

LA GENESI ASIMMETRICA DELL'INDIVIDUO

ADA TENUTI^(*)

Abstract: The research of symmetries allows the cognitive activity to find elements that do not change in the processes of transformation that characterize human experience. An epistemological reflection about the symmetry principle, and his role in the transition from modern science to contemporary physics, reveals that symmetries and symmetry breakings are very useful instruments in the modelling of physical reality. These remarks enable to develop a correlation between the concept of asymmetry and the genesis of the individual. In this regard the individuation process described by Gilbert Simondon offers an instructive example of the ontogenetical power of asymmetry.

Keywords: Invariants, Asymmetry, Individuation, Disparation, Transduction.

Simmetria significa invarianza rispetto a una trasformazione. Una simmetria comporta un mutamento e una resistenza ad esso: indica il permanere di una identità attraverso un cambiamento. Il processo trasformativo non si limita a lasciare alcuni elementi inalterati, ma li rende anche visibili in quanto invarianze. Nell'esperienza quotidiana incontriamo di frequente alcune forme di simmetria, ad esempio la simmetria bilaterale, per la quale un piano divide il nostro corpo in due parti specularmente identiche tra loro. Si tratta di un concetto geometrico molto semplice: una figura in uno spazio tridimensionale è simmetrica rispetto a un piano se coincide con la sua riflessione nel

(*) adasofia.tenuti@gmail.com.

piano, essendo questo considerato come uno specchio (Weyl 1964: 12–13). In questo caso la riflessione è la trasformazione e la figura, che permane identica, emerge come invarianza. Certo se ci addentrassimo nel corpo umano, osservando ad esempio la disposizione interna degli organi o la conformazione del nostro cervello, ci accorgeremmo che tale struttura perde la propria natura simmetrica per ragioni fisiologiche tanto centrali quanto la conquista evolutiva della bilateria. Pensiamo ora a un girasole o a una stella marina e immaginiamo di farli ruotare nello spazio attorno a un asse: l'invarianza della configurazione di questi oggetti rispetto ad una trasformazione per rotazione indica che sono dotati di simmetria radiale. Anche in questo caso però, la sovrapposibilità della figura ruotata con la figura iniziale dipende tanto dall'ampiezza dell'angolo di rotazione quanto dalla posizione dell'asse di simmetria. Se ci raffiguriamo infine il motivo decorativo di un vaso attico del periodo geometrico possiamo osservare la ripetizione ritmica di una figura traslata a intervalli regolari, un esempio di simmetria di traslazione. La simmetria ornamentale è rotta dalle file di figurine nere di uomini, cavalli o cervi stilizzati lievemente diversi l'uno dall'altro nei gesti e nell'atteggiamento corporeo.

Le simmetrie degli oggetti consueti suggeriscono un senso di ordine ed equilibrio, dovuto tanto al rapporto integrato e armonioso delle parti omogenee nel tutto, quanto alla continuità di una configurazione strutturale nel mutamento. Tuttavia, nelle molteplici forme in cui si manifestano, le simmetrie presentano sempre una tendenza irriducibile a rompersi. Nei corpi organici, nella fisica e nell'arte la rottura di simmetria fa da contrappunto all'invarianza, spezzando la conservazione nel mutamento e aprendo nuovi possibili percorsi di trasformazione.

1. Strumenti di oggettivazione della realtà fisica

«Inizio e elemento primordiale delle cose è l'illimitato... e donde viene agli esseri la nascita, là avviene anche la loro dissoluzione secondo necessità; poiché si pagano l'un l'altro la pena e l'espiazione dell'ingiustizia secondo l'ordine del tempo» (Anassimandro 12B1 DK, in Pasquinelli 1976).

In questo primo frammento di Anassimandro, uno dei testi più antichi della filosofia occidentale, possiamo rintracciare le radici di un esercizio del pensiero basato sulla simmetria. Anassimandro situa infatti la genesi degli esseri nella dimensione perfettamente simmetrica dell'*ἀπειρον*, segnata dalla pura invarianza priva di limiti e determinazioni. Il venire all'esistenza degli enti

comporta un distacco dall'ἀπειρον che rompe la simmetria originaria dando luogo ad una dissimmetria designata come ἀδικία, ingiustizia (Mathieu 1973). L'emergere delle determinazioni richiede una trasformazione che spezzi l'invarianza assolutamente simmetrica del nulla lasciando posto all'essere. Perché la simmetria sia ristabilita e l'ingiustizia espiata, occorre che l'ordine necessitante del tempo conduca gli enti a ricongiungersi con il principio indeterminato da cui provengono attraverso la morte. In una concezione metafisica che contempla la reversibilità come ripristino della giustizia, il venire all'esistere degli enti e il loro morire sono due dissimmetrie che si annullano a vicenda, al fine di ricomporre la simmetria originaria infranta nel processo di generazione delle cose. L'ἀπειρον, in quanto αρχή, è il sostrato metafisico invariante e simmetrico degli enti ma è al contempo la fonte di un'esistenza condannata ad essere asimmetrica rispetto alla propria origine. La metafisica anassimandrea è dunque un'impresa volta a colmare l'asimmetria tra il nulla originario e le cose esistenti, introducendo continuità nello scarto della genesi e tracciando il cammino di redenzione che condurrà al ricongiungimento con l'αρχή (Mathieu 1973: 403). L'unico modo di ricomporre la simmetria infranta è introdurre un elemento che orienti l'esistere delle cose ad estinguersi, il tempo reversibile, che riconduce la molteplicità delle determinazioni all'indeterminato.

Il frammento di Anassimandro mostra come, all'origine dello sforzo umano di oggettivazione del reale, vi sia la ricerca di una dimensione invariante che si sottrae al mutamento e lo rende intelligibile riconducendolo a una logica dell'identità. La ricerca dell'invarianza permette infatti al gesto conoscitivo di afferrare aspetti del reale che possono essere isolati e identificati attraverso una definizione oggettiva. In quest'ottica le simmetrie corrispondono a regolarità dell'esperienza che consentono di orientarsi nell'ambiente, di fare previsioni e di accumulare conoscenze astratte che regolano il comportamento facilitando tanto le reazioni agli stimoli quanto le tensioni progettuali.

Adottando una prospettiva costruttivista, si può indagare la funzione epistemologica dell'«incontro empirico con la simmetria» nella determinazione del dominio dell'oggettività scientifica in generale e fisica e in particolare (Bailly, Longo 2006). Le radici del concetto di simmetria si possono rintracciare in gesti e movimenti pre-concettuali che comportano la regolarità, la ripetizione identica nel cambiamento. Bailly e Longo innestano su questi atti di esperienza la costruzione dell'oggettività scientifica. Il processo prende le mosse dall'integrazione degli elementi empirici che si impongono alle facoltà percettive in configurazioni complesse, attraverso l'istituzione di nessi

analogici (Bailly, Longo 2006: 29–30). L'unificazione in schemi esplicativi di ampia portata è resa possibile dalla percezione, in complessi di fenomenici eterogenei, di un'impostazione strutturale comune dal punto di vista sincronico o della conservazione di certe proprietà sul piano diacronico. Il confronto degli esseri viventi con queste regolarità, che emergono come invarianti della contingenza empirica, costituisce dunque il primo passo nella formazione delle strutture concettuali che forniscono alla pratica scientifica i propri strumenti logico-formali (Bailly, Longo 2006: 32). Di conseguenza, gli oggetti che prendono forma in questa dinamica strutturante sono qualificati dalle caratteristiche che permangono identiche nel reticolo di trasformazioni dell'esperienza. Tale processo di oggettivazione si nutre della prossimità tra forme dell'esperienza percettiva, attività cognitiva di costruzione teorica del reale e proprietà di simmetria o rottura di simmetria degli oggetti che popolano i quadri di riferimento (Bailly, Longo 2006: 190). Le invarianze rispetto ad operazioni di simmetria pongono così le condizioni delle nostre possibilità di osservazione, che sono forme di accesso e modalità di interazione con i fenomeni.

L'oggettivazione scientifica del reale basata sull'esperienza della simmetria assume un valore paradigmatico nel quadro della fisica classica. L'intero edificio della scienza moderna, infatti, poggia sulla possibilità di formulare leggi generali che catturino le invarianze nel divenire dei fenomeni, riducendone la natura molteplice e contingente ad uno schema teorico di validità universale (Prigogine, Stengers 1981: 31). Questo approccio si basa sulla possibilità accedere, tramite l'osservazione, la misurazione e il calcolo, alle proprietà invarianti degli oggetti fisici, proprietà indipendenti da fattori contestuali e non alterate dalla prospettiva di osservazione, che permangono identiche nel corso di specifici processi di trasformazione. La registrazione dei vincoli dei processi fisici consente inoltre di porre principi normativi a cui obbedisce il comportamento dei sistemi di riferimento, circoscrivendone così l'identità. La sintesi newtoniana implica una natura omogenea e decifrabile, con la quale è possibile instaurare un dialogo sperimentale che sottende una forma di dominio (Prigogine, Stengers 1981: 40). Attraverso il dialogo sperimentale con il mondo naturale, che unisce l'osservazione alle tecniche di manipolazione, è possibile conferire alla realtà fisica un'approssimazione ottimale nei confronti di un'ipotesi teorica che non descrive ma determina il proprio dominio di oggettività, assoggettandolo a leggi universali.

Nei suoi *Principia*, riferimento ineludibile del pensiero scientifico moderno, Newton enuncia le leggi fisiche che descrivono e rendono prevedibile

il moto dei corpi, e ne estende la portata all'intero sistema solare unificando corpi terreni e celesti nell'impianto normativo della meccanica classica. Analogamente, scopre che il moto dei corpi materiali è determinato da una sola forza, la forza di gravitazione, indipendentemente dalla scala dei fenomeni considerati. Vediamo qui incarnato lo spirito scientifico del meccanicismo moderno, che enuncia dei principi generali che esprimono relazioni quantitative necessarie tra grandezze, esercitando una funzione esplicativa rispetto a fenomeni fisici eterogenei. A questo riguardo il concetto di traiettoria deterministica costituisce uno snodo centrale della fisica newtoniana. Infatti, l'integrazione del sistema di equazioni differenziali che esprimono lo stato istantaneo dei punti di un sistema dinamico permette di calcolare le loro traiettorie, che forniscono una descrizione completa del sistema (Prigogine, Stengers 1981: 59). Di conseguenza, conoscendo la legge generale del moto e uno stato qualunque di un sistema è possibile ricostruirne l'evoluzione passata e futura. «Le traiettorie sono leggi deterministiche» che forniscono tutte le informazioni pertinenti alla descrizione del comportamento dei sistemi dinamici integrabili, indipendentemente dalla loro natura specifica, dalla loro scala e da ulteriori elementi definiti dal gruppo di simmetria (Prigogine, Stengers 1981: 76).

La nozione di gruppo di simmetria indica l'insieme di trasformazioni rispetto a cui permangono immutate le strutture rilevanti che costituiscono l'identità del sistema di riferimento. Queste operazioni pongono anche i presupposti su cui edificare il sistema di leggi che ne regola il comportamento, innescando così il processo di costruzione dell'oggettività scientifica. Tra leggi fisiche e simmetrie si instaura quindi un nesso profondo, che si rivela anche un prezioso strumento di ricerca. A questo proposito, Richard Feynman sostiene che individuare i gruppi di simmetria legati alle leggi fisiche consente di stabilire i domini in cui queste sono valide ma fornisce anche utili strumenti per scoprire leggi che non conosciamo (Feynman 1967: 84).

Hermann Weyl definisce la simmetria di una figura geometrica come il gruppo dei suoi automorfismi (Weyl 1964: 49, 52). L'automorfismo è «una rappresentazione biunivoca $p \rightarrow p'$ di un campo di punti su sé stesso, che lascia invariate le relazioni fondamentali» tra i punti stessi che costituiscono la configurazione di riferimento (Weyl 1967: 88). Il gruppo degli automorfismi, o gruppo di simmetria, comprende l'insieme di trasformazioni che attribuiscono oggettività alle figure determinandone l'identità strutturale. Analogamente, dal punto di vista fisico, il gruppo di simmetria di un sistema comprende le trasformazioni che lasciano invariante la lagrangiana, ovvero la

funzione che ne caratterizza la dinamica esprimendo la differenza tra energia cinetica e energia potenziale in ogni punto del moto. Il Teorema di Noether (1918) stabilisce che a queste trasformazioni corrispondono delle invarianti dal punto di vista matematico o delle quantità conservate dal punto di vista fisico descritte dalle leggi di conservazione (Bailly, Longo 2006: 184). Alla simmetria dei fenomeni fisici rispetto alle traslazioni temporali, ad esempio, è legata la legge di conservazione dell'energia, che afferma il conservarsi nel tempo, qualsiasi cosa accada, dell'energia totale di un sistema. Stabilendo il nesso tra invarianza e conservazione, il teorema di Noether fornisce gli strumenti matematici per calcolare le quantità conservate connesse ai gruppi di simmetria di un sistema fisico, determinandone le proprietà strutturalmente più stabili come componenti essenziali della sua identità profonda (Bailly, Longo 2006: 184).

2. Simmetrie tra relatività e teoria dei quanti

Nel mondo della scienza classica il concetto di simmetria si associa alla formulazione di leggi universali basate sulla possibilità di identificare univocamente l'oggettività scientifica e di calcolarne il comportamento in modo deterministico. Nel quadro della fisica novecentesca, gli strumenti matematici e teorici offerti dalle simmetrie assumono un rilievo ancora maggiore. L'ideale moderno delle "leggi della natura" mostra la propria inadeguatezza in rapporto ad una nuova concezione dell'oggettività scientifica, sempre più legata alle simmetrie come principi di unificazione e strumenti insostituibili nella costruzione dei modelli teorici (Van Fraassen 1989).

Nel 1632 Galileo introduce l'idea secondo cui un insieme di fenomeni è *invariante* rispetto all'inserimento di un moto uniforme nel sistema di riferimento, si tratta dell'intuizione della relatività. Il principio di relatività galileiano stabilisce l'invarianza delle leggi della meccanica classica rispetto a diversi sistemi di riferimento inerziali in moto uniforme l'uno rispetto all'altro (Einstein 2011). Il calcolo delle coordinate di un oggetto nel passaggio da un sistema all'altro è reso possibile da un insieme di leggi che costituiscono la trasformazione galileiana, che comprende le trasformazioni di simmetria della meccanica classica. Con la relatività ristretta Einstein intende ristabilire la compatibilità tra il principio di relatività galileiano e le leggi dell'elettromagnetismo di Maxwell, che lo avevano messo in discussione poiché non risultavano invarianti rispetto alle trasformazioni di Galileo (Einstein 1905).

Dimostrando che tanto la distanza tra due punti, quanto la simultaneità tra due eventi dipendono dal sistema di riferimento in cui vengono misurate, Einstein afferma che spazio e tempo sono dimensioni relative, dotate di significato solo se poste in relazione ad un particolare sistema di coordinate (Einstein 2011). La relatività di spazio e tempo permette di aggirare il teorema di addizione della velocità, responsabile del conflitto tra il principio di relatività e la legge di propagazione della luce nel vuoto⁽¹⁾. Il gruppo di simmetria che permette di passare da un sistema di riferimento all'altro, in modo che in ciascuno di essi la velocità della luce si mantenga costante e risultino invarianti le equazioni di Maxwell, è costituito dalle trasformazioni di Lorentz. Queste stabiliscono la molteplicità di prospettive sugli eventi che garantiscono l'invarianza formale delle leggi della natura e al contempo forniscono gli strumenti di calcolo per passare da una prospettiva all'altra. Tra le implicazioni della relatività ristretta vi è la concezione dell'universo dei fenomeni fisici come continuo quadridimensionale o spazio-tempo di Minkowski, in cui gli eventi fisici sono descritti da tre coordinate spaziali e una coordinata temporale, in prossimità delle quali ne esistono altre che identificano eventi arbitrariamente vicini (Einstein 2011). Poincaré definisce gruppo di Lorentz il gruppo di simmetria composto dalle trasformazioni di Lorentz e dalle rotazioni spaziali, e lo estende includendovi le traslazioni spaziali e temporali (Poincaré 1906). Il gruppo così ottenuto prende il nome di *gruppo di Poincaré* e si afferma come gruppo di simmetria dello spazio-tempo di Minkowski ripreso nella relatività ristretta. Tanto la struttura del continuo spazio-temporale, quanto gli oggetti fisici come distribuzioni di eventi prendono forma come invarianti rispetto alle trasformazioni di simmetria comprese nel gruppo di Lorentz-Poincaré. Di conseguenza lo spazio e il tempo non si limitano a costituire la dimensionalità dell'accadere di fenomeni retti da leggi, ma presentano simmetrie che individuano gli oggetti e rendono visibili le leggi.

Con la relatività generale Einstein si spinge ad affermare che le leggi che prescrivono il divenire dei fenomeni sono analoghe in tutti i sistemi di riferimento qualunque sia il loro moto. La dimostrazione dell'uguaglianza tra la massa inerziale e la massa gravitazionale consente infatti di estendere il

(1) Immaginiamo di lanciare sulla banchina di un binario ferroviario un raggio di luce che procede ad una velocità c ; lanciamo poi un altro raggio sul vagone di un treno che si muove a velocità v . Per determinare la velocità della luce nel vagone rispetto alla banchina la meccanica classica applicherebbe il teorema di addizione sommando c e v ; se invece il vagone fosse preso come sistema di riferimento la sua velocità v andrebbe sottratta a c per ottenere la velocità della luce. Si otterrebbero dunque rispettivamente un numero maggiore e un numero minore di c , ma questo risultato contrasta con il postulato che definisce c come un numero costante che dovrebbe restare identico nei due sistemi di riferimento.

principio di relatività valido per i sistemi inerziali anche a sistemi di riferimento in moto accelerato, e stabilisce un'analogia tra questi ultimi e i sistemi in stato di quiete su cui agisce un campo gravitazionale. Per calcolare le proprietà del campo gravitazionale basterà dunque trasformare un sistema di riferimento galileiano in un sistema accelerato e calcolare come varia lo svolgersi dei fenomeni: questa variazione è infatti analoga all'influenza esercitata da un campo gravitazionale. Applicando questi principi alla luce si rileva che i raggi luminosi si propagano nei campi gravitazionali *in linea curva*. La curvatura associata all'accelerazione determina una complessificazione del continuo spazio-temporale, che comprende come caso particolare il continuo euclideo. Agli elementi della geometria euclidea subentrano superfici composte da linee curve che permettono di individuare dei punti attraverso coordinate gaussiane in un continuo a molteplici dimensioni (Einstein 2006: pos. 1524). Nel continuo non euclideo della relatività generale non è più possibile costruire sistemi di riferimento che permettano di indicare direttamente le coordinate spaziali e temporali degli eventi. I punti in movimento diventano linee, l'unico modo in cui si può parlare di eventi è come incontri tra linee che esprimono una condivisione di coordinate e dunque istituiscono relazioni metriche tra percorsi di movimento, espresse dalle coordinate gaussiane. La geometria riemanniana, con la sua dimensionalità e le sue simmetrie, genera lo spazio fisico in cui emergono le invarianti che costituiscono l'oggettività fisica e le sue leggi. In questo quadro prende forma il principio di relatività generale, secondo il quale: «tutti i sistemi di coordinate gaussiane sono di principio equivalenti per la formulazione delle leggi generali della natura» (Einstein 2006: pos. 1653). Il gruppo di simmetria che coglie le invarianze rispetto ai mutamenti di coordinate si è straordinariamente ampliato rispetto alla relatività ristretta, poiché comporta l'invarianza delle leggi fisiche rispetto ad ogni trasformazione di coordinate.

Nel 1930 Paul Dirac afferma che la concezione dell'universo come «un'associazione di enti osservabili in moto secondo definite leggi di forze» è sempre più lontana dal reale comportamento della materia, le cui leggi fondamentali «non governano in modo diretto l'universo quale esso appare nel nostro modello mentale» (Dirac 1976: XI). «La formulazione di queste leggi richiede l'uso della matematica delle trasformazioni» poiché «nell'universo gli enti importanti appaiono come gli invarianti di queste trasformazioni». Il comportamento degli enti osservabili indagato dalla meccanica quantistica è segnato dalla dualità tra modello corpuscolare e ondulatorio. Sulle orme delle ipotesi dimostrate da Einstein, secondo cui le

onde elettromagnetiche derivate dalle equazioni di Maxwell sono formate da quanti di luce, i fotoni, de Broglie estende la dualità tra rappresentazione corpuscolare e ondulatoria agli elettroni che orbitano intorno al nucleo atomico (Dirac 1976: 166). Heisenberg sottolinea tuttavia come questa duplice natura non vada arbitrariamente proiettata sulla realtà fisica, bensì riguardi il nostro modo di rappresentarla nei modelli teorici. Tali analogie concettuali servono a costruire una rappresentazione intuitiva di fenomeni fisici di cui non riusciamo a cogliere la natura unitaria a causa della parzialità del nostro accesso cognitivo al reale (Heisenberg 2016: 21). Come le onde elettromagnetiche presentano al contempo una composizione particellare, analogamente gli elettroni presentano delle onde associate che ne descrivono il comportamento. Schrödinger, a partire da questa ipotesi, troverà l'equazione che governa l'evoluzione delle onde di de Broglie attraverso una funzione d'onda ψ , che indica la probabilità che in un certo istante l'elettrone si trovi ad orbitare in un certo punto dello spazio. Accostare all'elettrone un fenomeno ondulatorio significa perciò riconoscere che il suo comportamento può essere descritto soltanto in termini probabilistici. Infatti, ciò che possiamo sapere delle coordinate di un elettrone è espresso da un'ampiezza di probabilità che esprime lo spettro di esattezza in cui cogliere la posizione e la quantità di moto dell'elettrone, che in ultima analisi coincide con il loro grado di indeterminazione (Heisenberg 2016: 27–28). Su questi presupposti Heisenberg sviluppa matematicamente le relazioni di indeterminazione, che sanciscono l'impossibilità di determinare simultaneamente, con esattezza, la posizione e la quantità di moto di una particella. Una funzione di trasformazione che collega matematicamente le ampiezze di probabilità associate alle diverse grandezze permette di estendere questa relazione ad «ogni coppia di variabili canoniche coniugate» (Heisenberg 2016: 30). Il principio di indeterminazione calcola dunque i limiti di esattezza relativi alla conoscenza simultanea di diverse variabili che descrivano lo stato di un sistema fisico. Alla base delle relazioni di indeterminazione, risiede l'idea secondo cui ogni esperienza di osservazione che rende possibile la misura di una variabile, perturba necessariamente la conoscenza delle altre variabili (Heisenberg 2016: 31). Su queste premesse, sembra che le conoscenze accumulate relativamente ad un sistema fisico non possano porsi come condizioni iniziali dei calcoli relativi al suo comportamento futuro, poiché ogni misura particolare altera l'oggetto di riferimento. Se la predizione deterministica era legata al concetto di traiettoria, che descrive il moto di un corpo indicandone per ogni istante la posizione in funzione

della velocità, nel mondo quantistico non è più possibile ottenere simultaneamente queste informazioni: al concetto di traiettoria subentra la rappresentazione nello spazio delle fasi di un pacchetto di onde di probabilità (Heisenberg 2016: 44). L'operazione di misura non fornisce più l'accesso ad una descrizione univoca e deterministica del reale, ma contribuisce a configurare una distribuzione di probabilità che esprime il punto d'incontro tra i limitati appigli dell'osservazione e la molteplicità dei percorsi possibili che attraversano lo spazio delle fasi.

Le grandezze coinvolte nella teoria dei quanti sono tensori definiti dalla direzione del loro asse principale, un vettore che indica lo stato fisico del sistema⁽²⁾. Secondo il *principio di sovrapposizione*, postulato della meccanica quantistica, lo stato di una grandezza quantica va concepito come la sovrapposizione di due o più stati combinati. «Il carattere intermedio dello stato risultante dalla sovrapposizione» dipende dunque dal fatto che «la probabilità di ottenere un particolare risultato in un'osservazione è intermedia fra le corrispondenti probabilità degli stati originari» (Dirac 1976: 18). Ogni operazione di misura comporta dunque la combinazione di molteplici vettori di stato, ciascuno dotato di un certo coefficiente di probabilità, dalla cui sovrapposizione emerge l'asse principale del corpo di riferimento. Sui vettori che definiscono gli stati delle grandezze quantiche agiscono inoltre gli operatori lineari, che costituiscono la formulazione algebrica di grandezze quali l'energia, il momento angolare, l'impulso o lo spin. Agli operatori sono dunque associate grandezze fisiche che trasformano lo stato di un sistema: è a livello di queste trasformazioni che emergono le simmetrie proprie della meccanica quantistica. Infatti il valore assunto dagli operatori ci dice come è cambiato il vettore che descrive lo stato quantistico nel corso di una trasformazione. Di conseguenza, il gruppo di simmetria associato a uno stato quantistico contiene le trasformazioni che lasciano un certo operatore invariato. Due stati quantistici sono dunque simmetrici sia rispetto ad una trasformazione che lasci invariato un operatore, sia rispetto ad una permutazione degli elettroni coinvolti. Infatti, «due costellazioni di elettroni, dedotte l'una dall'altra per una permutazione arbitraria degli elettroni, sono indiscernibili», a differenza di quanto accade in fisica classica dove ciascuna particella può essere identificata univocamente dalla propria traiettoria (Weyl 1964: 132).

(2) I tensori sono entità matematiche dotate di assi che ne fissano le coordinate in uno spazio vettoriale.

3. Rottura di simmetria e genesi del nuovo

Quando, nel 1928, Paul Dirac formulò un'equazione per descrivere il moto degli elettroni che rispettava la simmetria relativistica ed era al contempo compatibile con il formalismo matematico generale della meccanica quantistica, emerse un problema. Infatti, l'equazione presentava per ogni soluzione a energia positiva una soluzione speculare a energia negativa a cui Dirac decise di attribuire una realtà fisica nel quadro della meccanica quantistica (Barone 2013: 108). Nel '31 il fisico britannico si spiegò questi stati ad energia negativa introducendo l'esistenza di una nuova particella, con massa analoga a quella dell'elettrone ma carica opposta: l'antielettrone. L'anno successivo fu scoperta nei raggi cosmici una particella che presentava queste caratteristiche e fu battezzata *positrone*. L'antimateria faceva così il suo ingresso nella fisica, come componente nascosta dell'universo teoricamente ipotizzata e poi scoperta per ragioni di simmetria. L'operazione che permette di passare da una particella alla corrispondente antiparticella è una trasformazione di simmetria discreta, detta coniugazione di carica, che mantiene inalterate tutte le grandezze spazio-temporali ma inverte il segno della carica elettrica (Close 2013: 205). Introducendo gli studi sull'antimateria nel contesto delle ricerche cosmologiche possiamo osservare il suo ruolo centrale rispetto al processo di generazione dell'universo descritto nel modello del Big Bang. Come è noto, secondo questa teoria cosmologica nei primi istanti della sua nascita, che possiamo far risalire a circa 13,7 miliardi di anni fa, l'universo aveva una temperatura straordinariamente elevata e le forze gravitazionale, elettromagnetica, debole e forte costituivano un tutt'uno (Berra 2013: 104-111 e Close 2013: 211-219). Il primordiale plasma cosmico andò incontro a processi di progressiva espansione e raffreddamento, ponendo le condizioni per la formazione di addensamenti che formarono le prime particelle e per l'avvio della nucleosintesi. Il costante calo dell'energia termica provocò un rallentamento del moto degli elettroni, i quali finirono per essere attratti dai neonati nuclei andando a formare gli atomi neutri. Il processo che abbiamo schematicamente tracciato è scandito da fenomeni di rottura delle simmetrie che identificano l'universo primordiale negli istanti della sua genesi, come la perfetta simmetria tra materia e antimateria⁽³⁾. Vi fu probabilmente una fase in cui,

(3) Si può trarre tale conclusione poiché tanto le ricerche teoriche quanto le simulazioni degli acceleratori di particelle (LEP e LHC presso il Cern di Ginevra), inducono a credere che l'attuale asimmetria della materia rispetto all'antimateria derivi dal venir meno di una precedente condizione di simmetria.

in un plasma uniforme di materia e antimateria, la generazione di particelle e antiparticelle simmetriche implicava fenomeni di annichilazione che producevano fotoni, cioè energia, i quali scontrandosi si trasformavano nuovamente in materia sotto forma di coppie particella–antiparticella. Con il progressivo raffreddarsi dell’universo in espansione, giunse un momento in cui l’energia disponibile permise soltanto la prosecuzione dell’annichilazione delle coppie di particelle e antiparticelle e la loro produzione simmetrica finì per arrestarsi. La simmetria si rompe, innescando la produzione dell’universo materiale che conosciamo.

Attraversando alcuni momenti della fisica del Novecento abbiamo cercato di cogliere la profondità del ruolo giocato dalle simmetrie nella costruzione delle teorie fisiche. Nel passaggio dalla fisica classica alla relatività l’osservazione di stati fisici che rompevano le simmetrie galileiane ha messo in rilievo la parzialità del gruppo di simmetria in questione, inducendo a cercarne uno più ampio e in grado di descrivere sistemi fisici più generali, il gruppo di Poincaré. Le rotture di simmetria presentano dunque al ricercatore stati in cui le leggi che dovrebbero governare i fenomeni vengono meno, in corrispondenza di trasformazioni del sistema a cui non si associano invarianti o quantità conservate. Come afferma Weyl, se la natura non eccedesse mai le sue leggi «ogni fenomeno possiederebbe la simmetria totale delle leggi universali della natura» (Weyl 1964: 35). La rottura di simmetria delle leggi si fa portavoce della contingenza dei fenomeni naturali, dimensione in cui il mutamento non produce invarianze ma conduce a stati inediti e imprevedibili. Se da un lato le simmetrie contribuiscono a fondare i domini di validità delle leggi della natura e consentono di definire le proprietà sostanziali degli oggetti di esperienza, d’altra parte le rotture mostrano la parzialità di queste leggi nel «determinare il mondo» e la natura accidentale di attributi presunti essenziali. La rottura di una configurazione simmetrica non comporta soltanto una perdita di equilibrio e un’erosione dell’identità, ma inaugura nuovi itinerari possibili che abitano domini dello spazio delle fasi sino a quel momento inesplorati (Longo Montévil 2014: 131).

La natura feconda della rottura di simmetria, a cui abbiamo alluso citando la rottura della simmetria tra materia e antimateria nelle fasi aurorali del nostro universo, emerge anche da un teorema dimostrato nel 1961 dal fisico inglese Jeffrey Goldstone. Consideriamo un sistema modello con il suo gruppo di simmetria continuo. La rottura spontanea di una simmetria globale in uno stato del sistema produce una fluttuazione a lungo raggio che trasforma nello stesso modo l’intero sistema (Longo Montévil 2014: 133). Tale fluttuazione

quantistica corrisponde, in termini corpuscolari, ad una particella priva di massa che prese il nome di bosone di Goldstone. Poiché in natura non esistono particelle di questo tipo, Peter Higgs propose di considerare simmetrie locali spontaneamente rotte, *simmetrie di gauge*, non più simmetrie globali come nel caso del teorema di Goldstone. Higgs arrivò così a dimostrare che la rottura spontanea di una simmetria di gauge genera una particella di massa non nulla, il bosone che prese il suo nome (Barone 2013: 156). Ci troviamo dinnanzi al principio di simmetria che propaga quantità invarianti, contribuendo a definire una identità sostanziale che permane nel mutamento, e alla sua rottura che stravolge il fondamento identitario producendo nuove possibilità d'individuazione. Qualcosa di analogo accade con il gesto di misura in meccanica quantistica. La misura, infatti, rompe la natura intrinseca e unitaria dell'evoluzione del sistema, inducendolo a intraprendere un certo percorso tra i molteplici contemplati nello spazio delle fasi. In questo frangente si rompe la simmetria tra gli stati possibili, invarianti rispetto alle trasformazioni del loro gruppo di simmetria, e la realtà fisica *diviene* in relazione al gesto percettivo-cognitivo. La rottura di simmetria ci offre gli strumenti concettuali per spiegare questa dinamica eludendo la contrapposizione tra polo soggettivo e oggettivo.

Rievochiamo per un momento al frammento di Anassimandro, che associa alla rottura di simmetria un processo di ontogenesi. L'asimmetria tra il nulla originario e le cose, istituita nel processo del venire all'esistenza, viene ricomposta ed espiata attraverso la reversibilità della dimensione temporale, che ristabilisce l'invarianza laddove si era innescato un mutamento irreversibile. L'asimmetria temporale implicata nel divenire irreversibile dei fenomeni descrive una realtà differente rispetto all'universo newtoniano attraversato da traiettorie deterministiche e reversibili. Nel cambiamento di prospettiva rispetto alla temporalità dei fenomeni naturali, uno snodo decisivo è costituito dalla nascita della termodinamica agli inizi dell'Ottocento (Prigogine, Stengers 1981: 110-130). Nel 1811 Fourier elabora la teoria della propagazione del calore nei solidi, osservandone il comportamento non riconducibile alla fisica newtoniana a causa della sua irreversibilità. Accanto agli interessi puramente teorici, in quegli anni, l'irreversibilità della propagazione del calore poneva un problema tecnologico relativo allo scarto tra rendimento ideale e rendimento reale delle macchine industriali a causa della dissipazione dell'energia. Con l'introduzione del concetto di entropia, da parte di Clausius nel 1865, alle implicazioni tecnologiche del nesso tra propagazione irreversibile del calore e perdita di rendimento delle macchine si accosta

il problema cosmologico della relazione tra i concetti di conservazione e reversibilità (Prigogine, Stengers 1981: 124). Il tempo non deve per forza essere reversibile e dunque simmetrico per produrre nel suo fluire delle quantità conservate, infatti, anche nelle reazioni fisico-chimiche irreversibili può esservi conservazione di energia. L'entropia costituisce una «traccia dell'attività spontanea e intrinseca della materia», che viene manipolata nella sua evoluzione spontanea ma può essere controllata solo parzialmente. Nei processi irreversibili si può leggere dunque la tendenza dell'entropia ad aumentare progressivamente sino al raggiungimento dell'equilibrio termodinamico. L'interpretazione probabilistica dell'evoluzione termodinamica, introdotta da Boltzmann, coglie l'evoluzione di un sistema verso stati di crescente probabilità e disordine, sino ad una situazione di equilibrio e simmetria in cui si esauriscono le potenzialità evolutive. Nel corso di questo processo si realizza il graduale oblio dell'asimmetria delle condizioni iniziali, considerata come condizione improbabile rispetto al complesso delle configurazioni possibili. La temporalità irreversibile dei fenomeni termodinamici comporta dunque l'attenuarsi spontaneo dell'asimmetria che ne individua la peculiare forma di improbabilità, a causa di una tendenza intrinseca verso stati simmetrici e probabili (Prigogine, Stengers 1981: 132). La termodinamica non lineare si spinge oltre, considerando sistemi che hanno oltrepassato la loro soglia di stabilità e si trovano dunque lontani dall'equilibrio. Nel mondo dei sistemi instabili non vale più la probabilità che soggiace al principio d'ordine di Boltzmann, e esiste la possibilità che alcune fluttuazioni, invece di manifestarsi e poi regredire, si amplifichino fino ad interessare l'intero sistema producendo la genesi di un nuovo comportamento. L'amplificazione di una fluttuazione locale sul piano macroscopico costituisce una struttura dissipativa che intensifica la correlazione tra le parti del sistema considerato e può dar luogo a una sua riorganizzazione globale. In condizione lontane dall'equilibrio, di conseguenza, il comportamento generale del sistema non può più essere dedotto da leggi universali poiché si innescano processi di organizzazione irreversibili e altamente specifici (dunque improbabili, asimmetrici) che generano comportamenti qualitativamente differenti. Se si conduce un sistema oltre la soglia di stabilità, agendo su un parametro di controllo, si raggiunge un punto di biforcazione nel quale la struttura dissipativa diventa instabile rispetto alle fluttuazioni. La biforcazione produce una rottura di simmetria da cui emerge un processo di auto-organizzazione dotato di una componente irriducibile di casualità (Prigogine, Stengers 1981: 163). Il susseguirsi delle rotture di simmetria che generano le biforcazioni scandisce «il cammino storico lungo il quale

il sistema si evolve». Nel mondo termodinamico, l'asimmetria temporale che orienta il divenire innesca dinamiche irreversibili di organizzazione che individuano, non identificano, un sistema rompendo le simmetrie dei suoi stati stabili e generando così nuove possibilità di comportamento e nuove prospettive di sviluppo.

La rottura di simmetria innesca dunque processi di ontogenesi che individuano gli oggetti nell'irreversibilità della loro storia e nell'imprevedibilità della loro crescita. Si tratta di una forma d'individuazione differente rispetto all'attribuzione di identità attraverso la ricerca dell'invarianza nel mutamento: in una concezione asimmetrica del divenire «è la dissimmetria che crea il fenomeno» (Curie 1894: 400), alle trasformazioni che conservano un'identità subentrano così trasformazioni che generano differenze.

4. Relazioni asimmetriche nel *divenire altro*

Abbiamo osservato come la costruzione dell'oggettività scientifica si basi su alcune «determinazioni obiettive» che emergono dalle simmetrie delle dinamiche considerate e consentono di attribuire loro un'identità oggettiva. In quanto «condizioni di possibilità per la costruzione dell'oggettività fisica» le simmetrie pongono vincoli che «consentono alle relazioni causali di manifestarsi e di agire» sugli oggetti (Bailly, Longo 2006: 221). Tuttavia, la causalità efficiente che si esprime nell'accadere contingente dei fenomeni tende a rompere le simmetrie, causando una perdita d'invarianza e generando una trasformazione irreversibile che innesca nuove relazioni causali. Il tessuto teorico di relazioni dispiegato dall'avvicinarsi di configurazioni simmetriche e rotture richiede dunque una temporalità orientata e complessa, che attribuisce una dimensionalità asimmetrica all'individuazione.

Per indagare più a fondo il ruolo dell'asimmetria come motore dell'individuazione ci serviremo dei concetti simondoniani di disparazione e trasduzione. Simondon innesta l'individuazione nella realtà preindividuale, ossia in quella fase dell'essere carica di potenziali e prossima allo sfasamento che innesca le operazioni di transizione verso il reale individuato. In questo passaggio i potenziali non si esauriscono del tutto, ma permangono come correlato dell'individuo nell'«ambiente associato», che funge da riserva di energie preindividuali contestuale all'individuato (Simondon 2005: 33). Tra individuo e ambiente associato si istituisce una correlazione inscindibile che impedisce di risalire in modo reversibile e senza scarti dall'essere individuato alla sua genesi.

La realtà preindividuale costituisce una fase in cui l'essere «include un'incompatibilità in rapporto a sé stesso» espressa da forze di tensione o «da un'impossibilità di relazione tra i termini estremi delle dimensioni» (Simondon 2005: 34). Questo stato di disparazione costituisce la condizione preliminare di ogni individuazione. Infatti, la tendenza dell'essere a sfasarsi in rapporto a sé stesso, la sua non-unità e non-identità, preludono all'innescò di operazioni che generano un ordine di grandezza medio tra le dimensioni disperate. Il divenire dell'essere, di conseguenza, consiste nella «risoluzione di un'iniziale incompatibilità ricca di potenziali» e associa ad uno stato di disparazione un processo ontogenetico che implica un'opera di mediazione. L'individuazione, che provoca la comparsa di fasi dimensionali nel preindividuale tendente a sfasarsi, scandisce il divenire come processo di conservazione e simultaneamente di trasformazione.

L'essere che si sfasa in rapporto a sé stesso mantiene un'unità non identica nella propria trasformazione individuante, un'«unità trasduttiva» in cui il dispiegarsi dell'individuazione è legato all'invenzione di dimensioni organizzatrici della realtà disparta (Simondon 2005: 43). L'unità trasduttiva dell'essere emerge dunque soltanto nel divenire, ossia nella dimensione trasformativa dove la disparazione trova forme di ricomposizione senza mai estinguersi del tutto, ma permanendo come motore di ulteriori individuazioni. La trasduzione indica il movimento strutturante e individuante correlativo alla disparazione problematica. Nel corso del processo, prende forma una struttura di coerenza tra termini estremi che affiorano in uno stato di disparazione solcato dalla tensione preindividuale e da un'«incompatibilità ontogenetica». I termini inconciliabili non preesistono all'operazione trasduttiva, ma emergono come realtà disperate particolari dalla «tensione primigenia del sistema dell'essere eterogeneo». Lo stato di disparazione proprio della realtà preindividuale non comprende dunque individuati inconciliabili, bensì dinamiche relazionali di incompatibilità ed eterogeneità, non vincolate a termini, che diventano ontogenetiche poiché contengono possibilità di risoluzione tramite processi di trasduzione. L'asimmetria insita nella disparazione non si configura come rottura di una simmetria, bensì come condizione differenziale che si situa all'origine di ogni simmetria possibile. Come la disparazione non deriva dalla rottura di un equilibrio o dalla frammentazione di un'unità trasduttiva, ma è la dimensione propria del divenire che trova un vincolo simmetrico negli individui strutturati, analogamente, l'asimmetria non deriva necessariamente dalla perdita di un'invarianza originaria, ma dispiega i potenziali che agiscono nella costruzione degli itinerari di sviluppo.

La trasduzione propaga l'attività di individuazione su tre livelli, «fisico, vitale e psico sociale», a cui corrispondono «domini di trasduttività» in cui inquadrare i fenomeni in senso operativo e relazionale. L'individuazione fisica consiste nella relazione attiva che limita la realtà individuata e al contempo espande l'operazione oltre i propri limiti, amplificandone la singolarità d'innescò. La «realtà di una relazione costituente» situata al limite dell'individuo fisico genera «un sistema di risonanza interna singolare», in stato di equilibrio metastabile, che emerge dalla relazione allagmatica tra due ordini di grandezza, uno superiore e uno inferiore all'individuo (Simondon 2005: 86). La peculiarità dell'individuazione fisica risiede dunque nella sua natura liminare, che si traduce nell'attività costitutiva di un'esteriorità potenzialmente individuabile e di una dimensione topologicamente interna che precede geneticamente il limite. Il paradigma elementare dell'individuazione fisica è offerto dal processo di cristallizzazione, che determina il passaggio da uno stato fisico amorfo a uno stato strutturale cristallino tramite la correlazione di variazioni strutturali e energetiche (Simondon 2005: 86). L'operazione di individuazione si innesca a partire da uno stato energetico metastabile, ricco di potenziali, e richiede l'intervento di una singolarità d'innescò della strutturazione che costituisca una «condizione informativa non immanente» al sistema considerato. Qualora sussistano simultaneamente entrambe le condizioni, una condizione energetica immanente e una condizione evenemenziale apportata dalla singolarità storica, la trasformazione innescata potrà costituire un processo di individuazione fisica. La genesi di un «individuo cristallo» in una materia amorfa comporta l'innescò di un cambiamento di stato da parte di un germe strutturale che interagisce con il corpo amorfo, a condizione che questo si trovi in equilibrio metastabile. Il germe cristallino costituisce la singolarità non immanente che innescò l'orientamento strutturante attivo da cui emerge l'individuo. Affinché l'operazione di innescò risulti efficace, è necessario che la singolarità si faccia promotrice di una struttura compatibile con la sostanza amorfa di partenza. Se la configurazione strutturale proposta dalla singolarità risulta coerente con la conformazione della sostanza amorfa, il germe potrà sfruttare l'energia potenziale per esercitare la propria azione modulatrice nel processo di strutturazione. Detto altrimenti, per superare la disparazione sussistente tra la struttura virtuale del corpo amorfo e la struttura attuale della singolarità d'innescò occorre instaurare un rapporto *analogico* tra le due dimensioni dell'operazione (Carrozzini 2005: 50–51). L'analogia consiste dunque in una relazione di risonanza, obiettiva e teorica, che si sviluppa a partire da

un'asimmetria tra processi disparati, i quali scoprono una prospettiva di accordo e di simmetria possibile attraverso un'operazione di individuazione. La disparazione asimmetrica tra germe strutturale e corpo amorfo genera relazioni analogiche che mettono a frutto i potenziali preindividuali, accostandoli ad un'ipotesi individuante che si tramuta così in progetto. La condizione di riuscita dell'operazione consiste nella costruzione di una struttura di compatibilità che integri le realtà disparate tutelandone l'eterogeneità. Un essere simmetrico rispetto a sé stesso e alle alterità che lo limitano, osserva Simondon, sarebbe statico nella propria invarianza e conserverebbe un'identità nel proprio divenire. Perché un essere muti, si trasformi e acquisisca nuove proprietà di carattere relazionale, ossia, perché un essere si individui, è necessario che il suo divenire si interrompa in accessi di individuazione che costituiscono asimmetrie in una temporalità irreversibile. «La temporalità, poiché esprime o costituisce il modello più perfetto dell'asimmetria (il presente non è simmetrico al passato, poiché il senso del percorso è irreversibile) si rivela necessaria all'esistenza dell'individuo. [...] Secondo questa dottrina, si potrebbe affermare che il tempo è relazione e che non ci sono altre relazioni se non l'asimmetria stessa» (Simondon 2005, 124). La temporalità relazionale e asimmetrica necessaria all'esistenza dell'individuo genera il divenire altro, il processo allagmatico nel corso del quale l'essere si individua attraverso operazioni trasduttive che stabiliscono un parziale e contingente regime simmetrico. L'ontogenesi dell'individuo cristallo stravolge l'identificazione del divenire con una trasformazione di simmetria nella quale le invarianze conservate possono accidentalmente perdersi: l'operazione di individuazione, infatti, conserva l'asimmetria come motore che operazioni trasduttive sempre cariche di potenziali disparati. L'asimmetria, di conseguenza, rappresenta l'aspetto fecondo della disparazione, l'affermatività potenziale immanente al preindividuale che prelude alle operazioni allagmatiche che individuano nel «divenire altro».

A differenza di quanto accade nel mondo fisico, l'individuazione biologica è stratificata su livelli molteplici e comporta dunque una costante tensione tra integrazione e differenziazione. L'attività di trasduzione che caratterizza i processi di ontogenesi e filogenesi si radica nella «trasduttività primaria» del mondo dei viventi, quella temporale. Simondon avverte che i fenomeni biologici, come accadeva in termodinamica, richiedono una temporalità asimmetrica che è la sola compatibile con un'idea di sviluppo come processo che genera nuove e imprevedibili possibilità d'individuazione.

La dinamica processuale che innesta l'attività trasduttiva sugli stati di disparazione aiuta a cogliere l'asimmetria non soltanto come la rottura di una configurazione simmetrica con la conseguente perdita di un'invarianza, ma come la dimensione puramente trasformativa in cui l'invarianza può emergere. L'asimmetria del divenire tende a produrre percorsi d'individuazione nei quali si instaurano regimi simmetrici sempre trasformati, ricostruiti, rimessi in questione. L'asimmetria è ciò che fa di una relazione una relazione feconda, ciò che scopre nel divenire altro l'unica via per essere individuo.

Riferimenti bibliografici

- Anassimandro, *12B1 DK*, in Pasquinelli A. (a cura di), *I presocratici, frammenti e testimonianze*, Einaudi, Torino 1976.
- Agazzi E. (a cura di), *Seminari interdisciplinari di Venezia. La simmetria*, il Mulino, Bologna 1973.
- Bailly F., Longo G., *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*, Hermann, Paris 2006.
- Barone V., *L'ordine del mondo. Le simmetrie in fisica da Aristotele a Higgs*, Bollati Boringhieri, Torino 2013.
- Berra P., *Simmetrie dell'universo. Dalla scoperta dell'antimateria a LHC*, Dedalo edizioni, Bari 2013.
- Cavazzini A., Gualandi A. (a cura di), *Logiche del vivente. Evoluzione, sviluppo, cognizione nell'epistemologia francese contemporanea*, "Discipline filosofiche", XIX I, Quodlibet, Macerata 2009.
- Chiurazzi G., *Dynamis. Ontologia dell'incommensurabile*, Guerini, Milano 2017.
- Close F., *Lucifer's legacy: The Meaning of Asymmetry*, Dover publications, New York 2013.
- Curie P., *Sur la symétrie dans les phénomènes physiques, symétrie d'un champ électrique et d'un champ magnétique*, «Journal de Physique Théorique et Appliquée», 3 (1), 1894, pp. 393–415.
- Dirac P.A.M., *The Principles of Quantum Mechanics*, Oxford University Press, 1958; *I principi della meccanica quantistica*, tr. it di L. Casalini e V. Silvestrini, Bollati Boringhieri, Torino 1976, p. XI.
- Einstein A., *Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie (gemeinverständlich)*, F. Vieweg, Braunschweig 1917; *Relatività: esposizione divulgativa*, a cura di Bruno Cermignani, tr. it. Virginia Geymonat, Bollati Boringhieri, Torino 2011 (edizione ebook).
- Einstein A., *L'elettrodinamica dei corpi in movimento* (PDF), «Annalen der Physik», 17, 1905, pp. 891–921.

- Feynman R., *The Character of Physical Law*, MIT Press, Cambridge 1967.
- Galilei G., *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*, a cura di Antonio Beltràn Marì, BUR, Milano 2003.
- Heisenberg W., *Die physicalischen Prinzipien der Quantentheorie*, S. Hirzel Verlag, Leipzig 1930; *I principi fisici della teoria dei quanti*, tr. it. di M. Ageno, Bollati Boringhieri, Torino 2016.
- Longo G., Montévil M., *Perspectives on organisms. Biological Time, Symmetries and Singularities*, Springer, Heidelberg 2014.
- Mathieu V., *La simmetria in metafisica*, in *Seminari interdisciplinari di Venezia. La simmetria*, a cura di E. Agazzi, il Mulino, Bologna 1973, pp. 401–406.
- Melandri E., *La linea e il circolo. Studio logico-filosofico sull'analogia*, Quodlibet, Macerata 2004.
- Poincaré H., *Sur la dynamique de l'électron* (PDF), «Rendiconti del Circolo matematico di Palermo», vol. 21, 1906.
- Simondon G., *L'individuation à la lumière des notions de forme et d'information*, Millon, Grenoble 2005; *L'individuazione alla luce delle nozioni di forma e di informazione*, a cura di G. Carrozzini, Mimesis, Milano 2011.
- Simondon G., *Du mode d'existence des objets techniques*, Aubier, Paris 1989.
- Van Fraassen B., *Laws and symmetry*, Oxford University Press, Oxford 1989.
- West-Eberhard M.J., *Developmental Plasticity and Evolution*, Oxford University Press, Oxford 2003.
- Weyl H., *Symétrie et mathématique moderne*, tr. fr. a cura di G. Th. Guilbaud, Flammarion, Paris 1964.
- Weyl H., *Philosophy of Mathematics and Natural Sciences*, Princeton University Press, Princeton 2009; *Filosofia della matematica e delle scienze naturali*, tr. it. Alfonso Caraccio di Forino, Bollati Boringhieri, Torino 1967.