)



$m_\pi = 140 \text{ MeV} \rightarrow$ durata violazione energia nei vertici $< 5 \times 10^{-24} \text{ s} \rightarrow$ raggio nuvola pionica minore di : $c \Delta t = 1.5 \times 10^{-13} \text{ cm} !!$

Raggio d'Azione

N.B. - interazione e.m. completamente diversa: $m_\gamma = 0$
→ E_γ può anche essere nulla → nuvola fotonica
può estendersi fino a distanza infinita !!



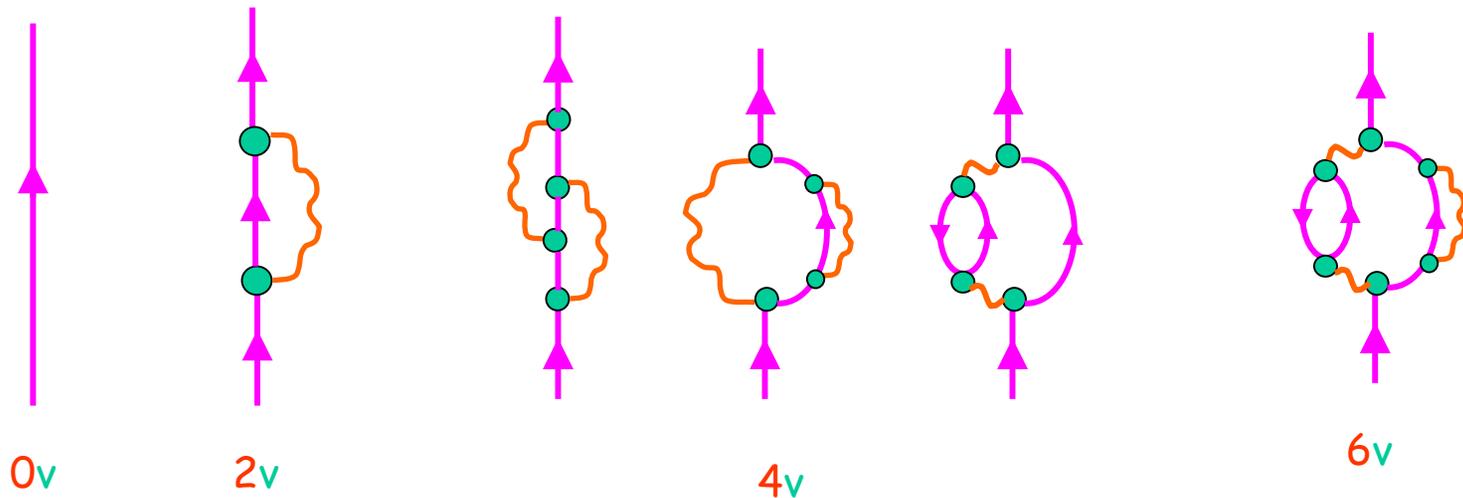
Come conseguenza del P.d'I. il raggio d'azione di una interazione è tanto maggiore quanto più piccola è la massa della particella scambiata

$$R \propto \frac{1}{mc^2}$$

Diagrammi di Feynman (I)

Violazione (temporanea) della conservazione di $E \rightarrow$ possibili tutti i tipi + complicati di stati virtuali

Esempio : diagrammi di Feynman per l'elettrone



Stati arbitrariamente complicati: unico vincolo è che in ciascun vertice sia conservata la carica elettrica

Diagrammi di Feynman (II)

Electrone reale = Σ pesata su tutti gli stati virtuali con peso inversamente proporzionale al numero di vertici che appaiono nel diagramma corrispondente

Quale electrone nei diagrammi ??

L'elettrone che compare nei diagrammi è ideale : ha massa n ($\neq m$) e carica elettrica j ($\neq e$) che sono inosservabili ed imprecisate

non suscettibile
di misura

no relazione
matematica
 $(n,j) \leftrightarrow (m,e)$

Infiniti

Problema formidabile

Ogni diagramma va calcolato per ogni possibile localizzazione nello spazio-tempo di ciascun vertice

→ in particolare, anche il caso in cui **emissione** e **riassorbimento** della particella virtuale avviene nello **stesso punto**, i.e. per una distanza tra i vertici = 0

Esempio : diagramma con "cappio"

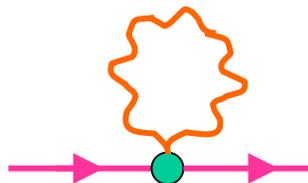


grafico
divergente !!

Rinormalizzazione (I)

Ricalcolo per distanza d tra vertici molto piccola (e.g. 10^{-30} cm) → determino valori definiti di n e j tali che:

$$(m, e)_{\text{teorica}} = (m, e)_{\text{sperimentale}}$$

Nasce l'inghippo: rifaccio il calcolo per $d = 10^{-40}$ cm → per riottenere gli stessi (m, e) devo usare valori di (n, j) diversi dal caso precedente !!

Però : se questi valori diversi di (n, j) vengono usati per calcolare la risposta a qualche altro problema, sommati tutti i possibili grafici, si ottiene un risultato praticamente identico

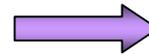
Rinormalizzazione (II)

Le **uniche grandezze** dipendenti da d sono n e j (i.e. parametri non osservabili): ogni altra grandezza misurabile è **indipendente** da tale distanza !!



Rinormalizzazione (Feynman, Schwinger, Tomonaga) :
metodi analitici che formalizzano tale osservazione

(dimostrazione che per ogni diagramma $+\infty$ ne esiste $-\infty$
→ nella somma si elidono)



QED

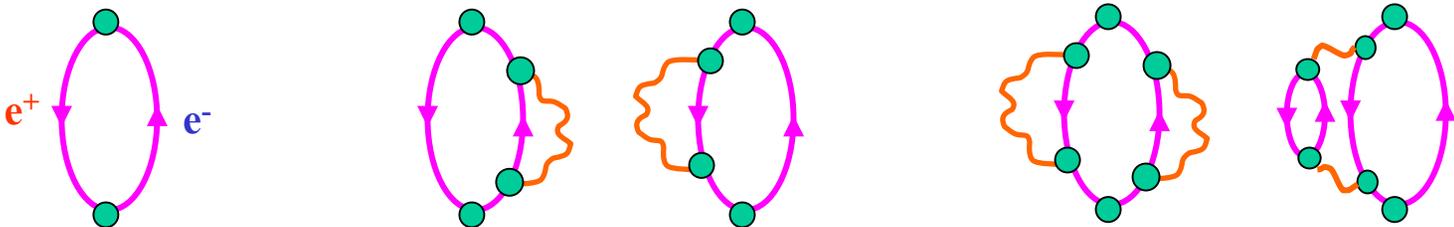
(Quantum ElectroDynamics)

N.B. - è sensato considerare $d = 0$?? per distanze così piccole la gravità diviene importante → la geometria cambia !!

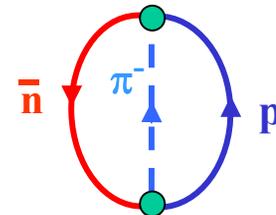
Vuoto Quantistico (I)

P.d'I. → "danza" delle particelle virtuali anche nello spazio vuoto

Esempio : diagrammi di vuoto della QED



... e se "accendiamo"
interazione nucleare



Vuoto Quantistico (II)

Una scatola vuota non è mai vuota: lo impedisce il P.d'I.

tutte le particelle note (con tutte le energie possibili) nello stato virtuale sono presenti nel vuoto fisico !!



Lo stato di vuoto è quello a cui compete la minima energia possibile

Annichilazione di particelle fornisce energia E al vuoto fisico → particelle virtuali promosse nello stato reale

tipo di particelle create dipende da E e dal tipo di particelle annichilate, i.e. da leggi di conservazione

Campi Fondamentali (I)

Caratterizzazione delle proprietà di trasformazione delle particelle sotto rotazioni spaziali → Spin

Quantità **determinata** che rappresenta (in unità di \hbar) il **momento angolare intrinseco** della particella

(Idea intuitiva di spin: particella ruotante intorno ad un asse
→ **falsa**: oggetto puntiforme non può ruotare su stesso)

Campi suddivisi in
2 grandi categorie

Fermioni: spin semintero

Bosoni: spin intero

Campi Fondamentali (II)

Campi sono di 2 tipi fondamentali

**Campi
Materiali**

Fermioni a
spin $1/2$

Leptoni

Quarks

**Mediatori delle
Interazioni**

Bosoni

Campi Materiali (I)

1[^] Famiglia

<u>Campo</u>	<u>q/e</u>	<u>m (GeV)</u>
e	-1	5×10^{-4}
ν_e	0	$< 3 \times 10^{-9}$
u	2/3	3×10^{-3}
d	-1/3	6.8×10^{-3}

2[^] Famiglia

μ	-1	0.106
ν_μ	0	$< 1.9 \times 10^{-4}$
c	2/3	1.2
s	-1/3	0.12

3[^] Famiglia

τ	-1	1.78
ν_τ	0	$< 18.2 \times 10^{-3}$
t	2/3	174.3
b	-1/3	4.3

Campi Materiali (II)

Dove sono il protone, il neutrone, i pioni, ... ??

Esperimenti di diffusione di e^- su p ed n mostrano che queste **non sono particelle elementari**, ma possiedono componenti interni: **quarks** (Gell-Mann, Zweig)

Caratteristiche essenziali dei **quarks**

- carica elettrica frazionaria
- carica di colore → ciascun **sapore** esiste in 3 versioni: **rosso**, **verde**, **blu** (**antiquarks** portano anticolori)

Campi Materiali (III)

Regole di combinazione dei quarks: solo oggetti bianchi, i.e. {R₁V₂B₃} oppure {colore - anticolore}, a carica elettrica intera (o nulla)

Esempio : Barioni (e.g. p, n) → tripletti di quarks

$$p = \{u, u, d\} \quad n = \{d, d, u\}$$

Mesoni (e.g. π^+ , π^-) → coppie quark-antiquark

$$\pi^+ = \{u, \bar{d}\} \quad \pi^- = \{d, \bar{u}\}$$

Natura aborre stati di colore isolati :
mai osservati quarks liberi !!

Mediatori delle Interazioni

Interazione

Mediatore

Spin

m (GeV)

Gravitazionale	Gravitone (G)	2	0
Elettromagnetica	Fotone (γ)	1	0
Debole	3 Bosoni (W^\pm, Z^0)	1	80.4, 91.2
Forte (Colore)	8 Gluoni (g_i)	1	0

Interazioni (I)

<u>Interazione</u>	<u>Carica</u>	<u>R</u> (cm)	<u>Forza</u>	<u>Azione</u>
Gravitazionale	energia	∞	$\approx 10^{-43}$	Q, L
E. M.	elettrica	∞	$\approx 10^{-2}$	Q, L
Debole	debole	10^{-15}	$\approx 10^{-5}$	Q, L
Forte (Colore)	colore	10^{-13}	1	Q

4 interazioni per spiegare tutto l'Universo !!

Interazioni (II)

- **Gravitazione & E.M.*** : familiari nella vita quotidiana
(causa il raggio d'azione infinito)
- **Debole*** : responsabile della radioattività β
(decadimento del neutrone $n \rightarrow p + e^- + \nu_e$)
- **Forte** : inizialmente ritenuta responsabile del **legame nucleare** e **mediata dal pione**. Natura composta di p , n e $\pi \rightarrow$ interpretata come **residuo dell'interazione di colore tra quarks** mediata da gluoni colorati
(trasportano colore-anticolore \rightarrow 8 combinazioni diverse)

* sono in realtà manifestazioni di una stessa interazione: Elettrodebole

Interazioni (III)

Perché 4 invece di 1 ?

Perché così diverse ?

- ❖ agiscono su classi diverse di particelle: quella di **colore** solo sui **quarks**
- ❖ intensità completamente differenti
- ❖ **mediate** da campi con proprietà diverse
 - ? **gluoni sono colorati** mentre il **fotone** ha carica elettrica nulla
 - ? $m_g = 0$ eppure l'interazione di **colore** ha **R finito**
 - Com'è possibile che **E.M.** & Debole derivino da una sola interazione se **W, Z** così diversi da **γ ??**

Unificazione ? (I)

Date queste differenze, è ragionevole pensare che queste 4 interazioni siano riconducibili ad una sola ??

La risposta attuale a questa domanda rivela ancora una volta l'importanza del vuoto quantistico !!

Elettrone nel vuoto della QED: positroni virtuali del vuoto attratti verso l'elettrone → **polarizzazione del vuoto**: creazione di uno schermo carico positivo intorno alla carica nuda dell'elettrone



e^- in avvicinamento: avverte una carica (in modulo) minore → minore repulsione !!

Unificazione ? (II)

e^- incidente di
bassa energia



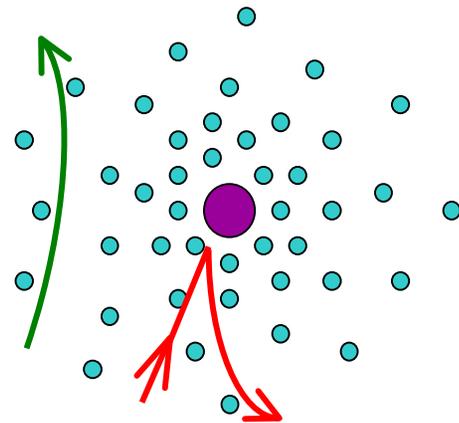
poco in profondità →
piccola deflessione

e^- incidente di
alta energia



molto in profondità →
grande deflessione

Intensità effettiva
della forza e.m. cresce
con l'energia



Unificazione ? (III)

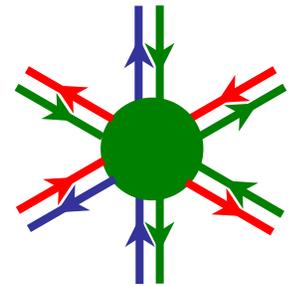
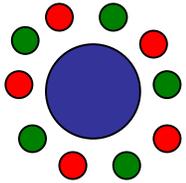
Quark colorato nel vuoto → 2 effetti di polarizzazione del vuoto:

1. coppie quark-antiquark virtuali intorno al quark → schermatura con carica di colore opposta: interazione di colore cresce con l'energia

(in analogia con la QED)

2. coppie gluoni virtuali colorati → diffusione della carica di colore del quark su distanze maggiori → mascheramento: carica di colore decresce allontanandosi dal quark

(no in QED perchè fotone non ha carica elettrica)



Unificazione ? (IV)

Quale dei due effetti prevale ??

Dipende da quanti **tipi di quark** possono comparire in forma di coppie virtuali: $n.$ di sapori $\leq 16 \rightarrow$ prevale **mascheramento** indotto dai gluoni

6 sapori



libertà
asintotica

Intensità effettiva
della forza di colore
decresce con l'energia

\rightarrow confinamento dei quarks: interazione tra quarks cresce al crescere della distanza reciproca !!

N.B. - Osservazioni sul Confinamento

Confinamento dei quarks non è assoluto: quelli del **p** "sentono" le cariche di colore di quelli all'interno del **n** vicino → (più debole) forza nucleare forte

compressione & riscaldamento estremi della materia nucleare → fusione **p** – **n**: quarks e gluoni costituenti divengono liberi → nuovo stato della materia:
plasma di quarks e gluoni

Evidenze sperimentali ?

- urti ad alta energia tra nuclei pesanti (CERN)
- stella **RXJ1856**: sfera di 12 km di diametro interamente composta di quarks & gluoni

Unificazione (I)

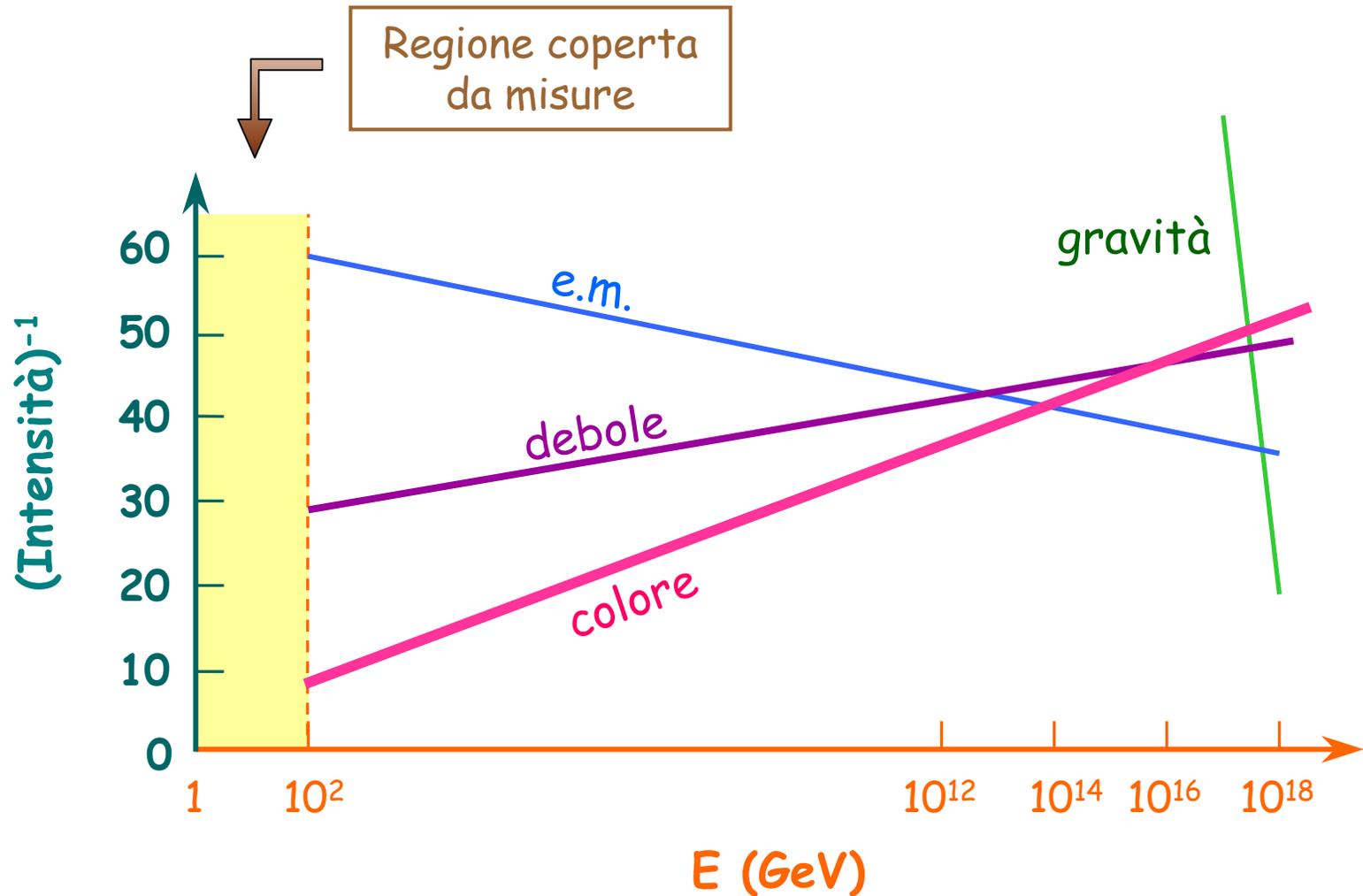
Proprietà del vuoto quantistico \Rightarrow intensità delle interazioni variano con l'energia

Dalle misure sperimentali delle intensità alle energie attualmente raggiungibili (≈ 100 GeV) la M.Q. consente di determinare la loro evoluzione teorica per valori crescenti dell'energia



Esiste valore dell'energia $E_{G.U.}$ per il quale tutte le interazioni hanno la stessa intensità ?? $E_{G.U.} = ?$

Unificazione (II)



Unificazione (III)

- ❑ Le curve non si incrociano nello stesso punto
- ❑ Le interazioni E.M., Debole & Colore sono vicine per $E \approx (10^{13} \div 10^{15}) \text{ GeV} \rightarrow T \approx (10^{26} \div 10^{28}) \text{ K}$

i.e. Universo $\approx (10^{-35} \div 10^{-32}) \text{ s}$ dopo Big Bang

- ❑ Gravità: nulla a che vedere con le altre
 - (a bassa energia) 43 ordini di grandezza meno intensa di quella di colore
 - unica mediata da particella a spin = 2

Simmetria

(1900 ÷ 1970)

Noether, Weyl, Luders, Pauli, Wigner,
Lee, Yang, Mills, Gell-Mann, Zweig,
Glashow, Weinberg, Salam, Goldstone,
Higgs, Englert, Brout, t'Hooft, Veltman, ...

La struttura del **vuoto** esemplifica la visione del mondo che emerge dalla **M.Q.** e **T.R.**

➤ **Immagine Classica:** ordine al di sotto del caos

Il mondo è accidentale e imprevedibile, ma le leggi fondamentali della natura sono **semplici** e **ordinate**

➤ **Immagine Moderna:** caos al di sotto dell'ordine

Ordine delle **leggi di conservazione** sovrainposto ad un caos più fondamentale associato ai processi di creazione ed annichilazione tra particelle



Nel mondo accade tutto ciò che non viola leggi di conservazione

Leggi di Conservazione

affermazione di una costanza nella natura durante una variazione

Esempio: numero di persone in questa sala = costante

- ❖ Nessuno entra o esce: legge di conservazione poco interessante
- ❖ Continuamente entra o esce gente: legge di conservazione ben più interessante →
n. arrivi = n. partenze !!

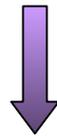
Semplicità: qualcosa rimane costante durante un processo complicato

Simmetria (I)

Linguaggio corrente: **simmetria** ha 2 significati diversi

1. eleganza nelle proporzioni (vago)
2. ripetizioni dei motivi in una forma (+ preciso)

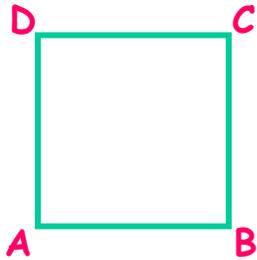
Matematica: interesse per le **trasformazioni** a cui può essere sottoposto un oggetto simmetrico



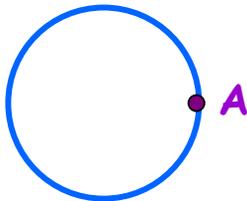
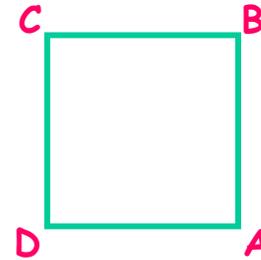
Simmetria come origine di invarianza: quando un oggetto è sottoposto ad una particolare trasformazione il suo aspetto rimane inalterato

Simmetria (II)

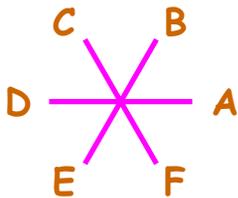
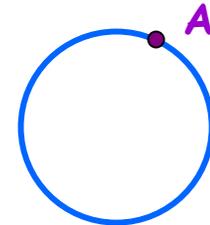
Esempi: simmetrie geometriche



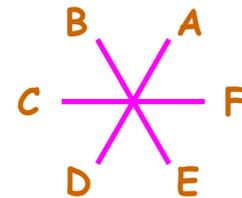
Rotazione
di $\pi/2$



Rotazione
arbitraria



Rotazione
di $2\pi/5$



Simmetria (III)

Simmetrie interessanti per la Fisica: quelle in cui non cambia aspetto la **forma** stessa delle leggi naturali

Teorema di **Noether** : stabilisce la connessione
simmetria \rightarrow invarianza \rightarrow legge di conservazione

Simmetria	Invarianza	Conservazione
Omogeneità Spazio	Traslazioni Spaziali	Impulso
Omogeneità Tempo	Traslazioni Temporal	Energia
Isotropia Spazio	Rotazioni Spaziali	Momento Angolare

Simmetria (IV)



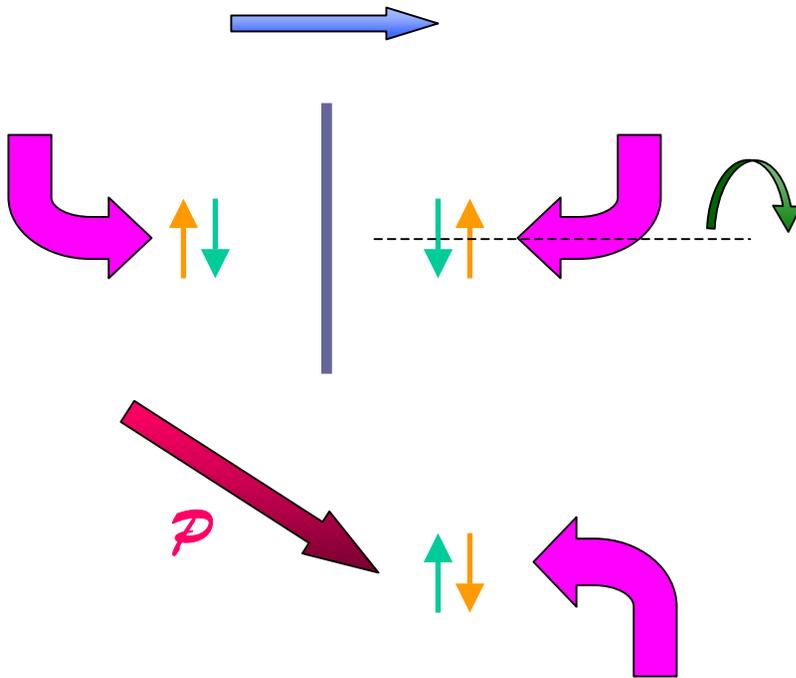
Le 3 leggi di conservazione classiche più importanti derivano dal fatto che le leggi della Fisica sono **le stesse** a tutti i tempi ed in tutti i punti e in tutte le direzioni dello spazio

i.e.

Leggi della Fisica non dipendono da come osservatore sceglie origine e orientazione assi del sistema di riferimento spazio-temporale

Parità (I)

riflessione in uno specchio + rotazione
di π intorno ad asse \perp allo specchio



$$\mathcal{P} : (x, y, z) \rightarrow (-x, -y, -z)$$

Parità (II)

Invarianza rispetto a \mathcal{P}

applicando tale trasformazione ad un qualunque processo ne ottengo uno altrettanto plausibile, governato dalle stesse leggi fisiche

Esempio: proiettore per diapositive

Diapositiva invertita \rightarrow immagine che viola il buon senso o che sia ovviamente impossibile ?? **NO !!**

Non è una coincidenza: mondo macroscopico è **simmetrico** per trasformazioni di **parità**

Inversione Temporale (I)

Inversione del flusso del tempo

$$\mathcal{T} : t \rightarrow -t$$

Invarianza rispetto a \mathcal{T}

data una sequenza di eventi, anche quella che si svolge in ordine inverso è fisicamente possibile

Paradosso: se osservo bicchiere che cade in terra e si frantuma **deve essere possibile** osservare anche il bicchiere che si ricompone e torna sul tavolo !!

Inversione Temporale (II)

Invarianza rispetto a τ violata macroscopicamente ??

NO

possibilità non implica probabilità:

potremmo attendere un miliardo di volte la vita dell'universo e non potremmo ancora aspettarci di vedere il bicchiere ricomporsi e risalire sul tavolo

Però, sebbene estremamente improbabile, il processo invertito nel tempo è in linea di principio possibile: non viola alcuna legge di natura !!

Inversione Temporale (III)

→ significato vero dell'invarianza sotto \mathcal{T} :

accade solo quello che potrebbe accadere anche in ordine inverso, i.e. **se un processo invertito nel tempo è impossibile, lo è anche quello diretto**



Le leggi della natura sono anche il risultato della condizione di invarianza sotto \mathcal{T}

... la traiettoria che il bicchiere descrive cadendo è in parte determinata dall'invarianza sotto \mathcal{T} , anche se è fuori questione che il bicchiere possa risalire sul tavolo

Coniugazione di Carica

sostituzione di particella con
corrispondente antiparticella

$$e: p \rightarrow \bar{p}$$

(e.g. massa e spin inalterati; carica elettrica cambia segno)

Invarianza rispetto a e

dato un processo, quello ottenuto sostituendo
ad ogni particella la sua antiparticella è
governato dalle stesse leggi

Esempio : $e (\gamma e^- \rightarrow \gamma e^-) \Rightarrow (\gamma e^+ \rightarrow \gamma e^+)$

i 2 processi si verificano con uguale probabilità

Simmetria CPT

trasformazioni \mathcal{C} , \mathcal{P} , \mathcal{T} soggette a vincolo assoluto:

Teorema CPT (Lüders & Pauli)

applicazione successiva delle trasformazioni \mathcal{C} , \mathcal{P} , \mathcal{T} (ordine arbitrario) ad un qualunque processo fisico genera un processo ugualmente possibile

i.e. , la trasformazione $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \otimes \mathcal{T}$ è sempre una simmetria qualunque sia l'interazione responsabile del processo !

... e le singole trasformazioni ??

Invarianza di Fase

M.Q. : informazioni relative allo stato di un sistema sono contenute nella sua **funzione d'onda ψ**

$$\text{Probabilità} \propto |\psi|^2$$



fase di ψ non può influenzare il valore di quantità osservabili

Particella carica: invarianza rispetto a variazioni arbitrarie della fase della sua funzione d'onda

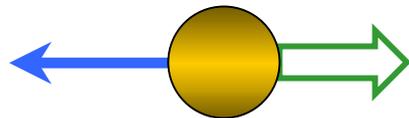


conservazione della carica elettrica

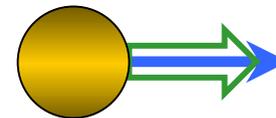
Rottura di Simmetrie (I)

Problema: interazione debole

Particelle con $m = 0$: orientamento del vettore di spin rispetto a quello dell'impulso



right



left

$\mathcal{P} : (\vec{s}, \vec{p}) \rightarrow (\vec{s}, -\vec{p}) \quad \longrightarrow \quad \text{left} \leftrightarrow \text{right}$

γ (interazione e.m.) : entrambe le versioni

ν (interazione debole) : solo left \rightarrow violazione di \mathcal{P}

Rottura di Simmetrie (II)

NON esistono antineutrini left \rightarrow interazione
debole viola anche e !!

... però, esistono antineutrini right \rightarrow interazione
debole invariante sotto $e \otimes \mathcal{P}$??

NO

Mesoni K neutri esistono in 2 stati con proprietà
di trasformazione diverse sotto $e \otimes \mathcal{P}$

$$K_S \rightarrow \pi \pi \quad (\tau = 8.9 \times 10^{-11} \text{ s})$$

$$K_L \rightarrow \pi \pi \pi \quad (\tau = 5.2 \times 10^{-8} \text{ s})$$

Rottura di Simmetrie (III)

Osservazione sperimentale: circa 1 volta su 1000 anche il K_L decade in 2 pioni \rightarrow violazione di $C \otimes P$

(simmetria $C \otimes P \otimes T$ + violazione di $C \otimes P$

\rightarrow invarianza rispetto a T deve essere violata)

Teoria: violazione possibile se n. di famiglie ≥ 3 !!

Inoltre: rapporto tra π neutri e π carichi differisce di $(0.1 \div 1) \text{‰}$ tra K_L e K_S \rightarrow si debbono osservare effetti che si verificano 1 volta su 1 milione o 10 milioni \rightarrow esperimenti ad alta statistica



DAΦNE & KLOE a Frascati

Rottura di Simmetrie (IV)

? Importante stabilire con precisione l'esatta entità della violazione di $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P} \rightarrow$ soluzione di un fondamentale mistero cosmologico:

asimmetria cosmica
materia-antimateria

Invarianza sotto $\mathcal{C} \otimes \mathcal{P}$ (insieme ad altre condizioni)
→ l'universo, inizialmente composto di materia ed antimateria in uguale quantità, continuerebbe a scomparire in esplosioni d'energia dovute all'annichilazione dei suoi componenti !!

Simmetrie Locali

Finora **Simmetrie Globali**: trasformazione applicata
simultaneamente a tutti i punti dello spazio

Simmetrie Locali: invarianza per trasformazione
di diversa entità in ogni punto dello spazio e per
ogni istante di tempo

S. Globale → trasformazione indipendente da (t, \vec{r})

S. Locale → trasformazione dipendente da (t, \vec{r})



Teoria di Gauge Locale

Teorie di Gauge (I)

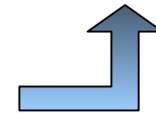
Prototipo teoria di gauge locale: teoria di Maxwell

- Cariche in quiete: solo campo elettrico \vec{E}
 - S. Globale: campo elettrico inalterato per variazioni del potenziale elettrico V a cui si trova il laboratorio
- Cariche in moto: anche campo magnetico \vec{H}
 - potenziale magnetico U → S. Locale: qualunque variazione locale di V può essere compensata da corrispondente variazione di U in modo tale che \vec{E} ed \vec{H} inalterati

Teorie di Gauge (II)

Importante : la **localizzazione** della simmetria è stata ottenuta per mezzo dell'introduzione di un **altro campo**

conseguenza diretta della **T.R.**



S. Locale → comunicazione all'osservatore nel punto **B** delle definizioni adottate da quello nel punto **A**

trasmissione informazione non può essere istantanea:
velocità massima di propagazione = c

→ **standardizzazione delle definizioni** richiede
propagazione di un campo

QED

Invarianza rispetto a variazioni nella fase del campo elettronico ψ è una simmetria globale

Posso renderla locale ??

SI !!

introduco ulteriore campo che compensa variazioni di fase di ψ

Quale campo ??

- $R = \infty \rightarrow m = 0$
- carica elettrica = 0
- spin = 1

FOTONE

Interazione Debole (I)

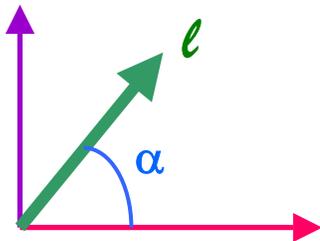
Osservazione Sperimentale:

nei processi governati dall'interazione debole l'elettrone ed il suo neutrino manifestano comportamenti simili



Ipotesi: e^- & ν_e sono 2 stati diversi di una stessa particella

Nuovo numero quantico: isospin debole \rightarrow vettore in spazio interno 2-dimensionale



$$|\ell\rangle = \cos\alpha |e_L\rangle + \sin\alpha |\nu_L\rangle$$

N.B. - solo particelle left nelle interazioni deboli

Interazione Debole (II)

Simmetria Locale di Isospin Debole:

fisica inalterata per variazioni locali indipendenti di α



6 nuovi campi di spin = 1 con $m = 0$

2 con carica elettrica = 0		fotone
2 con carica elettrica = -1		"fotone" negativo
2 con carica elettrica = +1		"fotone" positivo

Interazione Debole (III)



Teoria in disaccordo con l'osservazione

Problemi

- e^- & ν_e simili ma non indistinguibili
- no particelle cariche con $m = 0$
(che fortuna !! e sarebbe instabile !!)

Modifica: aggiunta "ad hoc" di $m \neq 0$ ai campi carichi,
i.e. introduco rottura esplicita della simmetria

Quale valore per m ? In accordo con il raggio
d'azione ($\approx 10^{-15}$ cm) dell'interazione debole

Interazione Debole (IV)

Funziona ??

NO !!

per la teoria modificata non è possibile elaborare una procedura di rinormalizzazione, a causa del fatto che la $m \neq 0$ conferita ai "fotoni" carichi l'ha resa asimmetrica



serve meccanismo che conferisca massa ai campi carichi senza danneggiare la simmetria

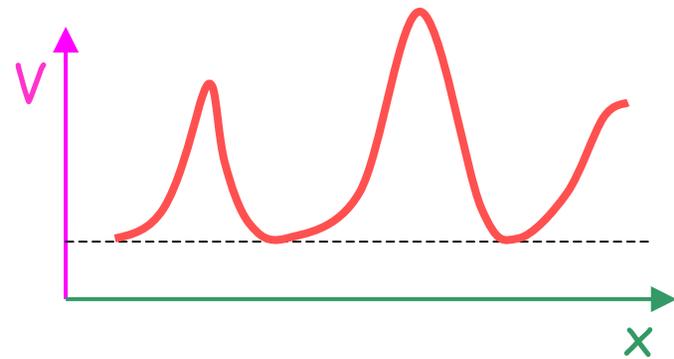
Esiste ?? SI, ed (anche questa volta) ha a che fare con le proprietà del vuoto quantistico !!

Rottura Spontanea della Simmetria

Rottura Spontanea (I)

Vuoto = stato di minima energia \rightarrow è unico ??

Esempio : andamento
spaziale dell'energia
potenziale V



Nuove possibilità:

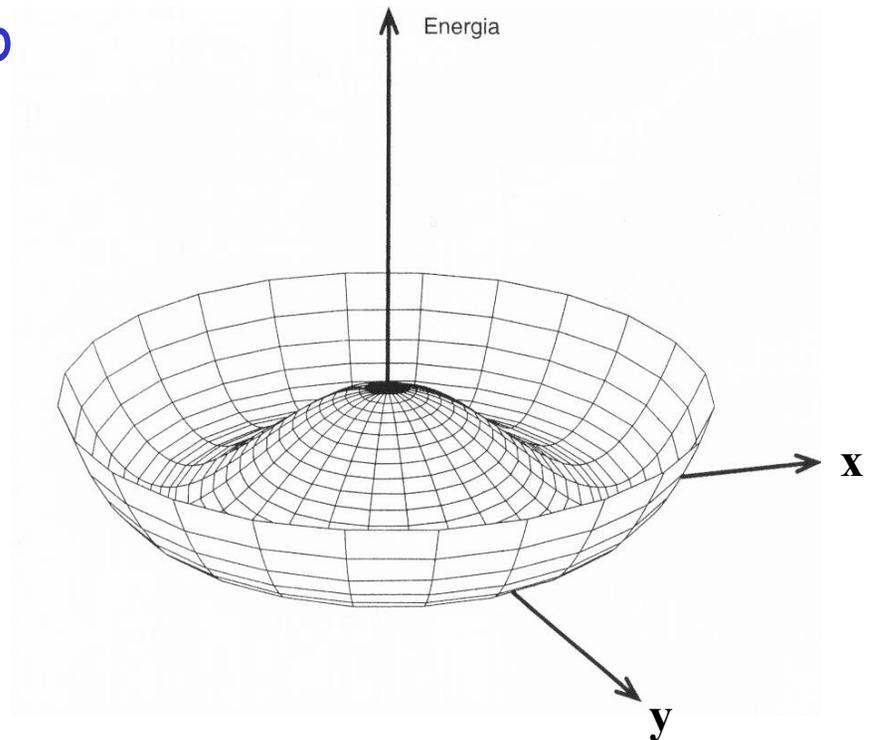
- molti vuoti \rightarrow dove ci troviamo ??
- possibile cambiare vuoto, saltando da un minimo ad un altro ??

Rottura Spontanea (II)

Ulteriore dimensione spaziale → può esistere curva continua che collega stati di vuoto di uguale energia

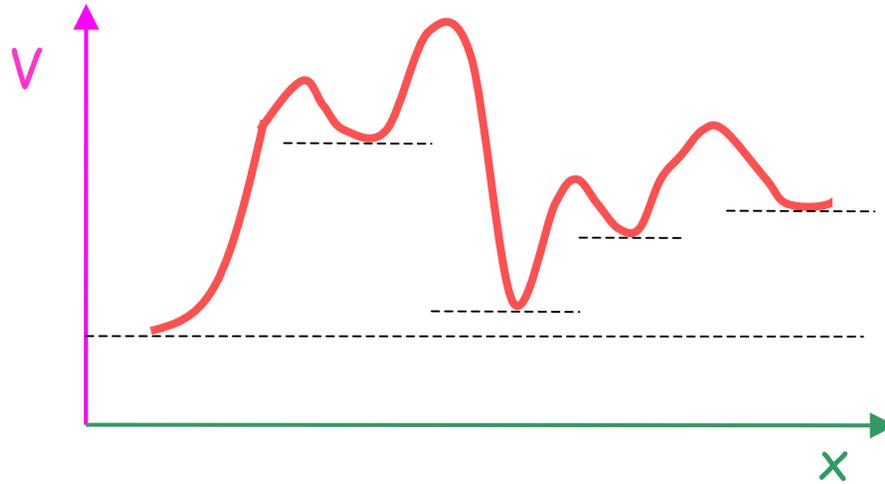
Esempio : andamento energia potenziale tipo "mexican hat"

$$V = (x^2 + y^2 - \eta)^2$$



Rottura Spontanea (III)

Profili più complicati: minimi non corrispondono tutti allo stesso valore di V ; diversa curvatura della funzione nell'intorno di minimi diversi



Effetto della temperatura: può cambiare numero ed energia dei minimi → alcuni possono cessare di essere dei minimi !!

Rottura Spontanea (IV)

Esempio: magnetizzazione del ferro

Energia di magnetizzazione dipende dalla temperatura:

- ❖ riscaldamento sopra temperatura di Curie ($T_c \approx 750 \text{ }^\circ\text{C}$) \rightarrow scomparsa delle proprietà magnetiche: no polo N e polo S
- ❖ raffreddamento sotto $T_c \rightarrow$ magnetizzazione spontanea: tornano a manifestarsi poli N e S

Cicli successivi di riscaldamento/raffreddamento \rightarrow polo N in generale non ubicato alla stessa estremità

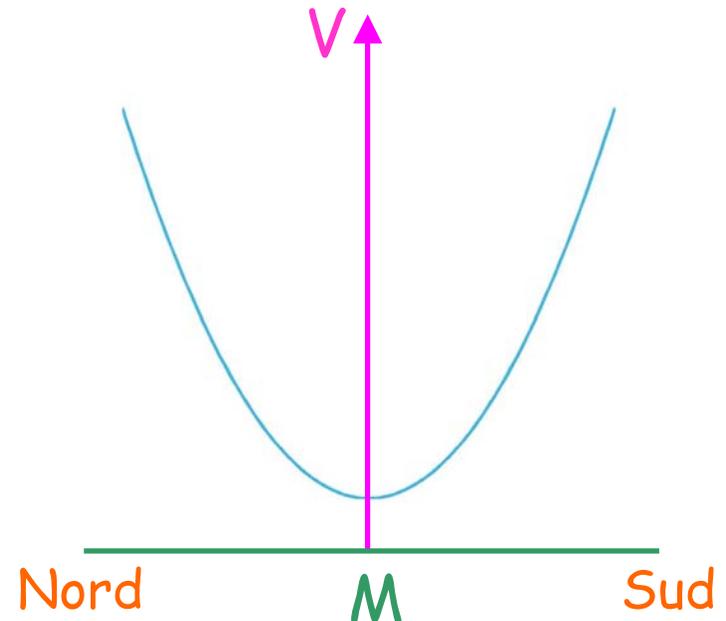
Rottura Spontanea (V)

diagramma Energia - Magnetizzazione

$$T > T_c$$

Stato di minima energia unico: $M = 0$

lo stato iniziale del ferro
non ha importanza: si
perde memoria di
qualsiasi magnetizzazione
precedente



Rottura Spontanea (VI)

$$T < T_c$$

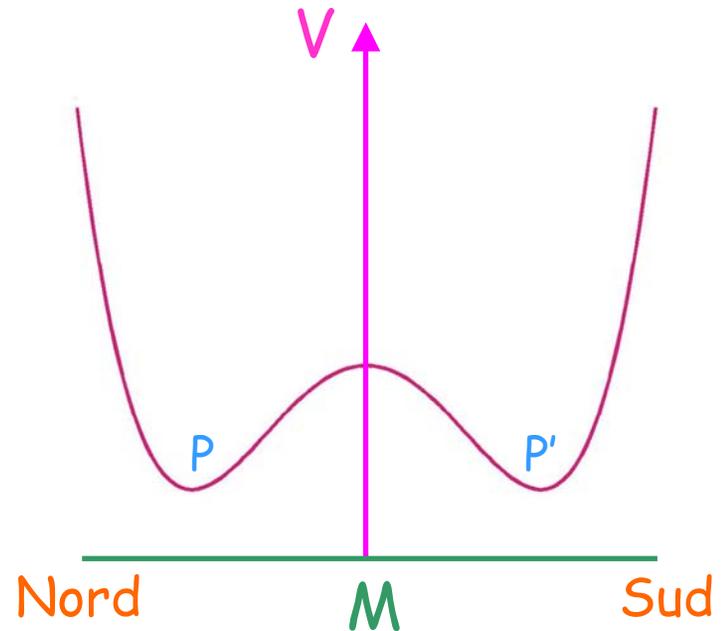
2 stati diversi di minima energia con $M \neq 0$

stato $M = 0$ è instabile:
uguale probabilità di
andare in P o P'

P :



P' :



Rottura Spontanea (VII)

 Simmetria: manifesta ad alta temperatura;
nascosta a bassa temperatura

Rottura Spontanea: scelta tra possibilità diverse
→ stato ordinato



le leggi di natura sono infallibilmente
simmetriche ma le loro conseguenze possono
essere strutture e stati che non posseggono le
stesse simmetrie delle leggi

Rottura Spontanea (VIII)

Universo governato da ridottissimo numero di leggi simmetriche (una sola ??) , ma che manifestano questo loro carattere soltanto per certe scale di energia (tempi, distanze, ...)



Salendo o scendendo tali scale si verificano transizioni di fase e si entra in un dominio dove la simmetria è nascosta

Come realizzare questa transizione di fase nel caso della teoria delle interazioni deboli ??

Modello GWS (I)

(Glashow - Weinberg - Salam)

Aggiunta di **campo scalare** (spin = 0) peculiare:

(contrariamente a tutti gli altri), per essere annullato richiede spesa di energia, i.e. **energia** di tale campo è minima quando esso ha un valore (uniforme) > 0

bosone di Higgs

direzione fissata nello spazio di **isospin** debole rispetto al quale riferire quella del **vettore** che descrive **miscela** $e - \nu_e$



N.B. - direzioni assolute indeterminate
(teoria è ancora simmetrica)

Modello GWS (II)

In realtà necessari 4 campi di Higgs:

doppietto (H^+ , H^0) \oplus anti-doppietto (H^- , \bar{H}^0)

Rottura spontanea Simmetria di Isospin Debole



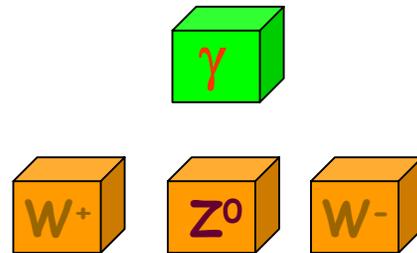
- fotone rimane privo di massa
- W^\pm e Z^0 acquistano massa "mangiando" H^\pm e \bar{H}^0
- H^0 sfugge cannibalizzazione \rightarrow osservabile

Modello GWS (III)

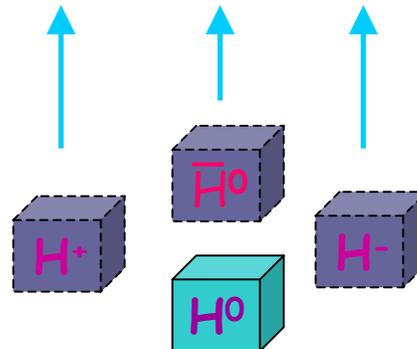
Leptoni
($s = 1/2$)



Bosoni Vettori
($s = 1$)



Bosoni di Higgs
($s = 0$)



Modello GWS (III)



Interazione ElettroDebole (E.W.): E.M. & debole derivano entrambe da un unica simmetria

N.B. - costanti d'accoppiamento rimangono diverse !!

È la teoria giusta ?? SI !!

- Teoricamente: rinormalizzabile !! (t'Hooft - Veltman)
- Sperimentalmente: osservazione di W^\pm e Z^0 (Rubbia)

Problema: ancora non osservato H^0 !!

LHC @ CERN
(2008 ?)

QCD

(Quantum ChromoDynamics)

Teoria dell'interazione di colore è modellata sulla QED

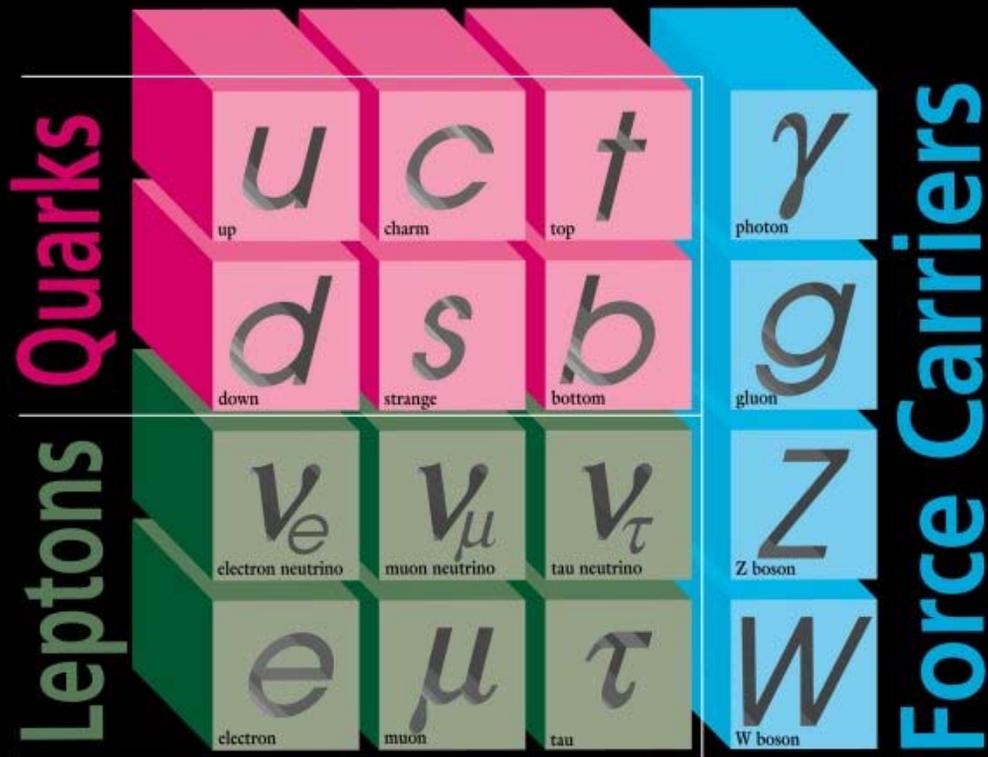
Principio d'invarianza relativo alle trasformazioni locali di colore dei quark

Simmetria di gauge è esatta e non richiede alcun meccanismo di rottura spontanea

Struttura più complicata: gluoni sono a massa & carica elettrica nulle ma possiedono carica di colore

(R finito malgrado $m = 0$)

The Standard Model



Gravity
?

I II III
Three Generations of Matter



?

Questioni Aperte (I)

➤ ? 3 Famiglie

? masse così diverse

$$m_t \approx 10^8 m_e$$
$$m_\nu \approx 10^{-9} m_e$$



Qual'è la vera origine della massa ?

➤ ? Quarks & Leptoni



G.U.Theory

➤ ? Bosoni & Fermioni



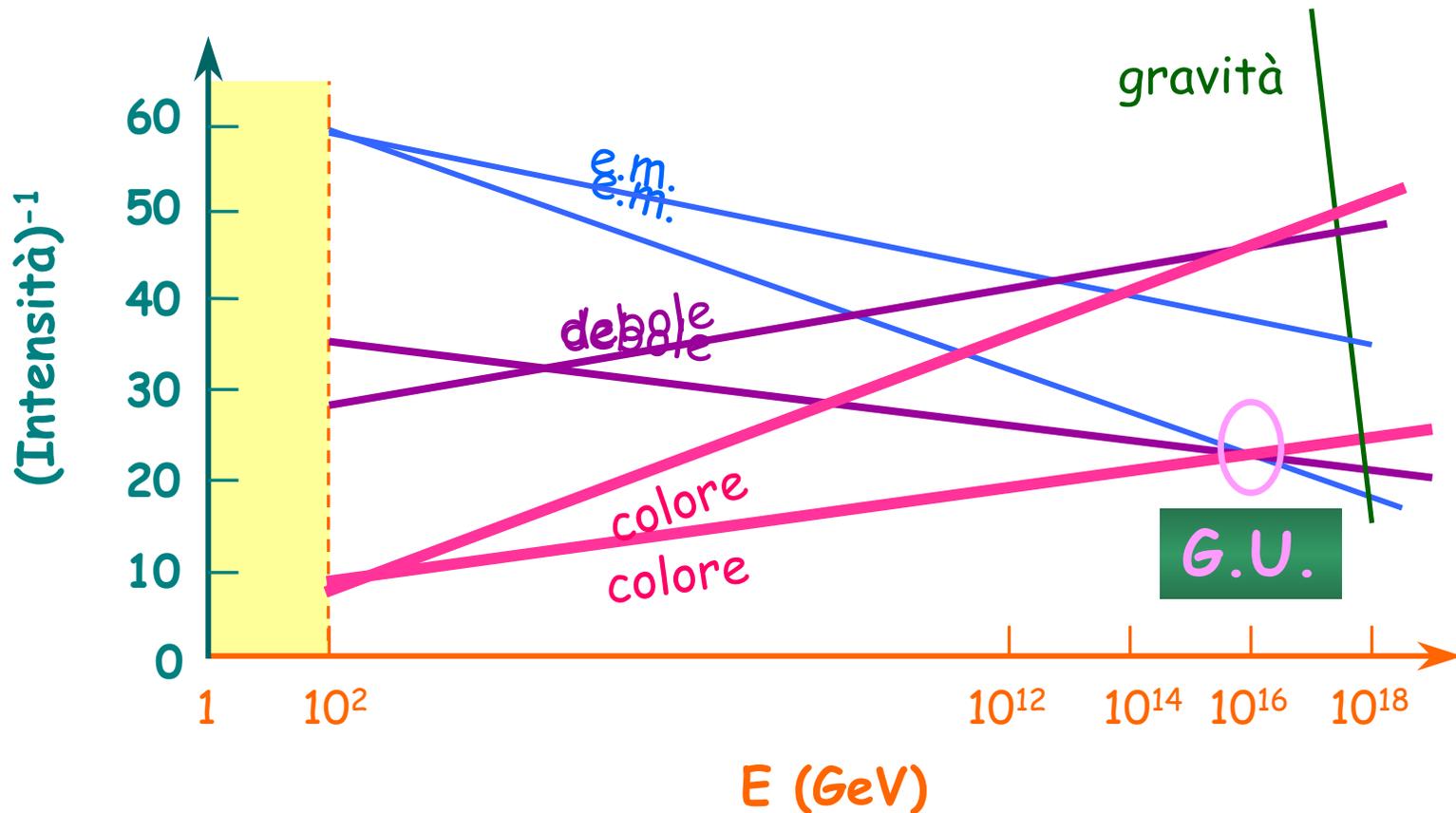
Nuova simmetria

Supersimmetria: correla bosoni & fermioni

→ per ogni bosone (fermione) esiste partner supersimmetrico fermionico (bosonico)

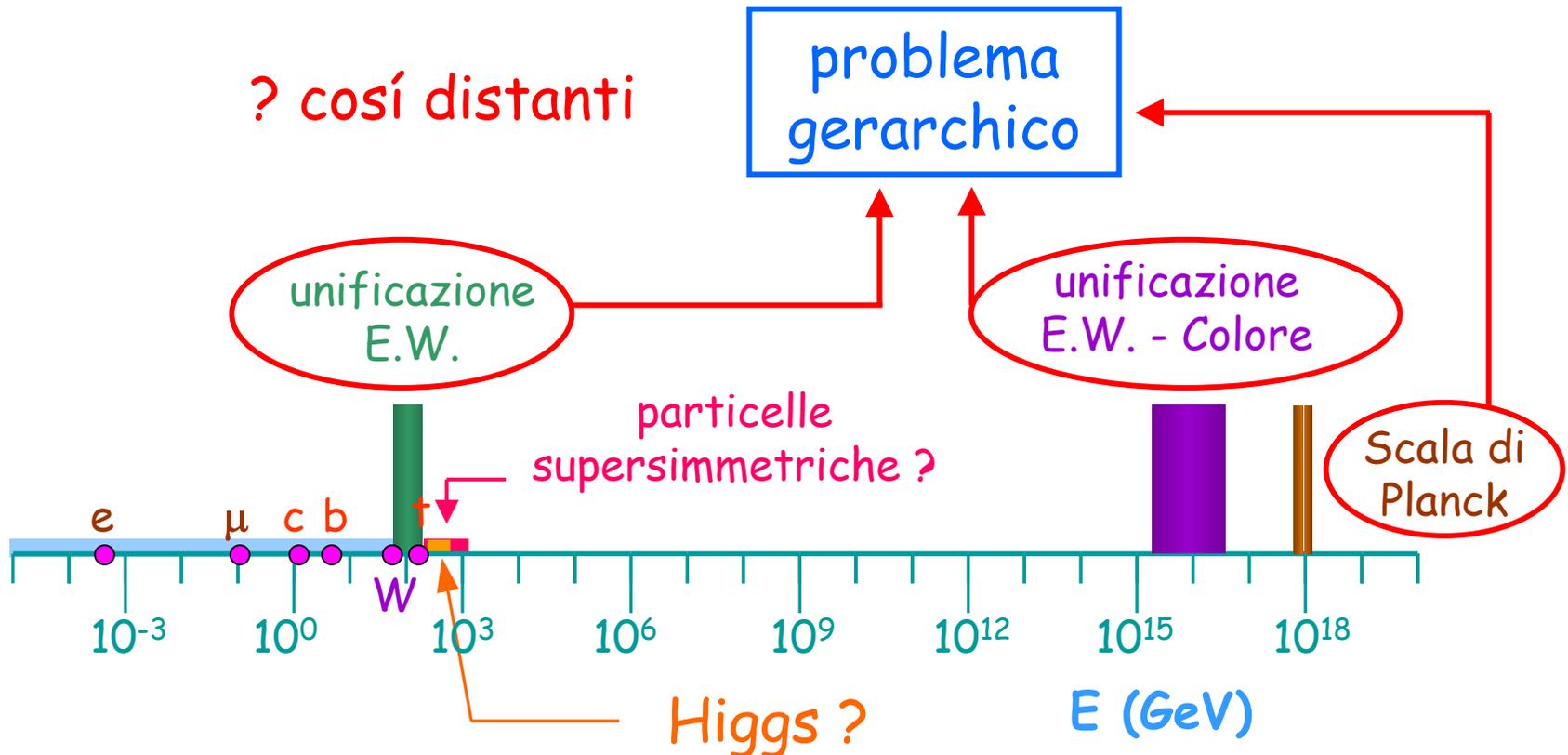
Questioni Aperte (II)

Modello Standard con Supersimmetria



Questioni Aperte (III)

Particelle supersimmetriche → soluzione problema della materia oscura ?? (solo 4.5 % della materia dell'universo è in forma di particelle ordinarie)



Questioni Aperte (IV)

- ? Spazio-tempo ha 3 + 1 dimensioni

aggiunta di dimensioni spaziali extra →
soluzione problema gerarchico ??

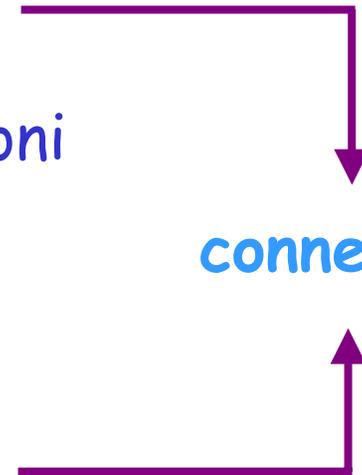
- ? Gravità così debole

(a bassa energia) tra 2 elettroni

$$F_{\text{Newton}} / F_{\text{Coulomb}} \approx 10^{-40}$$

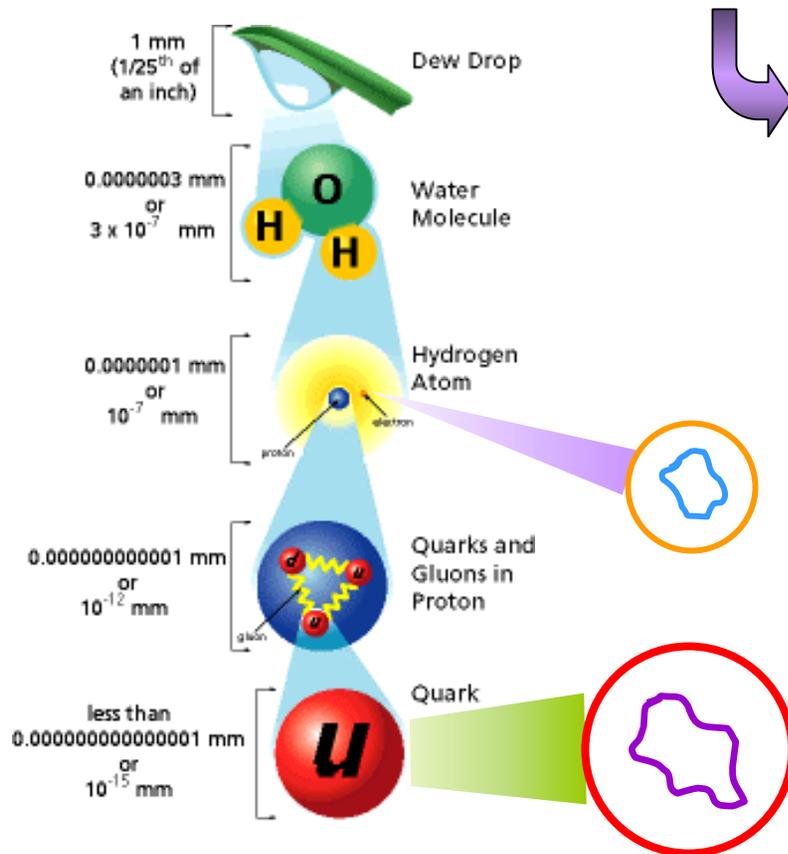
connesse ?

- Gravità compatibile con M.Q. ?



Questioni Aperte (V)

- Le particelle sono veramente puntiformi ??



Teoria delle Stringhe

ulteriore livello
microscopico: particelle
non sono puntiformi, ma
piccoli (10^{-33} cm) anelli
oscillanti

diversi stati di
oscillazione della stringa
→ particelle diverse

Questioni Aperte (VI)

Conseguenze della Teoria delle Stringhe:

❖ spaziotempo di dimensione $10 + 1$

le altre 7 dimensioni spaziali sono "arrotolate" su distanze $\approx 10^{-33}$ cm \rightarrow inosservabili per energie \ll scala di Planck

❖ risoluzione conflitto M.Q. - Gravitazione

Problema: manca la matematica !!

? Stringhe \rightarrow membrane p-dimensionali ?

teoria M

FdP & Cosmologia

AstroParticle
Physics

Leggi d'interazione universali (indipendenza da luogo e tempo) → estrapolazione nel passato (e nel futuro)

