Filosofia della fisica: temi attuali

Elena Castellani

Dipartimento di Filosofia
Università di Firenze

Filosofia - Fisica

- Fondamenti della fisica
- Filosofia della fisica

Fondamenti
(di una teoria)

- I principi e concetti sui quali la teoria è fondata.
- L’attività di analizzare, chiarire e talvolta ricostruire -- principalmente attraverso strumenti logici e matematici -- gli ingredienti e la struttura della teoria (per ex, ‘assiomatizzandola’).

Fondamenti della fisica

- Indagini di natura prevalentemente formale (cioè con l'uso di strumenti logici e matematici) delle basi e della struttura delle teorie fisiche contemporanee (teorie della relatività, meccanica quantistica, teorie quantistiche e relativistiche dei campi)

Filosofia della fisica

- Riflessione filosofica su concetti, teorie e metodi della fisica contemporanea (filosofia della fisica come parte della filosofia della scienza)
- Chiarificazione (non necessariamente formale) dei problemi concettuali e interpretativi delle teorie fisiche (contemporanee)

Analisi delle conseguenze degli sviluppi rivoluzionari della fisica contemporanea (relatività, meccanica quantistica, teorie dei campi, teorie delle stringhe,...) sul nostro modo di concepire il mondo.

Esempi:

- i concetti di spazio, tempo, e spaziotempo
- il concetto di causalità
- il concetto di oggetto fisico

Temi attuali:

- La questione degli oggetti fisici
- Il significato delle simmetrie fisiche

La questione (filosofica) degli oggetti fisici

- La questione generale di come si caratterizza (definisce) un oggetto fisico
- Il caso degli oggetti della fisica moderna (non sembrano rispettare i ragionevoli requisiti adottati per gli oggetti dell'esperienza ordinaria)

Motivazione: gli oggetti della fisica moderna (quantistica e relativistica) non sodisfano agli usuali criteri d'identificazione per gli oggetti ordinari

Questioni preliminari:

- quali sono gli usuali criteri d'identificazione?
  (il problema filosofico degli oggetti fisici)

- quali sono gli oggetti della fisica moderna e quali ulteriori problemi portano al dibattito sulla natura degli oggetti fisici
  (il problema degli oggetti microfisici)

oggetti → di varia natura

OGGETTI FISICI (OF) → oggetti che "esistono" nella realtà fisica
(nei termini dei quali "dividiamo" il mondo fisico)

- **OF ordinari** : "corpi", "cose materiali", "esseri materiali", ...
(di solito distinti da "persone")
- **OF della fisica** : punti materiali, campi, particelle, corpi astronomici, ...

↓

(gli oggetti per la descrizione del comportamento e delle caratteristiche dei quali sono formulate le teorie (fisiche)

- **OF ordinari** → alla base della concezione comune ("classica") di oggetto fisico, al centro del dibattito tradizionale sulla natura degli OF

→ sono materiali, occupano spazio, persistono nel tempo

Criteri usuali

(perché qualcosa possa essere qualificato come un OF)

- avere massa
- essere collocato nello spazio e nel tempo (nello spazio-tempo)
- persistere nel tempo (re-identificabilità)
- essere distinto da altri oggetti simili (distinguibilità)

↳ Dibattito filosofico sulla natura degli OF:

- in che modo, esattamente, un OF è identificabile come tale in base alla sua massa (composizione) e alle sue determinazioni spazio-temporali?
- servono (anche) altri criteri per identificare un OF?

- Oggetti della fisica

→ gli oggetti descritti nelle teorie fisiche (classiche, quantistiche, relativistiche, ...)

↓

soddisfano ai criteri di identificazione degli OF della concezione comune ?

Posizione più diffusa : gli OF della fisica classica non sono in realtà diversi dagli OF ordinari, le differenze (e quindi le difficoltà) nascono con le entità della fisica non classica.

⇓

gli oggetti della fisica veramente problematici sono le entità microfisiche (ex: le particelle elementari)

Criteri usuali	**Entità microfisiche ("Particelle")**
• avere massa	→ alcune particelle hanno massa nulla : fotoni, ...
• avere collocazione nello spazio e nel tempo	→ non è detto che si sappia sempre la posizione di una particella a ogni istante di tempo
• persistere nel tempo	→ in genere non c'è continuità spaziotemporale
• distinguibilità da altri oggetti simili	→ le particelle simili di uno stesso sistema atomico non sono distinguibili (simmetria di scambio)

E ancora:

In genere, che cosa può voler dire essere un OF nel caso di entità che non possono mai essere osservate come particelle libere (→ i quarks), di entità la cui esistenza è solo virtuale, di entità che si creano e si distruggono, ...?

• <u>Posizione separatista</u>: gli oggetti della microfisica sono « casi-limite » di OF, [« casi poco chiari » di OF, « oggetti esotici », « quasi-oggetti »] e quindi vanno trattati separatamente (con altri criteri). In ogni caso non hanno rilevanza per il dibattito tradizionale sulla natura degli OF.

<u>Problema</u>: se le particelle elementari sono i costituenti ultimi di tutti gli OF, come ignorarne le « parti » trattando dei « tutti » (costituiti da queste parti)?

• Posizione unitaria: gli oggetti microfisici sono da includere nella categoria degli OF, al pari degli oggetti ordinari, e vanno cercati criteri più generali (o di altro tipo) che possano andar bene per tutti gli OF.

Per esempio:

- partendo dagli OF ordinari, cercare una « nozione più liberale di OF » che includa nella categoria degli OF anche entità come le particelle elementari (QUINE, « Whither Physical Objects? » 1976).
  Risultato: una progressiva « evaporazione » degli OF, dai « corpi », alle « regioni dello spazio-tempo » per arrivare a « puri insiemi di coordinate numeriche ».

- partendo dagli OF più problematici → gli oggetti della microfisica, cercare criteri generali per determinare che cosa sia un OF. Esempio: l'approccio gruppale al problema della natura degli OF.

- Oggetti e Invarianza:

  (la rilevanza della nozione di invarianza [→ simmetria] nella caratterizzazione di un OF

  - simmetria e oggettività
  - approccio gruppale al problema degli OF

- Approccio gruppale al problema degli OF

oggetti fisici (elementari) $\longleftrightarrow$ rappresentazioni (irriducibili) del gruppo di simmetria nello spazio degli stati fisici

$\downarrow$

i numeri quantici (le proprietà invarianti) sono collegati agli indici delle rappresentazioni irriducibili)

Storicamente → E.P. Wigner (1939): classificazione delle particelle elementari (relativistiche) libere attraverso le rappresentazioni irriducibili del gruppo di Poincaré (numeri quantici: massa, spin)

– OGGETTI e INDIVIDUALITÀ –

- in che modo identificare un OF come «individuo» → su che cosa si fonda la possibilità di dire che si tratta di *questo* determinato OF e non di un altro

  ⇓

  (il problema dell'identità individuale)

- in che modo dividere il mondo in OF individuali → olismo / riduzionismo

- **Oggetti e Misurazione :**

(la relazione tra gli OF e i "dati d'esperienza" : come attribuire determinate proprietà oggettive a un OF sulla base dei risultati di misure)

- il "problema della misura" in QM e il correlato problema del rapporto tra oggetti macroscopici e oggetti microscopici
- il problema di che cosa in realtà misuriamo, per es. con gli acceleratori di particelle

A) la natura della relazione PARTI/TUTTO (la cui teoria formale è la mereologia)

- come un "tutto" è identificato in base alle sue "parti" (→ problema se la costituzione è identità)

- come un oggetto, che è "parte" di un "tutto", può essere considerato un OF individual

B) <u>la ricerca di un PRINCIPIO D'INDIVIDUAZIONE</u>

↓

un principio in base al quale attribuire individualità a un OF e in particolare poterne garantire la

- re-identificabilità
- distinguibilità (dagli altri OF simili)

– Identità di oggetti composti da «parti» –

- se e come un "tutto" è identificabile (come OF individuale) in base alle sue «parti»

  - bastano le parti e le loro relazioni a identificare il tutto (come individuo) o ci vuole qualcosa di più? (il tutto è uguale o più della somma delle parti?)
  - e <u>quali</u> parti? (e quali relazioni?)

<u>ESEMPI</u> :

- <u>il problema della nave di Teseo</u> : il problema

– Identità di oggetti che sono «parti» –

- se e come un oggetto, che è "parte" di un "tutto", può essere considerato un OF individuale

ESEMPIO: nel caso di sistemi quantistici composti, per via dell'esistenza di stati fisici «entangled» non è chiaro quali proprietà possono essere attribuite ai sistemi fisici componenti (→ ai sistemi che sono «parti» del sistema composto)

↓

entanglement ⟷ olismo quantistico

Si possono distinguere due principali tipi di teorie dell'individuazione, a seconda che il ruolo di conferire l'individualità venga attribuito a:

oppure
- proprietà (monadiche o relazionali) dell'OF
- qualcosa che trascende l'insieme delle proprietà dell'OF (individualità trascendentale, ecceità, ..)

ESEMPIO : INDIVIDUAZIONE SPAZIO-TEMPORALE

ESEMPIO : INDIVIDUAZIONE SPAZIO-TEMPORALE

↓

la teoria dell'individuazione che fa ricorso alle determinazioni spazio-temporali ed ha come ingredienti principali:

- la collocazione spazio-temporale

(per la re-identificabilità)

- una condizione di continuità sulla traiettoria spazio-temporale corrispondente alla carriera ("storia") dell' OF
  (⇒ la cosiddetta continuità spaziotemporale)

(per la distinguibilità)

- la condizione data dall'assunzione di impenetrabilità (due OF distinti non possono occupare la stessa posizione allo stesso tempo)

Indistinguibilità tra particelle quantistiche simili

- nella fisica: simmetria di scambio, collegata alle statistiche "quantistiche" di Bose-Einstein e Fermi-Dirac

- nella discussione sugli OF: il "problema delle particelle indistinguibili"

||

- le particelle indistinguibili (→ l'esistenza di entità che sono fisicamente indistinguibili eppure numericamente distinte ⇒ non sono la stessa cosa)

- il principio di Leibniz dell'IDENTITÀ DEGLI INDISCERNIBILI:
  non è possibile che due entità siano completamente uguali eppure numericamente distinte ⇒ due oggetti che hanno tutte le proprietà in comune sono identici (lo stesso oggetto)

PROBLEMA: il principio di Leibniz è violato nella fisica quantistica?

Temi attuali:

- La questione degli oggetti fisici
- Il significato delle simmetrie fisiche

SIMMETRIA

Dalle armonie delle figure...

... alle invarianze delle leggi

Nel linguaggio comune:

Simmetria indica, nel suo senso più generico, una forma di corrispondenza regolare tra le parti di una configurazione.

Il termine è usato prevalentemente riguardo a configurazioni spaziali.

Per le figure dello spazio ordinario, la nozione di simmetria è intesa principalmente in due sensi, a seconda che sia riferita a:

- disposizioni di *parti disuguali*
- disposizioni di *parti uguali*

Nel caso di una disposizione di *parti disuguali*:

'simmetrica' è una figura le cui parti diverse sono 'armonizzate' tra loro attraverso rapporti di proporzione.

Simmetria ha quindi il significato di proporzione o armonia di proporzioni.

Nel caso di disposizioni di *parti uguali*:

l’uso comune tende a identificare la simmetria con la corrispondenza speculare delle parti.

Di questa seconda nozione di *simmetria*, che nella matematica prende il nome di *simmetria per riflessione*, prevale nel linguaggio quotidiano il significato più specifico di *simmetria tra destra e sinistra* o *simmetria bilaterale* (che è, per esempio, la simmetria caratteristica della figura del corpo umano).

La simmetria destra-sinistra, trasposta su un piano astratto, è la proprietà che caratterizza una relazione tra due termini che intercorre nello stesso modo nei due sensi (nella matematica si parla, in proposito, di ‘proprietà simmetrica’ di una relazione).

Il fatto che, nel linguaggio comune, il termine *simmetria* sia usato soprattutto nei due sensi di ‘armonia di proporzioni’ e di ‘simmetria tra destra e sinistra’ non è casuale.

Nella storia della simmetria vengono infatti in evidenza *due principali nozioni* che, seguendo la distinzione tra una ‘simmetria degli antichi’ e una ‘nozione moderna di simmetria’ introdotta da *Claude Perrault* nel diciassettesimo secolo, possono essere caratterizzate rispettivamente come *antica* e *moderna*.

La *simmetria degli antichi* è la simmetria dei *Greci* e dei *Latini*, fondata essenzialmente sulla nozione di proporzione:

dalle prime attestazioni (tra il VI e V secolo a. C.) del termine συμμετρι′α, che deriva da συ′ν (con, insieme) e με′τρον (misura) e indica, in origine, una relazione di *commisurazione numerica* (*commensurabilità*) che consente di mettere in rapporto o 'accordare' due o più elementi attraverso l'individuazione di una *misura comune*,

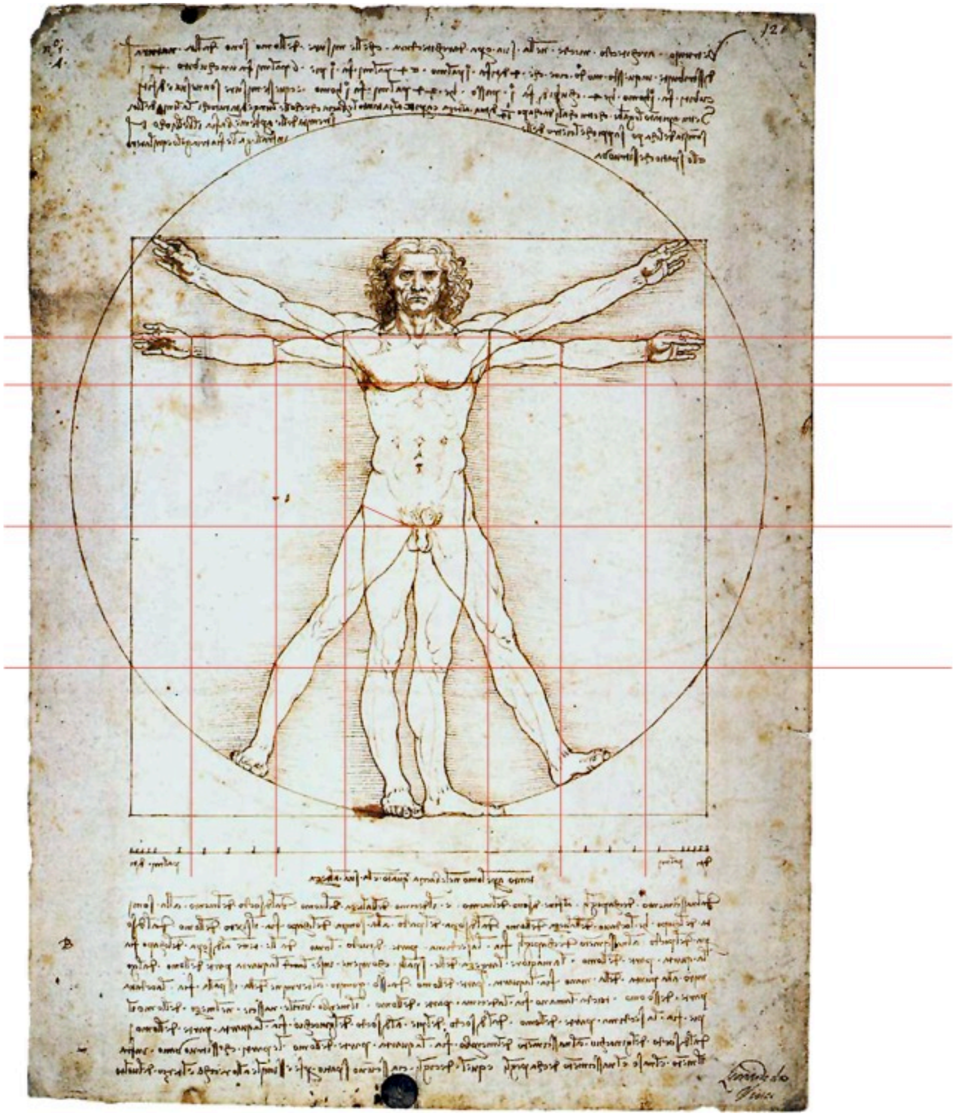
alla *symmetria* di Vitruvio (27 a. C.) definita come "l'accordo armonico tra le parti di una medesima opera e [al tempo stesso] la rispondenza di proporzioni tra le singole parti e l'intera figura" (la nozione dominante fino a tutto il Rinascimento).

.

L'insieme di queste *corrispondenze numeriche* trova una particolare sintesi visiva nella seguente raffigurazione vitruviana:

l'uomo che giace supino, con le braccia e gambe divaricate in modo tale da risultare inscritto allo stesso tempo in un cerchio e in un quadrato, entrambi centrati nell'ombelico (‘il centro naturale del corpo umano’).

La figura, specialmente nella versione disegnata da *Leonardo da Vinci*, è ben nota ed è stata spesso presa a emblema del significato della *simmetria* come *armonia di proporzioni*.



Accanto a questa ‘simmetria degli antichi’, si delinea, all’inizio dell’età moderna, una *seconda nozione di simmetria*, non più legata alla proporzione ma fondata su un ‘rapporto d’uguaglianza tra parti contrapposte’ (C. Perrault, 1673).

Le *parti contrapposte* sono quelle che si corrispondono specularmente rispetto a un asse (o a un piano):

le parti destre e sinistre se l'asse è verticale, alte e basse se l'asse è orizzontale, frontali e posteriori se l'asse è nella direzione della profondità.

Il rapporto d'uguaglianza è cioè quello che sussiste tra le parti che sono l' una l' immagine speculare dell'altra: alla componente d' *uguaglianza*, ovvero di ripetizione --- le parti destre sono uguali, se considerate per sé stesse, alle parti sinistre --- si affianca una componente di *disuguaglianza*, l'elemento rispetto a cui sono contrapposte le parti.

La *simmetria* in questo senso non è quindi un puro accostamento di parti uguali nello spazio, ma un ordinamento antitetico di parti uguali rispetto a un diverso elemento intermedio:

'All'uguaglianza si associa una disuguaglianza, e la vuota identità è interrotta dall'irruzione della differenza. Compare così la *simmetria*.' (G.W.F. Hegel, *Estetica*)

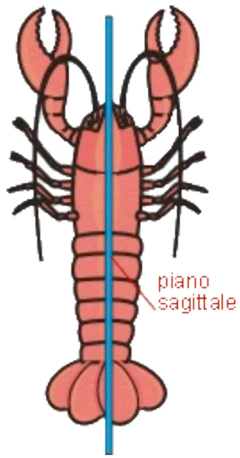
Si può dire che il senso *moderno* della simmetria nasce davvero solo quando la nozione di ‘corrispondente simiglianza delle parti’ viene a distinguersi nettamente da quella di ‘semplice ripetizione’.

È proprio l'essere qualcosa di più di una pura ripetizione di parti, e precisamente una ripetizione di parti *secondo una data legge*, a contraddistinguere una disposizione di parti uguali che sia *simmetrica*.

Fino a quando è intesa in questo senso di ‘ordinamento antitetico di parti uguali’, la simmetria dei moderni rimane essenzialmente una categoria dell’ *estetica*.

La nozione assume un significato più generale solo nel momento in cui, nella definizione di che cosa sia una configurazione simmetrica, è fatto intervenire il concetto matematico di operazione:

cioè quando, per definire il modo in cui le parti uguali sono disposte l'una rispetto all'altra in un ‘tutto simmetrico’, si ricorre all’impiego di determinate operazioni matematiche, quali la *riflessione*, la *rotazione* e la *traslazione*.


piano
sagittale

L’ *uguaglianza delle parti* è la condizione che rende inizialmente possibile questo sviluppo in senso matematico della nozione di simmetria.

Parti che sono uguali possono infatti essere ‘scambiate’ o ‘sostituite’ tra di loro, *trasformate* l'una nell'altra mediante opportune operazioni.

La simmetria dell'intera disposizione di parti può allora essere formulata nei termini dell’ *invarianza* della figura complessiva sotto l'azione delle *operazioni di scambio* tra le parti:

una *figura simmetrica* può essere definita come una figura che non cambia quando le parti uguali che la compongono sono trasformate le une nelle altre.

Il tipo di simmetria che caratterizza la figura dipende dal tipo di operazione o *trasformazione* che la lascia invariata:

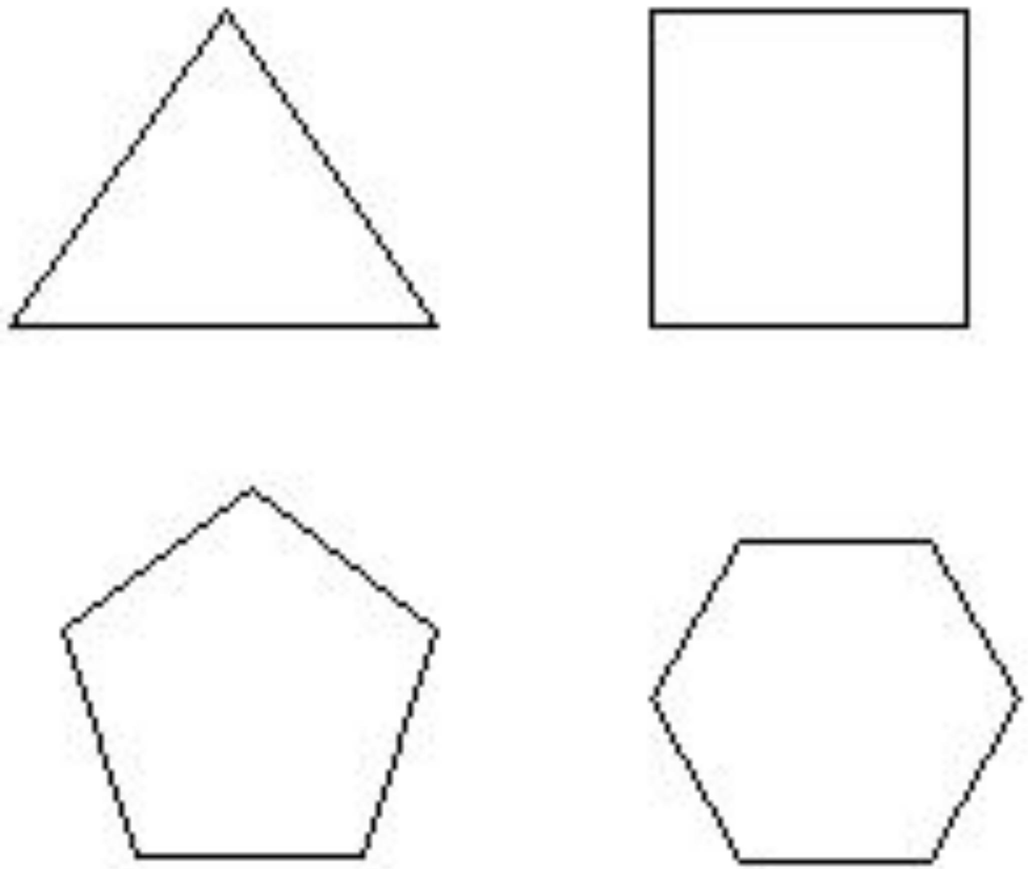
la figura ha *simmetria di riflessione* se è invariante rispetto a operazioni di riflessione, *simmetria di rotazione* se è invariante rispetto a operazioni di rotazione, *simmetria di traslazione* se è invariante rispetto a operazioni di traslazione e così via.

La figura umana, per esempio, rimane invariata quando le sue parti destre e sinistre sono scambiate tra di loro attraverso la riflessione rispetto a un piano mediano verticale: la simmetria che la caratterizza è quindi quella forma particolare della simmetria di riflessione che è nota come *simmetria tra destra e sinistra* o *simmetria bilaterale*.

Si arriva così a una definizione della simmetria nei termini delle nozioni di *invarianza* e *trasformazione*:

il particolare ruolo che avevano l' ‘uguaglianza’ e la ‘disuguaglianza’ nella caratterizzazione della simmetria dei moderni è ora ricoperto dalle nozioni di invarianza e trasformazione.

Una figura è definita *simmetrica* quando è composta di parti uguali (se considerate per sé stesse), disposte in modo tale che, sotto l'azione di determinate operazioni, si scambiano le relative posizioni mentre la figura, nel suo insieme, resta invariata: questa è la nozione di simmetria che si delinea nella seconda metà del secolo scorso e che è nota come *nozione cristallografica di simmetria* (in quanto inizialmente formulata ed applicata nell'ambito degli sviluppi della cristallografia ottocentesca).



L’ ulteriore generalizzazione della nozione moderna di simmetria si deve a uno sviluppo puramente matematico: vale a dire all'introduzione del concetto algebrico di *gruppo* e lo sviluppo successivo della *teoria dei gruppi di trasformazioni* nella seconda metà dell'Ottocento.

Le operazioni che lasciano invariata una figura simmetrica --- le *trasformazioni di simmetria* della figura --- soddisfano infatti alle condizioni per cui si possa parlare di *gruppo di trasformazioni*.

L’ essenza del *concetto di gruppo* --- la caratteristica fondamentale per cui un insieme di elementi è detto formare un gruppo --- consiste nell'esistenza di una *legge di combinazione* o *prodotto* tale che la combinazione di due elementi qualsiasi costituisce ancora un elemento dell’ insieme.

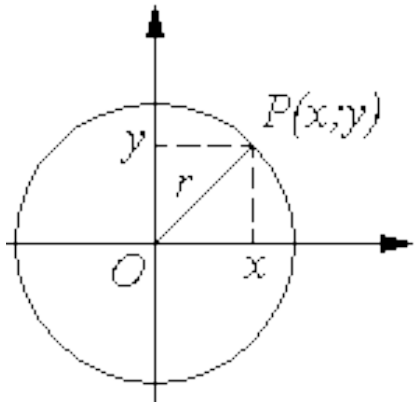
Le operazioni di simmetria di una figura soddisfano a questa condizione: *il prodotto di due qualsiasi operazioni di simmetria rappresenta ancora un'operazione di simmetria della figura*.

Tale natura ‘gruppale’ delle operazioni di simmetria permette quindi di arrivare alla *definizione generale* di *simmetria* come *invarianza rispetto a un gruppo di trasformazioni*.

La *definizione 'gruppale' della simmetria* è alla base della particolare efficacia del concetto di simmetria nella scienza contemporanea:

- ha reso possibile l'estensione delle considerazioni di simmetria dall'iniziale ambito *figurativo* a un ambito più *astratto*, e quindi un notevolissimo ampliamento del campo di applicazione della teoria della simmetria.
  Nel senso di 'invarianza rispetto a un gruppo di trasformazioni' la simmetria può essere proprietà sia di figure a noi familiari, sia di configurazioni che non hanno un immediato riscontro intuitivo, sia di relazioni di natura del tutto astratta (equazioni, forme algebriche o differenziali, ecc.);

- ha consentito l'applicazione dei risultati della teoria dei gruppi alle considerazioni relative a situazioni e proprietà di simmetria.

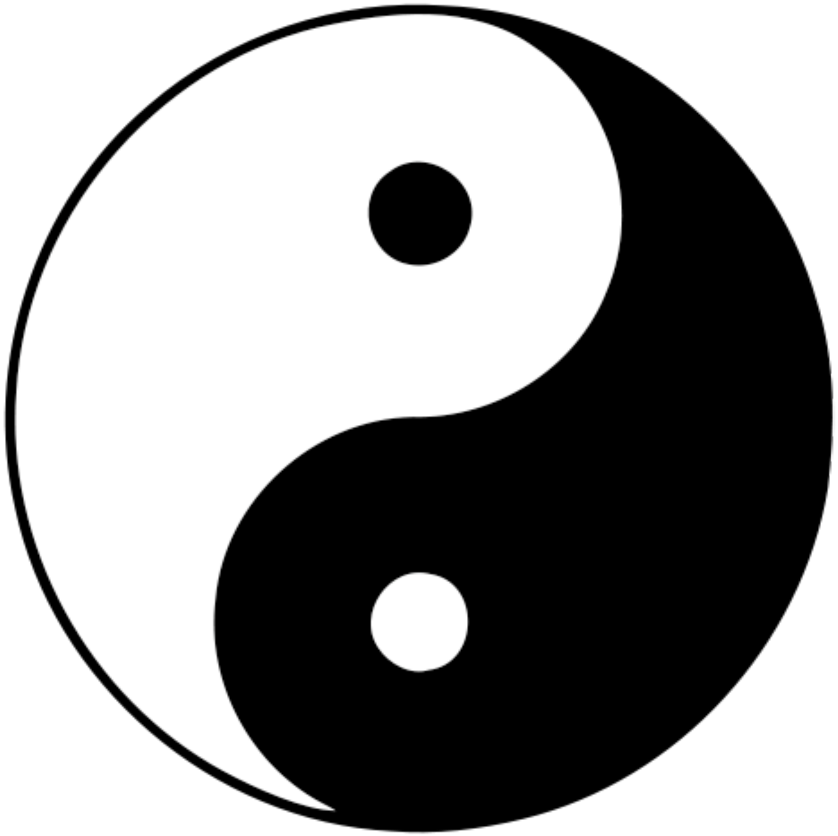

P(x;y)
y
r
O
x

Generalizzazione della teoria della simmetria

Le classificazioni delle forme di simmetria non sono più limitate alle configurazioni del piano e dello spazio euclidei:
le figure studiate per le loro proprietà di simmetria possono essere anche ‘figure’ a quattro o più dimensioni e, quali trasformazioni di simmetria, diventa possibile considerare anche operazioni che non siano isometrie.

Esempio 1): le trasformazioni di *similitudine*.
Forme come per esempio quelle spiralari delle conchiglie e quelle delle disposizioni a foglie di dimensioni crescenti nelle piante – cioè forme invarianti sotto l'azione di trasformazioni di scala (o dilatazioni) e quindi dotate di ‘simmetria di similitudine’ – possono così essere classificate dal punto di vista della simmetria.

Esempio 2): le trasformazioni di *colore*.



Simmetria e Geometria

La *teoria della simmetria*, come studio sistematico delle configurazioni simmetriche, è in naturale rapporto con la *geometria*.

Come dimostra il caso delle *figure geometriche regolari* del piano e dello spazio, le configurazioni studiate nella geometria possiedono caratteristiche che possono essere descritte interamente nei termini della simmetria.

Ma il significato della connessione tra *simmetria* e *geometria* non si esaurisce nella possibilità di descrivere alcune proprietà geometriche come proprietà di simmetria.
La connessione riguarda la natura stessa delle nozioni di simmetria e geometria, se queste sono intese come nozioni fondate su quella di *gruppo*.

La *teoria dei gruppi* ha un'origine di natura algebrica: nasce in relazione al problema della risoluzione delle equazioni algebriche di grado superiore al quarto, a partire dalla nozione di gruppo di sostituzioni delle soluzioni di un'equazione.

Dopo i decisivi contributi di Évariste Galois (1811-1832), la prima sistematizzazione della teoria dei gruppi è rappresentata dal *Traité des substitutions et des équations algébriques* (1870) di Camille Jordan.

L'applicazione di questa teoria alla *geometria* avviene essenzialmente a opera di Felix Klein e Sophus Lie.

La prolusione tenuta da Klein nel 1872 all'Università di Erlangen, dal titolo *Considerazioni comparative intorno a ricerche geometriche recenti*, segna l'inizio di una nuova concezione della geometria fondata sulla nozione di gruppo:

una teoria geometrica è definita – in relazione a un dato spazio (insieme di punti) e a un dato gruppo di trasformazioni – come lo studio di quelle proprietà delle figure (o sottoinsiemi) dello spazio che restano invariate sotto l'azione delle trasformazioni del gruppo.

Le *proprietà geometriche* acquistano così il significato di 'invarianti rispetto a un dato gruppo di trasformazioni' e quindi, in accordo con la definizione gruppale della simmetria, il significato di *proprietà di simmetria*.

Simmetria e Fisica

Simmetriche, nel senso di ‘invarianti rispetto a un gruppo di trasformazioni’, possono essere sia forme immediatamente visibili sia forme del tutto astratte.

A questo secondo tipo di ‘oggetti’ appartengono molte delle *relazioni matematiche* che sono utilizzate nelle scienze della natura.

È proprio in riferimento a relazioni di questo genere che la simmetria è diventata un concetto di grande rilevanza nella scienza contemporanea.

Che cosa significa ‘simmetria di una relazione’?

Nel caso della simmetria di una *figura*, le trasformazioni del gruppo di simmetria sono operazioni che scambiano tra loro le componenti equivalenti della figura (o operazioni che portano la figura a coincidere con un'altra equivalente), e le proprietà di simmetria della figura corrispondono a determinate caratteristiche della sua forma spaziale.

Nel caso che la simmetria sia riferita a *relazioni*, proprietà- e operazioni di simmetria non hanno più un significato così facilmente raffigurabile: ‘simmetria di una relazione tra grandezze’ significa che la forma della relazione rimane la stessa quando le grandezze sono sottoposte all'azione di un determinato gruppo di trasformazioni (variano le grandezze, ma non il modo in cui esse sono collegate tra di loro).

A rimanere invariata è quindi una forma astratta – la *forma della relazione* – e il significato che possono avere le sue proprietà di simmetria dipende dal significato che la relazione assume nel contesto in cui è considerata.

Nella fisica: le relazioni di cui si considerano le proprietà di simmetria sono quelle tra grandezze fisiche a cui, secondo un uso forse improprio ma corrente, viene generalmente dato il nome di *leggi fisiche* o *leggi della natura*.

Si tratta, essenzialmente, di quelle regole che si trovano al cuore di ogni teoria fisica e che ci dicono come si comportano ed evolvono i sistemi fisici descritti dalla teoria:
le cosiddette *leggi del moto*, espresse nei termini di equazioni che prendono appunto il nome di ‘equazioni del moto’ o ‘equazioni dinamiche’.

E` nell'uso identificare come *simmetria di una teoria fisica* proprio la simmetria delle sue equazioni dinamiche fondamentali, cioè la simmetria che è descritta dal gruppo di trasformazioni che lasciano invariate queste equazioni.

Le simmetrie delle leggi fisiche sono postulate attraverso i cosiddetti *principi d'invarianza* o *principi di simmetria*.

I principi d’ invarianza sono un’acquisizione della fisica contemporanea.

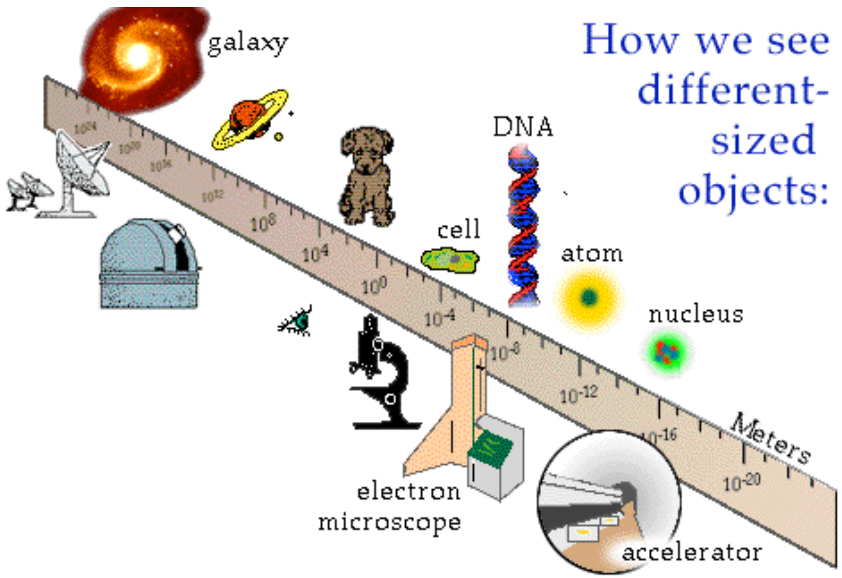
Le proprietà d’invarianza delle equazioni dinamiche venivano già studiate in maniera esplicita nell’Ottocento ma bisogna aspettare gli inizi del Novecento per trovare, nella storia della fisica, il *primo principio d’invarianza* esplicitamente formulato come tale:

il *principio di relatività (ristretta)*, con il quale Albert Einstein postula, nel 1905, l’ invarianza delle leggi fisiche per cambiamenti di sistemi di riferimento in moto rettilineo uniforme l'uno rispetto all'altro.

I principi d’invarianza rappresentano oggi uno degli ingredienti principali della descrizione fisica del mondo.

Le attuali teorie che descrivono il comportamento e le proprietà delle entità fondamentali che costituiscono il mondo fisico sono infatti delle vere e proprie *teorie di simmetria*: cioè teorie che sono fondate su proprietà di simmetria e formulate con l'aiuto degli strumenti matematici della teoria dei gruppi di trasformazioni.

Dalla ‘svolta’ einsteiniana a queste odierne ‘teorie di simmetria’ il percorso delle simmetrie nella fisica contemporanea coincide in buona parte con il percorso della stessa fisica teorica: la formulazione delle *teorie (ristretta e generale) della relatività*, l'applicazione della teoria dei gruppi di simmetria alla *meccanica quantistica*, l’elaborazione di *teorie di campo* basate sulle cosiddette *simmetrie di gauge*.



How we see different-sized objects:
galaxy
DNA
cell
atom
nucleus
10^8
10^4
10^0
10^{-4}
10^{-8}
10^{-12}
10^{-16}
10^{-20}
Meters
electron microscope
accelerator

Le simmetrie sono di diversi tipi a seconda degli ambiti fenomeni in cui sono applicate.

E’ tuttavia possible individuare delle funzioni comuni:

- *classificatoria* (la possibilità di classificare oggetti in base alle loro proprietà di simmetria);
- *definitoria* (la possibilità di definire oggetti, quando la classificazione in base a simmetrie è tale da includere tutte le proprietà essenziali);
- *normativa* (la possibilità di usare le simmetrie come *vincoli* nelle teorie, vincoli che in certi casi possono anche essere sufficienti per determinare la forma di un’equazione fondamentale della teoria);

- *esplicativa* (la possibilità di spiegare molti fenomeni naturali come conseguenze più o meno dirette della presenza di simmetrie);

- *unificatrice* (la possibilità di unificare usando le tecniche di unificazione dei gruppi di simmetria, come nel caso del programma di unificazione delle forze della natura);

- *euristica* (la possibilità di prevedere, in base a considerazioni di simmetria, l'occorrenza o meno di certi fenomeni, l'evoluzione di determinate situazioni fisiche e, soprattutto, l'esistenza di nuovi oggetti fisici).

Le varie e importanti funzioni delle simmetrie nella scienza portano in modo naturale a chiederci per quale motivo la simmetria possa occupare un posto così centrale nella nostra descrizione della natura.

Le simmetrie fanno veramente parte della natura o rappresentano solo efficaci strumenti concettuali attraverso i quali ci orientiamo nello studio del mondo fisico?

La difficoltà del problema interpretativo è dovuta anche alla sua generalità.

Qualunque tipo d'interpretazione venga proposta,

- *finalistica* (esiste una tendenza in natura verso la simmetria)
- *realistica* (le simmetrie sono proprietà reali che si riscontrano effettivamente nel mondo dei fenomeni)
- *epistemica* (le simmetrie hanno essenzialmente che fare con le modalità della nostra conoscenza del mondo fisico)

la riflessione sul *significato delle simmetrie fisiche* coinvolge inevitabilmente una riflessione di ca rattere più generale sul *significato e i metodi delle scienze della natura*.

Il problema interpretativo a cui danno origine le simmetrie rimane aperto.

Come molti dei problemi tipicamente discussi nella filosofia della scienza,
dipende anche dallo stato della conoscenza fisica,
oltre che dalla maturità della discussione filosofica.

MODERN NOTION OF SYMMETRY

EQUALITY OF PARTS

- **Equality** of parts that are opposed
- **Equality** with each others and with respect to the whole

equal parts can be exchanged by means of operations
→**mathematical development** of the notion of symmetry

SYMMETRIC DISPOSITION OF PARTS

the figure as a whole does not change when the parts are exchanged by means of some operations (symmetry transformations)

SCIENTIFIC NOTION

Symmetry as invariance under some transformations

Group theory

Symmetry as invariance under a group of transformations

- **Equivalence** of the elements that are related by symmetry transformations
- **Equivalence** with each others and with respect to the whole

EQUIVALENCE OF PARTS

Simmetria ♣ Equivalenza

- Simmetria, uguaglianza, gruppo → equivalenza

- Simmetria → situazione d’equivalenza:

  - alternative equivalenti: indifferenza, irrilevanza
  - prospettive equivalenti: oggettività (intersoggettività)

Simmetria → Equivalenza

- ruolo della nozione di uguaglianza nell'origine ed evoluzione della nozione moderna di simmetria

- l'uguaglianza è collegata alla simmetria in quanto *relazione d'equivalenza*, e questo è connesso alla natura *gruppale* delle operazioni di simmetria: gli elementi d'una configurazione che sono sostituibili l'uno con l'altro dalle trasformazioni del suo gruppo di simmetria sono legati da una relazione d'equivalenza

- è nella natura stessa della nozione di simmetria di esprimere una certa situazione d'equivalenza tra determinati elementi.

Simmetria → situazione d'equivalenza tra determinati elementi:

- questi elementi, in quanto legati da una relazione d'equivalenza, fanno parte di una *classe d'equivalenza*;

- le trasformazioni di simmetria possono essere considerate come le operazioni che lasciano invariate quelle proprietà che sono comuni a tutti gli elementi della stessa classe d'equivalenza;

- la simmetria è così legata alla nozione di *classe*, da cui il suo carattere di *generalità*: le proprietà di simmetria caratterizzano classi di oggetti, non oggetti come singoli individui.

Simmetria → alternative equivalenti:

- indifferenza (asino di Buridano, bilancia a bracci uguali), *ambiguità*

- irrilevanza (di una distinzione tra gli elementi equivalenti), *non osservabilità*

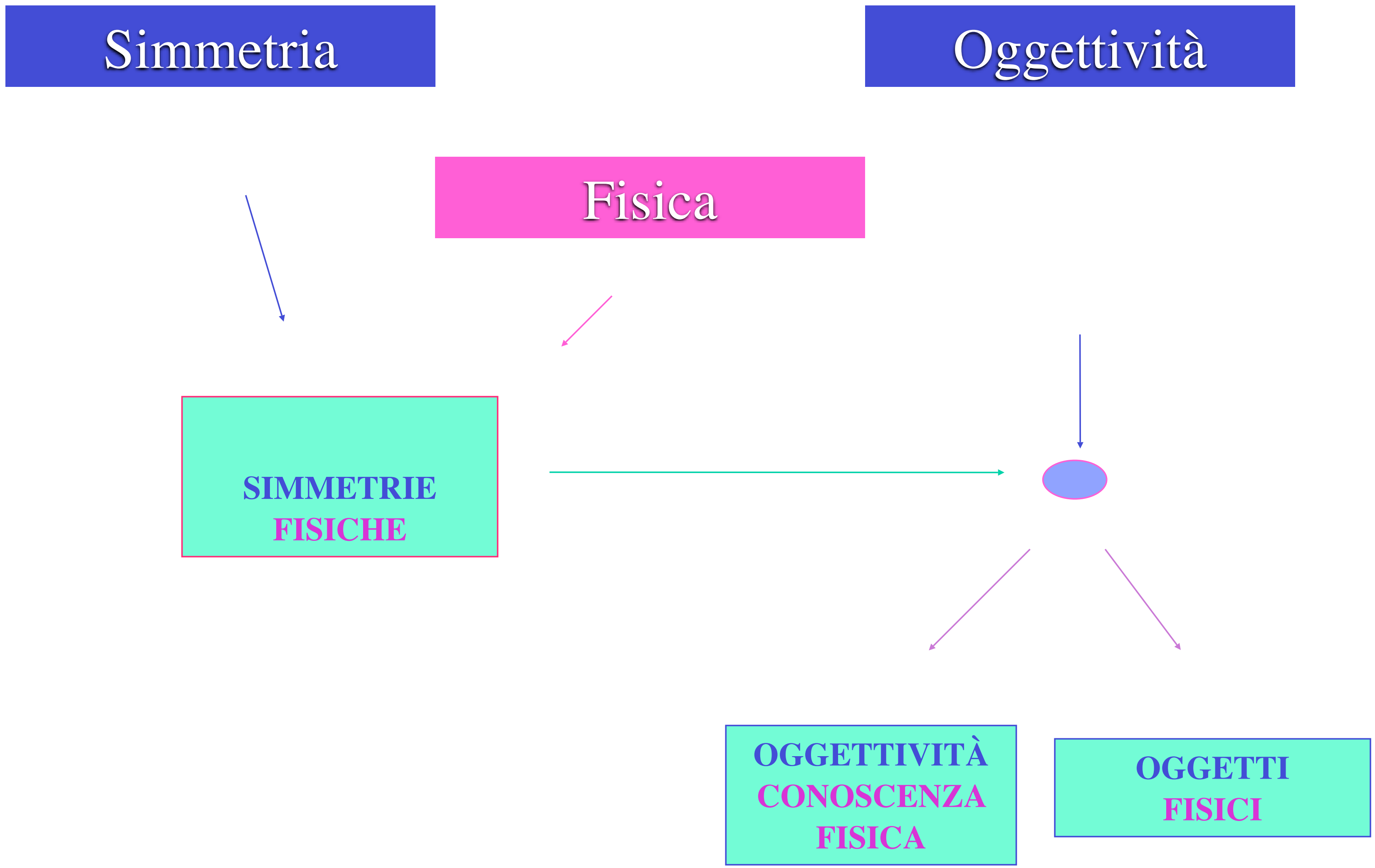
- incertezza (mancanza d'*informazione* utile a una scelta)

Simmetria → prospettive (punti di vista) equivalenti:

- equivalenza dei sistemi di riferimento (simmetrie spaziotemporali) → validità intersoggettiva

Hermann Weyl (*Symmetry*, 1952):
"Objectivity means invariance with respect to the group of automorphisms [of space-time]"

- intersoggettività → oggettività


Simmetria
Oggettività
Fisica
SIMMETRIE FISICHE
OGGETTIVITÀ CONOSCENZA FISICA
OGGETTI FISICI

Symmetry and Objectivity

(Physical) Symmetries **Constitution of (Physical) Objectivity**

$\downarrow$

SYMMETRY GROUPS
GROUP REPRESENTATIONS
EQUIVALENCE CLASSES

$\swarrow$ $\searrow$

SYMMETRIES and INTER-SUBJECTIVITY	**SYMMETRIES and OBJECTS**

Symmetry and Intersubjectivity

SPACETIME SYMMETRIES

↓

equivalence of reference frames

→

condition of objectivity
(intersubjective validity)
for
a physical description in terms of laws

↑ ↓

common idea

(SYMMETRY GROUPS)

↓

"Objectivity means invariance with respect to the group of automorphisms [of spacetime]"

H. WEYL (*Symmetry*, 1952)

←

what is objective
should not depend upon a
particular perspective

Symmetry and (Constitution of) Objects

HISTORY

F. KLEIN (1872)

E.P. WIGNER (1939)

the idea that the possibility of speaking in terms of objects in a given context is connected with the possibility of individuating invariants with respect to the symmetry group of the context

classification of elementary particles by means of the irreducible representations of the fundamental symmetry group

↓

each (elementary) particle has a number of invariant properties (quantum numbers), associated with the labels of the irreducible representations

application of the theory of symmetry groups and their representations to the object question

→

general procedure for constituting the objects of physical theories as "sets of invariants"