



Giuseppe Bruzzaniti

Intrecci tra fisica, matematica e filosofia: punti di svolta nel Novecento



Istituto Nautico San Giorgio - Genova - 6 marzo 2024



Tre riflessioni

Stato dell'arte

due rivoluzioni:

- teoria della relatività (1905)
- meccanica quantistica (1927)

E DOPO ?

Paradigma Piero Angela

- Tutto può essere spiegato a tutti
E' proprio così?
- I pericoli del paradigma: il caso dello spin



Storia della fisica

E' solo una narrazione di eventi?

Formazione dei concetti

Formazione
dei concetti

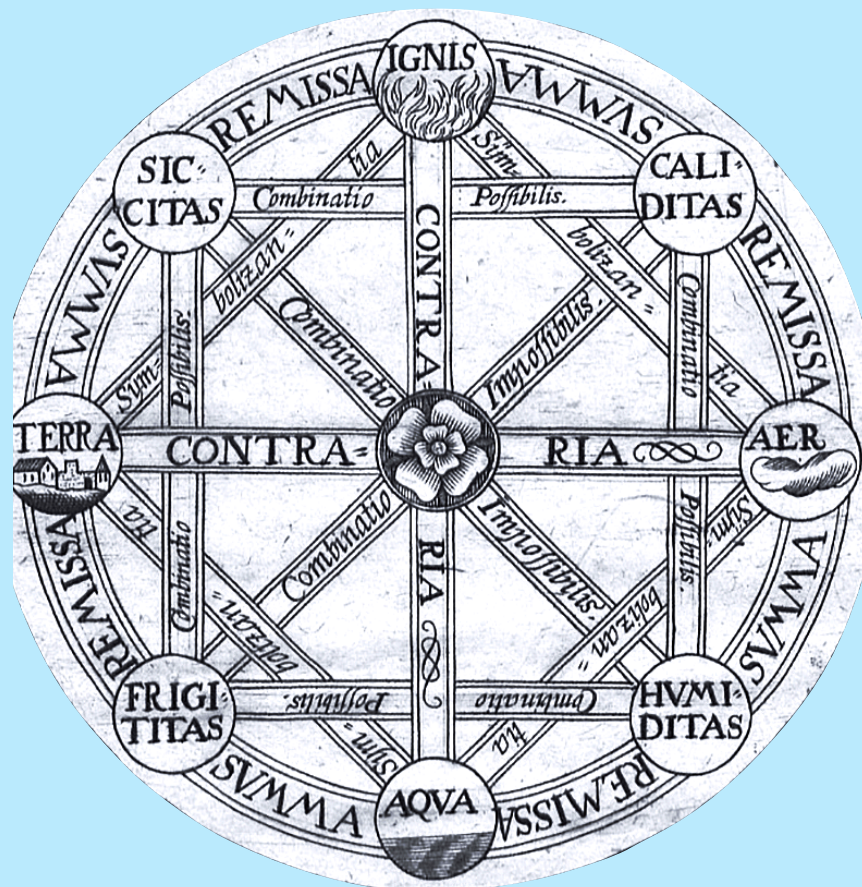
straordinari intrecci tra matematica fisica e filosofia

ruolo svolto dalle “metafisiche personali” (Lakatos,

influenza esercitata da rivoluzioni dimenticate

“vettore epistemologico”(Bachelard) che va dal reale al razionale

Teoria dei 4 elementi



Modello Standard

Tre generazioni della materia (fermioni)			Mediatori delle interazioni e Higgs (bosoni)	
Quark	$\approx 2.2 \text{ MeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ u up	$\approx 1.28 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ c charm	$\approx 173.1 \text{ GeV}/c^2$ $\frac{2}{3}$ $\frac{1}{2}$ t top	$\approx 124.97 \text{ GeV}/c^2$ 0 0 1 g gluone
	$\approx 4.7 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ d down	$\approx 96 \text{ MeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ s strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$ $-\frac{1}{3}$ $\frac{1}{2}$ b bottom	0 0 1 γ fotone
	$\approx 0.511 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ e elettrone	$\approx 105.66 \text{ MeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ μ muone	$\approx 1.7768 \text{ GeV}/c^2$ -1 $\frac{1}{2}$ τ tauone	$\approx 91.19 \text{ GeV}/c^2$ 0 1 Z bosone Z
Leptoni	$< 1.0 \text{ eV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_e neutrino elettronico	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_μ neutrino muonico	$< 18.2 \text{ MeV}/c^2$ 0 $\frac{1}{2}$ ν_τ neutrino tauonico	$\approx 80.39 \text{ GeV}/c^2$ ± 1 1 W bosone W

Sogno: scoprire il piccolo numero di elementi o “radici” di tutte le cose (fuoco, aria, terra, acqua)

Certezza: la “ragione” delle cose è osservabile nelle cose stesse:

Sogno: scoprire il piccolo numero di elementi o “radici” di tutte le cose (Quark, elettroni....)

Rinuncia: La comprensione dei costituenti “elementari” passa attraverso la rinuncia alla loro visualizzabilità. Essi diventano “**ENTITÀ TEORICHE**”: per osservarli è necessario affidarsi a nuovi “occhi”

Il percorso che ha condotto alla “visibilità” delle entità teoriche attraverso rappresentazioni condivise è stato rivoluzionario.

E' stata però una rivoluzione soprattutto filosofica perché sono state scardinate tantissime categorie filosofiche ritenute ben consolidate, ha mutato e ridefinito il significato di molti concetti (ad esempio, spazio, tempo, massa, stato, vuoto....)

Quando parliamo di “crisi” della fisica sarebbe meglio dire “crisi” della filosofia perché è quest'ultima che non è stata in grado di adeguare le proprie categorie alle stupefacenti acquisizioni della fisica.

I "punti di svolta"

1905
relatività



A. Einstein

1927 - Mecc. Quantistica

congresso



Solvay

1947 - Teoria quantistica dei campi

conferenze



Shelter

($\approx$ 1930) Una nuova parola
d'ordine: **SIMMETRIA**

E. Noether



E. Wigner



1954 - Teorie di gauge

C. N. Yang



R. Mills

C. N. Yang (1922 -) and Robert Mills (1927 - 1999)
at Stony Brook in 1999.

Modello

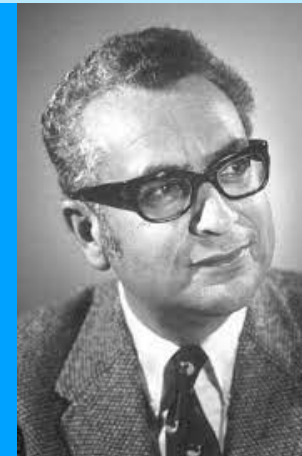
Teoria
elettrodebole

QCD
Cromodinamica
quantistica

Standard

1964 - I quark

M. Gell-Mann



G. Zweig



Il cuore

1927 -

congresso



Relazioni d'indeterminazione (parte limitativa)

$$\Delta p \Delta x \geq \frac{1}{2} \hbar$$

$$\Delta E \Delta t \geq \frac{1}{2} \hbar$$

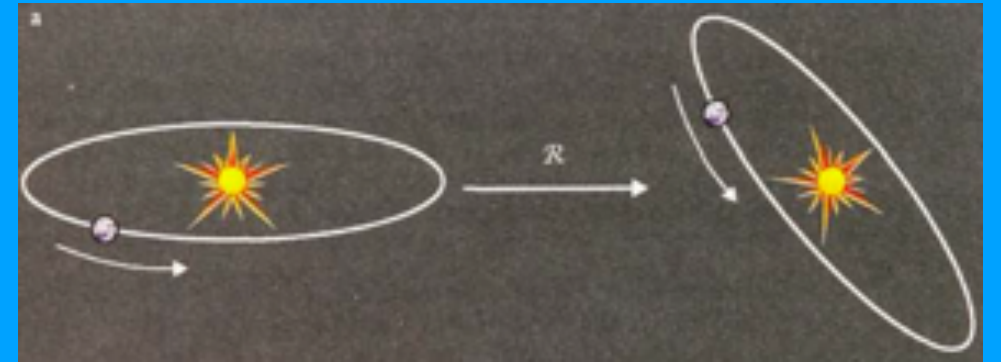
Quanto più penso agli aspetti fisici della teoria di Schrödinger, tanto più li trovo disgustosi

energia può essere presa in prestito: maggiore è l'energia presa e più breve è il tempo che può essere presa in prestito

Sapevo di essa ma mi sentivo scoraggiato, per non dire che mi ripugnava, dai metodi di algebra trascendentale e dalla mancanza di visualizzabilità

Principio di sovrapposizione (parte costruttiva)

Meccanica classica



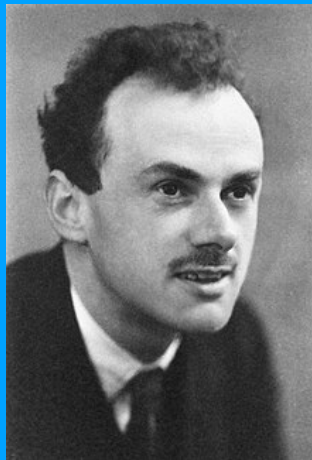
Una rotazione che agisce sull'orbita di un pianeta produce un'altra possibile orbita. Si tratta però di orbite che si escludono a vicenda: il pianeta sta o sulla prima o sulla seconda

Meccanica quantistica

Se $|\psi_1\rangle$ e $|\psi_2\rangle$ sono stati del sistema, allora anche $|\psi\rangle = c_1|\psi_1\rangle + c_2|\psi_2\rangle$ è uno stato del sistema

Quindi:

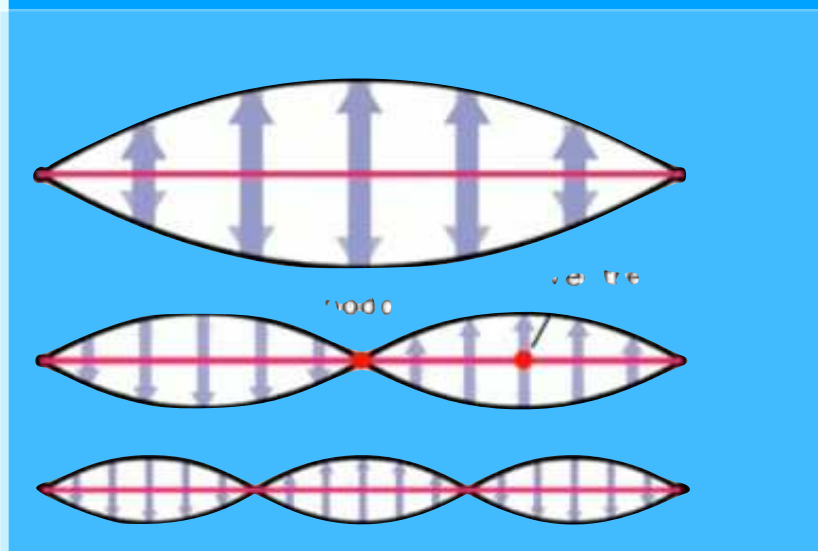
Se $|\psi\rangle$ presenta invarianza per rotazione allora, anche $|\psi\rangle + R|\psi\rangle$ rappresenta uno stato del sistema rotazionalmente invariante



Paul Adrien Maurice Dirac (1902 - 1984)

- Genio assoluto, introverso (il Dirac è l'unità di misura del silenzio verbale 1 Dirac = 1 parola/ora),
- talento matematico, sostenitore della bellezza matematica.
- Figura di transizione tra la generazione di Einstein, Schrödinger, De Broglie e quella di Feynman, Schwinger, Weinberg.
- Chiude la fase del dualismo ondulatorio - corpuscolare e apre quella della Teoria quantistica dei campi (QFT)

1927 *Pubblica l'idea alla base dell'elettrodinamica quantistica*



Immaginiamo una corda tesa e fissata ai suoi estremi. Vi sono molti modi semplici in cui la corda può vibrare e ciascuno di questi può essere caratterizzato dal numero di punti che rimangono fermi mentre la corda oscilla.

- Questi modi vengono detti “*modi normali*”
- In ogni modo normale ciascun punto della corda oscilla armonicamente, ossia come una particella sospesa a una molla
- Ogni oscillazione della corda, comunque complicato, può essere ricostruito sommando un determinato numero (anche infinito) di modi normali. Studiare il moto della corda equivale a studiare il moto di infiniti oscillatori armonici
- Quanto detto - si può dimostrare - vale per qualunque sistema continuo governato da equazioni lineari

Il campo elettromagnetico è un sistema continuo e le equazioni di Maxwell che lo governano sono lineari

QUINDI....

Il campo elettromagnetico può essere pensato nei termini dei suoi “modi normali” cioè come un insieme di oscillatori armonici

Secondo la M. Q. l'energia degli oscillatori può variare solo per multipli $h\nu$

I fotoni emergono in modo naturale come il prodotto della quantizzazione del campo

... Un progetto ambizioso...

Data la simmetria tra radiazione e materia stabilita dalla M.Q. , l'elettrone non potrebbe essere pensato come il prodotto della quantizzazione del suo campo ondulatorio?

Fotoni:
quanti del campo
elettromagnetico

perfetta simmetria tra
radiazione e materia

Elettroni:
quanti del campo
elettronico

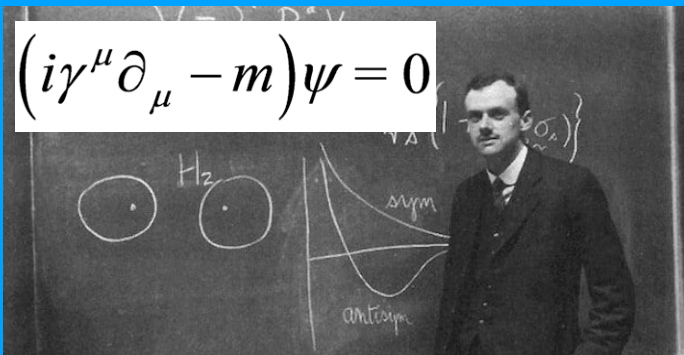
... Un progetto ambizioso...

Fotoni:
quanti del campo

perfetta simmetria tra
radiazione e materia

Elettroni:
quanti del campo

Un problema: il campo elettromagnetico è governato da equazioni (Maxwell) relativisticamente invarianti.
Al contrario, il campo elettronico è governato da un'equazione (Schrödinger) non relativistica.



1928 Dirac risolve il problema e formula l' "equazione di Dirac"

le ... magie ... dell'equazione

prevede l'esistenza
dello spin

prevede l'esistenza
dell'antimateria

un nuovo concetto
di vuoto

Dirac non porterà a termine il "progetto" ma consegnerà il
testimone a una nuova generazione di fisici

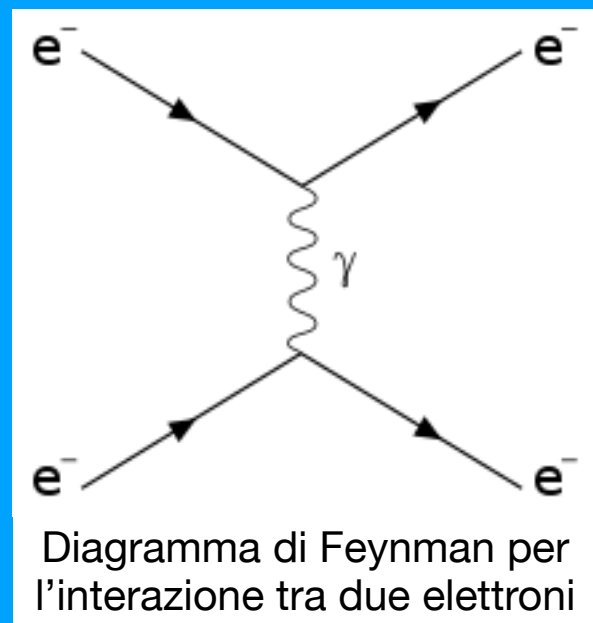
Il “gioiello della fisica”: l'elettrodinamica quantistica (QED)

Primo esempio di teoria quantistica dei campi: descrive l'interazione tra radiazione (fotoni) e materia (elettroni)



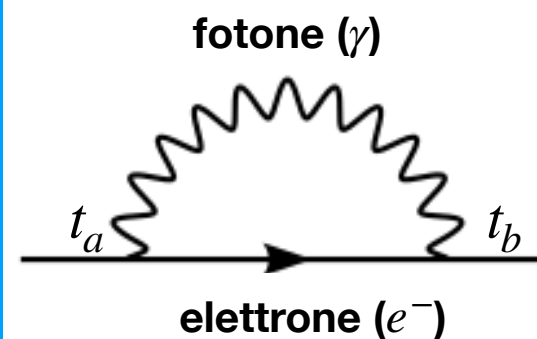
Il paradigma:

- Esistono solo campi quantistici. Le particelle sono eccitazioni del campo
- l'interazione è prodotta da “particelle” mediatrici



Problema: l'elettrone produce un campo elettromagnetico quindi deve interagire con sé stesso. Come la (QED) descrive questo fenomeno? (self energy dell'elettrone)

Nasce l'idea di particella virtuale



In t_a l'elettrone emette un fotone ma il processo violerebbe il principio di conservazione dell'energia. Questo diventa possibile grazie al principio di indeterminazione

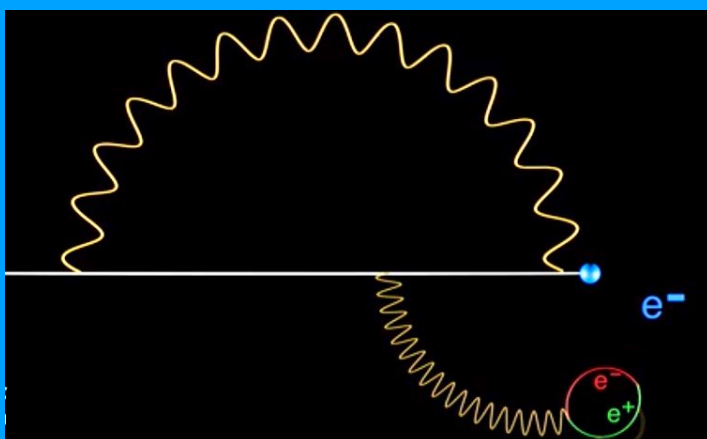
$$\Delta E \Delta t \approx \hbar.$$

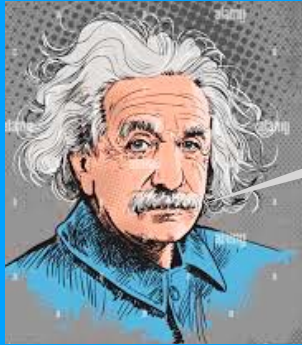
basta che il fotone sia riassorbito dopo un tempo

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

Una grande svolta: la ridefinizione del concetto di vuoto

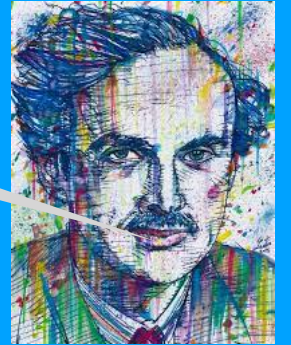
“Lo stato fisico del nulla”, usando una felice espressione di Schwinger, è un continuo ribollire di stati virtuali che esistono per piccolissime frazioni di tempo per essere subito riassorbiti.



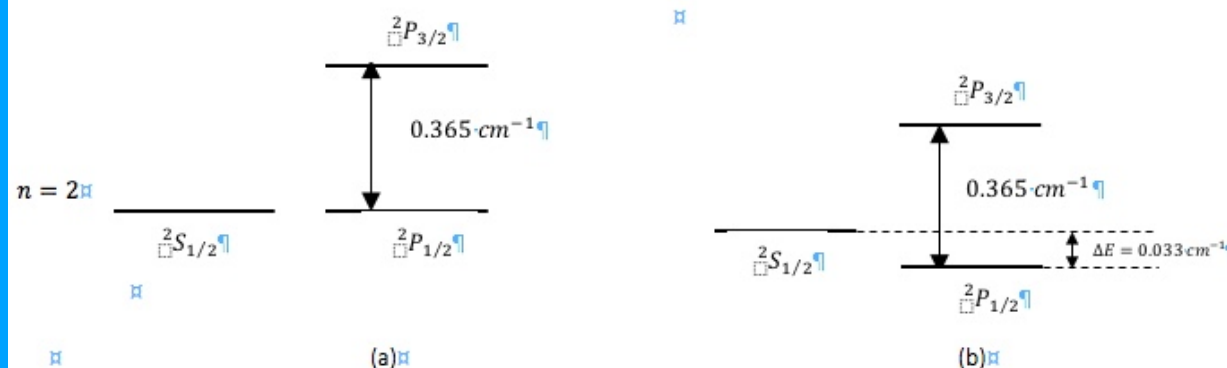


Ma stiamo facendo fisica o metafisica?
Si tratta solo di speculazioni metafisiche?

La risposta è semplice: la metafisica non è controllabile sperimentalmente, la fisica sì.
E la QED conduce a un accordo con i dati empirici stupefacente



Lamb shift (W. E. Lamb, R. C. Retherford, 1947)



$$\Delta E_{sper} \approx 1000 \text{ MHz}$$

$$\Delta E_{teor} \approx 1040 \text{ MHz}$$

Momento magnetico anomalo dell'elettrone

Valore misurato = $1.159652180252(95) \cdot 10^{-3}$

Valore calcolato = $1.15965218073(28) \cdot 10^{-3}$

**Precisione:
una parte per miliardo**

1918 Teorema di Noether

Legame tra simmetria e principi di conservazione
...ci vollero diverse decine di anni per ottenere il giusto riconoscimento

($\approx$ 1930) Una nuova parola d'ordine: **SIMMETRIA**

E. Noether



E. Wigner

Fine anni '20

Wigner avvia il suo progetto:
applicare i metodi della
teoria dei gruppi alla
meccanica quantistica

Primi risultati 1931

Wigner con tecniche
gruppali mostra che i livelli
energetici e le regole di
selezione nella
fenomenologia degli spettri
sono conseguenza delle
proprietà di simmetria
dell'atomo.
...Il lavoro viene
generalmente accolto con
diffidenza. W. Pauli conia il
termine "gruppenpest"

Il "capolavoro" 1939

Pubblica un lavoro sulle
rappresentazioni irriducibili
del gruppo di Poincaré che
segna un **punto di svolta**

Simmetria e teoria
dei gruppi
assumono un ruolo
di primo piano
nella ricerca
fondamentale

Piramide di Wigner



D. J. Gross (Nobel 2004) riprende e
estremizza il pensiero di Wigner
"Sono i principi di simmetria a determinare
la forma delle leggi di natura"

Il percorso di Wigner non fu
semplice: l'intreccio tra
matematica e fisica fu
profondissimo fino a rendere
indistinguibili i confini tra le
due discipline. Inoltre la
matematica utilizzata era del
tutto inusuale per i fisici



C. N. Yang (1922 -) and Robert Mills (1927 - 1999)
at Stony Brook in 1999.

R. Mills

...Le basi...

Riferiamoci alle equazioni di Maxwell. Ci volle circa mezzo secolo per scoprire che celavano due gioielli

- Invarianza per trasformazioni di Lorentz
- Invarianza di gauge

Immaginiamo una certa regione R dello spazio in cui è presente un campo elettrico $\vec{E}$, esso può essere derivato da una funzione scalare, il potenziale elettrico ϕ . Nulla cambierebbe se in tale regione il potenziale variasse di un'identica quantità. In questo caso abbiamo una **simmetria globale**

Cosa succederebbe se in ogni punto di R il potenziale ϕ variasse di una diversa quantità?

La simmetria precedente scompare. Può essere tuttavia ripristinata grazie al campo magnetico $\vec{B}$. Anche questo può essere espresso attraverso un potenziale magnetico $\vec{A}$ (vettore). Dalle equazioni di Maxwell segue che qualunque variazione di ϕ può essere combinata con una variazione di $\vec{A}$ in modo che $\vec{E}$ e $\vec{B}$ risultino invarianti. In una formulazione relativisticamente invariante ϕ e $\vec{A}$ vengono espressi attraverso un unico oggetto: il *quadripotenziale elettromagnetico* A_μ detto anche *campo di gauge*.

noto A_μ si ricavano
 $\vec{E}$ e $\vec{B}$.

Non vale il contrario:
ci sono infiniti A_μ che portano
agli stessi $\vec{E}$ e $\vec{B}$

**Invarianza di gauge
dell'elettromagnetismo**

Possiamo eseguire
trasformazioni tra campi di
gauge lasciando la fisica
invariata

Noether

Conservazione
della carica
elettrica



C. N. Yang (1922 -) and Robert Mills (1927 - 1999)
at Stony Brook in 1999.

R. Mills

Riferiamoci al campo libero di Dirac ψ . Poiché le osservabili dipendono da $|\psi|^2$ la teoria (la lagrangiana) è invariante sotto la *trasformazione di fase*

$$\psi \rightarrow \psi' = e^{i\theta} \psi$$

dove θ è una costante. Si tratta di una trasformazione globale poiché tutti i valori del campo subiscono lo stesso cambiamento

Cosa succederebbe se considerassimo non una trasformazione globale ma locale, cioè se θ fosse una funzione arbitraria delle coordinate, ossia $\theta = \theta(x)$?

Si perderebbe l'invarianza, ma questa può essere ripristinata introducendo il campo di gauge A_μ

L'esistenza del fotone (cioè di A_μ) diventa la conseguenza dell'imposizione dell'invarianza per trasformazioni di fase locali della lagrangiana di Dirac per le cariche libere. La combinazione di $\psi \rightarrow \psi' = e^{i\theta(x)} \psi$ con il campo A_μ conduce alla comparsa di un nuovo termine nella lagrangiana complessiva che rappresenta proprio l'interazione del campo di Dirac con quello di gauge

Il mutamento di prospettiva è radicale, quasi a conferma della piramide di Wigner

E' LA SIMMETRIA CHE GENERA L'INTERAZIONE

Si tratta di una prospettiva che si è affermata come paradigma di tutte le teorie attuali relative alla fisica delle particelle elementari

Tre parole per tre grandi svolte

Particella



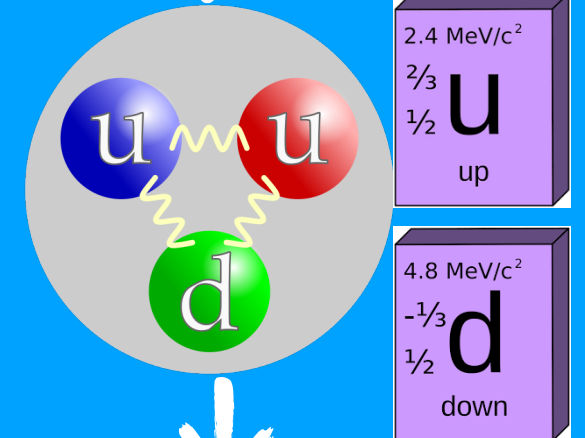
Alla base della materia non vi sono particelle ma campi quantistici

Interazione



L'interazione è generata dalla simmetria

Vuoto



$$M_{quark} = 2.4 + 2.4 + 4.8 = 9.6 \text{ MeV}$$

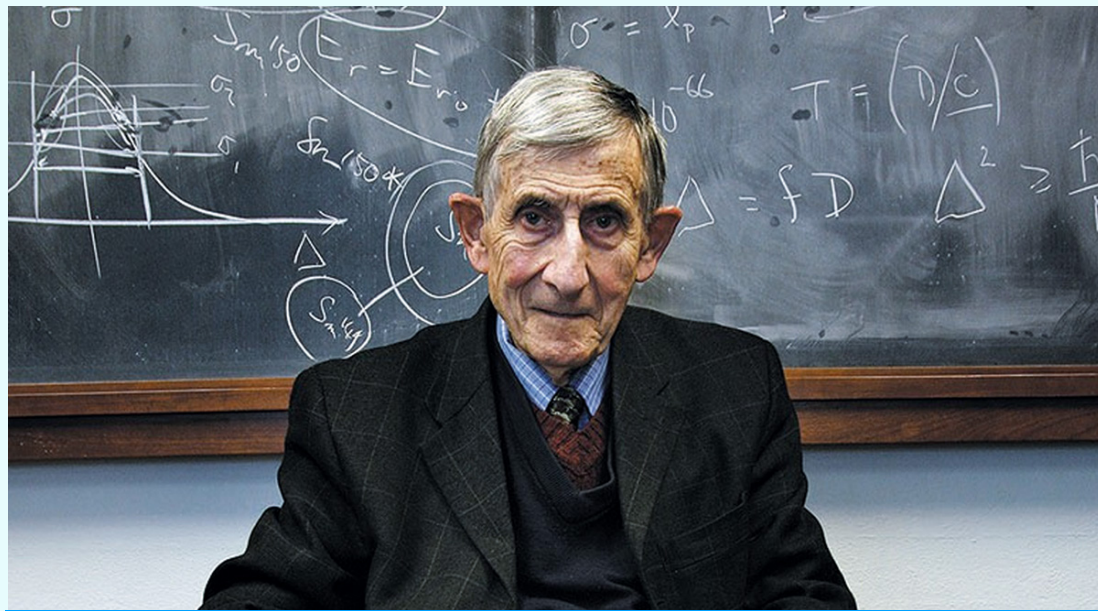
$$M_{protone} \approx 1 \text{ GeV}; M_{quark} \approx \frac{1}{100} M_{protone}$$

$$E \text{ gli altri } \frac{99}{100} ?$$

Sono prodotti dal continuo ribollire di particelle virtuali del vuoto quantistico



Quasi un paradosso...
Ciò che dà senso alla
“materia” è il vuoto
quantistico, lo “stato fisico
del nulla”



Freeman Dyson

“Meglio essere ricordati per un premio Nobel non assegnato che per un premio Nobel immeritato”

Di cosa siamo fatti? Di cosa è fatta la materia?

**Persino a un fisico teorico incallito come me riesce sempre sorprendente l'idea che il nostro mondo solido di alberi e pietre possa essere fatto di campi quantistici e nient'altro. Il campo quantistico sembra qualcosa di troppo fluido e inconsistente per essere la sostanza di base dell'universo. Eppure abbiamo imparato gradualmente ad accettare il fatto che sono le leggi della meccanica quantistica a imporre la loro peculiare rigidità ai campi che governano, una rigidità che è estranea alle nostre concezioni intuitive ma che tuttavia assicura efficacemente alla Terra la sua coesione. Abbiamo imparato ad applicare, sia a noi stessi sia al nostro argomento, le parole di Robert Bridges:
la nostra stabilità è solo equilibrio e la nostra sapienza sta nel controllo magistrale dell'imprevisto**