

Originale: Longo G. and Montévil M. (2012) The inert vs. the living state of matter: extended criticality, time geometry, anti-entropy — an overview. *Frontiers Physiology* 3:39. doi: 10.3389/fphys.2012.00039

Tradotto e rivisto per *Epistemologie. Critiche e prospettive contemporanee*, marzo 2023

**Giuseppe Longo, Mäel Montévil**

## **Materia inerte contro materia vivente: criticità estesa, geometria del tempo, anti-entropia – una panoramica**

### **Sunto**

La singolarità fisica dei fenomeni del vivente sarà analizzata attraverso il confronto con alcuni concetti guida delle teorie dell'inerte. Evidenzieremo analogie concettuali, trasferimenti di metodologie e di strumenti teorici tra la fisica e la biologia, oltre ad indicare significative differenze e talvolta dualità logiche. Al fine di rendere le fenomenalità biologiche intelligibili, introdurremo estensioni teoriche di alcune teorie fisiche. In quest'articolo di sintesi dunque riassumeremo e proporremo un quadro concettuale unificato per le principali conclusioni ricavate da un lavoro che abbraccia un libro e numerosi articoli degli autori, citati nel corso della trattazione<sup>1</sup>.

### **1. Una definizione di vita?**

Nel corso dell'antichissimo dibattito tra fisicalismo e vitalismo, si è spesso trattato di *definire* cos'è il fenomeno della vita. Un piccolo ma notevole libro di Schrödinger (“Che cos'è la vita?”) ha contribuito a ravvivare il dibattito in un modo che riteniamo rilevante, almeno nella sua seconda parte, e al quale ci riferiremo nella sezione 3.2. Per il momento, precisiamo come affronteremo la questione:

**Primo** Una definizione “ideale” dei fenomeni vitali sembra fuori questione: non esiste un'*idea platonica* della vita che possa essere afferrata in maniera definita o con la stabilità e l'invarianza concettuale massimale proprie delle nozioni matematiche (come lo è la definizione o l'*idea* del triangolo...). Si tratta piuttosto di definire alcune *nozioni operative* che permettano di elaborare concetti con i quali lavorare per un approccio sistemico in biologia. Inoltre, la fisica non definisce la “materia” se non per mezzo di una dualità o contrapposizione operativa (rispetto al concetto di energia o a quello di vuoto o di anti-materia, per esempio). Un'ulteriore “impossibilità dimostrabile di definire l'oggetto di studio”, estremamente rigorosa, verrà presentata in appendice. Si noti che l'approccio di Darwin all'evoluzione non utilizza né ha bisogno di una definizione della vita, ma ha bisogno di porre i principi di una storia degli organismi, ovvero dell'evoluzione.

**Secondo** Ogni tentativo operativo, a nostro avviso, deve essere fatto con riguardo alla specifica fenomenalità dei fenomeni vitali: ad esempio, è possibile che per qualsiasi lista finita scelta di proprietà “definitorie” della vita, esista un informatico sufficientemente talentuoso in grado di crearne la corrispondente immagine virtuale in maniera da restituirla sullo schermo di un computer (è abbastanza semplice programmare un sistema “autopoietico” (Varela et al., 1974;

---

<sup>1</sup> Un'attività che deve moltissimo alle collaborazioni con Francis Bailly, deceduto nel 2009.

Varela, 1989) o un ciclo metabolico formalizzato alla maniera di Rosen, 1991 – cfr. Mossio et al., 2009, per esempio). Tuttavia, non solo ogni essere umano, ma anche il più semplice degli animali lo riconoscerebbe come una serie di “immagini virtuali” non viventi (tipicamente rilevabili attraverso iterazione identica, come indirettamente suggerito dal gioco dell’imitazione di Turing - vedi Longo (2021), in particolare la “lettera Turing” in appendice di quel libro).

Si tratta piuttosto di proporre un’intelligibilità possibilmente robusta di una fenomenalità nella sua propria storia costitutiva, tenendo presente il fatto che *ogni costituzione è contingente*, è cioè risultato di una *storia* – sia la costituzione (evoluzione) della vita che la nostra comprensione storica di essa. Detto altrimenti, la vita ed i nostri modesti tentativi di afferrarla si dispiegano su un’evoluzione materiale (meglio ancora: su una delle *possibili* evoluzioni, che ha luogo su *questa* Terra, in *questi* ecosistemi e con *questa* materia fisica e storia). Per quanto riguarda la vita, il nostro punto di vista include ciò che i biologi esprimono spesso dicendo che nulla può essere compreso in biologia se non alla luce dell’evoluzione (darwiniana e in questo mondo).

Dovrebbe essere chiaro che in questa sede non discutiamo come “la vita possa essere emersa dall’inerte”, ma piuttosto esploriamo come passare dalle attuali *teorie* dell’inerte a una *teoria* del vivente sufficientemente robusta. In particolare, in questa sede accenniamo a un’analisi della singolarità fisica e della specificità dell’oggetto vivente, guardando prima alle proprietà che vorremmo avere (o *non avere*) in qualsiasi teoria dello “stato vivente della materia”. Si tratta infatti di un tentativo *incompleto* (vedi appendice) di fornire un quadro concettuale che possa guidare analisi più specifiche. Presentiamo qui una breve sintesi, in un esplicito gioco di rimandi tra fisica e biologia, che può solo indirizzare il lettore interessato verso i lavori presentati in bibliografia. In un’appendice metodologica, prenderemo in prestito dalla logica matematica una comprensione del ruolo dell’incompletezza nei “nostri sforzi teorici verso la conoscenza” (per dirlo con le parole di H. Weyl) e della sua relazione con le “definizioni” concettuali o formali, in particolare della vita.

Questo articolo è la revisione in italiano di una sintesi di numerosi anni di lavoro, sarà spesso quindi incompleto nelle evocazioni delle idee presentate. Ogni volta però i riferimenti permettono di ricostruirle con più rigore e, comunque, si rinvia al libro Longo, Montévil (2014) per una trattazione più organica - si vedano anche Bailly, Longo (2011) e Soto et al. (2016).

## **2. Dalla fisica alla biologia attraverso estensioni teoriche e dualità concettuali**

Varie teorie fisiche (classica, relativistica, quantistica, termodinamica...) rendono intelligibile l’inerte in maniera notevole. Esistono incompatibilità significative (i campi relativistico e quantistico non sono unificati; sono infatti incompatibili). Tuttavia, alcuni grandi principi (di costruzione concettuale, cfr. Bailly, Longo, 2011) conferiscono una grande unità alla fisica teorica contemporanea. Il principio geodetico e la sua formulazione attraverso “simmetrie” (Weyl, 1952; van Fraassen, 1989; Bailly, Longo, 2011) permettono di cogliere, sotto una prospettiva concettualmente unitaria, una vasta area di conoscenze riguardante l’inerte. La biologia, essendo stata ad oggi meno “teorizzata” e matematizzata, può progredire nella costruzione dei propri quadri teorici anche grazie ad analogie, estensioni e differenziazioni riguardanti teorie fisiche, come pure ricorrendo a dualità concettuali. Per quanto riguarda le dualità, ne citeremo una che è, a nostro avviso, fondamentale (e ampiamente affrontata in altri lavori, Frezza, Longo, 2010; Bailly, Longo, 2011; Longo, Montévil, 2011a): la *genericità* degli oggetti fisici (la loro invarianza teorica e sperimentale) e la *specificità* delle loro traiettorie (la loro ricostruzione per mezzo del principio geodetico) è, dualmente, invertita nella *specificità* (individuazione e storia) dell’oggetto vivente e nella *genericità* delle traiettorie (evolutive, ontogenetiche: sono solo dei “possibili” all’interno di spazi – ecosistemi – in co-costituzione).

## 2.1 Aspetti fisici.

### 2.1.1 Gli aspetti esclusivamente fisici.

Escludiamo dalle nostre analisi quelle proprietà che provengono dalla fisica (dove risultano spesso essenziali), ma il cui trasferimento in biologia è, dal nostro punto di vista, fuorviante:

1. La *genericità* degli oggetti (l'invarianza teorica e sperimentale degli oggetti fisici – o simmetria per sostituzione) non si applica alla biologia: l'oggetto vivente è storico e individuato; non è “intercambiabile”, in generale o con la generalità della fisica, né teoricamente né empiricamente, ci torneremo.
2. La *specificità* delle traiettorie (geodetiche, in fisica), dato che escludiamo la prevalenza del principio geodetico (non c'è “ottimalità”) per le dinamiche ontogenetiche ed evolutive di “individualità biologiche” – cellule, organismi, specie (che chiamiamo, sinteticamente, “bioloni”); in breve, embriogenesi, sviluppo ed evoluzione non sono traiettorie ottimali, ma *possibili*.
3. La *stabilità* del sistema di riferimento in quanto tale. Oltre che nella fisica classica, anche nella relatività generale e nei rapporti energia/geometria nello spaziotempo, le dimensioni sono fissate e non variano durante l'analisi fenomenica. Invece, lo spazio degli osservabili in biologia, dei fenotipi per esempio, che possono essere descritti anche da nuove “dimensioni”, è esso stesso soggetto a cambiamenti dinamici in un ecosistema. Usando un'analogia parzialmente informale, potremmo dire che lo “spazio delle fasi” (e lo spazio delle possibilità) dei fenomeni vitali è dinamicamente (co)costituito (Longo et al., 2012). Sempre per analogia, osserviamo che nella teoria della relatività, lo spazio-tempo è (co)costituito dalla distribuzione di energia/materia, ma in dimensioni stabili e nello spazio delle fasi pre-dato dalla teoria (“è la teoria che fissa gli osservabili ed i parametri pertinenti” dice Einstein) – mentre in Longo et al. (2012) sosteniamo che le cose stanno diversamente nei processi biologici, in particolare nell'evoluzione. Anzi, essa è proprio data dal cambiamento dei fenotipi e dei parametri pertinenti - prima che apparisse l'emoglobina tutti i processi (e fenotipi) relativi ed i loro parametri semplicemente ... non c'erano; lo stesso si dica per il volo dei vertebrati e tutti i fenotipi correlati, prima che alcuni dinosauri prendessero a volare.

Come discusso in Longo, Montévil (2011a), la genericità degli oggetti fisici e la specificità della loro traiettoria dipendono dalle simmetrie teoriche che permettono di costituirli. In biologia, la nostra ipotesi è che le simmetrie teoriche propriamente biologiche siano instabili. Ciò conduce ad un cambiamento dello status teoretico degli oggetti biologici rispetto alle situazioni fisiche. Discuteremo questo punto più avanti.

### 2.1.2 Proprietà fisiche della “transizione” verso lo stato vivente della materia.

In letteratura, troviamo spesso lavori notevoli riguardanti certe proprietà fisiche, a volte trasferite all'analisi dei fenomeni vitali, ma che nel seguito del testo considereremo nella loro forma esclusivamente biologica (cioè, che troviamo solo nello stato vivente della materia; per esempio, le transizioni critiche, che sono puntiformi in fisica, saranno “estese” nel nostro approccio, cfr. *infra*). In biologia, quindi, *non consideriamo* alcune delle proprietà che discuteremo “in quanto tali”, poiché esse si presentano come componenti dell'analisi dell'inerte; tuttavia forniscono un buon punto di partenza per le riflessioni sui fenomeni della vita (cfr. i riferimenti bibliografici). Per il momento, le evochiamo da una prospettiva fisica (“in quanto tali”) sottolineando che dal nostro punto di vista esse appartengono in parte al vocabolario teorico biologico ma non propriamente:

1. *Criticità* in quanto tale (in fisica, presente nelle transizioni di fase, come un punto matematico rispetto al parametro di controllo) (Jensen, 1998; Zinn-Justin, 2007);

2. *Chiusura organizzativa* in quanto tale (presente nella chimica fisica: micelle, vescicole, ma anche uragani, fiamme – la cui struttura è interamente organizzata secondo principi geodetici, in contrasto con gli organismi viventi, cfr. *infra*);
3. *Plasticità passiva* in quanto tale (presente nei cambiamenti di forma fisica o nei fenomeni di azione/reazione/propagazione alla maniera di Turing, per esempio Longo, 2021);
4. *Proprietà scalari* in quanto tali (presenti in numerosi fenomeni fisici e in particolare nelle transizioni critiche, diffusione anomala, ecc.);
5. Fenomeni di *crescita* in quanto tali (presenti nella crescita dei cristalli, per esempio);
6. *Chiralità* in quanto tale (presente in fisica delle particelle o in chimica, per esempio);
7. Possibili variazioni negative dell'*entropia* (presenti nel passaggio dal disordine all'ordine, nelle transizioni critiche, per esempio),
8. La *dimensionalità* delle quantità fisiche (quasi sempre presente);
9. La *misura* che è intesa classicamente come imprecisione e come un risultato (tranne quando frattale);
10. La *frattalità* in quanto tale di alcuni oggetti e dinamiche (presente in un certo numero di fenomeni fisici, ma anche in *organi* di piante e animali in quanto costretti dal loro ruolo nello scambio di energia e materia) (Weibel, 1991);
11. La chimica delle *macromolecole* e la chimica fisica *in vitro*.

## 2.2 Aspetti biologici

La materialità contingente dei fenomeni vitali include, tipicamente, la chimica fisica specifica della biologia, donde il nostro primo gruppo di proprietà:

### 2.2.1 Alcune proprietà “fisiche” dei fenomeni del vivente:

1. Il ruolo biologico della *chiralità* delle molecole (amminoacidi, zuccheri) nel metabolismo;
2. Varie altre *invarianze* fisiche secondo il livello di organizzazione (le basi chimiche e la struttura geometrica del DNA, relativamente comuni a tutti gli oggetti viventi; le invarianti metaboliche, inclusa la relazione metabolismo/massa/durata, cfr. *infra*).

Oltre alle proprietà fisiche di cui sopra, che si manifestano specificamente (e solo) nei fenomeni vitali, le seguenti fanno certamente parte della *teorizzazione* biologica:

1. Analisi in termini di *substrati fisico-chimici* come le reti di interazione macro-molecolare che possono essere trovate solo nelle cellule;
2. *L'estensione matematica* di alcune leggi fisiche che includono quantità che non appaiono come tali o in modo operativo nella fisica (per esempio, la nostra nozione di anti-entropia negli equilibri metabolici, menzionata più avanti, che estende le equazioni di equilibrio ben note in termodinamica grazie ad una nuova osservabile: l'anti-entropia, appunto (Bailly, Longo, 2009).

### 2.2.2 Il mantenimento dell'organizzazione biologica.

L'organizzazione delle attività fisiologiche (le funzioni degli “orgoni” – organelli, organi, popolazioni, cfr. Bailly et al., 1993; Bailly, Longo, 2011), è spesso accompagnata da una chiusura organizzativa che si compie per mezzo di:

1. Il *metabolismo* e le *attività fisiologiche* (essenziali all'integrazione e alla regolazione) che interagiscono e, di fatto, si sovrappongono;
2. L'accoppiamento tra *vari livelli di organizzazione*, correlati in modo causale, sia “verso l'alto” sia “verso il basso”, in particolare attraverso l'integrazione e la regolazione,

3. La *frattalità* degli orgoni nelle loro funzioni fisiologiche (polmone, sistema vascolare, sistema nervoso... strutture intracellulari);
4. Le *leggi di scala* (l'allometria descrive la temporalità e il metabolismo in funzione della massa biologica) (Brown et al., 2002; West, 2006);
5. L'importanza dei *numeri puri* (senza dimensioni fisiche) e della loro *relativa invarianza* (numero totale dei battiti cardiaci, delle respirazioni... che sono in media costanti per i mammiferi, e anche tra gruppi importanti di specie meno studiate rispetto ai ritmi interni).

Cercheremo di inquadrare concettualmente queste proprietà dello stato vivente della materia per mezzo di concetti relativamente nuovi, incluso quello di *transizione critica estesa* nella sezione 3.1, come luogo e quadro teorico per questi fenomeni che abbiamo semplicemente enumerato sopra.

### 2.2.3 La relazione con l'ambiente

A queste funzioni, dobbiamo aggiungere il rapporto con l'ambiente che non è solo dinamico, ma adattivo e (o *perché*) cognitivo (come lo sono le attività protensionali). Inoltre, la dinamica è anche situata al livello dello spazio di riferimento o, più in generale, dello "spazio delle fasi" (in quanto spazio dei parametri e osservabili rilevanti), poiché un organismo co-modifica il proprio ambiente:

1. *Plasticità adattiva* a tutti i livelli dell'organizzazione, nell'interazione con un ambiente;
2. Il cognitivo, presente non appena c'è vita, risiede, in particolare, nella *capacità di discriminare* (la densità numerabile di punti critici all'interno della zona di criticità estesa menzionata più avanti può rappresentare questa capacità discriminatoria, con passaggi discontinui (ma senza interruzioni) da un punto all'altro);
3. Il principio di *compatibilità* (tendenza a realizzare tutte le possibilità compatibili con i vincoli dati), che giustifica la genericità delle traiettorie evolutive e ontogenetiche;
4. La *specificità* dell'oggetto e, come dicevamo al punto 3, la *genericità* delle traiettorie (contrariamente alla fisica);
5. *I cambiamenti negli spazi alle fasi*, che inducono e permettono la dinamica biologica, anche nel numero di dimensioni descrittive rilevanti (ovvero, torniamo a dire: lo spazio stesso dei parametri e osservabili pertinenti cambia nel corso della dinamica dei fenomeni del vivente, al contrario di quelli delle teorie fisiche, diversi certo da una teoria all'altra, ma fissati una volta per tutte, una volta scelto il quadro teorico, classico, relativistico, quantistico - quest'ultimo per esempio può essere uno spazio di infinite dimensioni, detto di Hilbert, che permette di scrivere l'equazione di Schrödinger, cambiare il numero di particelle in fisica statistica, ma sempre con le stesse caratteristiche osservabili).

Di nuovo, la maggior parte di questi aspetti sono legati a un'instabilità delle simmetrie teoriche biologiche, associate qui alla co-costituzione dell'oggetto biologico e dell'ambiente teoricamente rilevante e... cangiante.

### 2.2.4 Passaggio alle analisi dell'organismo

Le *transizioni critiche* sono ampiamente discusse nell'analisi del passaggio, in particolare, dall'inerte al vivente, (Kauffman, 1993). Come tali, esse descrivono molto bene gli stati dell'inerte che sono abbastanza interessanti anche per la biologia, (cfr. Binney et al., 1992; Mora, Bialek, 2011). In fisica, tuttavia, le "strutture coerenti" appaiono su transizioni puntuali, e normalmente in modo reversibile. Siamo, tuttavia, di fronte ad uno stato vivente della materia quando la criticità è *irreversibile e perdura* (fino alla morte). Affrontiamo questi problemi considerando un organismo come se stesse in una transizione irreversibile "continua" (ininterrotta). Ogni mitosi, in un organismo multicellulare, produce una biforcazione

asimmetrica e la formazione di una nuova struttura di coerenza – nuova matrice tissulare..., come componenti di una transizione critica. Nel nostro approccio, l'intervallo di criticità è quindi esteso nel tempo e in tutti i parametri di controllo rilevanti (temperatura, pressione, ...), cfr. sezione 3.1. L'idea chiave è che tutte le usuali proprietà delle transizioni di fase critiche sono conservate (la formazione di strutture di coerenza, lunghezze di correlazione divergenti, cambiamenti di simmetria ...). Tuttavia, mentre in fisica, queste si applicano solo in un punto topologicamente isolato (almeno questa è la rappresentazione matematica, in cui si applicano i metodi di rinormalizzazione, cfr. sezione 3.1), noi riteniamo che la “transizione” debba essere definita su un intervallo non banale. Questo avviene quando i ritmi (punto 1 *infra* e sezione 3.3), l'attività protensionale (punto 2 e 3.3) e l'organizzazione, in quanto anti-entropia (punto 3 e 4, cfr. anche 3.2), si manifestano assieme.

Possiamo allora concepire (ma questa discussione non è il nostro scopo, in questa sede) che, all'origine della criticità estesa della vita, ci possano essere state particolari transizioni critiche della materia inerte, una transizione globale che all'improvviso ha sovrapposto tutte quelle di cui ci stiamo occupando. Tutte queste possono essere descritte come “biforcazioni” concettuali e materiali, con i loro correlati organizzativi: estensione della criticità a un intervallo, attraverso la formazione di membrane stabilizzatrici e di differenti livelli di organizzazione (come l'anti-entropia), biforcazione della dimensione temporale (ritmi autonomi). Tuttavia, la criticità estesa è un fenomeno continuativo per tutta la vita, ben oltre la sua origine. I cinque punti che seguono saranno al centro della sintesi di questo testo (e sono descritti in dettaglio negli articoli inclusi nei riferimenti). Proponiamo quindi di organizzare queste “biforcazioni”, che segnano il passaggio (concettuale) da uno stato dell'inerte allo stato vivente, come una *costituzione di*:

1. La seconda dimensione temporale, il tempo *compattificato* dei ritmi biologici, ovvero l'aggiunta di una dimensione temporale sotto forma di un cerchio<sup>2</sup>, compattificazione della retta temporale infinita: una spirale che si avvolge lungo il cilindro così generato rappresenta geometricamente i ritmi biologici - cardiaci, respiratori, metabolici ... (Bailly et al, 2011; Longo, Montévil, 2014);
2. La *protensione*, come “gesto proattivo” nell'interazione con l'ecosistema, presente anche nelle forme di vita più semplici;
3. L'*anti-entropia*, come la costituzione e il mantenimento dell'organizzazione (che si oppone alla disorganizzazione – in particolare all'entropia prodotta da tutti i processi irreversibili);
4. La distinzione in *numerosi livelli di organizzazione*, al centro dell'attività di integrazione e di regolazione di ogni unità vivente (che possono essere concettualmente unificati come *orgoni* – organelli, organi, popolazioni – e *bioloni* – cellule, organismi, specie).
5. Un'*instabilità delle simmetrie teoriche* degli oggetti, che può essere vista come una cascata di cambiamenti di simmetria, nel tempo, e che conduce alla variabilità – da intendersi nel senso forte di cambiamenti nelle simmetrie teoriche - con questo facciamo riferimento al ruolo delle simmetrie in fisica: i grandi principi di *conservazione* (energia, quantità di moto ...) sono “simmetrie” nelle equazioni che li esprimono (Bailly, Longo, 2011). La prima e fondamentale instabilità di simmetrie è il primo principio dell'eredità di Darwin: “riproduzione con variazione”, ovvero ad ogni riproduzione, da una cellula ad un grande organismo, la discendenza varierà - un principio di “*non-conservazione*” del fenotipo, se si vuole (ad es., una cellula dà luogo a due cellule leggermente diverse fra loro e da quella originaria; questo è funzionale alla produzione di diversità, dunque alla stabilità stessa del vivente).

---

2 In fisica, viene chiamata compattificazione di uno spazio  $M$  la costruzione di uno spazio prodotto  $M \times C$ , munito della proiezione naturale  $M \times C \rightarrow M$ , dove lo spazio  $C$  è compatto (e d'abitudine ha anche misura finita). Si dice in questo caso che  $M \times C$  è compattificato sullo spazio  $C$ . Nel caso in esempio,  $M$  è lo spazio-tempo usuale dei fenomeni, mentre  $C$  corrisponde a una dimensione temporale ciclica modellizzata da un cerchio. Questa nozione di compattificazione non va confusa con la nozione topologica di compattificazione di una varietà geometrica  $X$ , che corrisponde all'immersione densa di  $X$  in una varietà compatta  $Y$ . [NdT]

In breve, l'intelligibilità dei fenomeni del vivente che proponiamo presuppone l'esistenza ("da qualche parte", "all'origine della vita") di biforcazioni la cui comprensione richiede l'aggiunta delle nuove entità teoriche di cui sopra. Queste possono essere perfettamente compatibili con la teorizzazione fisica (fatto non evidente, viste le incompatibilità esistenti all'interno della fisica, quantistica e relativistica, ad esempio), ma non sono specifiche di quel campo. In questo senso, si tratta di proporre estensioni teoriche compatibili, ma "rigorose", delle teorie dell'inerte. La riduzione può essere un passo ulteriore per il riduzionista interessato, che dovrebbe dimostrare che queste teorie sono prima di tutto conservative (in senso logico: non dimostrano più "teoremi", o proprietà), poi solo apparentemente basate su proprietà "indipendenti", ma in realtà derivabili dai principi delle teorie fisiche esistenti. Non facile, visto che neppure le proprietà dei fluidi incompressibili (idrodinamica) sono derivabili dalle proprietà quantistiche (l'equazione di Schrödinger, diciamo), né da quelle della fisica statistica (Boltzmann). E in una cellula c'è molta acqua....

### **3 La singolarità fisica dello stato vivente della materia.**

Torniamo ora, con qualche dettaglio in più, a queste nuove oggettività rilevanti per il biologico. Con i concetti che suggeriamo non intendiamo in alcun modo definire o caratterizzare la vita. Cerchiamo solo di mettere a fuoco alcune fenomenalità che sembrano particolarmente preminenti e cerchiamo di trattarle in un modo possibilmente robusto a livello concettuale. I tre punti che seguono delineano brevemente il lavoro sviluppato in numerosi articoli, ai quali faremo riferimento di volta in volta.

#### **3.1 Criticità estesa.**

L'interesse biologico delle teorie fisiche della criticità è dovuto in primo luogo al fatto che, in fisica, le *transizioni di fase critiche* sono processi di cambiamento di stato in cui, mediante un cambiamento improvviso (una singolarità rispetto a un parametro di controllo), la struttura globale è coinvolta nel comportamento dei suoi elementi: la situazione locale dipende dalla (è correlata alla) situazione globale. Matematicamente, questo può essere espresso dal fatto che la lunghezza di correlazione tende formalmente all'infinito (è il caso con transizioni di secondo ordine, come la transizione para-/ferromagnetica); fisicamente, questo significa che la determinazione è globale e non locale. In altre parole, una transizione critica è legata a un cambiamento di fase e alla comparsa di comportamenti critici di alcune grandezze degli stati del sistema – magnetizzazione, densità, per esempio – o di alcune delle sue caratteristiche particolari – come la lunghezza di correlazione. Può presentarsi all'equilibrio (flussi nulli) o lontano dall'equilibrio (flussi non nulli). Nel primo caso, gli aspetti fisico-matematici sono piuttosto ben compresi (per quanto riguarda la matematica, rinormalizzazione (Binney et al., 1992), per quanto riguarda il ponte tra descrizione microscopica e macroscopica, la termodinamica), mentre, nel secondo caso, siamo lontani dall'avere teorie altrettanto soddisfacenti.

Alcuni casi specifici, senza particolare enfasi sulla situazione lontana dall'equilibrio, sono stati ampiamente sviluppati e divulgati da Bak, Kauffman e altri (cfr. Bak et al., 1988; Kauffman, 1993; Nykter et al., 2008). I "mucchi di sabbia", la cui criticità si riduce all'angolo di formazione delle valanghe in tutte le scale, la percolazione (cfr. Bak et al., 1988; Laguës, Lesne, 2003) o persino la formazione di un fiocco di neve sono esempi interessanti. La prospettiva assunta è, in parte, complementare a quella di Prigogine: ciò che conta nella formazione di strutture di coerenza non sono le fluttuazioni all'interno di una situazione debolmente ordinata, ma "l'ordine che deriva dal caos" (Kauffman, 1993). Tuttavia, in entrambi i casi le correlazioni potenziali sono improvvisamente rese possibili da un cambiamento di uno o più parametri di controllo per un valore specifico (puntuale) di questo parametro. Per esempio, le forze che attraggono le molecole dell'acqua le une verso le altre, in

quanto ghiaccio, sono potenzialmente già presenti: il passaggio al di sotto di una temperatura precisa, così come il moto browniano decrescente, a un certo valore di pressione e umidità, permette che queste forze si esercitino e conducano tipicamente alla formazione di un fiocco di neve.

Le transizioni critiche devono essere intese anche come improvvisi cambiamenti di simmetria (rottture di simmetria e formazione di nuove simmetrie), e una transizione tra due diversi oggetti fisici macroscopici (due stati diversi), con una conservazione delle simmetrie dei componenti. Le rottture di simmetria specifiche, locali e globali forniscono la varietà di forme organizzate e le loro regolarità (le nuove simmetrie) poiché queste transizioni sono (molto) sensibili alle fluttuazioni in prossimità della criticità. In fisica, la natura puntiforme del “valore critico” del parametro di controllo è una questione matematica essenziale, così come per il trattamento da parte della matematica di “rinormalizzazione” nelle teorie della criticità, (cfr. Binney et al., 1992).

Sulla falsariga degli approcci fisici alla criticità, ma all'interno del quadro concettuale della termodinamica lontana dall'equilibrio, consideriamo i sistemi viventi come “strutture coerenti” in una transizione critica continua (estesa). Lo stato permanente di transizione è mantenuto, ad ogni livello di organizzazione, dalle attività di integrazione/regolazione dell'organismo, cioè dalla sua struttura coerente a livello globale.

In breve, in (Bailly, Longo, 2008; Longo, Montévil, 2011a; Longo, Montévil, 2014), sulla base delle prime idee di Bailly (1991), proponiamo di analizzare l'organizzazione della materia vivente come “transizioni critiche estese”. Queste transizioni sono estese nello spazio-tempo e rispetto a tutti i parametri di controllo pertinenti (pressione, temperatura ecc.), essendo la loro unità assicurata da relazioni causali globali tra i livelli di organizzazione (e dalla loro integrazione/regolazione). Più precisamente, il nostro principale paradigma teorico è fornito dall'analisi delle transizioni di fase critiche, poiché questa forma peculiare di stato critico presenta alcuni aspetti particolarmente interessanti per la prospettiva biologica: la formazione di lunghezze di correlazione estese (matematicamente divergenti) e di strutture di coerenza, la divergenza di alcune osservabili rispetto al (o ai) parametro(i) di controllo e il cambiamento delle simmetrie associate a potenziali cambiamenti rapidi dell'organizzazione biologica.

Tuttavia, le “strutture critiche coerenti” che sono l'obiettivo principale del nostro lavoro non possono essere ridotte agli approcci fisici esistenti, poiché le transizioni di fase, in fisica, sono trattate come “eventi singolari”, corrispondenti a uno specifico valore ben definito del parametro di controllo, come già detto in precedenza, un solo punto (critico!). Invece, ciò che sosteniamo è che nel caso dei sistemi viventi, queste transizioni critiche coerenti sono “estese” e mantenute in modo tale da persistere nello spazio multidimensionale di analisi, pur conservando tutte le proprietà fisiche menzionate sopra (lunghezze di correlazione divergenti, nuove strutture di coerenza, cambiamenti di simmetria...). Un oggetto vivente non è solo una dinamica o un processo, nei vari sensi possibili analizzati dalle teorie fisiche, ma è una permanente *transizione critica*: è sempre al confine di un cambiamento, in particolare di cambiamenti di simmetrie, come analizzato in Longo, Montévil (2011a; 2014). Abbiamo allora a che fare con un'organizzazione estesa, *globale*, permanentemente ricostruita e in trasformazione, in interazione con strutture *locali*, poiché l'interazione globale/locale è propria delle transizioni critiche, anche in fisica - si pensi ai miliardi di riproduzioni cellulari che hanno luogo in un'ora, per dire, in un organismo come il nostro, ognuna una “transizione critica” (biforcazione, riorganizzazione, correlazioni tissutali che cambiano...). Matematicamente, bisogna vedere la criticità estesa come data da un insieme di punti critici denso in un intervallo di numeri reali, ma dove la “topologia” non è quella usuale (degli intervalli convergenti a 0, in lunghezza) ma una topologia debole, dove gli intervalli hanno le lunghezze minime delle “durate” pertinenti ai vari fenomeni esaminati: in biologia nulla ha senso al di sotto di “intervalli temporali minimi”, le “durées” di Bergson, menzionate anche da H. Weyl, nella polemica con Einstein (Longo, 2021a).

Finora, la nostra analisi, negli articoli citati sopra, è stata in gran parte concettuale, poiché, a causa della perdita della matematica della rinormalizzazione, che richiede la "puntualità" della transizione, sembra esserci poca fisica matematica conosciuta che possa applicarsi a questa situazione fisicamente singolare, per di più lontana dall'equilibrio. Chiaramente, la seconda grande difficoltà concettuale e tecnica è l'instabilità delle simmetrie coinvolte. La questione consiste in come oggettivarle, dato che, in contraddizione con le situazioni fisiche, tali simmetrie non sembrano essere teoricamente determinate in maniera tale da appartenere ad un insieme specifico e pre-dato - questione profondamente legata all'instabilità dello spazio delle fasi, la cui conservazione è la fondamentale simmetria delle teorie fisiche.

### 3.2 Anti-entropia

In Bailly, Longo (2009) la nostra prospettiva sistemica per la complessità biologica, sia nella filogenesi che nell'ontogenesi, è sviluppata attraverso un'analisi dell'organizzazione in termini di "anti-entropia", una nozione che abbiamo definito e che differisce concettualmente dall'uso comune di "entropia negativa". Si noti che sia la formazione che il mantenimento dell'organizzazione (una ricostruzione permanente della struttura coerente) procedono in direzione opposta rispetto all'aumento dell'entropia. Questa è anche la preoccupazione di Schrödinger nella seconda parte del suo libro del 1944. Egli considera la possibile diminuzione dell'entropia mediante la costruzione di "ordine dall'ordine", che chiama informalmente "entropia negativa". Nel nostro approccio, l'anti-entropia è presentata matematicamente come una nuova osservabile, non è quindi solo l'entropia con un segno negativo (entropia negativa, come più rigorosamente presentata da Shannon e in Brillouin, 1956). In genere, quando si sommano in egual quantità, entropia ed entropia negativa eguali danno 0: nel nostro approccio, l'entropia e l'anti-entropia si trovano simultaneamente e non si annullano nell'intervallo critico esteso dello stato vivente della materia - anzi "producono" l'oggetto vivente o, più modestamente, co-esistono in esso. Si potrebbe considerare l'analogia puramente concettuale con l'antimateria in fisica quantistica, che ne ha ispirato il nome: quest'ultima è una nuova osservabile, relativa a nuove particelle, le cui proprietà (carica, energia) hanno segno opposto. Seguendo la nostra analogia molto grossolana, la materia e l'antimateria, sommandosi, non danno mai 0, ma un nuovo stato energetico: la doppia produzione di energia sotto forma di raggi gamma quando si incontrano in una singolarità (puntiforme!). Di nuovo, l'entropia e l'anti-entropia coesistono in un organismo, come zona estesa (intervallo) di criticità. A questo scopo, vanno introdotti due principi, "esistenza e mantenimento dell'anti-entropia" (Longo, Montévil, 2014), oltre a quelli termodinamici, che sono (matematicamente) compatibili con i principi tradizionali ma che non hanno alcun significato per quanto riguarda la materia inerte. L'idea è che l'anti-entropia rappresenta la proprietà chiave di un organismo, persino unicellulare, di essere descrivibile mediante diversi livelli di organizzazione (anche una cellula eucariote possiede organelli, microtubuli, mitocondri ...), che si regolano, si integrano l'un l'altro - parti che integrano funzionalmente un tutto, e il tutto le regola. Questo corrisponde alla formazione e al mantenimento di una struttura di coerenza globale, in corrispondenza alla sua criticità estesa: l'organizzazione aumenta, diciamo lungo l'embriogenesi, e si mantiene, contrastando la continua produzione di entropia dovuta a tutti i processi irreversibili. Nessuna criticità estesa né la sua proprietà chiave della coerenza sarebbero possibili senza la produzione di anti-entropia: l'organizzazione globale - sempre rinnovata - (esprime e) permette il mantenimento della transizione critica estesa.

In Bailly, Longo (2009), vedi anche Longo, Montévil (2014), abbiamo applicato la nozione di anti-entropia a un'analisi del lavoro di Gould sulla complessificazione della vita nel corso dell'evoluzione, (Gould, 1997). Abbiamo così esteso una tradizionale equazione di equilibrio per il metabolismo alla nuova nozione specificata dai principi di cui sopra. Questa equazione è ispirata dall'analisi di Gibbs dell'energia libera, che è accennata come possibile strumento per

l'analisi dell'organizzazione biologica in una nota in Schrödinger (1944). Abbiamo esaminato sistemi lontani dall'equilibrio e ci siamo concentrati in particolare sulla produzione di entropia globale associata al carattere irreversibile dei processi. Nell'articolo del 2009, un'analisi approfondita dell'anti-entropia è stata condotta nei termini di un'equazione di diffusione della biomassa sulla complessità fenotipica nel corso dell'evoluzione. È possibile ricostruire, sulla base di principi generali, la curva dell'andamento della biomassa sulla complessità nell'evoluzione formulata da Gould (1997). Inoltre, proponiamo una valutazione quantitativa della complessità fenotipica nell'embriogenesi in relazione ad alcuni dati empirici (*Caenorhabditis elegans*). Ancora una volta, la Meccanica Quantistica ha indirettamente ispirato il nostro approccio matematico: abbiamo preso in prestito l'approccio operatoriale utilizzato da Schrödinger nella sua famosa equazione, ma alla luce di un inquadramento classico. Classicamente, questa equazione può essere intesa come un'equazione di diffusione (in effetti, abbiamo usato coefficienti reali invece di complessi, quindi al di fuori del quadro matematico delle teorie quantistiche).

### 3.3 Tempo biologico.

La rappresentazione consueta del tempo in fisica (lineare) è insufficiente, a nostro avviso, per la comprensione di alcuni fenomeni della vita. Una forma estesa di presente sembra più adeguata per la comprensione della memoria, poiché questa è una componente essenziale dell'apprendimento, ai fini dell'azione futura (basata sulla "protensione", come aspettativa preconsua). In particolare, mentre la memoria, come ritenzione, è trattata in alcune teorie fisiche (fenomeni di rilassamento), la protensione sembra al di fuori dell'ambito della fisica. Abbiamo quindi suggerito alcune semplici rappresentazioni funzionali della ritenzione e della protensione biologiche (Longo, Montévil, 2011b; cfr. anche Varela, 1999).

Allo stesso modo, il ruolo dei ritmi biologici non sembra avere alcuna controparte nella formalizzazione matematica degli orologi fisici, che sono basati su frequenze nella dimensione temporale solita (se del caso, termodinamica, ovvero irreversibile). In Bailly et al. (2011) abbiamo presentato una varietà bidimensionale come "cornice matematica" per accogliere i ritmi biologici autonomi: la seconda dimensione è "compattificata", ovvero, è una fibra circolare ortogonale alla rappresentazione orientata del tempo fisico, come dicevamo.

L'aggiunta di una nuova dimensione per il tempo biologico è giustificata dal particolare status dimensionale dei ritmi biologici *interni*; è compactificata perché la "retta temporale" è trasformata in un cerchio ed ogni e diversa descrizione temporale dei fenomeni (correlati a ritmi - cardiaci, metabolici, respiratori...) dà luogo ad una spirale che si avvolge nel cilindro generato dal "prodotto" tempo-termodinamico x tempo-compattificato. La vita in effetti è scandita temporalmente sia dai ritmi esterni fisici (tipicamente circadiani), che sono frequenze, sia da quelli interni (metabolismo, respirazione, cardiaci). Questi ultimi sono numeri puri, non frequenze: quando sono usati come coefficiente nelle leggi di scala diventano frequenze medie e producono il tempo della durata della vita (Schmidt-Nielsen, 1984; West et al., 1997; Savage et al., 2004). Questi ritmi hanno anche comportamenti singolari (variazioni multiscale) rispetto al tempo fisico, che possono essere visualizzati nella nostra prospettiva teorica. In contraddizione con le situazioni fisiche, la scalabilità (i coefficienti di scala), tuttavia, non sembra essere associata ad un esponente stabile. Queste due caratteristiche peculiari (numeri puri e serie temporali simili a frattali) sono le principali giustificazioni dell'autonomia del nostro tempo compactificato rispetto al tempo fisico.

I due nuovi aspetti del tempo biologico ci hanno permesso di introdurre la nozione astratta di "inerzia biologica" come componente dell'analisi concettuale del tempo della criticità estesa. Si noti che il nostro approccio di protensione e ritenzione è, per ora, focalizzato su aspetti locali del tempo biologico, e dovrebbe quindi essere completato per accogliere le correlazioni a lungo raggio osservate sperimentalmente (cfr. Grigolini et al., 2009). Infatti, questo tipo di

correlazioni è rilevante per entrambi gli aspetti del tempo biologico, e si adatta al quadro concettuale della criticità estesa.

Un altro aspetto del tempo biologico, introdotto in Longo, Montévil (2011a), è il tempo costituito dalla cascata di cambiamenti di simmetria che ha luogo nelle transizioni critiche estese. In altri termini, questo tempo è definito dalle trasformazioni organizzative onnipresenti che avvengono nella materia biologica. Qui, il tempo corrisponde quindi alla *storicità* degli oggetti biologici e al processo di individuazione biologica (sia ontogenetica che filogenetica). In effetti, il tempo non è più il parametro delle traiettorie nello spazio delle fasi poiché quest'ultimo è instabile, quindi la temporalità definita dai cambiamenti dello spazio delle fasi ha una natura originale.

#### 4 Conclusioni

A grandi linee, a partire dalla criticità estesa, le leggi che proponiamo, pur trattando queste particolari osservabili e grandezze, specifiche dei fenomeni vitali, costituiscono una *estensione* delle leggi fisiche esistenti: tali leggi conservano la stessa struttura matematica formale e, se poniamo il valore delle osservabili o dei parametri considerati a 0 (estensione della criticità, seconda dimensione temporale, durata della protensione, valore dell'anti-entropia), esse restituiscono le teorie dell'inerte. Le nostre proposte teoriche sono quindi compatibili, sebbene irriducibili, alle "teorie fisiche esistenti". Ossia, sono riducibili a queste leggi *solo se, e non appena*, ci troviamo al di fuori della zona della criticità estesa – che ha la sua propria temporalità e la sua anti-entropia –, o non appena queste specifiche quantità vanno a 0. In conclusione, la fenomenalità peculiare della vita merita alcune nuove osservabili (nei nostri tentativi, transizione critica estesa, organizzazione biologica, tempo proprio). Il punto è la pertinenza "*per sé*", se esiste, di questa concettualizzazione. Coloro che sostengono che tutti questi concetti dovrebbero essere ridotti a teorie fisiche (esistenti?) sono i benvenuti nel provarci. Ma dovrebbero prima di tutto guardare alla stessa storia della fisica, dove le nuove cornici teoriche sono segnate dall'invenzione di nuovi concetti, nuovi osservabili e di nuove prospettive. La loro pertinenza è stata giudicata "in quanto tale", non sulla base della loro riducibilità a motivi esplicativi esistenti e perciò "sicuri"<sup>3</sup>. Si noti, tuttavia, che le transizioni critiche estese, in associazione con i cambiamenti di simmetria onnipresenti, possono condurre a cambiamenti metodologici più radicali, in quanto associati alla specificità degli oggetti e alla genericità delle traiettorie.

#### 5 Appendice: Interfacce dell'incompletezza.

Abbiamo bisogno di una definizione della vita per costruire teorie robuste sullo stato vivente della materia?

Rispondiamo a questa domanda attraverso un'analogia con una cornice teorica dove può essere trattata con il massimo rigore: la logica matematica.

Il concetto di numero intero (quindi "standard" o finito) è catturato (definito, caratterizzato) dalla teoria (formale) dei numeri? Frege (1884) credeva di sì, poiché il concetto assoluto di numero era, a suo avviso, pienamente caratterizzato dalla teoria di Peano-Dedekind. In termini logici moderni, possiamo dire che, per Frege, l'Aritmetica di Peano (AP) era "categorica". Cioè, si credeva che la AP avesse un solo modello, a meno di isomorfismi: il modello standard dei numeri interi (quello che il lettore ha imparato alla scuola primaria, con lo 0, 1... e in

---

<sup>3</sup> In altri termini, affinché la riduzione o l'unificazione possa essere realizzata, la prima questione da affrontare è: che cosa si vuole ridurre ed a che cosa? L'audacia della fisica, nella sua storia, è stata proprio di inventare concetti ed osservabili, e persino strutture matematiche, nuovi, da Newton a Hamilton, dalla termodinamica alla fisica quantistica. Poi, procedere per unificazioni: Newton (mele che cadono e pianeti che girano), Hamilton, Maxwell, Boltzmann (il principio ergodico è asintotico, non "riduce" proprietà macro a micro), Einstein (gravitazione ed inerzia)....

aggiunta l'induzione formale). Così, si supponeva che la teoria dovesse definire in modo univoco “cosa è un numero”.

Tutto ciò si è rivelato clamorosamente sbagliato. Löwenheim e Skolem (1915-20) dimostrarono che AP ha un numero infinito di modelli non isomorfi. Inoltre, un semplice teorema (“compattezza”), ha dimostrato che nessun predicato, definibile in AP, può isolare tutti ed esattamente tutti gli interi standard (cfr. Marker, 2002). In breve, qualsiasi predicato valido su infiniti numeri interi standard, deve valere anche per (infiniti) numeri interi non standard (che non possono essere considerati propriamente “finiti”) – questo è noto come il “lemma di overspill”. Il teorema di incompletezza di Gödel ha rafforzato queste proprietà negative: AP è *incompleto* o, equivalentemente, ha molti modelli logicamente non equivalenti, una proprietà molto più forte della *non-categoricità*: alcuni asserti sono validi in certi modelli, altri in altri - una catastrofe per gli assolutisti dell'aritmetica e della logica. A fortiori, non c'è speranza di caratterizzare in maniera finitista il concetto di numero intero standard, compattezza e Gödel lo vietano: si deve aggiungere un assioma dell'infinito (teoria degli insiemi) o una quantificazione di secondo ordine per farlo, e questi sono quadri formali infinitari o impredicativi - altro spauracchio dei logicisti (Longo, 2011).

Eppure, tutti considerano AP come la teoria formale “naturale” dei numeri: essa individua splendidamente le principali proprietà rilevanti, molto robuste, dei numeri (0, successore, induzione), sebbene *non possa definire cosa sia un numero*. In analogia all'impossibilità della fisica di definire il proprio oggetto di studio, la “materia” inerte, come abbiamo detto all'inizio, abbiamo qui un altro esempio di una coerente cornice teorica che non può definire, al suo interno, il proprio oggetto di studio, cioè l'oggetto numero naturale. Non vediamo un modo per uscire dal linguaggio della fisica o della biologia in maniera analoga a ciò che può fare la logica matematica: a cosa mai potrebbe corrispondere un assioma dell'infinito o una quantificazione di ordine superiore, impredicativa? Forse: ... “assumere il punto di vista (e il linguaggio) di Dio”?

Incoraggiamo quindi il lettore a proseguire la riflessione teorica in biologia senza l'angosciante ricerca di una *definizione* della vita. E con la chiara prospettiva dell'intrinseca incompletezza di tutti i nostri sforzi teorici, (Longo, 2010; 2011): possiamo solo sperare di cogliere e organizzare esplicitamente grazie alle teorie alcuni frammenti di realtà, qualunque sia il significato di questa parola. Cerchiamo di farlo al meglio delle nostre conoscenze, in modo sufficientemente ampio e robusto, e in piena libertà teorica ed empirica, senza necessariamente sentirsi attaccati alle teorie esistenti, né affannandosi alla ricerca continua della “Teoria (completa?) definitiva” o della “riduzione definitiva”.

**Ringraziamenti:** il primo autore desidera ringraziare vivamente i traduttori e revisori (Luca Cabassa e Mattia Galeotti), non solo per l'eccellente traduzione, ma per i commenti e le chiarificazioni fatte o richieste.

## Riferimenti bibliografici

Gli articoli di Longo sono scaricabili a in <http://www.di.ens.fr/users/longo/>

Bailly, F. (1991). L'anneau des disciplines. *Revue Internationale de Systémique*, 5.

Bailly, F., Gaill, F., Mosseri, R. (1993). Orgons and biolons in theoretical biology: Phenomenological analysis and quantum analogies. *Acta Biotheoretica*, 41, 3–11.

Bailly, F., Longo, G. (2008). Extended critical situations: the physical singularity of life phenomena. *Journal of Biological Systems*, 16, 309.

Bailly F., Longo, G. (2009). Biological organization and anti-entropy. *Journal of Biological Systems*, 17, 63–96.

- Bailly F., Longo, G. (2011). *Mathematics and the natural sciences; The Physical Singularity of Life*. London: Imperial College Press. Versione francese, 2006: Hermann, Vision des sciences.
- Bailly F., Longo, G., Montévil, M. (2011). A 2-dimensional geometry for biological time. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 106, 474–484.
- Bak, P., Tang, C., Wiesenfeld, K. (1988). Self-organized criticality. *Physical review A*, 38, 364–374.
- Binney, J., Dowrick, N. J., Fisher, A. J., Newman, M.E.J. (1992). *The Theory of Critical Phenomena: An Introduction to the Renormalization Group*. New York: Oxford University Press.
- Brillouin. L. (1956) *Science and Information Theory*. New York: Academic Press.
- Brown, J. H., Gupta, V. K., Li, B.-L., Milne, B. T., Restrepo, C., West, G. B. (2002). The fractal nature of nature: power laws, ecological complexity and biodiversity. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences*, 357, 619–626.
- Frege, G. (1884). *Collected Papers on Mathematics, Logic and Philosophy*. Oxford: Basil Blackwell. In italiano è possibile trovare gran parte degli scritti in Frege, G. (1965). *Logica e aritmetica*. Torino: Boringhieri [a cura di Corrado Mangione].
- Frezza, G., Longo, G. (2010). Variations on the theme of invariants: conceptual and mathematical dualities in physics vs biology. *Human Evolution*, 25, 167–172.
- Gould. S. J. (1997) *Full house: The spread of excellence from Plato to Darwin*. New York: Three Rivers Press.
- Grigolini, P., Aquino, G., Bologna, M., Lukovic, M., West, B. J. (2009). A theory of noise in human cognition. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 388, 4192–4204.
- Jensen, H. J. (1998). *Self-Organized Criticality, Emergent Complex Behavior in Physical and Biological Systems*. Cambridge: Cambridge lectures in Physics.
- Kauffman, S. A. (1993). *The origins of order*. New York: Oxford University Press.
- Laguës, M., Lesne, A. (2003). *Invariance d'échelle*. Paris: Belin.
- Longo, G. (2008). Laplace, Turing and the “imitation game” impossible geometry: randomness, determinism and programs in Turing’s test. In R. Epstein, G. Roberts, and G. Beber, (a cura di) *Parsing the Turing Test*, Dordrecht: Springer, 377–411. Springer.
- Longo, G. (2010). Incompletezza. in *La Matematica*, vol. 4, pp. 219 - 262, Einaudi. Revised and translated: 2018. Interfaces of Incompleteness. In Minati, G, Abram, M and Pessa, E (Eds.) *Systemics of Incompleteness and Quasi-systems*, Springer, New York, NY.
- Longo, G. (2011), Reflections on Concrete Incompleteness. *Philosophia Mathematica*, 19(3): 255-280.
- Longo G. (2021a). Confusing biological rhythms and physical clocks. Today’s ecological relevance of Bergson-Einstein debate on time. In A. Campo, S. Gozzano (eds.), *Einstein vs Bergson. An enduring quarrel of time*, De Gruyter.
- Longo, G. (2021). *Matematica e senso, per non divenir machine*. Milano: Mimesis
- Longo, G., Montévil, M. (2011a). From physics to biology by extending criticality and symmetry breakings. *Progress in Biophysics and Molecular Biology*, 106, 340–347.
- Longo, G., Montévil, M. (2011b). Protention and retention in biological systems. *Theory in Biosciences*, 130, 107–117.
- Longo, G., Montévil, M. (2014) *Perspectives on Organisms: Biological Time, Symmetries and Singularities*, Berlin: Springer.
- Longo, G., Montévil, M., Kauffman, S. A. (2012). No entailing laws, but enablement in the evolution of the biosphere, in *GECCO Proceedings 2012*, Arxiv 1201.2069.
- Marker D. (2002). *Model theory: an introduction*. New York: Springer Verlag.
- Mora T., Bialek, W. (2011). Are biological systems poised at criticality? *Journal of Statistical Physics*, 144, 268–302.
- Mossio, M., Longo, G., Stewart J. (2009). A computable expression of closure to efficient causation. *Journal of Theoretical Biology*, 257, 489–498.
- Nykter, M., Price, N.D., Aldana, M., Ramsey, S. A., Kauffman, S. A., Hood, L. E., Yli-Harja, O., Shmulevich, I. (2008). Gene expression dynamics in the macrophage exhibit criticality. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 105, 1897.
- Rosen R. (2005). *Life itself: a comprehensive inquiry into the nature, origin, and fabrication of life*. New York: Columbia University Press.
- Savage, V. M., Gilloly, J. F., Woodruff, W. H., West, G. B., Allen, A. P., Enquist, B. J., Brown, J. H. (2004). The predominance of quarter-power scaling in biology. *Ecology*, 18: 257–282.

- Schmidt-Nielsen, K. (1984). *Scaling*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Schrödinger, E. (1944). *What Is Life?* Cambridge University Press, 1944; trad. it. di Mario Ageno, *Che cos'è la vita? La cellula vivente dal punto di vista fisico*, Milano: Adelphi<sup>5</sup>, 1995.
- Soto A., Longo G., Noble D. (eds.) (2016) *From the century of the genome to the century of the organism: New theoretical approaches*, a Special issue of [Progress in Biophysics and Mol. Biology](#), Vol. 122, 1, Elsevier.
- Van Fraassen, B. C. (1989). *Laws and symmetry*. Oxford: Oxford University Press.
- Varela, F. G. (1989). *Autonomie et connaissance*. Paris: Seuil, Paris, 1989.
- Varela, F. G. (1989). The specious present: A neurophenomenology of time consciousness, in *Naturalizing Phenomenology: Issues in Contemporary Phenomenology and Cognitive Science*, a cura di Petitot, J., Varela, F. J., Pachoud, B., Roy, J. M., (Stanford, CA: Stanford University Press), 266–314.
- Varela, F. G., Maturana, H. R., Uribe, R. (1974). Autopoiesis: The organization of living systems, its characterization and a model. *Biosystems*, 5(4): 187–196.
- Weibel E. R. (1991). Fractal geometry: a design principle for living organisms. *American Journal of Physiology – Lung Cellular and Molecular Physiology*, 261(6): L361–L369.
- West, B. J. (2006). *Where medicine went wrong: Rediscovering the path to complexity*, volume 11 of *Studies of nonlinear phenomena in life sciences*. World Scientific Publishing Co. Inc
- West, G. B., Brown J. H., Enquist B. J. (1997). A general model for the origin of allometric scaling laws in biology. *Science*, 276, 122–126.
- Weyl, H. (1952). *Symmetry*. Princeton: Princeton University Press; trad. it. Giliola Lopez, *La simmetria*, Milano: Feltrinelli, 1962.
- Zinn-Justin, J. (2007). *Phase transitions and renormalization group*. New York: Oxford University Press.