Simmetrie in Natura, nell'Arte e nella Scienza

E. Santopinto

INFN Genova
10 Aprile 2025

Sommario

- Introduzione cosa significa simmetria
- Simmetria nell'arte
- Simmetria nella natura
- Il linguaggio matematico delle simmetrie
- Tipi di simmetrie
- La rottura spontanea della simmetria

Introduzione
cosa significa simmetria

- **Fin dall'antichita' il concetto di simmetria ha affascinato filosofi, matematici, artisti e pensatori in genere. La sua formalizzazione matematica a partire dalla fine del XIX secolo (ad opera di Galois) ha portato a sviluppi molto significativi in matematica (teoria dei gruppi) e in particolare nella fisica moderna, tanto che alcune delle piu' grandi scoperte della fisica teorica del XX secolo, come vedremo, possono essere intese come scoperte dell' esistenza di particolari proprieta' di simmetria delle leggi fisiche.**

Il termine simmetria risale ai greci, che con esso indicavano
una nozione strettamente legata a quelle di proporzione e armonia.
Questa nozione antica di simmetria, fatta propria dai latini nella versione di Vitruvio cioe' la rispondenza di proporzioni tra le singole parti e l'intera figura, rimane quella dominante fino a tutto il Rinascimento e se ne trova traccia ancora oggi in una delle due accezioni usate
nel linguaggio corrente

Simmetria= Abilita' di predire

Nell' originale,la simmetria e' meravigliosamente rotta!

Piero della Francesca: Madonna del Parto

Il **buckminsterfullerene** è il più piccolo fullerene nel quale due pentagoni non condividono un lato.
Nella struttura del buckminsterfullerene (C_{60}) gli atomi di carbonio si dispongono ai vertici di un particolare poliedro semiregolare: l'icosaedro troncato.

Fullerene C 60

La scoperta ha avuto luogo alla Rice University, apparentemente per caso. Insieme al ricercatore ospite britannico H. Kroto, R. Smalley e R. Kurl hanno trovato molecole di carbonio di grande massa nel corso di una laser-vaporizzazione della grafite. Le molecole di carbonio con la massa più comune erano C60, C70, C84 e C540.

All'inizio loro non sapevano di cosa si trattasse. Kroto aveva un vago ricordo che la cupola geodetica che aveva visto al World Expo di Montreal nel 1967 era composta da esagoni e pentagoni e gli sembrava di ricordare che quella struttura,

Realizzata avrebbe dovuto avere 60 vertici.

La cupola geodetica che Kroto aveva visto era stata costruita dall'architetto R. Buckminster Fuller .

Fuller voleva costruire una struttura che avesse la massima resistenza con il minimo numero di elementi.

L'elaborazione al computer ha confermato la modellizzazione della molecola del fullerene come un poliedro con 60 vertici, e per questo motivo, e' stata chiamata in questo modo.

Padiglione di Richard Buckminster Fuller Montreal Expo '67

Nobel per la scoperta del fullerene
(1996)

Definizione moderna di simmetria

- **Se si considera un "oggetto" (un vaso, una molecola, una particella elementare, un pianeta o l'intero universo) come un sistema fisico, diciamo che questo possiede una certa simmetria quando le sue proprietà, dopo la trasformazione che abbiamo operato su di esso, sono indistinguibili da quelle che aveva prima.**

Invarianza e conservazione

- **Una quantità è conservata quando non varia durante un dato processo**

- **Nel 1918, Emmy Noether pubblicò la prova di due teoremi ora centrali nella fisica moderna: ogni simmetria continua di un sistema è equivalente ad una quantità misurabile conservata**

Simmetrie connesse con le leggi di conservazione. Teorema di Noether (1917)

- Ogni simmetria continua della natura produce una legge di conservazione.
- Anche l'opposto è vero: ogni legge di conservazione riflette una simmetria sottostante.

Invarianza e conservazione

- **Studiando quantità che sono conservate in processi di collisione tra particelle, possiamo imparare quali sono le simmetrie fondamentali che determinano le sottostanti interazioni senza conoscere tutti gli stati del sistema**

Un es.:La via degli ottetti, M. Gell-Mann, Y. Ne'eman

Ottetto dei barioni

La sottostante simmetria e'quella di un gruppo che ha come rappresentazione fondamentale il tripletto e questo tripletto sono i quark up, down e strange

Ottetto dei barioni con struttura a quark

Il mistero della simmetria, *A. Masiero e M. Pietroni, Asimmetrie 11,Simmetrie, aprile 2011*

Decupletto dei barioni

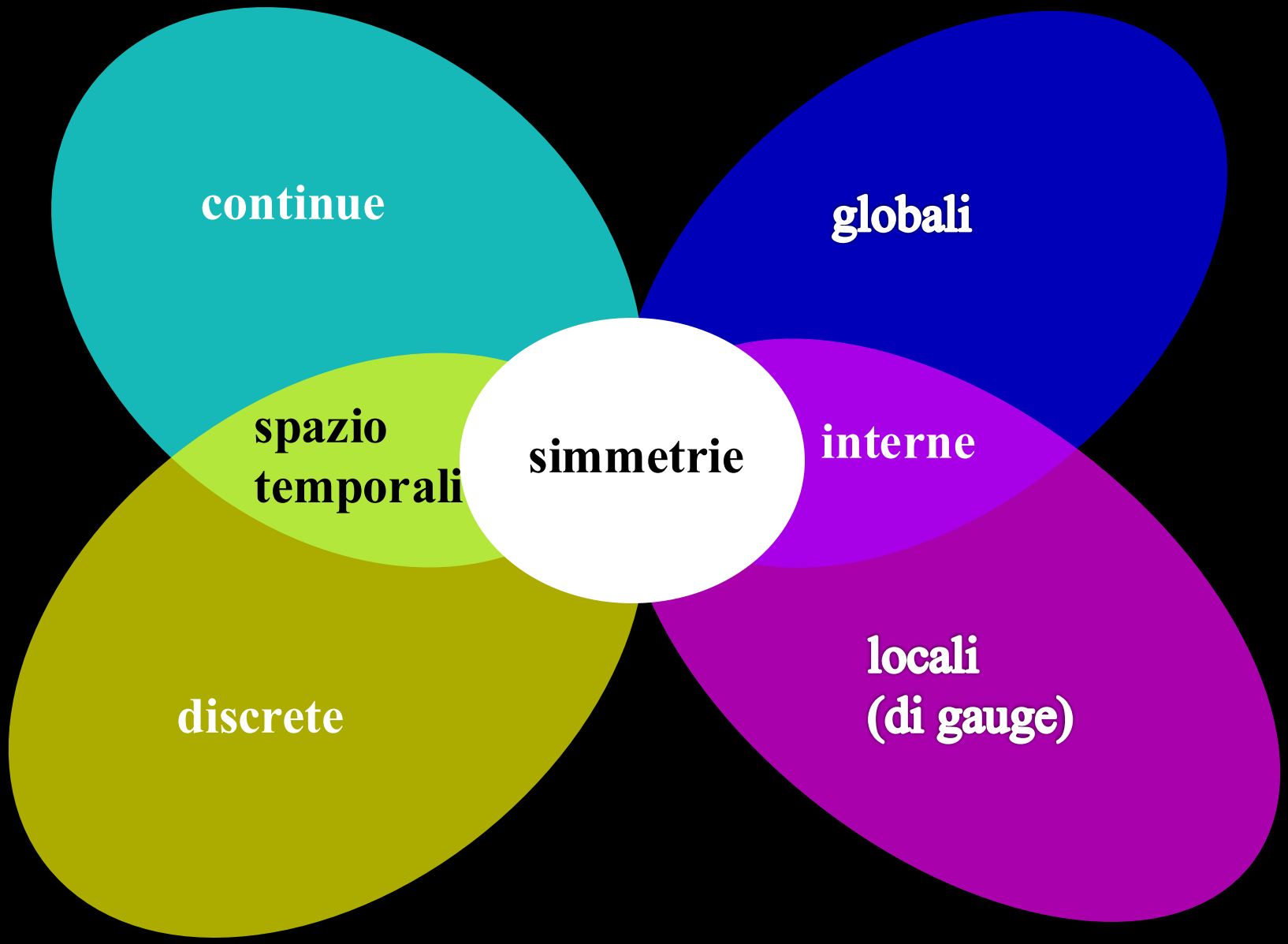
La Teoria dei quark 1964

Gell-Mann predice la scoperta dell' Ω^-, subito dopo confermata sperimentalmente.

Nel 1969 M. Gell-Mann riceve il premio Nobel per *"il suo contributo e le scoperte riguardanti la classificazione delle particelle elementari e le loro interazioni"*.

Il fatto che le particelle come il protone, il neutrone, il pione, e tante altre, non siano puntiformi ma siano costituite a loro volta da oggetti elementari, chiamati quarks, sta all'origine di questa simmetria.

M. Gell-Mann


continue
globali
spazio
temporali
simmetrie
interne
discrete
locali
(di gauge)

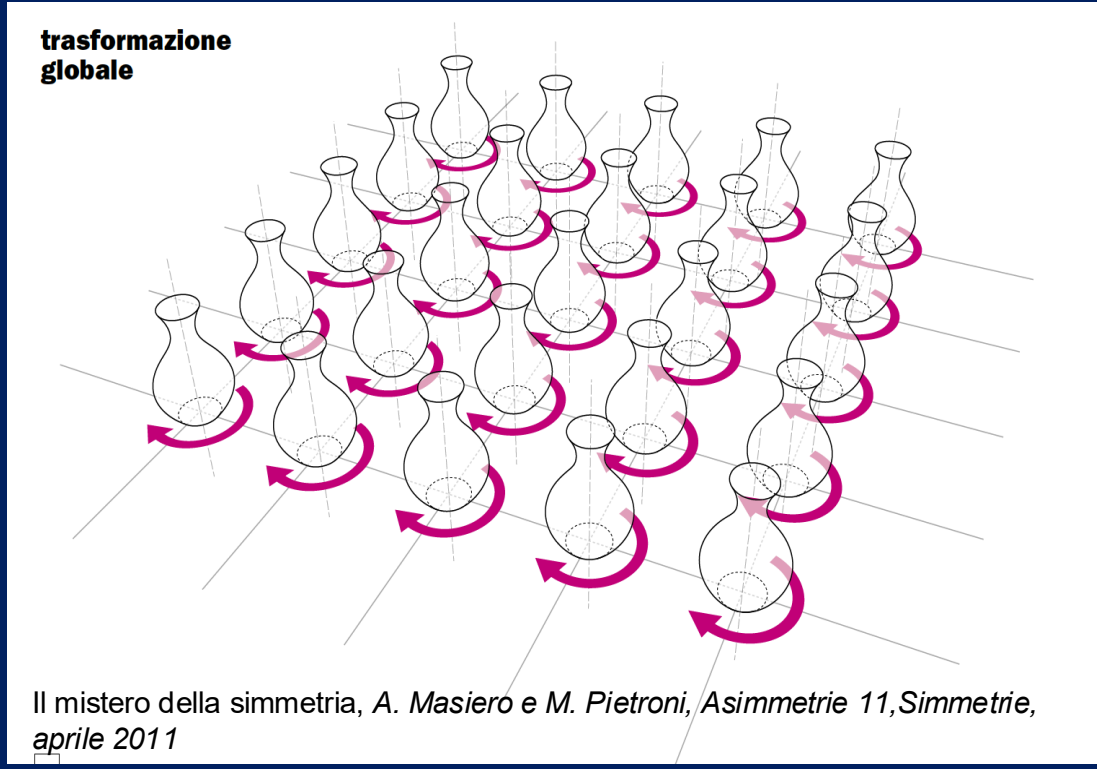
2) Simmetrie interne al sistema

Trasformazioni globali

Come esempio di sistema fisico possiamo pensare, ad esempio, ad un insieme di vasi, mentre, come esempio di trasformazione globale possiamo pensare ad una rotazione.

Effettuare una trasformazione globale sul sistema di vasi significa ruotare ciascun vaso di uno stesso.

Come si vede dalla figura, dopo la rotazione l'aspetto di ciascun vaso e ci appare sempre lo stesso

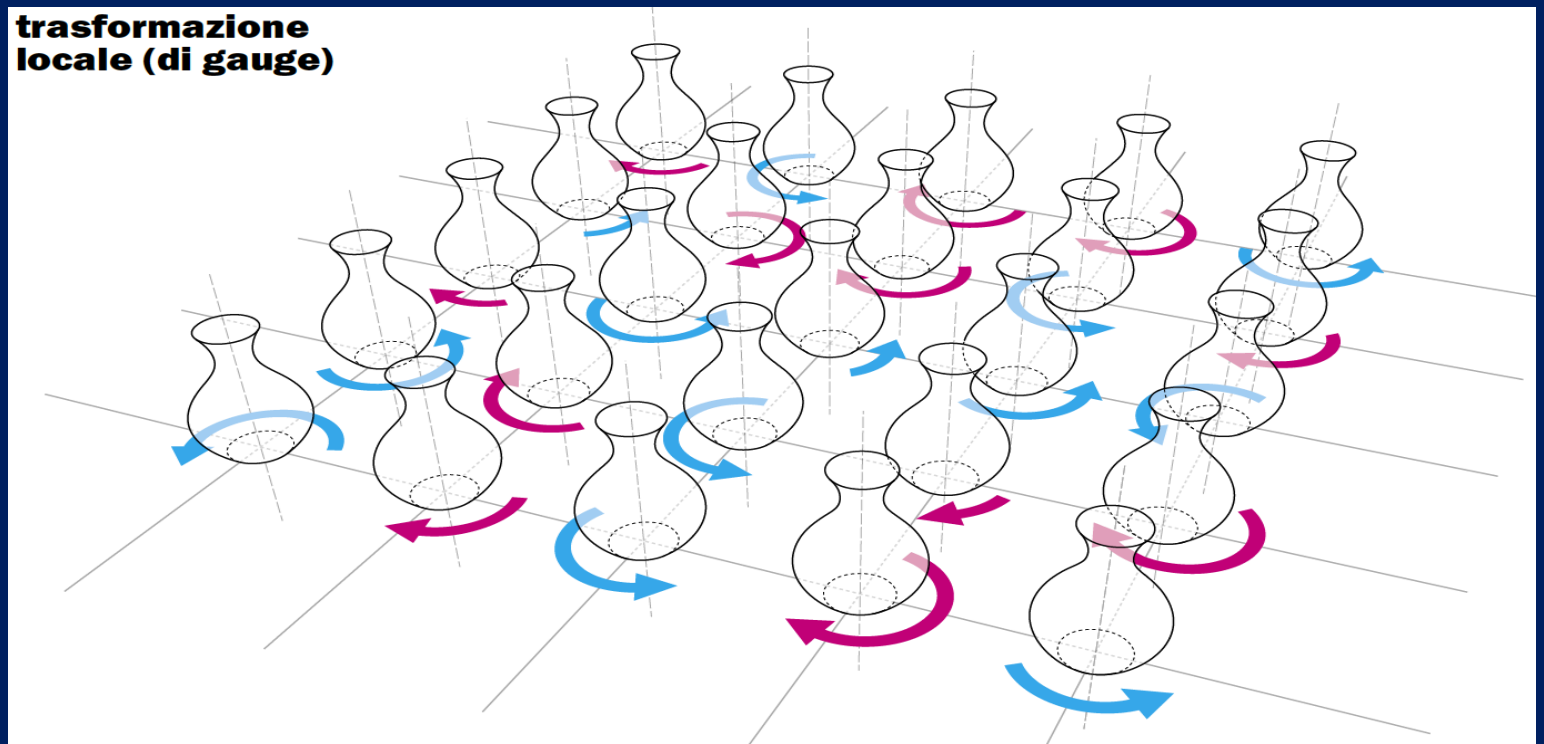


Il mistero della simmetria, *A. Masiero e M. Pietroni, Asimmetrie 11,Simmetrie, aprile 2011*

2) Simmetrie interne al sistema

Trasformazioni locali o di gauge

Consideriamo come sistema sistema fisico l'insieme di vasi dell'esempio precedente. Se invece di ruotare tutti i vasi di uno stesso angolo, ruotiamo ogni vaso di un angolo differente realizziamo una trasformazione locale o di gauge.



Il mistero della simmetria, *A. Masiero e M. Pietroni, Asimmetrie 11,Simmetrie, aprile 2011*

Teorie di gauge

Tipico esempio di teoria di gauge
e' l'elettromagnetismo.

Esempio dell'elettromagnetismo

Fotone – mediatore della forza EM

γ

L’unificazione della teoria elettromagnetica con quella debole

Grazie ai loro contributi (1959) all'elaborazione della teoria elettrodebole, a Sheldon Glashow, Abdus Salam e Steven Weinberg fu assegnato il Premio Nobel per la Fisica nel 1979

Nel 1983 al CERN di Ginevra venne verificata sperimentalmente l'unificazione elettrodebole attraverso la produzione dei bosoni W e Z. Per tale lavoro l'anno successivo a Carlo Rubbia e a Simon van der Meer venne assegnato il premio Nobel per la fisica.

W^+ W^- Z^0

Sembra che siamo finiti nel tipico vicolo cieco: convinti dal successo dell'elettromagnetismo, vogliamo che esista una simmetria di gauge per descrivere la radioattività, ma al tempo stesso NON vogliamo che la presenza di questa simmetria ci conduca a particelle W^+, W^- e Z^0 di massa nulla…

La rottura spontanea della simmetria di gauge

Esiste una via d'uscita e si chiama rottura spontanea della simmetria di gauge.

La rottura spontanea della simmetria

Un esempio per capirci: prendete una matita e ponetela in equilibrio sulla sua punta perpendicolarmente alla superficie del tavolo. Questo sistema possiede una simmetria di rotazione attorno all'asse verticale lungo la matita.

Però sappiamo che la situazione è altamente instabile: in pochi attimi una qualunque piccola perturbazione farà inevitabilmente cadere la matita.

La rottura spontanea della simmetria

Lungo quale direzione? Questo non si può dire, ma è certo che, una volta caduta, vi sarà una direzione "privilegiata" e si sarà perduta l'invarianza per rotazioni attorno all'asse verticale. In questo caso abbiamo un esempio di un sistema fisico che possiede una certa simmetria in linea di principio, ma che, in pratica, nello stato in cui si viene a trovare alla fine e che minimizza l'energia del sistema, non possiede più quella simmetria.

La rottura spontanea della simmetria

Un altro esempio ancora più interessante è quello della calamita. Se supponiamo di guardarla con uno speciale microscopio, vedremmo i piccoli "magnetini" che la compongono tutti allineati lungo una stessa direzione, quella che determina l'esistenza di un polo nord e un polo sud della calamita.

La rottura spontanea della simmetria

Se la calamita viene portata a una temperatura abbastanza alta, perde le sue proprietà, cioè non è più magnetizzata e non attira più gli oggetti ferrosi, perché i suoi magnetini sono disposti in modo del tutto casuale.

La rottura spontanea della simmetria

Quindi non c'é più una direzione speciale
rispetto alle altre e questo sistema è del tutto invariante per rotazioni spaziali. Se ora si fa scendere nuovamente la temperatura, si arriva a una temperatura critica a cui, improvvisamente, tutti i magnetini di cui è composta la calamita si allineano lungo una stessa direzione.

La rottura spontanea della simmetria

Lo stato fondamentale del sistema non possiede piu' la simmetria di partenza

La rottura spontanea della simmetria

Come la matita dell'esempio precedente, che, cadendo, rompe spontaneamente la simmetria rotazionale, anche nel modello standard con il meccanismo di Higgs si ha una rottura spontanea della simmetria

Il 4 luglio 2012 gli esperimenti ATLAS e CMS annunciano al mondo la scoperta del bosone di Higgs

Un evento candidato H che decade in due fotoni in ATLAS (i due coni gialli).

$M_H = 125{,}18 \pm 0.16$ GeV (PDG)

Il 4 luglio 2012 gli esperimenti ATLAS e CMS annunciano al mondo la scoperta del bosone di Higgs

$M_H = 125{,}18 \pm 0.16$ GeV (PDG)

Un evento candidato H che decade in due fotoni in CMS (i due segnali verdi).

Nel 2013 **Peter Ware Higgs e François Englert** sono stati insigniti del Premio Nobel per la fisica per la teorizzazione del bosone di Higgs

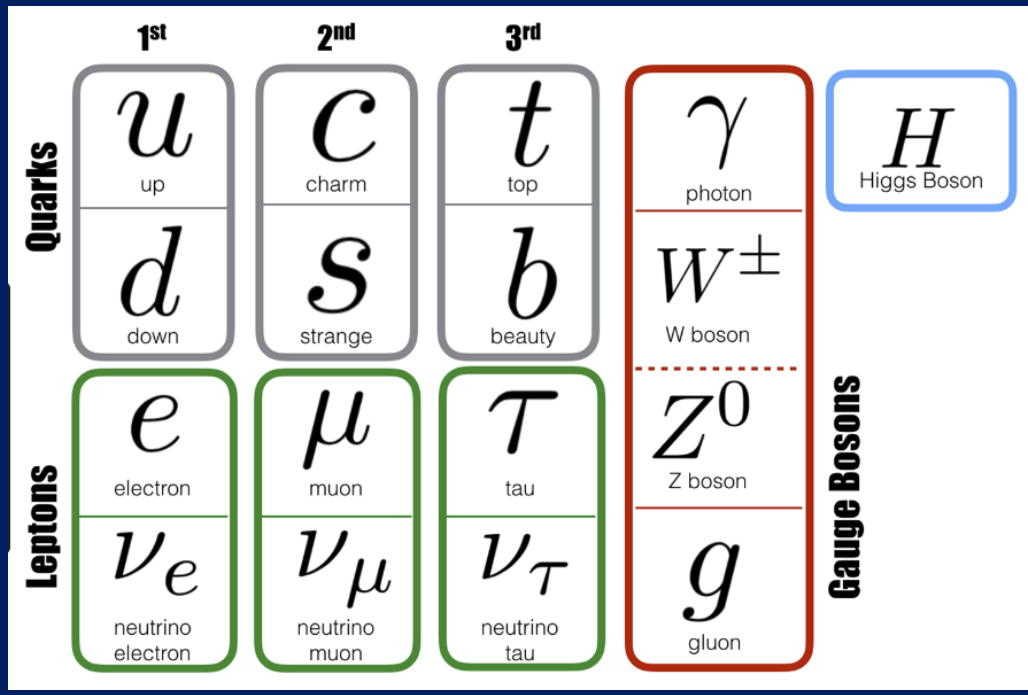
François Englert

Peter Higgs

Il modello standard

Il **Modello standard (MS)** è la teoria fisica che descrive tre delle quattro forze fondamentali note: l' interazione forte, elettromagnetica e debole.

Dietro il modello standard ci sono concetti di simmetria e di rottura spontanea di simmetria

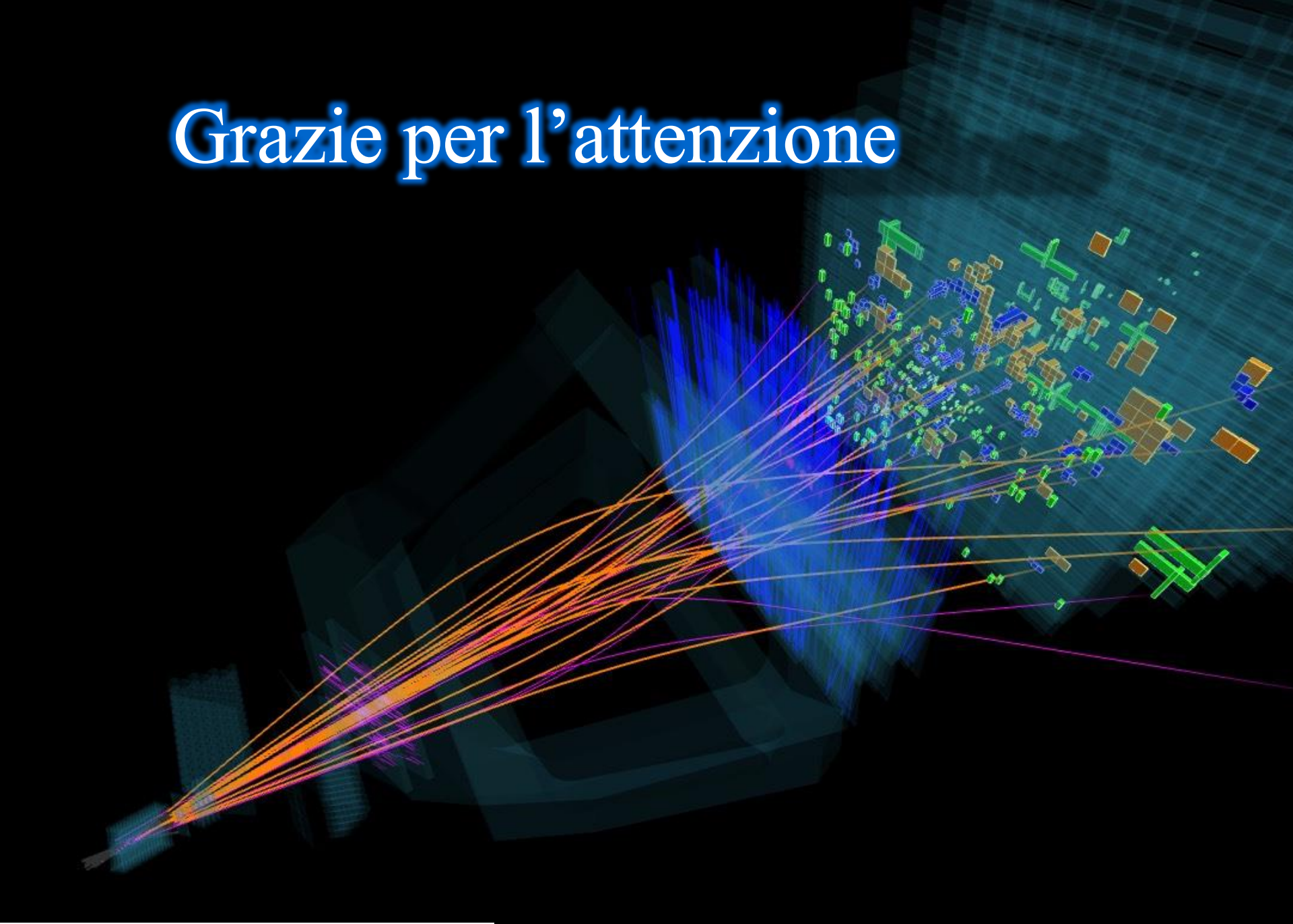


La supersimmetria

Ci si potrebbe chiedere quale sia la simmetria più grande possibile che sia compatibile con le teorie delle interazioni fondamentali di cui abbiamo parlato.

è stata chiamata supersimmetria e gli esperimenti al CERN la stanno cercando

CONCLUSIONI

La simmetria permea un po' tutta la nostra vita, visto che sperimentiamo la simmetria di piante, animali, oggetti, musica, disegni. ecc. ma la simmetria non è solo qualcosa che percepiamo guardando ciò che ci circonda e che cerchiamo di riprodurre in vario modo nelle espressioni artistiche o qualcosa capace di produrre quel misto di piacere e stupore che sta dietro la sensazione di armonia, la simmetria e' diventata per i fisici anche uno strumento potentissimo di conoscenza. Steven Weinberg, nella sua *Dirac Memorial lecture* del 1986, disse: "At the deepest level, all we find are symmetries and responses to symmetries" (al livello più profondo, tutto quello che troviamo sono simmetrie, e risposte alle simmetrie).

Grazie per l'attenzione