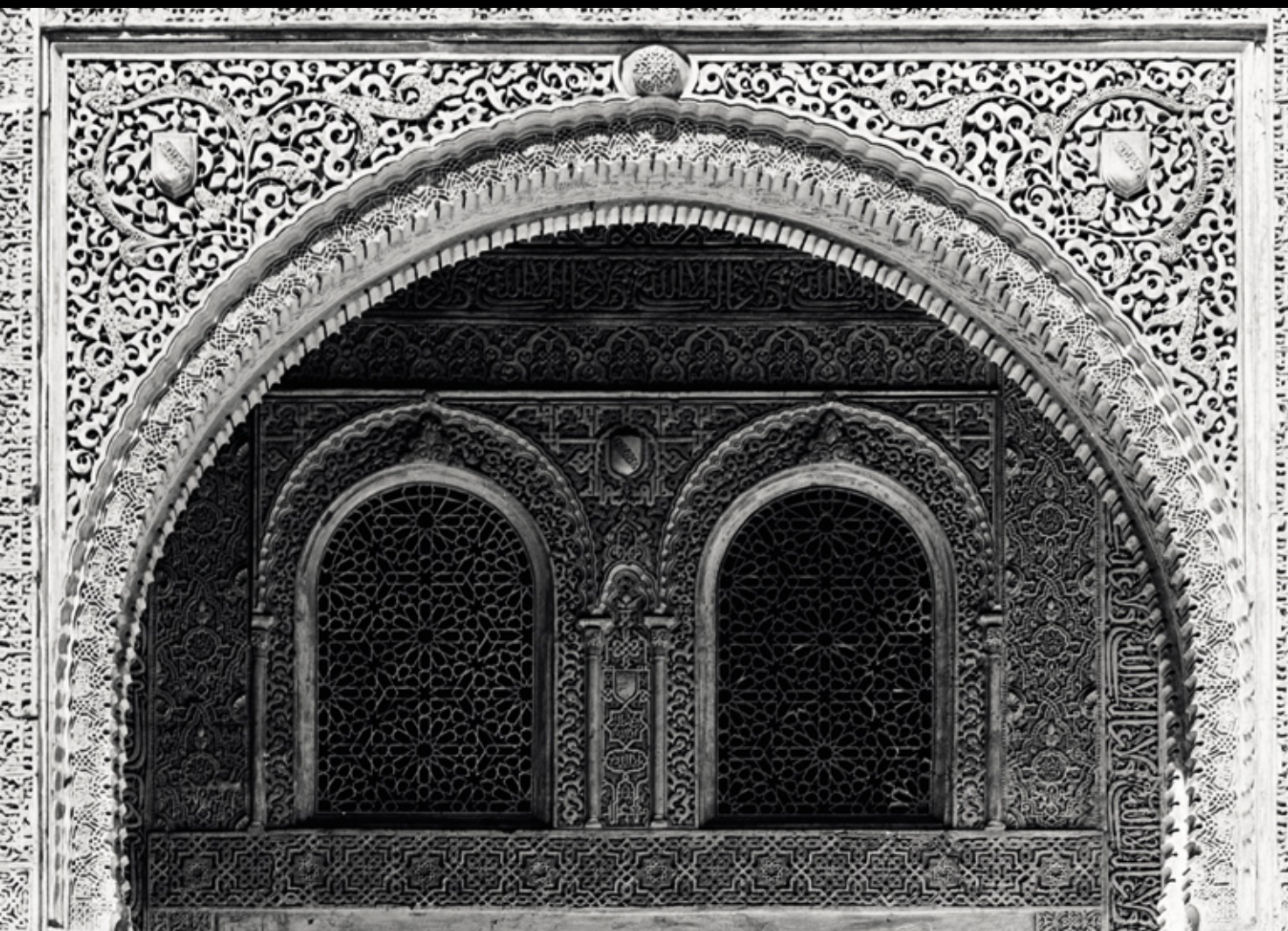


# Il mistero della simmetria

Dall'Alhambra alle particelle.

di Antonio Masiero e Massimo Pietroni



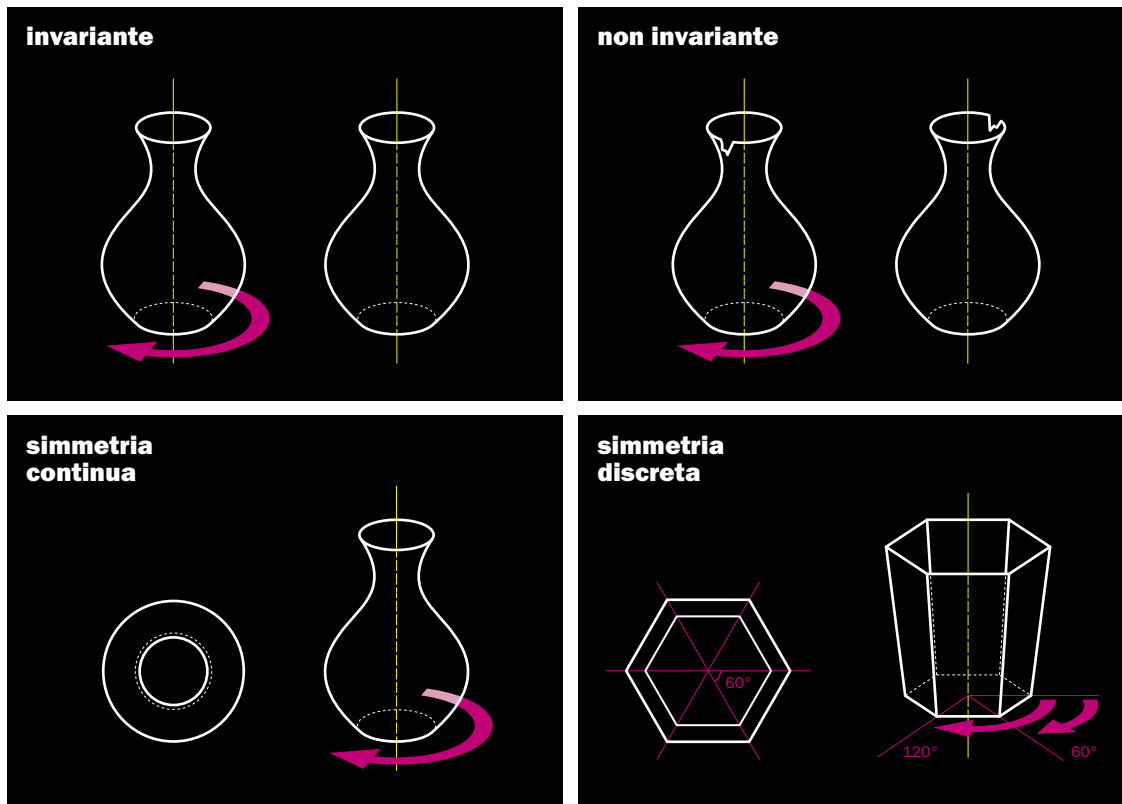
La simmetria permea un po' tutta la nostra vita e il nostro rapporto con il mondo esterno, dai primi anni di vita in cui sperimentiamo la simmetria di piante, animali, oggetti, musica, disegni, fino a quando un giorno entriamo nell'Alhambra di Granada o ci soffermiamo davanti ai quadri di Escher, il "pittore dei matematici", o ascoltiamo una sonata di Bach. Ma la simmetria non è solo qualcosa che percepiamo guardando ciò che ci circonda e che cerchiamo di riprodurre in vario modo nelle nostre espressioni artistiche, qualcosa che ci produce quel misto di piacere e stupore che sta dietro la sensazione di armonia. La simmetria diventa per i fisici anche uno strumento potentissimo di conoscenza. Come espresso dalle parole di Steven Weinberg, nella sua *Dirac Memorial lecture* del 1986: "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).

Ma cos'è una simmetria? In essenza, possiamo dire che è l'espressione di una "uguaglianza tra cose": cose che possono essere differenti oggetti oppure uno stesso oggetto che si presenta sempre nello stesso modo, prima e dopo una qualche operazione che abbiamo compiuto su di esso. 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. Pensiamo, ad esempio, a un vaso: se lo ruotiamo il suo aspetto ci appare sempre lo stesso. In questo caso diciamo che il vaso è *invariante* sotto una qualunque rotazione attorno all'asse di simmetria, la linea immaginaria perpendicolare al tavolo che attraversa il centro del vaso (vd. fig. a). Se, malauguratamente, il vaso è scheggiato in un qualche punto, questa simmetria si perde, "è rotta", e una rotazione del vaso non passerà inosservata alla guardia del museo in cui, ad esempio, il vaso è esposto (vd. fig. b). In sostanza, quindi, la simmetria è un'*invarianza* di un sistema fisico sottoposto a un cambiamento, chiamato *trasformazione di simmetria*. Ci sono diversi tipi di trasformazioni di simmetria. Per esempio, se il vaso ha una base circolare (è un vaso, cioè, di tipo cilindrico) allora è invariante per rotazioni attorno al suo asse, di un qualunque angolo: in questo caso la simmetria è *continua* (vd. fig. c). Se invece il vaso è, per esempio, esagonale, l'invarianza sarebbe presente solo per rotazioni a scatti di 60 gradi (o multipli di 60 gradi); in questo caso è una simmetria *discreta* (vd. fig. d). Se poi immaginiamo di moltiplicare all'infinito i vasi, e di metterne uno in ogni punto dello spazio, le possibili simmetrie si ampliano. Possiamo ruotare tutti i vasi di uno stesso angolo, nel qual caso avremmo fatto una trasformazione *globale* (vd. fig. e), oppure possiamo decidere di ruotare ogni vaso di un angolo differente, realizzando così una trasformazione *locale*, o *di gauge* (vd. fig. f).

Considerazioni di questo tipo sarebbero rimaste delizie per matematici se non fosse intervenuta Emmy Noether, probabilmente la più grande matematica mai vissuta, di cui si parlerà a p. 14. Il suo teorema del 1918 stabilisce che in corrispondenza a ogni simmetria continua delle leggi fisiche vi è

<

L'arco di ingresso al *Cuarto dorado* (*Golden room*) dell'Alhambra di Granada.



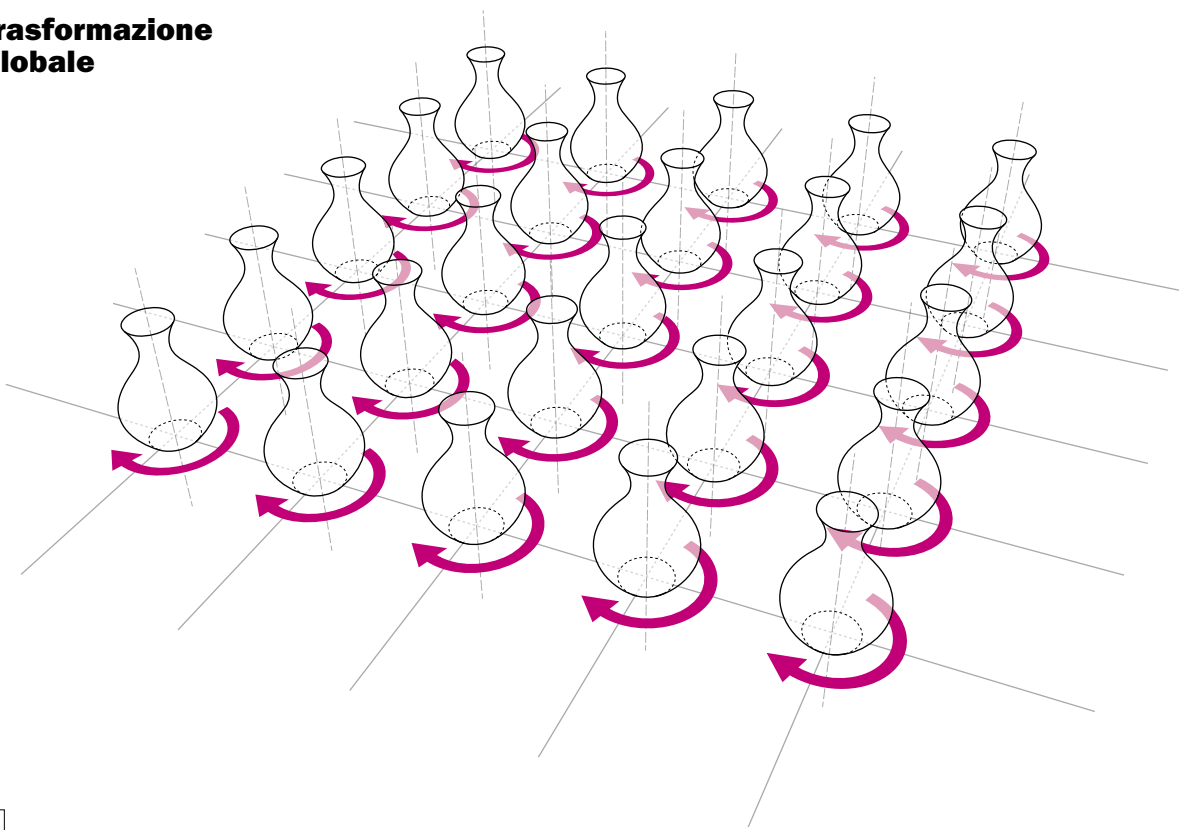
|    |    |
|----|----|
| a. | b. |
| c. | d. |

una *legge di conservazione* e una corrispondente quantità conservata, cioè una quantità fisica misurabile che, qualunque sia il processo considerato, non cambia (ad es. l'energia totale di un sistema fisico). Ma c'è di più: anche il viceversa, quasi sempre, è valido. Cioè, ogni qualvolta scopriamo che in natura esiste una qualche quantità che è conservata nei processi fisici (per esempio la carica elettrica), allora sappiamo che deve esistere una corrispondente simmetria continua. Il teorema di Noether promuove lo studio delle simmetrie dall'ambito estetico-matematico a quello fisico. In fisica ci sono tre grandi leggi di conservazione. Queste ci assicurano che durante un qualunque processo, per quanto complesso, che coinvolga un sistema fisico "lasciato in pace", cioè a cui non sono applicate forze esterne, ci sono tre quantità che non variano: l'energia, la quantità di moto e il momento angolare. Secondo quanto ci dice Emmy Noether, in corrispondenza di queste tre leggi di conservazione devono esistere tre simmetrie continue della natura. In effetti si scopre che queste leggi sono le tre grandi simmetrie dello spaziotempo, ovvero l'invarianza

per traslazioni nel tempo, per traslazioni nello spazio e l'invarianza per rotazione. Per capire, o intuire almeno, come mai esista questo legame così profondo e, per certi versi, misterioso, vale la pena fare un piccolo controesempio che prendiamo dal libro *Symmetry and the beautiful universe* di L. Ledermann e C. Hill. Immaginiamo, per assurdo, che la legge di gravità non fosse sempre la stessa in ogni momento, cioè – in termini più tecnici – che violasse l'invarianza per traslazioni nel tempo. Possiamo pensare, ad esempio, che ogni martedì mattina la forza di gravità diminuisse per qualche ora, per poi tornare al suo valore normale. A questo punto, sarebbe il caso di correre a Wall Street e fare incetta delle azioni di una centrale idroelettrica che pompa l'acqua in alto proprio il martedì mattina usando, quindi, meno energia, per poi farla ridiscendere in un altro momento della settimana, e intascare così un guadagno netto di energia gratuita! Probabilmente però nessun fisico comprenderebbe queste azioni: infatti nessun esperimento ha mai rivelato la benché minima violazione delle tre leggi di conservazione fondamentali. La nostra fiducia (o fede) in queste leggi è pressoché assoluta, anche perché

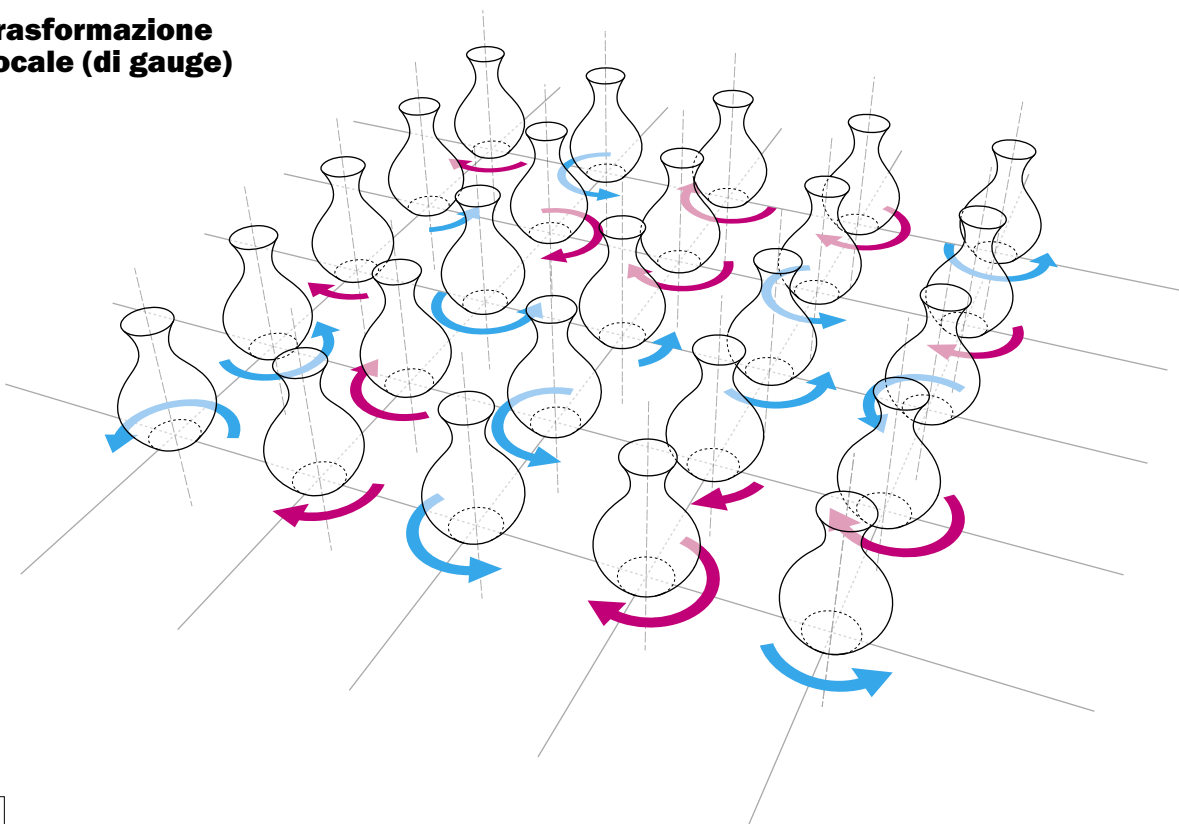
a. / b. / c. / d. / e. / f.  
Rappresentazioni grafiche dei diversi tipi di trasformazione di simmetria.

**trasformazione globale**



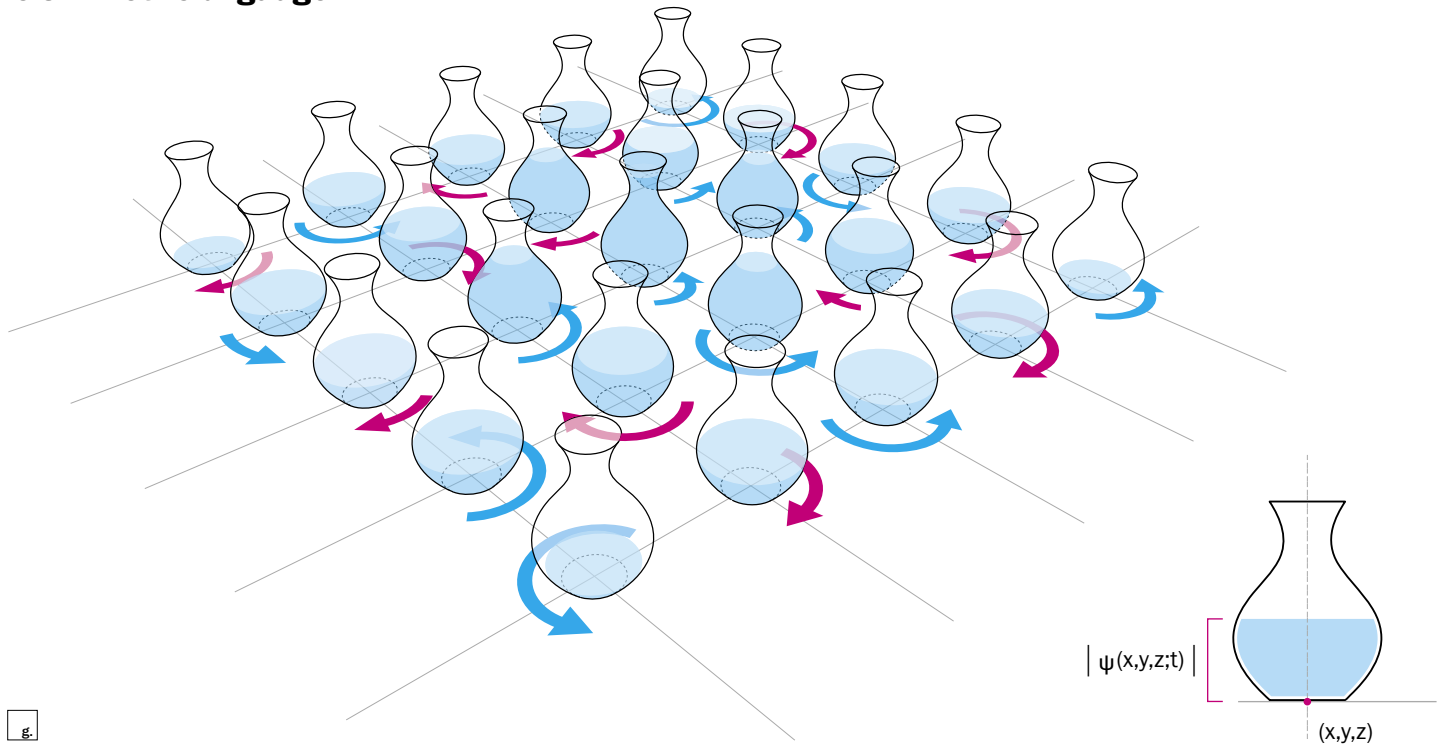
e.

**trasformazione locale (di gauge)**



f.

## funzione d'onda e simmetrie di gauge



g.

in passato ha portato a successi clamorosi. Fu in base a questa fede che la notte del 4 dicembre 1930 il famoso e “prudente” fisico Wolfgang Pauli compì un atto di drammatica spregiudicatezza (per quel tempo!): ipotizzò l’esistenza di una nuova particella, pur di impedire che in un processo di decadimento di un nucleo atomico la conservazione dell’energia venisse violata. La fede di Pauli venne premiata. Qualche anno dopo quell’oggetto misterioso venne effettivamente trovato: il neutrino! La fiducia di Pauli nella simmetria lo aveva condotto a ipotizzare l’esistenza di un mattone fondamentale dell’universo e la natura lo ricompensava mostrandosi in sintonia con il suo pensiero. Con l’avvento della meccanica quantistica nel secolo scorso, il legame tra simmetria e conoscenza della natura trovò il suo momento più alto e affascinante: si capì, infatti, che la simmetria è così potente da “creare” le *interazioni*, cioè le forze fondamentali presenti nell’universo fin dal Big Bang e, con queste, le particelle che trasmettono queste interazioni, cioè i loro “messaggeri”. Da descrizione di ciò che è presente nelle leggi fisiche, la simmetria divenne essa stessa “creatrice” della realtà che ci circonda

nei suoi elementi fondanti, vale a dire le interazioni fondamentali e il modo in cui i costituenti ultimi della materia interagiscono tra di loro. Per illustrare questo passaggio fondamentale, immaginiamo di voler descrivere il comportamento di un elettrone solitario. Nella fisica classica, tutto quello che dobbiamo fare per “descriverlo” è individuare la posizione nello spazio – che abbreviamo con  $x$ , anche se intendiamo la terna spaziale  $(x, y, z)$  – che esso occupa a un certo tempo  $(t)$ . Nell’ambito della fisica quantistica, invece, l’elettrone è descritto da un’onda che, a un tempo fissato, è sparpagliata in tutto lo spazio, ed è indicata da una funzione dello spazio e del tempo,  $\Psi(x,t)$ , chiamata *funzione d’onda* dell’elettrone. La funzione d’onda è legata alla probabilità di trovare il nostro elettrone in  $x$  al tempo  $t$ . Per raffigurarci la situazione, potremmo immaginare tanti vasi distribuiti in tutti i punti  $x$  dello spazio e contenenti una quantità d’acqua diversa l’uno dall’altro. L’ampiezza della funzione d’onda  $\Psi(x,t)$  corrisponde all’altezza a cui arriva l’acqua nel vaso che sta in  $x$ . Ora, se facciamo una rotazione di un angolo diverso, a seconda del vaso considerato, e scattiamo una fotografia dopo aver compiuto queste rotazioni, questa ci darà un’immagine dei vari vasi, indistinguibile

g.  
Rappresentazione grafica della simmetria di gauge. Bisogna immaginare che al centro della figura vi sia un elettrone, la cui probabilità di trovarsi nel punto  $x=(x,y,z)$  dello spazio al tempo  $t$  è legata alla funzione d’onda  $\Psi(x,t)$ .



h.



i.

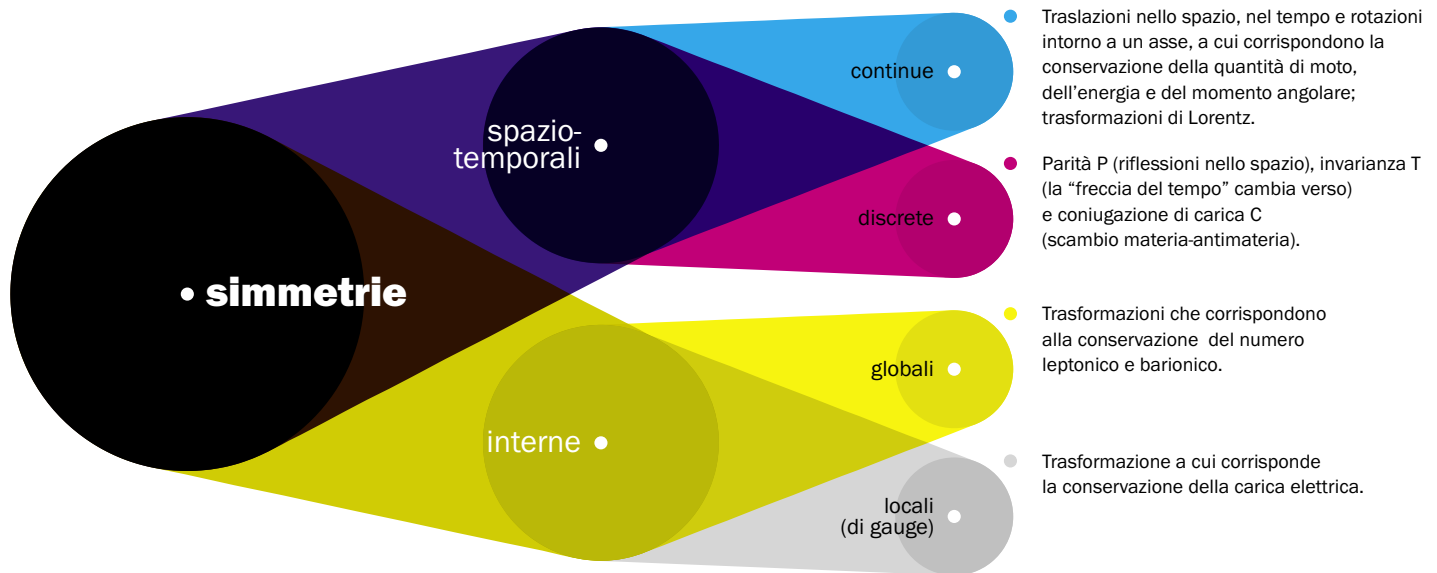
da quella di partenza: l'aspetto di ogni vaso è, infatti indistinguibile da quello che aveva in precedenza, essendo i vasi invarianti per rotazioni, e così entra in gioco l'invarianza di gauge descritta precedentemente. Ecco perché i fisici hanno chiamato queste simmetrie "di gauge" (da "calibro" in inglese); perché in un certo senso esse consentono di "calibrare" la funzione d'onda  $\Psi(x,t)$  da un punto all'altro dello spaziotempo (vd. fig. g).

Allo stesso modo, nella descrizione quantistica dell'elettrone, la probabilità di trovare l'elettrone in  $x$  al tempo  $t$  non cambia se "ruotiamo"  $\Psi(x,t)$  di un angolo dipendente da  $x$ . Questa "rotazione" è scritta tra virgolette, perché non è una usuale rotazione spaziale come quella dei vasi di fig. f. È una rotazione in uno "spazio interno" astratto che non ha nulla a che fare con lo spaziotempo percepito dai nostri sensi. A questo punto, se, analogamente all'invarianza per rotazioni dei vasi, chiediamo che la fisica sia la stessa quando ruotiamo  $\Psi(x,t)$ , abbiamo una clamorosa sorpresa. Anche se la rotazione non provoca un cambiamento dell'ampiezza, tuttavia essa cambia un'altra caratteristica dell'onda-elettrone: la sua frequenza (o la sua lunghezza d'onda). Ora, quantisticamente, la frequenza (lunghezza d'onda) è legata all'energia

(quantità di moto) dell'elettrone. Ma allora siamo di nuovo nella situazione di Pauli: se insistiamo nella conservazione dell'energia (o della quantità di moto), scopriamo che l'elettrone non può essere solo, deve esistere qualcos'altro che compensi lo squilibrio nell'energia dell'elettrone quando abbiamo ruotato la sua funzione d'onda. La potenza della simmetria è così grande da riuscire a fornire un identikit pressoché completo del misterioso accompagnatore dell'elettrone: deve essere una particella di massa esattamente nulla, che non ha carica elettrica, ma interagisce con particelle cariche e che ha una proprietà delle particelle, chiamata *spin*, che corrisponde proprio alla polarizzazione dei fasci di luce. Ebbene sì, questa particella "creata" dall'imposizione della simmetria di gauge non è nient'altro che il *fotone*, la particella "messenger" del campo elettromagnetico: ovvero, è proprio la luce. Per dirla con Lederman, "when She invented gauge symmetry, God said: 'Let there be light'" (quando inventò la simmetria di gauge, Dio – a cui il "politically correct" assegna il genere femminile – disse: "Sia fatta la luce"). È il sogno della scuola pitagorica che si realizza dopo 25 secoli: la potenza del numero che descrive la realtà.

h.  
Wolfgang Pauli a Princeton (USA) il giorno del suo quarantacinquesimo compleanno, il 25 aprile 1945. Quindici anni prima, pur di impedire che in un processo di decadimento di un nucleo atomico la conservazione dell'energia venisse violata, Pauli ipotizzò l'esistenza di una nuova particella, il neutrino.

i.  
Carlo Rubbia, nel 1984, subito dopo aver vinto il premio Nobel per la scoperta dei bosoni  $W^\pm$  e  $Z^0$ .



I.

La richiesta "geometrica" di una certa simmetria che agisce su uno "spazio nuovo" origina, quasi dal nulla, l'interazione elettromagnetica.

Ma allora, viene spontaneo chiedersi, non potremmo ripetere questa alchimia, e cioè cercare di imporre nuove simmetrie in nuovi spazi interni, arrivando a originare tutte le altre interazioni fondamentali esistenti in natura?

In effetti, proseguendo su questa strada e introducendo una nuova simmetria di gauge (suggerita dagli esperimenti) che agisce in un nuovo spazio interno, si vide che era possibile "originare" una nuova interazione fondamentale, quella relativa alle forze responsabili dei decadimenti radioattivi dei nuclei (interazioni *deboli*) (vd. p. 20, ndr). Si presentava però un problema apparentemente insormontabile: le simmetrie di gauge predicono inequivocabilmente che i messaggeri delle corrispondenti interazioni abbiano massa nulla (come il fotone). D'altra parte, i messaggeri delle interazioni deboli sono delle particelle molto pesanti chiamati bosoni  $W^+$  e  $W^-$  e  $Z^0$ , la cui scoperta valse il premio Nobel a Carlo Rubbia nel 1984.

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  $W$  e  $Z^0$  di massa nulla, che sarebbe in contrasto con le evidenze sperimentali che troviamo nei nostri acceleratori. E allora? Esiste una via d'uscita e si chiama *rottura spontanea* di 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 (anche il battito d'ali di una farfalla in Australia!) farà inevitabilmente cadere la matita. 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. Un altro esempio ancora più interessante è quello della calamita. Se supponiamo di guardarla con uno speciale microscopio, vedremo 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. 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. Quindi non c'è 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 soglia critica a cui, improvvisamente, tutti i magnetini di

I.  
Schema dei tipi di trasformazione di simmetria.

m.  
Il tunnel di Lhc presso il Cern (Ginevra), dove i protoni vengono portati ad altissima energia. Grazie ai loro scontri, nei prossimi anni, i fisici sperano di trovare il bosone di Higgs ed evidenze della teoria supersimmetrica.



m.

cui è composta la calamita si allineano lungo una stessa direzione. Come per la caduta della matita, anche in questo caso ogni direzione è del tutto equivalente all'altra, ma una volta che una qualunque di queste direzioni è stata scelta dai magnetini, non c'è più l'invarianza per rotazioni che era presente a temperature maggiore di quella critica. Il sistema fisico non è cambiato, ma al di sotto della temperatura critica la disposizione del sistema (lo stato del sistema, come si dice in fisica) non possiede la simmetria di partenza: la simmetria per rotazione spaziale è stata rotta spontaneamente.

Tutte le interazioni deboli possono essere descritte in termini di una simmetria (di gauge) rotta spontaneamente. Che cosa provoca questa rottura? Ecco che entra in scena il *deus ex-machina* della situazione, il famoso *bosone di Higgs* di cui si è parlato in *Asimmetrie* n. 8 ("Il bosone di Higgs", settembre 2009, ndr). Come la matita dell'esempio precedente, questo si trova in uno stato in cui la simmetria collegata alle interazioni deboli viene rotta spontaneamente. Quello che succede ha dell'incredibile, eppure la fantastica macchina che ha preceduto Lhc al Cern di Ginevra, l'acceleratore di elettroni e antielettroni

(*positroni*) Lep, ci ha detto a chiare lettere che è proprio vero: alcune delle componenti del bosone di Higgs, nel momento della rottura spontanea di simmetria, vengono "ingoiate" dal W e dallo Z<sup>0</sup> per fornire loro la massa, mentre rimane un'unica componente fisica, quella che noi comunemente chiamiamo il bosone di Higgs e che contiamo di produrre e identificare in Lhc. Questo è noto come *meccanismo di Higgs*. Tale "sintonia", tra una delle più audaci speculazioni della mente umana imperniata sul concetto di simmetria e ciò che esiste realmente in natura, ha qualcosa di affascinante e misterioso: è lo stupore che accomuna gli uomini di scienza (e non solo loro, naturalmente) da quando Galileo parlò del grande libro della natura scritto a caratteri matematici (creati dalla nostra mente), a quando Dirac ammise che: "Il matematico è impegnato in un gioco di cui si scrive da solo le regole, mentre il fisico gioca con le regole fornite dalla natura. Ma con il passare del tempo appare sempre più evidente che le regole che un matematico trova interessanti sono proprio le stesse scelte dalla natura".

A proposito di curiosità matematiche, ci si potrebbe chiedere, "qual è la simmetria più grande possibile che sia compatibile con le



teorie delle interazioni fondamentali di cui abbiamo parlato?”. Dando un’occhiata alla fig. 1 viene spontaneo chiedersi, se esista una simmetria che agisca sia nello spaziotempo che negli spazi interni. Ebbene, il matematico ci dirà che questa simmetria “super” esiste, e naturalmente è stata chiamata *supersimmetria*. A prima vista sembra che questo rimanga solo un *divertissement* da matematici, dato che una delle predizioni della supersimmetria è che sotto la sua azione ogni particella nota si trasformi in una nuova particella *superpartner*. Il problema è che non abbiamo mai visto neppure uno di tali superpartner.

Ma ecco che interviene il fisico, che dall’inizio degli anni ’80 capisce che la supersimmetria rappresenta il modo più elegante (e forse più convincente) di affrontare alcune questioni cruciali poste dalla teoria della fisica delle particelle, il *modello standard* delle interazioni fondamentali, ed escogita il rimedio alla mancata osservazione dei superpartner: rompere la supersimmetria. Ecco che i superpartner diventano tanto pesanti da non essere più visibili alle macchine acceleratrici del passato, ma (ed è una predizione del fisico) sono abbastanza leggeri da poter essere visti in Lhc, l’acceleratore di particelle attivo dal 2008 a Ginevra, in Svizzera! Vedremo nei prossimi anni, se queste predizioni verranno confermate in Lhc. Tornando all’esempio della calamita che riscaldiamo, abbiamo visto che la simmetria presente in un certo sistema fisico dipende dalla temperatura e quindi dall’energia a cui si trova. E se il sistema fisico fosse l’intero universo e la temperatura a cui si trova segnasse il raffreddamento progressivo dal caldissimo Big Bang iniziale al “freddo” (un paio di gradi Kelvin) del nostro attuale universo? Nel caso

della calamita, quando la temperatura sale al di sopra di un certo valore critico, il sistema acquista una simmetria (quella per rotazione spaziale dei magnetini che lo compongono), che viene invece “rotta” quando la temperatura scende al di sotto di tale soglia critica: il sistema-calamita sperimenta due *fasi* diverse, a seconda della sua temperatura. Così, se noi seguiamo il sistema fisico universo, man mano che si raffredda a partire dal Big Bang, constatiamo che esso passa attraverso fasi diverse in corrispondenza alle quali simmetrie di gauge delle sue interazioni fondamentali sono esatte (a temperature più alte) o spontaneamente rotte (a temperature più basse). Più ci avviciniamo al momento iniziale del Big Bang, più il grado di simmetria dell’universo aumenta. Potremmo speculare che l’universo parta al momento del Big Bang con un’unica grande simmetria di gauge (o addirittura una supersimmetria), che descrive in modo unificato tutte le interazioni fondamentali, e che poi nel suo raffreddamento “parti” di questa grande simmetria iniziale siano rotte spontaneamente dando luogo alla differenziazione tra le varie interazioni (elettromagnetiche, deboli, *forti*, gravitazionali) che oggi noi vediamo. La simmetria diverrebbe qui la trama ultima più profonda che caratterizza l’universo e la sua intera evoluzione. Einstein spese gli ultimi anni della sua vita alla ricerca di una teoria “finale” che potesse descrivere in modo unificato e simmetrico (unità) le varie interazioni (molteplicità) dell’universo che ci circonda. Forse, la simmetria è uno di quei “pensieri” fondamentali di cui Einstein ci parla nella sua famosa provocazione: “Non sono interessato a capire questo o quel dettaglio, ma a capire quelli che erano i pensieri di Dio quando creò il mondo” .

#### Biografie

**Antonio Masiero** è direttore della sezione di Padova dell’Infn e professore dell’Università di Padova. La sua attività verte sulla ricerca di nuova fisica al di là del modello standard con particolare attenzione alle connessioni tra fisica delle particelle e cosmologia.

**Massimo Pietroni** è ricercatore dell’Infn della sezione di Padova. In questi ultimi anni si è occupato principalmente del problema della materia e dell’energia oscura nell’universo e delle sue possibili spiegazioni nell’ambito della fisica delle particelle.

#### Link sul web

[www.emmynoether.com](http://www.emmynoether.com)

[www.galileonet.it/articles/4c32e1485fc52b3adf000cba](http://www.galileonet.it/articles/4c32e1485fc52b3adf000cba)

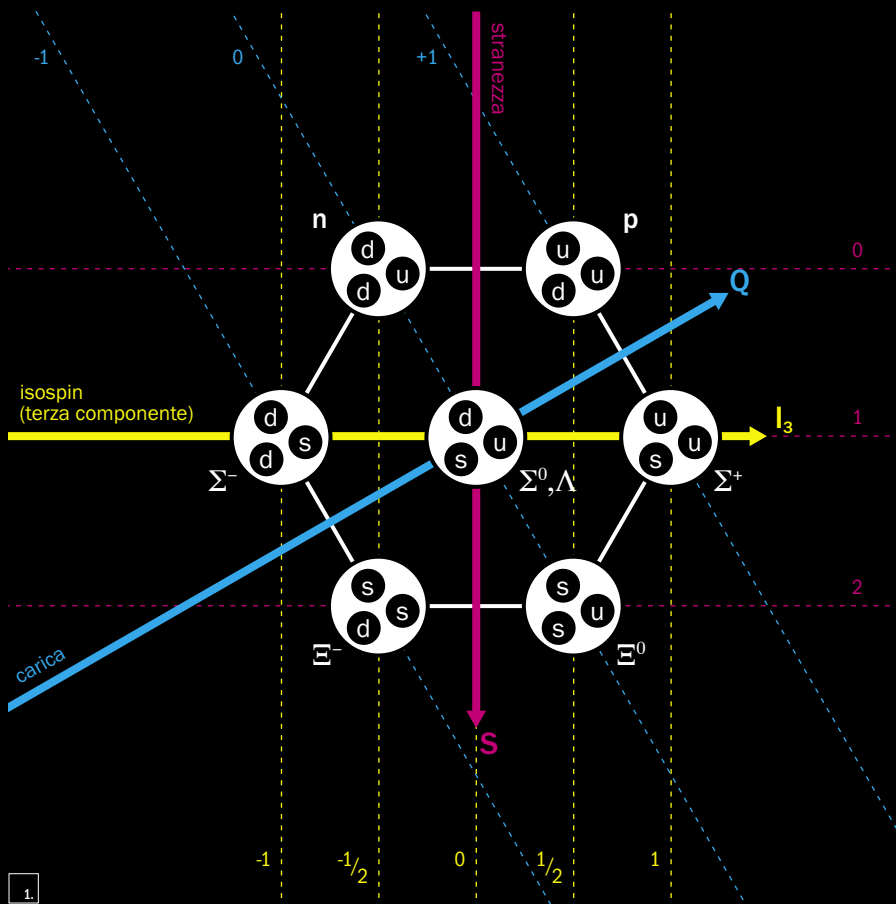
[http://www.enciclopedia-1.com/t/teoria\\_di\\_gauge.html](http://www.enciclopedia-1.com/t/teoria_di_gauge.html)

# Particelle e geometrie

La simmetria rappresenta la chiave di volta per spiegare ciò che è complesso e molteplice, in termini di qualcosa di più semplice ed elementare. Proprio nel momento in cui matematicamente crea un "ordine" nelle cose che osserviamo, essa diviene suggerimento per scoprire nuove, elementari strutture che compongono la realtà complessa. Esempiare in questo senso è quanto è successo negli anni '60 cercando di mettere ordine nel mondo delle particelle che possiedono interazioni nucleari forti, come i protoni e i neutroni, chiamate *adroni*. Raggruppando infatti queste particelle in base alle loro caratteristiche e distribuendole su un piano cartesiano con assi

scelti in modo opportuno, emerge un ordine che è manifestazione di simmetrie profonde della natura. Nell'esempio in fig. 1 la famiglia considerata è quella dei *barioni* "leggeri" (*ottetto barionico*) e le grandezze rappresentate sugli assi sono due tra quelle che caratterizzano le singole particelle (*numeri quantici*), e cioè  $I_3$  (terza componente dello *spin isotopico*) sull'asse x e la *stranezza* S sull'asse y. In base alle loro "coordinate"  $I_3$  e S, le otto particelle si dispongono con simmetria esagonale. Questa configurazione (assieme alle altre che contenevano tutte le particelle note allora, e ne prevedevano di nuove, poi puntualmente scoperte) ispirò Murray Gell-Mann e George Zweig del Caltech, che nel '63 ipotizzarono che gli adroni fossero composti a partire da tre elementi, i *quark up*, *down* e *strange*, raccolti in triplette nel caso dei barioni (come in figura) e in coppia nel caso dei *mesoni* (vd. p. 28, ndr). I protoni e i neutroni sono costituiti da combinazioni di *quark up* (carica elettrica +2/3) e di *quark down* (carica elettrica -1/3). Quando successivamente i quark vennero sperimentalmente confermati, si realizzò un altro

esempio del fertile connubio tra entità matematiche e realtà fisica. Accanto alla coppia up e down, se ne aggiunsero negli anni altre due di masse più elevate (*charm* e *strange*, *top* e *beauty*). Sperimentalmente si osservò che tali famiglie di quark sono "mescolate" tra loro, cioè che elementi di una coppia possono trasformarsi in elementi di un'altra. Questo fenomeno chiamato *mescolamento dei quark* fu compreso per la prima volta in termini di proprietà di simmetria dei quark da Nicola Cabibbo, recentemente scomparso, che introdusse l'*angolo di mescolamento* che porta il suo nome. Ma perché proprio tre coppie di quark sono i fondamentali mattoni dell'universo? Non sappiamo rispondere a questa profonda domanda. Ma ancora una volta la simmetria è pronta a darci un possibile suggerimento: quando costruiamo l'oggetto matematico che realizza il mescolamento dei quark delle tre famiglie (vd. p. 20, ndr), scopriamo che vi è la possibilità di avere la rottura della simmetria discreta CP (vd. p. 16, ndr), una rottura da cui può scaturire la presenza della materia fatta di protoni e neutroni dell'intero universo.



1. L'ottetto barionico che raccoglie i barioni leggeri (il neutrone, il protone e le particelle lambda, csi e sigma) secondo il modello a tre quark. I tre assi colorati sono legati ai tre numeri quantici caratteristici delle diverse particelle (la terza componente dell'isospin  $I_3$  sull'asse x, la stranezza S sull'asse y e la carica Q sull'asse inclinato).

- n neutrone
- p protone
- $\Sigma$  particelle sigma
- $\Lambda$  particelle lambda
- $\Xi$  particelle csi
- u quark up
- d quark down
- s quark strange