

## Capitolo 5

# Come il futuro dipende dal passato e dagli eventi rari nei sistemi viventi

*Giuseppe Longo*

\*

### Introduzione

#### Tesi principali

La biologia si pone tra la montagna concettuale e tecnica della costruzione fisico-matematica e le profondità delle scienze umane. In forza dei suoi metodi sperimentali e della natura stessa dell'osservazione, è una scienza della natura; allo stesso tempo l'importanza della storia per la comprensione del vivente apre una via d'accesso privilegiata verso i metodi d'analisi propri delle scienze storiche, iniziando dalla centralità della conoscenza (e della misura) degli eventi passati.

Per investigare il ruolo della storia nella costituzione di una conoscenza specifica, quella delle scienze del vivente, questo testo evidenzierà le seguenti proprietà:

- *Le dinamiche temporali comportano cambiamenti riguardo lo spazio dei possibili (o “spazio delle fasi” in senso fisico<sup>1</sup>);*
- *La variabilità e la diversità degli osservabili sono componenti integrali della stabilità strutturale degli oggetti pertinenti e delle loro dinamiche.*

Per questa analisi, gli osservabili pertinenti sono i fenotipi, in quanto osservabili caratteristici degli organismi.

Come conseguenza di questo approccio alla storicità, si sostiene che in biologia:

- *Gli eventi rari contribuiscono in modo cruciale alla storia.*

In questa prospettiva, si distinguerà tra:

- *il tempo dei processi e il tempo della storia*

---

\*Questo capitolo è stato tradotto da Angelo Marinucci e Stefano Salvia. L'originale è: (Longo 2016) [N.d.t.].

<sup>1</sup>Si tratta dello spazio di tutti i parametri e gli osservabili pertinenti, come le quantità misurabili (si veda in basso per un approfondimento di questo concetto che, in fisica, fornisce un quadro preciso e matematico per lo “spazio di tutte le dinamiche possibili”).

in quanto casi differenti di tempi misurabili, sebbene in una stessa dimensione fisica<sup>2</sup>. In breve, il tempo storico è scandito dagli eventi rari e dai cambiamenti dello spazio delle fasi.

In quest'analisi si discuterà la dipendenza, nei sistemi biologici, dei fenomeni presenti (e futuri) in riferimento agli eventi passati. La dipendenza storica sarà considerata anche a partire dal problema della misura, via d'accesso scientifica ai fenomeni, includendo quelli passati. Le caratteristiche della misura emergono dalle ipotesi teoriche, come la scelta degli osservabili e dei parametri, degli strumenti e delle metriche, e, nello specifico della biologia, esse emergono anche dalla storicità delle dinamiche. In termini filosofici, quest'analisi può essere considerata "epistemica", in riferimento alla conoscenza storica ancorata alla misura e, in particolare, in riferimento alla distinzione tra:

- *Le misure sincroniche e le misure diacroniche* (in quanto via d'accesso verso il passato).

Infine, la nozione fisico-matematica di invarianza, così come le trasformazioni che la caratterizzano<sup>3</sup>, saranno impiegate in biologia in un senso nuovo, quello di

- *invarianza storicizzata*

che sarà definita nel corso di questo testo<sup>4</sup>.

## Determinazione e dipendenza dalla traiettoria, dalla fisica alla biologia

La storia non ha alcuna rilevanza nella maggior parte delle teorie fisiche esistenti. Ciononostante, nella seconda sezione, sarà discusso brevemente il ruolo chiave delle analisi storiche in cosmologia a partire dalla dipendenza dalla traiettoria nella varietà riemanniana (attraverso il trasporto parallelo di Levi-Civita), così come nelle cascate di singolarità e di transizioni critiche. Si farà riferimento, in maniera informale, anche al modo in cui la fisica statistica e la fisica della materia condensata descrivono i fenomeni di dipendenza dalla traiettoria.

I casi molto interessanti di "dipendenza della storia", o più precisamente di *dipendenza dai processi*, che sono stati appena richiamati riguardo la fisica e che saranno discussi più avanti, possono contribuire a comprendere il passaggio dalle *teorie* dell'inerte alle *teorie* dello stato vivente della materia. In (Longo e Montévil 2014) si è insistito sulle possibilità di questa transizione concettuale complessa trovando appoggio, per esempio, su un'estensione della nozione di transizione critica di fase. Le teorie fisiche della criticità (analisi dei passaggi per un "punto critico") sono ampiamente usate in biologia teorica a partire dagli anni '80 del secolo passato, come mostrato in (Bailly e Longo 2006; Longo e Montévil 2014), passando all'analisi di ciò che si è chiamato "criticità estesa", una nozione propriamente biologica (permanenza in un "intervallo di criticità"). Altri autori considerano la fisica statistica e la fisica della materia condensata come il luogo d'incontro teorico possibile tra la fisica e la biologia (Goldenfeld e Woese 2011). Ciononostante, le teorie biologiche possono avere bisogno di differenziarsi dalle teorie fisiche così come la relatività e la fluidodinamica differiscono dalla meccanica quantistica (senza dimenticare che queste tre teorie presentano incompatibilità di natura fisico-matematica). Ciò non impedisce che alcune teorie dell'inerte possano essere illuminanti per la biologia, in particolare, attraverso delle estensioni formali appropriate, come la criticità estesa o una teoria bidimensionale del tempo biologico,

---

<sup>2</sup>In fisica, l'energia cinetica e l'energia potenziale, per esempio, sono osservabili diversi in una stessa dimensione, l'energia.

<sup>3</sup>Un "invariante" è caratterizzato dalle trasformazioni che lo preservano, in particolare dalle trasformazioni nello spazio e nel tempo, in quanto sistemi di riferimento, per esempio nella relatività di Galilei ed Einstein o, in termini matematici, da gruppi di trasformazioni o di isomorfismi in opportune categorie.

<sup>4</sup>Pierre Musso ha suggerito l'aggettivo "storicizzato" per esprimere l'interesse per il trasferimento concettuale della nozione d'invarianza da un quadro fisico-matematico per la scienza storica.

in cui il tempo ha la funzione di operatore, molto diversa da quella che ha in fisica (Bailly e Longo 2006, 2009; Longo e Montévil 2014). Tali estensioni possono contribuire ad una migliore comprensione del vivente e delle sue dinamiche perché, sperando di essere più fortunati dei fisici, potrebbero non esserci incompatibilità matematiche con le teorie fisiche esistenti e pertinenti.

In opposizione al ruolo che qui si attribuisce alla storia in biologia (o nelle scienze umane), lo stato attuale di un sistema soddisfa, per principio, la comprensione della dinamica presente o, per essere più precisi, soddisfa la “determinazione” del sistema fisico, che sia per un fine predittivo - eventualmente in termini di probabilità. La “determinazione completa” di un sistema fisico, salvo le eccezioni che saranno discusse nella seconda sezione, è in linea di principio indipendente dalla maniera in cui “la si è ottenuta”, se la sua traiettoria si sviluppa in uno spazio delle fasi appropriato. Inoltre, le dinamiche fisiche sono analizzate come “sistemi determinati dallo stato”, se lo spazio delle fasi è ben costruito. In breve, anche nei domini della fisica, in cui le nozioni di “dipendenza dal cammino” o pure “di storia” sono impiegati e dove la risposta del sistema ad un contesto cangiante dipende precisamente dalla storia, lo sforzo principale del teorico è proporre degli osservabili e dei parametri pertinenti, e perfino uno spazio delle fasi appropriato per ottenere una determinazione completa dello stato e attraverso lo stato. In questo modo, in linea di principio, l’insieme delle risposte possibili può essere integrato nella descrizione del sistema e, se è aleatorio, può essere dato in termini di probabilità (cfr. sezione 2). In questi casi si mostrerà che è l’analisi del tempo dei processi e non del tempo storico propriamente detto, ad essere sviluppata.

Il fine, pertanto, è quello di proporre un criterio di analisi sufficientemente solido per evidenziare la peculiarità di una scienza storica come la biologia e, in particolare, dell’evoluzione biologica, come detto nella sezione 1.1. Saranno forniti anche degli strumenti concettuali utili all’analisi del ruolo degli eventi passati nelle dinamiche presenti e future dei sistemi viventi, al fine di comprendere come la storia contribuisce alla loro forma specifica e alla loro intrinseca imprevedibilità. Si sostiene, ad esempio, che la comprensione delle funzioni passate delle strutture biologiche sia essenziale alla comprensione delle funzioni presenti (e future), poiché essa è basata sulla loro costruzione storica. Di conseguenza, si discuterà del ruolo della storia nell’evoluzione darwiniana e, brevemente, nella cognizione umana; si insisterà, inoltre, sulla specificità della teorizzazione di tali analisi, che oltrepassa, ma non è *a priori* incompatibile, con i ricchi quadri teorici della fisica.

Il lettore deve ricordare che in fisica “determinismo”, in quanto determinazione matematica, e la prevedibilità non sono la stessa cosa. È noto che, dopo Poincaré, anche un semplice sistema di equazioni o di funzioni dell’evoluzione di una dinamica non-lineare, in quanto determinazione formale adeguata di un processo fisico (per esempio, la dinamica del sole e di due pianeti attraverso le equazioni di Newton e le loro varianti contemporanee), non implica una prevedibilità matematica (Devaney 1989). La meccanica quantistica è andata ben oltre, analizzando la dinamica di un quanto come determinazione di un’ampiezza (una legge) di probabilità (l’equazione di Schrödinger). Si tratta, in questo secondo caso, di una maniera originale (e geniale) d’integrare l’imprevedibilità, in quanto aleatorio, nella teoria, attraverso l’uso di uno spazio delle fasi molto astratto che può anche avere infinite dimensioni (uno spazio di Hilbert). Questo approccio, così come l’indeterminazione e la non-commutatività della misura (in altri termini, il fatto che la differenza tra le misure della posizione e dell’impulso e viceversa non può scendere sotto la costante di Planck) danno la natura intrinseca (alla teoria) dell’imprevedibilità e dell’aleatorio della meccanica quantistica<sup>5</sup>.

---

<sup>5</sup>Per quanto riguarda l’imprevedibilità e l’aleatorietà, è bene insistere sul fatto che “aleatorio” significa qui *imprevedibilità relativa alla* teoria proposta (Calude e Longo 2016). Questa definizione inquadra l’aleatorio nelle simmetrie (e nelle loro rotture) proprie di ciascuna proposizione teorica (Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015). Si può parlare di imprevedibilità/imprevedibilità, dunque di aleatorio per “(non-)pre-dire” bisogna innan-

Ciononostante, in tutti questi differenti sistemi, uno spazio delle fasi preconstituito permette di definire equazioni e funzioni dell'evoluzione dinamica sulla base della conoscenza (relativa) del presente - e i casi complessi sopra menzionati, proprio come in fisica statistica, non modificano il ruolo essenziale della determinazione dello stato in fisica.

Al contrario, per scrivere le equazioni è necessario stabilire lo spazio delle fasi pertinente, i parametri e gli osservabili, così come le scale o i livelli della descrizione. È bene sottolineare, infine, che le equazioni di flusso per i sistemi possibilmente stazionari, ma non in equilibrio, sono date anche in spazi di fasi predefiniti (Bertini et al. 2015; Nicolis e Prigogine 1977; Vulpiani et al. 2014).

## Processi nomologici

Nella scienza occidentale la nozione di “legge della natura” ha una storia lunga e controversa (Needham 1951; Roux 2009). L'approccio di tale testo a questo dibattito si caratterizza per il fatto che, dopo Cartesio, e più precisamente dopo Newton, ma certamente non prima, è possibile definire rigorosamente le “leggi della natura” attraverso la notazione matematica delle equazioni e/o delle funzioni di evoluzione in uno spazio dei parametri dato. Questa è la *condizione* stessa che permette di fare della fisica, le forme *a priori* dello spazio e del tempo devono essere pertanto date matematicamente così come ha mostrato Kant<sup>6</sup>.

Nel XIX secolo gli osservabili furono esplicitamente aggiunti ai parametri cartesiani, in quanto condizione di una determinazione completa. Così, ciò che sarà chiamato “spazio delle fasi” fu gradualmente precisato, in particolare da Hamilton, Boltzmann, Poincaré e Gibbs, aggiungendo l'impulso alla posizione spaziale e l'energia al tempo. Verso la fine del secolo, queste coppie sono diventate le “variabili congiunte” cruciali della misura non-commutativa in meccanica quantistica.

Al fine di proporre uno spazio delle fasi a partire da queste estensioni dello spazio-tempo, come sono scelti gli osservabili? L'energia e l'impulso sono invarianti fondamentali della fisica: sono caratterizzati dalle leggi di conservazione. Tali invarianti sono poi stati compresi grazie ai teoremi di Noether (cfr. sezione 2), in quanto elementi rilevanti di una proprietà matematica ancora più essenziale: la simmetria. Siffatti osservabili sono in effetti descritti da invarianze rispetto al tempo o allo spazio, che sono simmetrie nelle equazioni. Nel XX secolo la geometrizzazione ulteriore della fisica, da Einstein a H. Weil sino a A. Connes (1994), ha prodotto dei quadri geometrici per lo spazio (delle fasi) ancora più ricchi, dei nuovi *a priori* della conoscenza fisica, al fine di rendere intellegibile l'inerte.

Al contrario, in biologia, è convinzione di chi scrive che l'impossibilità di stabilire *a priori* lo spazio delle fasi delle traiettorie evolutive non permetta la formulazione delle equazioni delle leggi, come nelle teorie fisiche in cui le equazioni specificano le dinamiche in uno spazio pre-dato (Koppl et al. 2015; Longo e Montévil 2014; Longo, Montévil e Kauffman 2012). La tesi che qui

---

zitutto provare a “dire” qualcosa (*dicere* in latino), anzi proporre una teoria. Di qui, si comprende in che senso gli aleatori classico e quantistico differiscono, prima di tutto perché la meccanica quantistica dà un valore non classico alle probabilità degli eventi *entangled* (Aspect, Grangier e G. 1982; Einstein, Podolsky e Rosen 1935), poi perché per la misura e l'equazione di Schrödinger, l'aleatorio è “integrato” (e intrinseco) alla fisica dei quanti. Inoltre, ma si tratta di un'altra questione, in fisica classica ogni evento ha una causa, sia essa una fluttuazione o una perturbazione non misurabile; ora, nell'interpretazione che qui adottata, alcuni eventi quantistici aleatori possono essere a-causali, ad esempio, lo *spin* di un elettrone verso l'alto o il basso. Le teorie “a variabili nascoste” affermano che ci sono sempre cause nascoste, tuttavia, è proprio lì che si pone il problema: esse hanno bisogno di variabili non-locali per generare l'*entanglement*, un'incoerenza fisico-matematica. In breve in fisica il significato di “aleatorio” è vario e dipende dalla teoria. La nozione di aleatorio che qui s'intende proporre per la biologia è diversa, e ciò è dovuto al ruolo dei cambiamenti dello spazio delle fasi e degli eventi rari (elementi comparativi più dettagliati in fisica, ma meno in biologia, sono forniti in (Calude e Longo 2016)).

<sup>6</sup>Gli aspetti di quest'analisi relativa alla storia e alla filosofia della scienza sono al centro del progetto diretto dall'autore all'IEA di Nantes, “Lois des dieux, des hommes et de la nature” (2014-2020) <http://www.iea-nantes.fr/rtefiles/File/projet-giuseppe-longo-2014.pdf>.

si sostiene si basa pertanto sul ruolo della storia, come precisato nella sezione 1.1, innanzitutto in riferimento alla determinazione dello spazio delle fasi cangiante dei processi biologici.

Questo “risultato negativo”, l'impossibilità di dare *a priori* lo spazio delle dinamiche possibili come in fisica, impone un'analisi del ruolo positivo (costruttivo) della storia, non soltanto per la comprensione degli stati attuali dei sistemi biologici, ma anche nella determinazione delle loro dinamiche future (più precisamente, dei loro spazi evolutivi). In fisica la determinazione matematica permette di discernere gli sviluppi futuri, facendo delle predizioni (risolvendo equazioni e calcolando le funzioni di evoluzione) e/o assegnando probabilità ai risultati futuri, tenendo conto dell'imprevedibilità tanto classica quanto quantistica. L'analisi probabilistica è possibile, almeno in linea di principio, perché le traiettorie (eventualmente imprevedibili) si sviluppano in spazi delle fasi dati - includendo la traiettoria di Schrödinger di un'ampiezza di probabilità, che ha luogo in uno spazio di Hilbert. Una misura della probabilità è, in breve, la ratio tra i casi attesi e l'insieme di tutti i casi possibili, nello spazio considerato (in modo più formale, si usa la misura di Lebesgue o altre teorie della misura). Ciò che è imprevedibile è una *quantità*, in seno ad una dimensione data o osservabile (i casi particolari della fisica della materia statistica e condensata sono discussi sotto). Il carattere infinito dello spazio delle fasi, e anche la sua dimensionalità infinita, non rappresentano un problema: le loro simmetrie matematiche permettono di definirli/comprimerli assiomaticamente in un numero finito di termini. È la sfida ulteriore che si affronterà in biologia: i cambiamenti continui di simmetrie nelle dinamiche biologiche, come osservato in (Longo e Montévil 2014; Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015), non permettono di applicare una tale formalizzazione *a priori* degli spazi delle fasi.

Ciò che qui si nega è la possibilità di stabilire *a priori*, in biologia, uno spazio delle fasi pertinente, vale a dire, degli osservabili e parametri, dei “possibili”, pre-definiti (si propone, anzi, di comprendere quest'analisi nei contesti storici dell'uomo). Tale scelta è giustificata, in particolare, attraverso il ruolo essenziale della storia per la conoscenza del presente e delle dinamiche d'insieme, nel senso pieno della determinazione del suddetto spazio delle fasi, come in fisica. Tale spazio degli osservabili e dei parametri pertinenti (fenotipi ed ecosistema) è soggetto a continui cambiamenti che dipendono anche dai contesti passati - è la tesi che si vuole sostenere. Nello studio dell'aleatorio come imprevedibilità si passa dunque dall'impossibilità di prevedere una quantità in uno spazio dei possibili prestabilito, come nelle teorie fisiche esistenti (ivi compresa, con alcune riserve, la fisica statistica, come si vedrà), all'impossibilità di prevedere lo spazio delle fasi futuro propriamente detto - si tratta di un cambiamento qualitativo della conoscenza<sup>7</sup>.

Tutto ciò è stato già analizzato in riferimento alla nozione di “enablement” (rendere possibile) (Longo e Montévil 2014; Longo, Montévil e Kauffman 2012) e obbliga a focalizzare l'attenzione su altri *a priori* principi di organizzazione e variazione come pure sullo stato di default proprio

---

<sup>7</sup>Il cambiamento degli spazi delle fasi durante l'evoluzione biologica è stata implicitamente presentata, in diversi contesti e linguaggi, da (Kauffman 2002) e (Bailly e Longo 2006). Ora, le osservazioni presenti in questi testi sono state anticipate dalle intuizioni di R. Thom (Amsterdamski 1990). Secondo Thom, nelle analisi scientifiche lo spazio delle fasi matematico preesiste all'aleatorio (“il rumore”) che interessa un sistema (p. 70). In questo modo, “è l'assenza di definizione [del possibile virtuale] che influisce - fortemente - la natura scientifica della teoria dell'evoluzione di Darwin” (p. 271). Al contrario, seguendo Darwin, qui si opera alla costruzione di una scienza in cui i cambiamenti hanno luogo al livello stesso dello spazio delle fasi, del possibile virtuale, per riprendere le parole di Thom; spazio delle fasi che può essere modificato dagli eventi aleatori. L'osservazione di Thom ricorda un'idea, espressa in (Einstein, Podolsky e Rosen 1935), per cui “La meccanica quantistica è incoerente o incompleta, perché implica l'*entanglement* delle particelle” (proprietà derivata formalmente in meccanica quantistica), poiché contraddice la separabilità di eventi distinti e misurabili - un'assurdità dal punto di vista di Einstein, allo stesso modo per Thom la teoria di Darwin non è scientifica. Molto più tardi, l'*entanglement* è stato confermato dall'esperienza (Aspect, Grangier e G. 1982). I grandi spiriti scorgono il punto cruciale, anche quando si sbagliano: l'evoluzione di Darwin non permette di predefinire un “possibile virtuale”, ma non per questo non è una scienza; la meccanica quantistica permette di derivare l'*entanglement*, contraddicendo così la teoria della relatività, ma quest'ultimo è stato corroborato dall'esperienza e, pertanto, non è un'assurdità formale.

di tutti gli organismi, “riproduzione con variazione”, il primo e fondamentale principio di Darwin (Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015; Soto e Longo 2016).

In questo testo si insiste sul ruolo delle traiettorie filogenetiche passate e sugli eventi rari nell’innovazione biologica. Conseguentemente e in opposizione con la matematica applicata alla fisica, l’aleatorio, in quanto imprevedibilità, in biologia, al livello dei fenotipi, non può essere associato ad una misura di probabilità, perché le possibilità, anzi la lista degli osservabili e dei parametri possibili, cambiano nel corso del tempo storico. Gli organismi “sopportano” i cambiamenti di quadro, i cambiamenti, nello specifico, dell’ecosistema, grazie alla loro autonomia in senso vareliano (Moreno e Mossio 2015b; Varela 1979). “Autonomia” non vuol dire indipendenza dal contesto: l’invarianza storicizzata della ricostruzione permanente dei componenti biologici si preserva essa stessa nel corso dei cambiamenti, ai quali si adatta attraverso l’ontogenesi e la filogenesi. Si aggiunga che la nuova comprensione dell’autonomia come “closure of constraints”, all’interno di una spazio-temporalità locale e dei suoi tempi caratteristici, come proposta in (Montévil e M. 2015), può far nascere un legame tra le teorie dell’autonomia biologica e la riflessione sulla dipendenza dalla storia e sulla variabilità: infatti, l’autonomia si adatta attraverso il cambiamento, rispettando le temporalità caratteristiche e la stabilità della produzione e della rigenerazione dei vincoli. Stando così le cose, per collegare la teoria di (Montévil e M. 2015) a questa prospettiva storica, bisognerebbe condurre un’analisi ravvicinata dell’invarianza storicizzata propria alla “closure of constraints”.

Infine, si insisterà sul fatto che tutte le “descrizioni istantanee”, anche complete o infinite, del presente di un sistema vivente - pure quella del demone di Laplace - sono formalmente incomplete a causa delle sue “determinazioni teoriche”, contrariamente alle teorie (classiche) dell’inerte: sono incomplete innanzitutto per il ruolo che si dà alla storia, e poi perché i processi biologici possono essere esaminati solo in presente esteso, in un intervallo temporale stabilito dalla nozione di criticità estesa in relazione, come si vedrà, al parametro temporale.

## Un risultato negativo?

È possibile che, come accennato, la riflessione qui proposta possa essere considerata alla stregua di un risultato negativo in biologia, eventualmente minore: non si ha la possibilità di predefinire lo spazio delle fasi dell’evoluzione perché esso dipende anche da una storia parzialmente inaccessibile; lo stesso vale per la possibilità di attribuire delle probabilità ai cammini futuri. Quasi tutti gli storici e gli specialisti dell’evoluzione hanno già informalmente integrato queste osservazioni nei loro lavori. Il fine di questo testo è di inquadrarle in un contesto scientifico e di proporre alcuni principi, utili a comprenderne la pertinenza.

Bisogna ammettere che, spesso, i risultati negativi hanno aperto delle nuove porte alle scienze: la negazione da parte di Gauss del quinto assioma di Euclide, il problema dei tre corpi di Poincaré (da lui stesso chiamato “risultato negativo”), il teorema di Gödel... Il primo ha posto le basi della geometria differenziale riemanniana (e poi della teoria della relatività), il secondo ha portato all’analisi moderna dei sistemi dinamici (e alla loro geometria), il terzo ha permesso alla logica di diventare una disciplina matematica (la calcolabilità, le teorie della prova e dei modelli sono nati dal teorema d’incompletezza e questo per buone ragioni (Longo 2010)). Si potrebbe aggiungere l’entanglement, derivazione einsteiniana di una proprietà fondamentale dei sistemi quantistici, proprietà “negativa”, secondo lui incompatibile con i quadri classici e relativistici. Il mito di una comprensione crescente del mondo per mezzo delle tecniche e delle teorie già accettate, vedasi ad esempio la vita che dovrebbe essere compresa a partire dalle “teorie fisiche esistenti” (Perutz 2007), incontra la storia stessa della matematica e della fisica, che sono state e sono ancora al giorno d’oggi campi di indagine estremamente creativi per ciò che è la novità radicale e anche la teorizzazione contraddittoria. L’unità del sapere è una conquista difficile, così come l’invenzione

di strumenti matematici appropriati: da Newton a Boltzmann e da Maxwell e Eayl a Connes, i concetti fisici e la ricerca di teorie unificatrici hanno stimolato, anche durante il XX secolo, l'invenzione di nuove idee matematiche; le aspettative riguardo la biologia sono le stesse<sup>8</sup>.

In conclusione, per la determinazione e la comprensione del presente e del futuro, sarà assegnato un ruolo fondamentale e costruttivo alla storicità e al passato. Quest'opinione, ben chiara nelle scienze umane e, in certo modo, in biologia (almeno in biologia dell'evoluzione), non è generalmente costituita a partire dalle stesse motivazioni che si propone questo testo. Questo approccio si differenzia nettamente dalle teorie fisiche esistenti, con rare eccezioni che tra poco saranno menzionate, perché possono costituire un ponte per la comprensione di quadri concettuali differenti, come ricordato nella sezione 1.2. Questa indagine si basa su un trasferimento (e un adattamento) di metodi e di nozioni chiave d'invarianza e di trasformazioni che preservano gli invarianti, situati nell'interazione tra matematica e fisica. In ciò, si tenta di "oggettivare", addirittura di proporre un approccio scientifico per le intuizioni comuni sulla storicità dei sistemi viventi, sperando che un giorno da queste proposizioni teoriche costruttive (invarianti storicizzati) appaiano nuovi concetti e strutture matematiche, come è spesso successo in fisica - allorché, è bene sottolineare, ciò non si è mai avuto, per quello che si sa, nell'analisi dei fenomeni biologici.

## Storia e dipendenza dal cammino in fisica: qualche confronto

In cosmologia il processo di formazione delle stelle, dei pianeti e delle loro aggregazioni, vale a dire la loro storia, è analizzata scrupolosamente, perché la cosmologia è quasi unanimemente considerata una scienza "storica"; inoltre, con la teoria del Big Bang, oggi è frequente evocare l'immagine del tempo, che mostra ancora di più l'importanza della storia. Ora, la determinazione formale di un sistema cosmologico (per lo più attraverso equazioni) è data dal suo stato (Islam 2001). Inoltre, fino ad oggi la storicità data attraverso un'origine del tempo è incompatibile con la relatività. In effetti, dopo il teorema di Noether, la conservazione dell'energia è compresa come una simmetria temporale nelle equazioni del movimento (Bailly e Longo 2006; Kosmann-Schwarzbach 2010; Longo e Montévil 2014), cioè come una traslazione temporale che esclude un'origine del tempo. Si tratta di una prima pista per affrontare la difficoltà di integrare la storia nella fisica, scienza che finora ha dato risposte differenti a questo problema (ad esempio, considerare il tempo relativistico come un movimento all'indietro e asintotico verso la sua "origine")<sup>9</sup>.

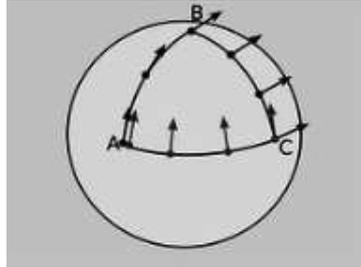
In generale, sistemi fisico-matematici "dipendenti dalla storia" molto interessanti sono stati sviluppati a partire dalla nozione originale di Hetz sui sistemi non olonomici (sistemi che dipendono dal cammino (Berry 2012)). Il caso più semplice e più paradigmatico è il trattamento

---

<sup>8</sup> Anche secondo H. Weil, il quadro matematico delle scienze naturali è basato sulla costruzione preliminare della matematica dello spazio dei possibili, in quanto contesto *a priori* di tutte le analisi. Egli discute le difficoltà che ciò potrebbe comportare ad un'elaborazione matematica della biologia, poiché tale quadro preliminare dev'essere fondato su una lista prestabilita di simmetrie e di loro possibili violazioni (Weyl 1949).

<sup>9</sup> In forma generale, l'astrofisica è piuttosto una scienza che analizza processi fondamentali, più o meno invarianti, come la formazione delle stelle o dei pianeti (Longair 2006). Ora, la quantità disequilibrata di elementi chimici è spesso spiegata per mezzo di una storia particolare dell'universo; dicasi lo stesso per la comprensione della posizione di una palla ai piedi di una collina in riferimento alla conoscenza della sua traiettoria: una rottura originale della simmetria o l'iterazione di alcune d'esse descrive pienamente lo stato di cose (si vedano gli esempi proposti sulla "dipendenza dal cammino"). Un esempio ancora più interessante può essere dato dalle leghe. Un tipo di cottura particolare di una stessa lega può provocare la nascita di proprietà drasticamente differenti: tracce del passato (o "la memoria della forma") giocano un ruolo in certe transizioni critiche o biforcazioni nelle trasformazioni previste. Ciononostante, il processo generale e la sua temporalità sono analizzati in spazi delle fasi predefiniti. Un'approccio recente e radicale alla questione della storicità in cosmologia propone un cambiamento del valore delle costanti fondamentali della fisica; esso fa riferimento, tuttavia, ai cambiamenti dei valori numerici nelle dimensioni prestabilite  $G$ ,  $c$ ,  $h$  (o delle costanti  $a$ -dimensionali, come  $\alpha$ ) (Uzan 2011).

matematico del trasporto parallelo nel lavoro di Levi-Civita, correlato all'uso einsteiniano della geometria di Riemann: dati i punti A e C e un vettore in A, l'orientamento del vettore, spostato da A a C su una sfera (più in generale in uno spazio a curvatura diversa da 0), dipende dal percorso seguito dalle trasformazioni A e C (per esempio, seguendo il percorso più corto o passando per B), allorché, in uno spazio euclideo, è indipendente dal percorso.



Ovviamente, quest'applicazione è altrettanto valida nelle teorie cosmologiche e relativistiche già esposte. Tuttavia, se si aggiunge il vettore *orientato* come osservabile pertinente (per esempio, come impulso), questo caso riemanniano dà un senso generale a questo tipo di dipendenza dal cammino: differenti percorsi producono diversi risultati nello spazio delle fasi (lo spazio matematico di tutti i parametri e osservabili pertinenti), anche se nello spazio essi si trovano nello stesso punto. Così, la conoscenza dello stato delle cose nello spazio delle fasi, comprendendo l'impulso, fornisce una determinazione esaustiva del sistema, indipendente dalla storia. Più precisamente, le tracce o le conseguenze del percorso seguito sono pienamente riflesse nello stato (di fase) e possono così essere ignorate in quanto tali e in favore di una determinazione soddisfacente della dinamica.

Un esempio più raffinato di dipendenza dalla storia in fisica è osservabile nelle cascate di singolarità, nella teoria delle catastrofi di Thom (V. I. Arnold 1992), o nelle transizioni critiche di fase nella teoria della criticità (Binney et al. 1992), la cui natura ed ordine possono giocare un ruolo nella determinazione del risultato finale. In breve, la presenza di una singolarità o di un punto critico può “deformare” una geodetica o condurre ad uno stato diverso. In generale, la conoscenza dei percorsi, osservati come qui sotto negli spazi delle fasi pertinenti, è “sintetizzata” nello stato di fase<sup>10</sup>.

Seguendo questo ragionamento, ma secondo un approccio più pertinente per questa proposta, la fisica statistica e la fisica della materia condensata descrivono fenomeni di dipendenza dal cammino ben distinti. Per esempio, procedimenti stocastici ampiamente studiati, come i cammini aleatori rinforzati dalle fermate e i processi di salto rinforzati dal sito, in cui le particelle tendono a ritornare sui luoghi nei quali sono già passati, sono considerati come dei processi stocastici dipendenti dalla storia (Disertori, Sabot e Tarrès 2014). Da un lato, questi rafforzamenti sono integrati nei dati, in uno spazio delle fasi noto e, dall'altro, l'aleatorio dell'ambiente è dato come catena di Markov, in cui la probabilità dello stato seguente dipende unicamente dallo stato attuale e non dalla sequenza di eventi che lo hanno preceduto, e questo all'interno di una lista dei possibili prestabilita.

In altri casi complessi, la cui analisi oltrepassa la portata di questo testo, è ancora aperta la discussione sull'aggiunta di parametri e osservabili differentemente impliciti che permetterebbe un'interpretazione generalizzando ciò che si è detto a proposito del trasporto parallelo o delle cascate di transizioni critiche. La dipendenza dalla storia, che i fisici descrivono come una

---

<sup>10</sup>È anche il caso della termodinamica d'equilibrio, in cui gli osservabili, che dipendono dal percorso, sono l'entropia l'entalpia, la pressione. . .

dipendenza dal cammino, può essere compresa come percorsi diversi che producono risultati differenti all'interno di uno spazio delle fasi convenientemente inteso, ma prestabilito? Si direbbe di sì, visto che la situazione sembra globalmente ben compresa in fisica come la dimensionalità in meccanica statistica<sup>11</sup>.

Si deve sottolineare, infine, che le strutture non in equilibrio (eventualmente stazionarie, per esempio il flusso costante di energia-materia) non hanno una storia evolutiva: al massimo seguono evoluzioni individuali standard. Recuperando la terminologia che si sta usando, esse hanno un tempo di processo, ma non un tempo storico. Una fiamma, una cellula di Bénard o una micella, un uragano... attraversano irreversibilmente vari stati, sotto un flusso di energia o di materia, inoltre, questo processo si sviluppa in un tempo proprio irreversibile. Tuttavia, le fiamme, le cellule di Bénard o le micelle... sono sempre dello stesso tipo, hanno addirittura, in linea di principio, la stessa struttura fisico-matematica sulla Terra dopo 4 miliardi di anni e possono essere descritte in uno spazio delle fasi pre-dato. È proprio per questo che sono considerati come processi che cambiano in modo irreversibile nel tempo, quello dei processi, che, però, non hanno un tempo storico propriamente detto. Non è questo il caso degli organismi, con i loro 4 miliardi di anni di una storia evolutiva piuttosto ricca, passando per maggiori cambiamenti di osservabili e di parametri pertinenti, così come per eventi rari, che saranno analizzati nella nona sezione.

La difficoltà che si presenta in biologia - la tesi di chi scrive - è che le dimensioni, gli osservabili e i parametri pertinenti che costituiscono lo spazio delle fasi sono anche il risultato di un *percorso storico* e non possono essere predati. Questi cambiamenti fanno la storia e il suo tempo proprio, scandito dalla costituzione della diversità e degli eventi rari. A questo punto dell'analisi è arrivato il momento di proporre l'idea per la quale, in contrasto con i processi fuori dall'equilibrio già menzionati (le fiamme, ecc.), i cambiamenti storici degli organismi, dopo i primi batteri, mostrano la differenza radicale del vivente in relazione a un sistema lontano dall'equilibrio: esso non si pone solo in un tempo processuale, ma anche in un tempo storico inteso allo stesso tempo come filo- e ontogenesi<sup>12</sup>. Si inizierà pertanto l'analisi da una deviazione (apparente) sulla cognizione.

## La memoria: un esempio d'invariante storicizzato

*Imagination... son nom est la déformation  
de la mémoire des sensations  
(P. Valéry, Cahiers, 1974).*

Al fine di discutere del ruolo della storia nei sistemi biologici, può essere utile iniziare da un elemento specifico dell'attività (animale): la ritenzione e la memoria, che rappresentano tracce

---

<sup>11</sup>Come ricordato in (Longo e Montévil 2014), la meccanica quantistica o quella statistica possono avere bisogno di un numero aleatorio di variabili di particelle. La dimensione dello spazio delle fasi, *stricto sensu*, non è dunque prestabilita. Ciononostante, il campo delle possibilità è noto: le particelle hanno una natura nota, osservabili pertinenti, determinazioni equazionali e le probabilità di ciascuno spazio delle fasi delle particelle, che sono dati. In altri termini, anche se il numero delle dimensioni dello spazio non è noto, la sua natura e le sue probabilità sono note - si conosce, pertanto, la probabilità conforme alla quale cambieranno una, due o più dimensioni e, ancora più importante, esse sono formalmente simmetriche. Il numero delle particelle (eventualmente supplementari) diventano, così, un nuovo parametro. La situazione è quindi delicata, ma completamente padroneggiabile sul piano matematico.

<sup>12</sup>Come mostrato in (Longo e Montévil 2014), i sistemi lontani dall'equilibrio sono delle (auto)organizzazioni spontanee di flussi di energia e/o di materia. Al contrario, gli organismi non sono spontanei e usano i flussi per vincolarli. La maniera in cui la chiusura dei vincoli canalizza i flussi energetici è analizzata nei dettagli in (Montévil e M. 2015). La precisazione che qui si aggiunge consiste nel modo in cui gli organismi, per autorganizzarsi, usano continuamente le tracce della loro storia, in particolare una traccia fisico-chimica fondamentale e un *vincolo* ereditato in cui si canalizza lo sviluppo: il DNA.

fondamentali della storia. Tanto la ritenzione *incosciente* che la memoria *cosciente* hanno un ruolo funzionale maggiore negli animali; esse sono necessarie all'azione nella misura in cui permettono la protensione, anzi la previsione cosciente. In (Longo e Montévil 2014) si suggerisce una rappresentazione matematica semplice della ritenzione e della protensione, in cui la protensione dipenda matematicamente dalla ritenzione<sup>13</sup>. Se ne deriva così un coefficiente particolare di protensione, dipendente dalla ritenzione nell'organismo dato, detta "inerzia biologica". Essa è analoga all'inerzia massica in fisica che, in quanto coefficiente di velocità, dà una quantità di movimento; l'inerzia biologica esprime il "peso" astratto (o la traccia) del passato nell'azione protensiva.

Oltre al problema interessante della dipendenza dal cammino in fisica menzionato precedentemente, esistono dei materiali inerti che hanno una sorta di memoria, come mostrato dai fenomeni di *relaxation* e di formazione di leghe; ciononostante, il ruolo nella protensione, come in biologia, è al di fuori del campo d'applicazione delle teorie fisiche esistenti. Una certa ritenzione del passato e una protensione sembrano essere presenti anche all'interno degli eucarioti unicellulari (per esempio, un paramecio può ricordare (*retenir*) i cammini passati per cercare il suo nutrimento (Misslin 2004); vedasi anche il "blub" analizzato (Boiseau, Vogel e Dussuntour 2016)). Molti studiosi affermano dunque che c'è vita laddove c'è *agentivité* e, quindi, cognizione, così come una certa forma di ritenzione e di protensione. Ci si concentrerà, però, sull'attività comune del corpo e del cervello negli animali multicellulari in quanto luogo per la formazione di una traccia attiva selezionata di passato, una forma debole di invariante. Come indicato dagli esempi precedenti, la ritenzione e la protensione riguardano l'organismo intero in relazione al suo ambiente. Queste producono e permettono di fornire un primo esempio di ciò che si è voluto chiamare un "invariante storicizzato".

In matematica, un invariante è interamente definito o conosciuto quando la classe di trasformazioni che lo preserva è esattamente definita o conosciuta<sup>14</sup>. In biologia, si può fornire solo una definizione informale, quantunque ispirata alla matematica, all'invarianza; ciò che "relativamente" si preserva attraverso certe specifiche trasformazioni dello spazio delle fasi (dei possibili biologici, ecosistemici, ecc). Si tratta di una definizione relazionale: l'invarianza dipende da come un concetto, una struttura, se possibile matematizzata, è data in un contesto e preservata nel caso di trasformazioni di questo contesto stesso (Marinucci 2019). Siccome queste trasformazioni si producono nel tempo, è possibile chiamare tali invarianti, propri della biologia, *invarianti storicizzati*.

Si tratta di trasferire, pertanto, in biologia, un concetto o, più precisamente, una metodologia per formare un concetto, anzi, per stabilizzare relativamente una struttura. Si tratta dell'*invarianza per trasformazioni*, con la variabilità storica e la flessibilità propria degli organismi (e della cognizione) e le loro teorie. L'informalità non è dovuta a una mancanza di rigore, ma alla natura differente della stabilità strutturale biologica se comparata con quella fisica, differenza sulla quale si ritornerà.

Giungendo quindi al caso della cognizione, al quale si applica prima di tutto questa proposta teorica: nella cognizione animale la ritenzione pre-cosciente e la memoria cosciente sono forme di costruzione di invarianti per l'azione. Ciò significa che al fine di muoversi, catturare una preda, agire, ecc, gli animali non hanno bisogno di ricordare esattamente o esplicitamente i processi passati trattenuti (nella mente), nemmeno tutti i dettagli dei vari contesti dai quali provengono in quanto invariante relativamente stabile, anche in una forma non purificata; si impara ad anticipare una traiettoria *dimenticando* i dettagli dell'oggetto ricercato e il contesto delle espe-

---

<sup>13</sup> Esistono dati neurofisiologici e immagini neuronali a favore della protensione (pre-cosciente) e della dipendenza della protensione dalla ritenzione (Botzung, Denkova e Manning 2008; Szpunar, Watson e McDermott 2007).

<sup>14</sup> *Un esempio elementare*: una linea retta può essere definita come un asse di rotazione, vale a dire come l'invariante di un gruppo di simmetrie, che sono trasformazioni dello spazio tridimensionale stesso, le rotazioni.

rienze precedenti e mantenendo solo ciò che importa per l'azione. La ritenzione recupera ciò che è cruciale per l'attività in corso; essa esclude i dettagli che non sono per essa pertinenti. La ritenzione e la memoria sono selettive e *oblianti*; esse formano, così, un invariante relativamente stabile selezionando negativamente, e quindi dimenticando ciò che non è pertinente - giacché la pertinenza è relativa all'attività in corso e al suo contesto, essa mantiene ciò che importa per l'azione e ciò permette di reiterare l'azione in ambienti differenti, benché parzialmente simili. Così, l'azione protensiva usa ciò che è stato selettivamente mantenuto e che sembra pertinente per il nuovo contesto "interpretando" le tracce del passato, vale a dire dandogli un significato in un nuovo contesto<sup>15</sup>. La ritenzione di un'attività e di un contesto può così essere considerata come la costruzione di un *invariante storico* (biologico e cognitivo), che è relativamente preservato dalle trasformazioni di quadro.

La protensione modifica e stabilizza maggiormente l'invariante trattenuto, interpretandolo, riattivando questa traccia del passato secondo ciò che è più pertinente nel nuovo contesto di azione. Il ricordo è, infatti, un'attività trasformatrice. La fissazione di un'azione (o di un'interazione con l'ecosistema) e questa stima di ciò che è pertinente per l'azione protensiva risultano dalla struttura relazionale e dalle trasformazioni possibili di contesto, interne ed esterne all'organismo, e questo per affrontare il futuro. È ciò che si intende quando si afferma che la ritenzione e la memoria animale esiste per l'azione, cominciando per il movimento animale più semplice, che è la forma minima di protensione (Berthoz 1997).

In breve, un invariante mantenuto è storicizzato in quanto traccia del passato, costituita in un contesto, e reinterpretazione continua di queste tracce in un senso semiotico. L'oblio selettivo vi gioca un ruolo cruciale. Dalla presente prospettiva, ciò può contribuire in modo determinante all'innovazione; far fronte all'incerto usando un'esperienza mantenuta, vagamente simile, obbliga a inventare un nuovo comportamento o una nuova risposta. Come si mostrerà a proposito dell'evoluzione biologica nella sezione 4.2, la novità è spesso il risultato di una riorganizzazione delle tracce (fenotipiche e genetiche in questo caso) del passato. Tipicamente, per portare a termine un'azione futura, si possono usare e ricombinare differenti esperienze o tracce (pre-coscienti) del passato; l'uso dell'una o dell'altra, o di entrambe, può dipendere da differenze minori, non-misurabili nel presente - una forma di biforcazione dovuta alle tracce della storia passata. Ritenzione e protensione sono insieme una costruzione e una ricostruzione interpretativa del passato.

Riassumendo, la rete di esperienze passate produce un invariante (trattenuto) cognitivo, in quanto risultato di un'attività stabile nei differenti contesti e in quanto traccia interpretata del passato. Questo invariante è inoltre modificato quando la ritenzione è usata per la protensione; l'uso della memoria non è mai passivo, nella misura in cui si trattiene ciò che è utile per l'attività in corso o in prospettiva di un'azione futura, talora ristrutturando radicalmente le tracce mentali esistenti. La memoria è permanentemente reinterpretata. Su questa linea, Edelman e Tononi (Edelman e Tononi 2000) considerano l'attività del ricordo in quanto prodotta nel cervello quando "si pone esso stesso in uno stato già vissuto" compatibile con quello presente. Tale stato del cervello è pertanto il risultato di un'attività passata in un contesto che potenzialmente non esiste più, nel quale contribuiva a costituire un senso specifico; a questo "significato" di un'azione passata si aggiunge il senso dell'azione in corso. Secondo la maniera in cui il cervello (e il corpo) erano strutturati nel passato, quest'interazione del suo stato non è più identica. Essa è il prodotto di una relazione cervello-corpo cangiante, in un nuovo contesto per un nuovo scopo: in questo

---

<sup>15</sup>Per quanto riguarda la difficile nozione di "interpretazione", applicata agli esseri viventi, non s'intende far riferimento ad un significato cosciente "in quanto riferimento", ma di un significato *in atto*, in un *Umwelt* nel senso di von Uexküll (Brentari 2015). In altri termini, di un significato codificato dall'azione in un senso biosemiotico largo (vedasi il riferimento a Peirce in (Deacon 2015)).

senso, essa è interpretata. L'intero processo costituisce un caso tipico di costruzione e uso di ciò che si è chiamato "invariante storicizzato".

Questa dipendenza dal passato dell'azione futura può essere vista come una ricostruzione mai identica di un invariante precedentemente forzato e la produzione di un nuovo invariante; se lo spazio delle esperienze vissute cambia, allora le trasformazioni che definiscono l'invariante storicizzato sono anch'esse soggette a cambiamento. In breve, la ritenzione e la memoria, continuamente ricostruite, sono dei componenti essenziali della protensione e contribuiscono così al rinnovamento in un contesto cangiante. Lo spazio delle fasi dell'attività cambia continuamente. È certamente importante sottolineare che un cervello funziona solo nel suo ecosistema preferito, la testa di animale, il che implica l'attività del corpo intero<sup>16</sup>. Sorprendentemente, la ritenzione di un'attività per un'azione futura può anche aversi nel corpo ed essere poi trasferita nel cervello (rigenerato) (Schomrat e Levin 2013)<sup>17</sup>.

In altri termini, l'instabilità parziale di ciò che è stabile, la ricostruzione e l'uso di un invariante storicizzato, costituito nell'azione, è al cuore dell'adattamento biologico, in particolare dell'elemento più plastico di un animale: il cervello. La trasformazione in un nuovo contesto dell'invariante storicizzato dell'azione passata permette la creazione permanente di nuove soluzioni per affrontare questo nuovo contesto. Questa trasformazione consiste in un cambiamento appropriato del riferimento al passato, una reinterpretazione dell'invariante trattenuto. Ciò può aiutare a produrre novità anche rivisitando un contesto familiare, sulla base di un'esperienza nuova o più approfondita. Infatti, la diversità delle esperienze vissute contribuisce, anche per il fatto che sono mescolate, alla diversità delle risposte possibili a nuove sfide, così come alla stabilità o anche alla sopravvivenza dell'organismo. La ritenzione di *eventi rari*, come si vedrà nella sezione 9, può contribuire anche in modo cruciale alla storia cognitiva di un individuo, poiché gli eventi rari possono incidere fortemente sulla memoria.

Giacché si discute di cognizione, si può esplicitamente affermare che la conformazione specifica del cervello e del corpo e le *deformazioni* hanno un *significato* in un contesto dato, in particolare in quello che contribuisce a formarle. In un contesto differente, queste strutture, che possono anche essere soggette a cambiamenti via transizioni (critiche ed estese), acquisiscono un nuovo significato grazie alle nuove strutture relazionali nelle quali sono incluse. Inoltre, ciò può andare dalle trasformazioni individuali (creazioni di nuove pratiche e nuovi concetti) alla creazione di nuove forme collettive di "vivere insieme" (Koppl et al. 2015).

La costruzione, la trasformazione e l'utilizzo di invarianti storicizzati dell'azione in un contesto, sotto forma di ritenzione e protensione, è al cuore delle dinamiche cognitive. È bene insistere sul fatto che il trasferimento puramente concettuale, fatto di nozioni tipicamente matematiche, dev'essere adattato al contesto biologico. Per esempio, la nozione d'invarianza della linea retta, come detto nella nota precedente, è perfettamente adeguata per descrivere, in fisica, il movimento inerziale in quanto movimento rettilineo uniforme. Si osservi che, a questo proposito, l'inerzia galileiana è una proprietà asintotica/limite, che mai si realizza nel mondo fisico. Ciononostante, contemplando a partire di questo orizzonte-limite tutti i movimenti possibili, essa li rende intelligibili, perché Galilei può così analizzare ciò che è proprio del movimento inerziale, segnatamente la gravità e l'attrito. Nella relazione tra matematica e biologia, questo tipo di passaggio, questa forma di astrazione o di costruzione limite, può non funzionare. Pertanto, le analogie concet-

---

<sup>16</sup>(Prochiantz 2011) osserva che un pianista pensa anche con le sue mani e un ballerino con i suoi piedi. Le strutture neuronali e muscolari sono modificate insieme e la ritenzione è distribuita. Per un'analisi della memoria vestibolare, vedasi (Berthoz 1997).

<sup>17</sup>Le planarie recuperano parzialmente la memoria dopo la loro decapitazione e la rigenerazione delle loro teste, come se le tracce corporali delle attività passate potessero influenzare il cervello nuovo (Schomrat e Levin 2013). Come mostra la nota precedente, è noto che i pianisti e i violinisti hanno sinapsi rafforzate, in relazione all'aumento muscolare locale (si ignora, però, se l'esperienza delle planarie possa funzionare con pianisti e violinisti per mancanza di volontari).

tuali si usano con prudenza; strumenti matematici adeguati a questi concetti potrebbero essere prodotti da innovazioni future, come avviene continuamente nella storia della fisica.

Si discuterà ulteriormente della memoria e della cognizione dopo aver trattato gli aspetti più propriamente biologici del ruolo della storia nelle dinamiche filogenetiche.

## Gli osservabili biologici e le loro dinamiche evolutive

Tout le passé d'un organisme peut venir se refléter dans son monde  
(Miquel 2015)

### “Enablement”, *exaptation* e non-ottimizzazione nell'evoluzione

Come in fisica, le teorizzazioni propriamente biologiche iniziano dalla determinazione degli osservabili (e, laddove possibile, dei parametri<sup>18</sup>) pertinenti. La teoria di Darwin, ad esempio, si concentra sui fenotipi; la *discendenza con modificazioni* e la *selezione* si applicano all'analisi dell'eredità di questi osservabili. La scelta degli osservabili dipende da “ciò che conta” per la teoria, sul modello delle proprietà di conservazione in fisica già menzionate, o, nel caso della termodinamica, sul modello delle proprietà particolari di un osservabile nuovo e molto originale, l'entropia, che non necessita di essere conservato. Anche quando le proprietà conservate non cambiano, l'unità dei vari quadri teorici è una sfida ulteriore, come mostra la ricerca, ormai centenaria, di una teoria unificatrice per i campi relativistici e quantistici. Allo stesso modo la teorizzazione biologica necessita di quadri teorici propri; l'unità con le teorie fisiche esistenti o nuove dev'essere costruita come già detto; ma essa non può essere una metafisica imposta dal trasferimento di strumenti tecnici da una disciplina all'altra<sup>19</sup>.

La matematica e la fisica sono fondate su una definizione (formale) perfettamente stabile di invarianza, poiché i loro oggetti sono generici (sono degli invarianti della prova e dell'esperienza: un triangolo vale per tutti gli altri, così come una mela che cade). In biologia, al contrario, la stabilità strutturale degli organismi, ma anche degli organi e delle popolazioni, è dovuta alla “chiusura dei vincoli” degli organismi e alla loro autonomia (Montévil e M. 2015), ma anche alla variazione, che è correlata alla sensibilità al contesto, contribuendo all'adattamento e alla diversità, ed è, inoltre, basata sulla specificità (e, quindi, sulla storicità) degli organi e degli individui. Una popolazione è più stabile (per resilienza o tolleranza adattiva alle disfunzioni) se è diversificata. Questa relazione vale anche per i piccoli numeri e si applica anche agli organi (Bravi e Longo 2015). Tali proprietà della vita, in particolare il ruolo della diversità o la mancanza della (perfetta) invarianza degli individui, obbligano a comprendere la robustezza e la resilienza in biologia in modo diverso dalla fisica (Lesne 2008). Nello specifico, la ridondanza computazionale o fisica contribuisce alla robustezza in questi domini, ma è molto differente dalla diversità biologica (si veda anche la nozione di degenerescenza di Edelman). La diversità è il prodotto di un'invarianza storicizzata dal fatto che la specificità di ciascun organismo dipende dalla sua storia onto-filogenetica. A dire il vero, come sanno bene i biologi sperimentali, le osservazioni e gli esperimenti richiedono la migliore conoscenza possibile della storia dell'organismo specifico usato come modello.

---

<sup>18</sup>Galilei ha inaugurato la fisica moderna focalizzandosi sulla quantità di moto: il movimento inerziale è la conservazione della quantità di moto.

<sup>19</sup>Tutto ciò viene approfondito nell'introduzione di (Longo e Montévil 2014). Ad esempio, l'unificazione asintotica delle traiettorie classiche e delle leggi di conservazione con la termodinamica, realizzata da Boltzmann, è discussa come un contro-esempio dei metodi riduzionistici dominanti. L'approccio di Boltzmann ha portato ad una nuova teoria unificata e alla sua matematica: la fisica statistica. Si rimanda a (Chibbaro, Rondoni e Vulpiani 1992) anche per una storia anti-riduzionistica della fisica.

Per i fini di questa analisi, si prendono in considerazione gli osservabili di Darwin e le loro dinamiche storiche. Inoltre, lo scopo è di unire ontogenesi e filogenesi, parzialmente in una prospettiva EvoDevo (Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015; Soto e Longo 2016). In questo quadro, l'eredità è un oggetto di studio fondamentale. Il fine è pertanto di analizzare la maniera in cui la conoscenza della storia in quanto tale, e non solo delle sue conseguenze presenti, dev'essere presa in considerazione in tutti i tentativi di "determinare" il presente e analizzare l'evoluzione futura di un organismo. I sistemi biologici non devono quindi essere considerati come dei "sistemi determinati dai loro stati", perché la conoscenza del loro cammino storico sino allo stato presente gioca un ruolo diretto nella determinazione teorica di siffatto stato presente e delle dinamiche future.

Quale che sia la concezione di determinazione biologica, deve chiaramente comprendere le dinamiche imprevedibili, in quanto soltanto gli incompetenti affermano di poter prevedere, risolvendo equazioni, simulando numericamente, o assegnando delle probabilità, la lista dei fenotipi in un milione di anni, una scala temporale evolutiva ragionevole. Ciononostante, alcuni sostengono che si tratta solo di una questione di imprevedibilità deterministica, nel senso di una dinamica non-lineare, e dunque che l'analisi delle traiettorie evolutive in quanto geodetiche in spazi delle fasi pre-dati è possibile ipotizzando che i geni contengono la determinazione completa dei fenotipi (vedasi l'ottimizzazione genetica delle popolazioni, secondo l'approccio di (Grafen 2014), in cui la massimizzazione del valore riproduttivo dirige l'evoluzione, in accordo con la Sintesi Moderna (J. Huxley 1943)).

La prima critica che si può indirizzare all'approccio geno-centrico, ampiamente basato sulla dinamica classica, riposa su un riferimento all'indeterminazione quantistica che sembra presente al livello molecolare e al contempo nei fenomeni genetici ed epigenetici (Arndt, Juffmann e Vedral 2009; Buiatti e Longo 2013). In breve, benché l'aleatorio fisico è l'imprevedibilità, sia classica (e quindi deterministica) sia quantistica (e dunque dovuta a un'indeterminazione intrinseca), l'aleatorio biologico è almeno una commistione ed una sovrapposizione di entrambi. Una mutazione, il salto di un trasposone, può dipendere da eventi quantistici. Lo stesso dicasi dei fenomeni epigenetici come la demetilazione degli istoni. L'aleatorio classico e l'aleatorio quantistico possono così sovrapporsi in una cellula e avere, in modo indipendente o combinato, conseguenze fenotipiche (Buiatti e Longo 2013; Plankar, Jerman e Krašovec 2011). Di qui, un evento quantistico può comportare una variazione negli osservabili biologici, i fenotipi, che è, a un livello fenomenico, molto differente da quello della microfisica con la propria forma specifica di aleatorio. In particolare, un fenotipo può dipendere causalmente da un evento a-causale, nell'interpretazione standard del formalismo quantistico, ben oltre dunque le geodetiche della fisica classica.

Inoltre, le interazioni tra differenti livelli di organizzazione possono produrre ciò che si è chiamato "bio-risonanza" (Buiatti e Longo 2013), in analogia con la risonanza dei pianeti di Poincaré, punto di inizio dell'analisi dell'imprevedibilità deterministica. Ciò permette di prendere in considerazione l'eredità non basata sul DNA, sia essa epigenetica o ecologica (Jablonka e Lamb 2008; Nowacki e Landweber 2009; Rando e Verstrepen 2007; West-Eberhard 2003). Così, la selezione naturale si applica escludendo gli organismi incompatibili e permettendo (*enabling*) quelli fattibili all'interno di un ecosistema co-costituito (Longo e Montévil 2014; Longo, Montévil e Kauffman 2012).

Tutto ciò è palesemente molto diverso dalla determinazione di una geodetica in uno spazio delle fasi pre-dato; si tratterebbe, se così fosse, di un ecosistema in cui tutte le forme di vita sarebbero completamente codificate nel DNA, seguendo il mito geno-centrico della Sintesi Moderna. Per comprendere la differenza, si noti che un fiume e un dado seguono una geodetica, sicuramente deterministica, verosimilmente imprevedibile, un cammino specifico in uno spazio delle fasi pre-dato e "non si sbaglia" mai. Nell'evoluzione (ma anche nello sviluppo), le specie (e gli organismi) si sbagliano spesso lungo il percorso (il 99% delle specie è scomparso). La vita

genera forme nuove esplorando cammini generici (cammini possibili, relativamente agli invarianti per trasformazioni adeguate, ma non completamente determinati - il quantistico è sufficiente a garantirlo). Tale esplorazione è resa possibile e canalizzata da vincoli interni, organici o dell'ecosistema, e fallisce spesso. Il risultato è lontano dall'ottimizzazione, non è proprio un optimum locale, a causa del fatto che non c'è un ordine parziale pre-dato in uno spazio delle fasi fisso in cui l'elemento più importante possa essere definito; l'ecosistema è co-costituito dalle dinamiche e nessuna scelta pre-data degli osservabili permette di fissare uno spazio parzialmente ordinato con un massimo o anche con un massimo locale. In effetti, se un organo o un organismo era un optimum in uno spazio delle fasi dato e se questa ottimizzazione era un elemento essenziale del suo *fitness*, come sostiene la Sintesi Moderna, sarebbe rapidamente morto al minimo cambiamento dell'ecosistema. Per usare la metafora del "bricolage" (Jacob 1981), l'evoluzione può usare la struttura di una vecchia sedia per costruire il contenitore di una radio. Questa non è certamente ottimale, ma ci si può sedere sopra ascoltando la radio, una *exaptation* ben appropriata nei termini di Gould (per altri esempi, come le piume e gli "*spandrels*" di diversi tipi, si vedano (Gould 1989, 2002; Gould e Vrba 1982)<sup>20</sup>). Le mani dei primati sono sufficienti per afferrare i rami degli alberi, ma non ottimali (il loro pollice non è perfettamente opponibile), ciononostante, possono anche essere usate, essendo aperte, per accarezzare, battere o appiattare un oggetto. Detto altrimenti, se un organo era un oggetto ottimale per un'attività, sarà difficile o impossibile utilizzarlo per altre funzioni, sicuramente non in modo ottimale, che non sia l'uso sincronico o una *exaptation* evolutiva.

Riassumendo, l'*exaptation* delle tracce ereditate del passato, insieme all'autonomia degli organismi nel senso di (Moreno e Mossio 2015b), contribuisce alla relativa stabilità della vita attraverso l'invenzione continua di "soluzioni" nuove, compatibili con i vincoli interni ed esterni, co-costruiti di "fattibilità" (*viabilité*). Bisogna sottolineare che l'*exaptation* e il *bricolage* sono compresi meglio abbandonando il mito dell'ottimizzazione nell'evoluzione. L'esempio metaforico di Jacob del ri-uso di una vecchia sedia per fare il contenitore di una radio, senz'altro non ottimale, e i suoi possibili e molteplici usi, rappresenta anche un esempio di ciò che bisognerebbe chiamare "sovraccarico" funzionale degli organi, molto comune in biologia. Le nostre mani, i nostri cervelli, sono gli esempi più tipici - sono continuamente preposti a nuove funzioni. L'ottimizzazione funzionale escluderebbe per principio funzioni alternative, che dovrebbero essere tutte ottimali. Come detto, se la *fitness* è l'ottimizzazione in uno spazio delle fasi pre-dato, l'organo (o l'organismo) ottimizzato non potrebbe sopportare i cambiamenti dell'ecosistema. Inoltre, poiché la struttura delle dinamiche biologiche è relazionale, è normalmente impossibile isolare un osservabile dagli altri, togliere la correlazione delle loro funzioni, definire un ordine parziale con un massimo e attribuire un valore a una funzione biologica misurabile<sup>21</sup>.

---

<sup>20</sup>Lo "*spandrel*" è una struttura, in architettura, sottoprodotto di esigenze tecniche, usato anche per un'altra funzione (per esempio, i dipinti in spazi inconsueti o i pendenti di supporto tra gli archi di una cattedrale, come in San Marco a Venezia).

<sup>21</sup>L'applicazione acritica delle geodetiche classiche alle traiettorie filogenetiche è molto criticata dai fisici che lavorano anche in biologia (Goldenfeld e Woese 2011), dove si sottolinea "l'importanza delle interazioni collettive e l'interdipendenza di fluttuazioni ambientali ed evoluzioni, neglette dalla Sintesi Moderna", unitamente agli approcci di ottimizzazione (attraverso geodetiche) che si basano su quest'ultime. È bene citare direttamente il testo: "...Sappiamo che il trasferimento laterale dei geni si produce anche negli eucarioti multicellulari, come mostrato dai risultati di uno studio dell'associazione pangenomica pubblicato l'anno scorso [...]. Si tratta proprio dell'eredità dei caratteri acquisiti [...] non solo attraverso il trasferimento laterale dei geni, ma anche attraverso i meccanismi epigenetici che eludono i meccanismi ereditari usuali, in particolare nei cigliati. Non solo la Sintesi Moderna riceve forti critiche, ma sono i suoi stessi fondamenti ad essere messi in questione. La tautologia evidente in 'la sopravvivenza del più adatto' serve a sottolineare il carattere retrogrado del paesaggio adattivo; non solo è *non-misurabile a priori*, ma non apporta nessun mezzo per esprimere l'aumento senza-fine della complessità e della produzione di novità genetiche. Così, la Sintesi Moderna è, quanto meno, una rappresentazione parziale della genetica delle popolazioni; ma questo è in sé un sott'insieme limitato dei processi evolutivi e senza dubbio il

## A proposito della creatività biologica

Dovrebbe essere chiaro che si discute delle nozioni di “creatività” e di “ingegnosità” in quanto nozioni teoriche, di forme di imprevedibilità nella teoria della storia che si sceglie, come spiegato nelle note della pagina precedente. In questo modo, non s’impone nessun assoluto metafisico al lettore; è possibile che una “teoria delle variabili nascoste” o un demone di Laplace possa un giorno interpretare queste nozioni in un quadro causale cartesiano pre-dato, ma questo non è qui un problema. Si interpretano infatti termini come “creatività”, spesso utilizzati nell’analisi del vivente, ma inadeguati alle teorie fisiche esistenti, come l’apparizione di un nuovo osservabile (dei nuovi fenotipi, anzi organismi) fondato sulla re-interpretazione contestuale delle storie passate. Le tracce del passato contribuiscono alla costruzione di nuovi osservabili, e così a dei nuovi spazi di interazioni ecosistemiche. Come riassunto in (West-Eberhard 2005), “l’origine delle differenze specifiche, e dei nuovi fenotipi in generale, implica una riorganizzazione dei fenotipi ancestrali (ricombinazione dello sviluppo), seguita da una ricezione (*accommodation*) genetica del cambiamento”. Per esempio, la forma della foglia di *Monstera dubia* “è stata evolutivamente duplicata, soppressa e ricombinata in una molteplicità di modi durante l’evoluzione del genere *Monstera*, dando nascita a una varietà di ontogeneie proprie a ciascuna specie”. Un altro tipo di ricombinazione evolutiva è “il transfert intersessuale o transfert dell’espressione da un tratto di un sesso all’altro” (West-Eberhard 2005). Anche l’eterocronia (la modificazione delle temporalità evolutive) nell’espressione dei tratti adattivi può condurre alla speciazione. Per esempio, lo spinarello (*Gasterosteus aculeatus*) presenta talvolta una forma di bentonico e una forma di limnetico. La loro “popolazione ancestrale occupa gli habitat delle specie discendenti e esibisce i due fenotipi in diversi momenti del suo ciclo di vita, un modello che suggerisce che le diverse specie attuali non provengano da un’evoluzione parallela, ma da un’alterazione delle temporalità” di espressione di questi tratti (eterocroni) (West-Eberhard 2005). Più in generale, gli organismi “interpretano” contestualmente le tracce fenotipiche del passato e le ri-utilizzano; “filogeneticamente separati, i fenotipi ricorrenti mostrano che un tipo comune di ricombinazione evolutiva è la *ri-espressione* di fenotipi persi a causa dell’eliminazione o dell’alterazione evolutiva di un meccanismo regolatore, senza l’alterazione di altri aspetti della capacità evolutiva di produrre la forma persa. [...] Un ampio insieme di prove mostra che l’innovazione fenotipica favorisce una riorganizzazione che produce dei geni nuovi” (West-Eberhard 2005). Questo stesso tipo di riferimento, trasposto all’ontogeneia, guida le nuove ricerche in biologia del cancro (Longo e Montévil 2017).

Anche quando le novità evolutive possono essere permesse (*enabled*) dai cambiamenti genetici e da quelli dell’ecosistema, con effetti sui fenotipi, la loro imprevedibilità differisce radicalmente dall’imprevedibilità fisica; non c’è nessuna “creatività” nel risultato imprevedibile di un lancio di un dado o della misura dello spin di un elettrone, perché tutti i risultati possibili sono pre-dati. Anche le nuove simmetrie nelle strutture di coerenza classica o quantistica, ad esempio l’“emergenza” di strutture (auto-)organizzate nelle transizioni critiche o l’(auto-)organizzazione del flusso nelle dinamiche lontane dall’equilibrio termodinamico, non creano nessuna novità in un senso biologico. In questi casi, i cambiamenti di simmetria, dovuti a cambiamenti dei parametri dati (per esempio, la temperatura per un fiocco di neve), producono dei nuovi oggetti fisici che possono essere *quantitativamente* imprevedibili all’interno degli osservabili pre-dati e qualitativamente prevedibili (il loro *tipo* è prevedibile, per usare la terminologia della logica). Al contrario di quanto avviene per gli organismi, questi oggetti emergono *spontaneamente* e sono tutti simili: i fiocchi di neve, le celle di Bénard, gli uragani. . . appaiono regolarmente, sotto certe condizioni, perfettamente prevedibili, hanno sempre lo stesso tipo di struttura di coerenza, come

---

meno interessante” (Goldenfeld e Woese 2011, p. 383). La “non-misurabilità *a priori*” è, per il discorso che si sta svolgendo, causata dalla co-costituzione delle traiettorie filogenetiche e dei loro spazi delle fasi; l’aumento della complessità aleatoria e indefinita degli organismi è formalizzata in (Bailey e Longo 2009; Longo e Montévil 2014).

si sta affermando, nel senso limitato alla stessa struttura fisico-matematica. Essi dipendono da un tempo processuale, che segue sempre lo stesso fascio di cammini, come già detto. Al contrario, in biologia gli spazi delle fasi cambiano e questi cambiamenti scandiscono il tempo *storico* e contribuiscono alla novità biologica, la cui manifestazione non è affatto prevedibile.

## Verso il futuro: sapere e imprevedibilità

Come menzionato, se i fenotipi sono gli osservabili pertinenti, in quanto un evento quantistico (verosimilmente a-causale) può modificare un fenotipo, allora se ne può dedurre che i cambiamenti degli spazi delle fasi delle traiettorie biologiche sono caratterizzati da un'imprevedibilità intrinseca proprio nel senso della meccanica quantistica. Ciononostante, non è questo l'argomento principale. In generale, la selezione e l'*enablement* hanno luogo al livello dell'organismo sulla base dei fenotipi; delle variazioni propongono continuamente ciò che sarà eliminato o portato avanti/*enabled* da e in un ecosistema co-costruito. Come detto, tale co-costruzione non esclude un controllo discendente delle variazioni da parte dell'ecosistema, tipicamente controllo dell'espressione del DNA attraverso la (de-)metilazione o anche attraverso il cambiamento dei vincoli fisici sulla cromatina o sulla membrana nucleare (Bécavin, Victor e Lesne 2012; Desprat et al. 2008; Fernandez Sanchez et al. 2010).

Ciononostante, il fine principale è qui di scandagliare il ruolo della storia per la comprensione del presente in biologia dunque *a fortiori* per tutte le analisi delle dinamiche biologiche future vale a dire per l'analisi dell'imprevedibilità in biologia. Se tale ruolo è pertinente, quanto si sta affermando può contribuire ad un nuovo quadro teorico e allontanerà radicalmente le analisi biologiche dalle teorie fisiche esistenti in quanto "teorie di stati o processi determinati". Tutto ciò non impedisce certo la ricerca di un'unità futura, cioè l'invenzione di una nuova teoria unificatrice, né di nuove matematiche, verosimilmente appoggiandosi su eventuali "teorie ponte" (fisica della materia condensata, fisica della criticità o fisica statistica). Come indicato, nel corso della storia della loro disciplina i fisici hanno sempre cercato l'unità teorica e nuove matematiche e non delle "riduzioni", dopo l'unificazione di Newton della caduta delle mele galileiane e delle orbite planetarie kepleriane, passando per i lavori di Boltzmann, o per esempio di Maxwell, che unificò elettricità e magnetismo, fino alle ricerche attuali sull'unificazione dell'astrofisica o dell'idrodinamica e della microfisica (Chibbaro, Rondoni e Vulpiani 1992).

## Tracce invarianti di una storia

L'eredità è un fenomeno multidimensionale (Jablonka e Lamb 2008). In particolare, le tracce storiche sono presenti al livello dei geni, ma anche del proteoma, delle membrane, ecc., fino all'eredità culturale. È ormai ben noto che gli embrioni ereditano delle molecole di RNA dalle cellule materne attorno allo zigote e che il sistema immunitario è inizialmente ereditato dalla madre; ciò fornisce un esempio di eredità di un carattere acquisito (Lemke, Coutinho e Lange 2004).

In (Longo e Montévil 2014) si concepiscono il cammino filogenetico e ontogenetico come delle ricostruzioni permanenti, attraverso dei cambi di simmetria teorici, di una struttura coerente: l'unità organica con le sue correlazioni interne ed esterne. La sua sussistenza, tanto interna quanto la sua coerenza con l'ecosistema, è mantenuta durante il cambiamento e per mezzo del cambiamento. L'*exaptation* è il sovraccarico, in quanto adattamenti di organi a partire dalle funzioni passate servono essenzialmente per sopravvivere. Questo comportamento dinamico particolare del vivente produce transizioni critiche estese, nel senso menzionato precedentemente, estendendo la nozione di transizione di fase critica in fisica ad un intervallo di tutti i parametri

pertinenti (il tempo tra gli altri). In fisica, la criticità è descritta come una transizione in un punto matematico<sup>22</sup>. Con la transizione critica puntuale, una struttura coerente si produce o si modifica attraverso dei cambi di simmetria. In biologia, è necessario considerare tutte le traiettorie filo-ontogenetiche come cascate di cambiamenti di simmetria, a cominciare dalla semplice riproduzione cellulare.

Più precisamente, secondo questa prospettiva, non si può rendere conto dei fenomeni biologici in un unico punto del tempo né di altri parametri. L'immagine istantanea di una pietra in caduta o di un fiocco di neve informa ampiamente sull'oggetto inerte: è sufficiente aggiungerci l'analisi (equazionale se possibile) di una dinamica, anzi l'analisi di una transizione critica puntuale (per il fiocco di neve). Al contrario, la dinamica istantanea di un organismo può rendere conto solo dell'anatomia dell'organismo morto; le funzioni e l'autonomia biologica sono completamente perse, allo stesso modo delle relazioni funzionali verso l'ecosistema. Tutta la comprensione propriamente biologica richiede un certo intervallo di tempo d'analisi. Non si ha, tuttavia, solo a che fare con un processo, ma con ciò che si può chiamare "intervallo di criticità estesa". Inoltre, all'interno di questo intervallo, ogni riproduzione cellulare ha tutte le caratteristiche di una transizione critica: tipicamente, la ricostruzione di una nuova struttura coerente con le nuove simmetrie; le nuove cellule sono simili, ma non identiche (ricostruzioni leggermente differenti del DNA e bipartizione del proteoma e della membrana, una rottura di simmetria). In un organismo multicellulare, al momento di una riproduzione cellulare in un tessuto, la matrice extracellulare e la sua struttura di tensegrità sono certamente ricostruite, ma mai all'identico: l'organismo intero si trova quindi in una transizione critica estesa, un passaggio continuo attraverso delle singolarità critiche. Questi cambiamenti di simmetria caratterizzano, in questa prospettiva, le traiettorie biologiche e sono al cuore della variazione, così come dell'adattamento e della diversità, che contribuisce in modo cruciale alla stabilità biologica (Longo e Montévil 2014). Gli invarianti storicizzati sono i prodotti e i produttori di una ricostruzione permanente di strutture relativamente stabili e pertanto localmente invarianti, a tutti i livelli di organizzazione. È bene ribadire che si stanno sovrapponendo descrittivamente l'ontogenesi e la filogenesi, poiché si considerano tutte le traiettorie filogenetiche come una somma di cammini ontogenetici e, dunque, obbedienti agli stessi principi (Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015).

## Spazi relazionali costruttivi e invarianza

A dispetto della natura non-genocentrica di quest'analisi, essa inizia proprio con un riferimento al DNA, la traccia chimica fondamentale della storia evolutiva di un organismo. Essa è costantemente usata da ogni cellula durante l'ontogenesi. Come per qualsiasi altro componente della vita, le funzioni del DNA possono essere interpretate solo in modo relazionale; il DNA agisce in relazione ad un contesto, cioè ad una cellula viva in un ambiente adatto, che può essere un organismo multicellulare; inoltre, si può dare un senso biologico al DNA e definire la sua attività solo relativamente a questo contesto. Infatti, uno stesso DNA può esprimere proteine differenti in un bruco e in una farfalla; un metabolismo indotto può modificare profondamente l'espressione dello stesso DNA anche in animali sociali (api, formiche. . .), ecc. In certi casi, il DNA contiene la determinazione completa dell'organismo. Nella terminologia di (Montévil e M. 2015), il DNA è un *vincolo* (fondamentale!) della filo-ontogenesi - la cellula, in contesti diversi, produce proteine usando in vari modi il DNA come un modello (*template*) vincolante.

Ora, la struttura chimica del DNA è essa stessa il risultato di una relazione storica di più contesti di attività; in altri termini, il DNA è un invariante storicizzato, relativamente stabile, che è stato formato e mantenuto attraverso contesti diversi nel corso del tempo evolutivo. Le

---

<sup>22</sup>Questo è necessario per l'applicazione del metodo di rinormalizzazione a questo fenomeno (Binney et al. 1992).

mutazioni, le trasposizioni, le integrazioni, dovute ad esempio a retrovirus, così come molte altre forme di trasferimenti orizzontali menzionate, possono essere spontanee o dovute a differenti forme degli effetti aleatori già richiamate, o possono essere indotte da interazioni all'interno dell'ecosistema. Quando le conseguenze fenotipiche delle modificazioni del DNA diventano possibili (*enabled*) a partire dal contesto, esse contribuiscono alla stabilità relativa della storia filogenetica dell'organismo. Evidentemente, ciò non esclude che "l'innovazione fenotipica sia favorevole ad una riorganizzazione che produce dei geni nuovi" (West-Eberhard 2005). Come nel caso del cancro, ontogenesi mal funzionante ("*development gone awry*") (Soto, Maffini e Sonnenschein 2008)), le due strutture causali non si escludono reciprocamente e possono anche agire in sinergia, benché le "cause" ecosistemiche debbano essere maggiormente considerate (Longo 2019). Ogni tipo di stabilità nelle relazioni e nelle strutture che ne risultano è relativo al fatto che il contesto può usare diversamente la stessa molecola proprio come un altro componente biologico, tipicamente attraverso un *bricolage* alla Jacob o attraverso un'*exaptation* alla Gould (Gould e Vrba 1982). Per esempio, il ri-uso per nuove funzioni biologiche di elementi trasponibili è una forma d'*exaptation* di luoghi di fissaggio dei fattori di trascrizione (promotori e amplificatori), che giocavano precedentemente un ruolo differente, e questo influisce sull'evoluzione della regolazione genetica (Souza, Franchini e Rubinstein 2013). Si può comparare questo fenomeno a quello delle piume che sono state *exapted* a partire dalle loro funzioni di regolazione termica, per permettere la parata nuziale e il volo degli uccelli. Le tracce della storia sono re-interpretate e acquisiscono un significato/funzione biologico differente nei nuovi contesti, e sono così modificate.

Riassumendo, la cellula e l'organismo possono usare in diverse maniere un frammento dato di DNA o l'espressione dei differenti frammenti di DNA. Delle variazioni minime (stocastiche o orientate) di un frammento di DNA o dei suoi usi possono condurre a differenti cammini ontogenetici e filogenetici.

La variazione genetica criptica è un altro esempio di questo fenomeno. Secondo (Paaby e Rockman 2014): "la variazione genetica criptica (VGC) è invisibile in condizioni normali, ma può alimentare l'evoluzione quando le circostanze cambiano. In teoria, la VGC può rappresentare una riserva segreta massiva di potenziale adattivo o anche un insieme di alleli deleteri che necessitano di essere repressi costantemente". Similmente, il riconoscimento crescente dell'importanza del trasferimento orizzontale dei geni nell'evoluzione (Keeling e Palmer 2008) necessita di una certa conoscenza del ruolo passato dei geni trasferiti per comprendere pienamente le loro funzionalità presenti e future. Come nel caso della cognizione, delle differenze misurabili nell'utilizzo presente o futuro possono dipendere da tracce differenti, ma non-misurabili *a priori* o da differenti usi della stessa traccia di un'attività passata - delle forme di biforcazione nelle traiettorie filogenetiche dovute alla storia anteriore. La differenza con la fisica dovrebbe essere chiara: in quest'ultima, la scelta di una biforcazione dipende da una fluttuazione locale al "momento" e nel "luogo" della biforcazione, nella misura in cui la dipendenza dal cammino può essere presa in considerazione attraverso un'adeguata estensione dello spazio delle fasi; in biologia, la biforcazione può dipendere dalle variazioni passate non rilevabili o attualmente non-pertinenti, il che non esclude che siano potute essere pertinenti in passato. Dalla prospettiva proposta, le conseguenze fenotipiche di un frammento di DNA possono essere comprese solo in relazione con un contesto epigenetico, dell'organismo e dell'ecosistema. Così, si può aver bisogno, per comprendere (cioè tanto per conoscere quanto per prevedere) i molteplici usi possibili di un frammento di DNA, anche della conoscenza dei suoi usi in contesti passati (verosimilmente sconosciuti), che sono potuti essere co-costruiti dagli organismi e dai loro DNA.

La struttura e il ruolo biologico del DNA sono pertanto il risultato dei contesti di interazione che hanno contribuito alla loro storia. Di qui, il DNA mantiene una struttura e si esprime in un modo relativamente invariante da così tanto tempo che le trasformazioni del contesto riproducono interazioni simili e riferimenti che le rendono possibili (*enabling*). Ciononostante, qui si sostiene

che in un contesto differente il DNA può essere usato in maniera diversa. La stessa osservazione vale per tutti gli altri elementi di un organismo. In generale, secondo questa prospettiva, concettualmente ispirata alla matematica, queste trasformazioni del contesto producono e definiscono degli invarianti storicizzati delle strutture biologiche. Essi sono richiesti per la conoscenza del presente e per l'analisi della prevedibilità. Come detto, le piume dei dinosauri sono state un risultato relativamente stabile d'interazioni ecosistemiche in cui lo scambio termico gioca un ruolo preponderante. Esse sono durate qualche decina di milioni di anni. In seguito, solo la clade dei dinosauri volanti e impiumati è sopravvissuta, cosa che sarebbe stato difficile da predire da osservatori eventuali dei dinosauri con piume sporadiche che corrono; l'*exaptation* delle piume è stata cruciale per la loro sopravvivenza. Inoltre, la diversità crescente all'interno del clade ha contribuito alla sua stabilità evolutiva.

In biologia, l'invarianza relativamente alle trasformazioni ecosistemiche non è esatta né permanente; inoltre, il fatto che sia storicizzata è essenziale alla relativa stabilità degli organismi e delle specie attraverso la variazione, l'adattamento e la diversificazione. Queste proprietà sono i componenti essenziali della sopravvivenza di una popolazione o di una specie e, quindi, della stabilità biologica a lungo termine.

## Conoscenza del presente e invenzione del futuro

Seguendo quest'analisi, in matematica gli oggetti sono definiti dalle loro proprietà invarianti per trasformazioni negli spazi: si tratta, pertanto, di una definizione relazionale. La natura costruita e concettuale delle strutture matematiche autorizza a definirle esattamente dall'insieme di trasformazioni all'interno di uno spazio dato (o di una categoria), o possibilmente tra differenti contesti ristretti e ben definiti (più categorie nel linguaggio matematico contemporaneo<sup>23</sup>). In un organismo, al contrario, quasi tutto è legato a quasi tutto il resto e, come è noto dopo Darwin, le variazioni si sviluppano in permanenza e sono sempre "correlate". È anche il caso dell'ecosistema, sebbene in modo più debole<sup>24</sup>.

## La comprensione della vita presente

È possibile comprendere completamente e determinare la struttura e la funzione di un elemento di un organismo o di un ecosistema attraverso la struttura presente (per esempio, chimica) e attraverso le sue correlazioni biologiche? Continuando le argomentazioni appena sviluppate, la risposta è negativa perché ciascun elemento è il risultato non solo delle relazioni attuali, ma anche della storia delle relazioni passate che hanno contribuito a produrre le strutture esistenti e le loro funzioni. Si è presentato il DNA come un esempio tipico di ciò. Nessun segmento di DNA ha funzioni definite; il polimorfismo e la pleiotropia (un gene è legato a più fenotipi, più geni

---

<sup>23</sup>Nella matematica contemporanea, l'approccio di Grothendieck è la miglior forma di matematica relazionale esistente; inoltre, la sua applicazione alla fisica contemporanea viene organizzata in questo stile (Zalamea 2012). La definizione di concetti e strutture nuovi, nell'approccio relazionale di Grothendieck, è in continuità con la prospettiva basata sugli invarianti e le trasformazioni sviluppate da Klein a Weyl e MacLane (il fondatore della teoria delle categorie), ma va ben oltre: le definizioni di Grothendieck sono date nel quadro matematico "più puro", anche se dotate di senso, di modo che la loro invarianza e le trasformazioni sono "intrinseche" alla nuova nozione (Longo 2015).

<sup>24</sup>Un organismo è un ecosistema con fenomeni cruciali di simbiosi tra le specie. Ciononostante, un ecosistema non è un organismo. Le correlazioni della sua struttura sono più deboli, almeno secondo la metrica (ma anche per quanto riguarda le funzioni). Per esempio, due cellule in uno stesso tessuto non si allontanano mai troppo e mantengono le loro funzioni. Nondimeno, in una colonia di formiche, due lavoratrici possono allontanarsi di molto, ma mantengono le loro funzioni. Ben inteso, la maggior coerenza e autonomia degli organismi è fatta per lo più di vincoli e delle loro correlazioni (Montévil e M. 2015).

sono legati ad un solo fenotipo) permettono funzioni molto differenti, a cominciare dalle relazioni multiple (*many-many*) tra geni e proteine, una forma di “degenerazione” nel senso di (Edelman e Gally 2001).

In effetti, la degenerazione è onnipresente in biologia, dal DNA al cervello. Essa può essere specificata come 1) una degenerazione “sistemica”, uno stesso sistema contribuisce a funzioni distinte; 2) una degenerazione “funzionale”, dei sistemi non-isomorfi che partecipano a una medesima funzione (Bailly e Longo 2006). Essa differisce dalla ridondanza nei sistemi artificiali, i computer per esempio, in quanto quest’ultima è realizzata dalla ripetizione di componenti identici.

La degenerazione sistemica corrisponde così in particolare alle differenti funzioni che un medesimo componente biologico può aver avuto nel corso della sua storia costitutiva in differenti contesti relazionali. Gli omologhi ne sono conseguenza: un’origine comune è seguita da funzioni o, addirittura, da anatomie divergenti (per esempio, le zampe anteriori vs le ali nei tetrapodi<sup>25</sup>). In certi casi, gli omologhi al livello biochimico, per esempio le “interazioni ligandi-recettori e le loro controparti intermedie di segnalazione a valle”, possono mostrare “gli omologhi funzionali tra le strutture e le funzioni in apparenza estremamente dissimili come gli alveoli polmonari e i glomeruli renali, la pelle e il cervello, il cervello e i polmoni” (Torday 2015). Reciprocamente, una funzione data può essere il risultato di differenti cammini evolutivi, e questo permette di comprendere le diverse anatomie (degenerazione funzionale); le analogie sono esempi tipici (per esempio le ali degli insetti e quelle degli uccelli). La comprensione (determinazione teorica) di questi fenotipi dipende così dalla conoscenza ricostruita, paleontologica se necessario, delle loro radici comuni, addirittura delle origini diverse per funzioni analoghe - il tutto misurabile, se possibile.

Ora, le potenzialità della degenerazione funzionale e strutturale sono conseguenze di una storia passata costitutiva, ma non è necessario che esse si manifestino nella situazione presente. Detto altrimenti, ogni componente di un organismo o di un ecosistema è il risultato di strutture relazionali in costante trasformazione che hanno potuto lasciare in questo componente una traccia dei cambiamenti per ciascun evento storico importante. Diventa così un invariante storicizzato, risultante da trasformazioni del contesto nel suo tempo storico.

In questo modo, anche una conoscenza completa, ammesso che sia possibile, dello stato presente delle correlazioni interne ad un organismo e ad un ecosistema, non fornisce una determinazione dello stato di cose né delle sue dinamiche future, se necessario in termini di probabilità, come la posizione e la quantità di moto fanno in meccanica classica. L’intera storia dell’organismo ha contribuito alla costruzione del suo stato presente, attraverso le dinamiche passate delle sue relazioni di cui i significati persi possono contribuire alla determinazione presente e alla costruzione futura di nuovi significati, come le variazioni genetiche critiche. Di qui, in contrasto con la fisica, nessuno spazio delle fasi non-storico e pre-dato può includere tutti gli osservabili passati e futuri e le loro possibili descrizioni qualitative, anche perché gli osservabili passati possono essere inaccessibili alla misura. Questi fenomeni non rendono la teoria dell’evoluzione di Darwin non-scientifica, come ha affermato René Thom e come pensano coloro i quali tentano di “correggerla” imponendo la matematica della fisica alla biologia; essi sono, al contrario, al cuore delle scienze dell’evoluzione e dello sviluppo.

Riassumendo, il significato biologico di un elemento di un organismo, sia esso il DNA o un organo, ha una storia cangiante. La struttura chimica di un segmento di DNA è prodotta attraverso la variazione, la selezione e la plasticità. Similmente, solo un’analisi dell’interazione di omologie e analogie tra gli occhi dei polipi e quelli dei vertebrati può aiutare a comprendere le loro strutture e le rispettive funzioni, in quanto le caratteristiche degli occhi degli animali bilaterali

---

<sup>25</sup>Vedasi: <http://www.britannica.com/EBchecked/topic/270557/homology>

non sono solo dovute ai vincoli funzionali presenti, ma sono anche una conseguenza della loro storia evolutiva<sup>26</sup>. Poiché i contesti relazionali passati possono essere difficili da misurare o possono essere ormai persi e le loro conseguenze sulle strutture esistenti possono contribuire a una comprensione delle funzioni presenti così come, potenzialmente, di quelle future, la sola descrizione in termini di funzioni e relazioni presenti è necessariamente incompleta. In breve, il senso biologico è una questione di costruzione storica. Inoltre, in questo approccio, deve sempre essere dato in un presente esteso, un intervallo esteso di criticità (Longo e Montévil 2014).

Certamente, tutto ciò si sovrappone all'incompletezza delle descrizioni matematiche degli stati esatti in fisica. Come detto, la misura classica è sempre approssimata, cioè un intervallo, per principio (a meno di fluttuazioni termiche e gravitazionali), e, nel caso della non-linearità della determinazione matematica, questo produce l'aleatorio classico, inteso come imprevedibilità deterministica. Analogamente, benché differente (non-omologa), la meccanica quantistica introduce un'indeterminazione della misura. In entrambi i casi, le determinazioni fisiche, attraverso la misura e la formalizzazione matematica, sono sincroniche: ignorano le storie passate - con le eccezioni parziali menzionate nell'introduzione e nella sezione 2, sempre riducibili a un'analisi per stato di fase con uno spazio delle fasi sufficientemente ricco o, nella migliore delle ipotesi, inserendo nell'analisi un tempo processuale. Così, l'incompletezza della conoscenza e della determinazione, in fisica matematica, non dipende, in principio, dalla maniera in cui si accede allo stato presente, cioè attraverso la sua misura, con al massimo una certa attenzione al passato in uno spazio delle fasi dato.

In questo modo, queste argomentazioni arricchiscono l'incompletezza sincronica della conoscenza propria della fisica, che si applica certamente anche ai sistemi biologici, per mezzo dell'incompletezza *diacronica* della determinazione biologica, dovuta in particolare alla misura del passato. Inoltre, la maggior parte della storia evolutiva è definitivamente persa, insieme alla genetica, all'epigenetica e alle altre forme di interazione passate. In fisica, per principio, non si può scendere sotto la migliore misura classica o sotto la costante di Planck per le variabili quantistiche coniugate. In biologia, ci sono anche delle lacune inevitabili nella conoscenza e nelle approssimazioni rispetto alla misura delle storie passate, ma, come si vedrà, nessuna teoria oserebbe quantificarle, come ha potuto fare la fisica quantistica di Planck<sup>27</sup>.

## Inventare il futuro

*... no hay camino,  
... se hace camino al andar*  
Antonio Machado.

Dopo quanto detto, non è possibile fornire una lista completa della maniera in cui una struttura degenerata può funzionare in un nuovo contesto, poiché ciò potrebbe richiedere una conoscenza completa delle funzioni passate di questa struttura. Alcune possono essere riattivate in questo nuovo contesto, benché senz'altro in modo differente. Questo può ricordare ciò che si è detto precedentemente sulla protensione e la ritenzione negli animali: una forma di riattivazione sempre diversa di un passato reinterpreto.

---

<sup>26</sup>Tipicamente, nelle piovre, le fibre nervose passano dietro la retina, mentre nei vertebrati queste si dirigono verso la retina e la perturbano con un "punto cieco". Le storie filo- e onto-genetiche differenti di questi due sistemi nervosi aiutano (parzialmente) a comprendere questa differenza e mostrano che non c'è ottimizzazione, poiché gli occhi dei vertebrati possono essere considerati "migliori" a causa della presenza di una cornea, ma non per il percorso delle fibre nervose (la leggenda racconta che Helmholtz, un pioniere dell'analisi strutturale dell'occhio, avesse proposto di licenziare il creatore dell'occhio dei vertebrati, così assurdamente connesso...).

<sup>27</sup>In astrofisica, al contrario, è possibile "vedere" il passato nel presente, nei limiti della misura sincronica: è sufficiente osservare una galassia, una stella sufficientemente lontana... ma tutti gli elementi di questo passato, nel presente, possano aver luogo solo oggi. Questo non impedisce che possa insegnarci qualcosa sul nostro passato.

In altri termini, da un lato, l'intera storia relazionale di un organismo o di un ecosistema contribuisce alla sua determinazione attuale, dall'altro, contribuisce anche alla maniera in cui può reagire ad un cambiamento esterno o interno. La conoscenza delle reazioni future richiede almeno la conoscenza delle funzioni e delle relazioni passate, che possono essere parzialmente o largamente inaccessibili.

Per questo si interpreta la teorizzazione fisica attraverso considerazioni propriamente biologiche. Se la storia contribuisce in modo cruciale alla determinazione dei sistemi biologici, essa li rende anche intrinsecamente imprevedibili, al di là dell'imprevedibilità fisica, riferita all'incompletezza della conoscenza e dunque della misura, del passato. È possibile dare dei limiti intrinseci a questa misura?

In fisica classica, è possibile valutare localmente le fluttuazioni termiche e gravitazionali e, così, fissare un limite inferiore all'intervallo della misura (Rowan, Hough e Crooks 2005). In fisica quantistica, la costante di Planck sembra essere un valore minimo robusto, anche se approssimativo, per la misura (delle variabili coniugate). In biologia, per un osservabile fissato, l'ampiezza del migliore intervallo di approssimazione teorica di una misura storica dovrebbe, in principio, crescere nella misura in cui si va indietro nel tempo. Ciononostante, di quali osservabili e funzioni è una misura esatta? la conoscenza di alcune funzioni ed osservabili del passato potrebbe essere del tutto persa.

Certamente, si può interpretare il ruolo di un passato (sconosciuto) nella costruzione del futuro con ottimismo. Ri-utilizzando le tracce invariati di un contesto relazionale scomparso, l'evoluzione (e lo sviluppo) *crea* la novità inattesa. Il ri-uso non è mai all'identico, cammini filogenetici o dello sviluppo identici non esistono affatto. Il ruolo degli eventi rari, che saranno discussi nella prossima sezione, è sufficiente a mostrarlo. Di qui, alle ragioni fisiche per l'esistenza della novità in biologia (per esempio, gli eventi molecolari aleatori, talora di natura quantistica, le conseguenze fenotipiche e la biorisonanza descritta in (Buiatti e Longo 2013) si aggiunge il ruolo della storia nella conoscenza e nella determinazione, al contempo, dello stato presente e delle dinamiche biologiche future.

La differenza maggiore relativamente alle teorie fisiche esistenti, ma con un ponte parziale verso la fisica della materia condensata e la fisica statistica, è che lo spazio delle fasi cambia in generale: gli osservabili pertinenti, i fenotipi, sono strutture cangianti. Di qui, in biologia è lo spazio delle fasi stesso ad essere imprevedibile. La sfida matematica è di passare da un'analisi dell'aleatorio interno ad uno spazio delle fasi dato, come in fisica classica e quantistica, alla costituzione dello stesso spazio delle fasi. Ciò induce l'impossibilità di misurare l'aleatorio attraverso la probabilità (un problema che è anche in fisica molto delicato (Longo e Mugur-Schächter 2014)). Ciononostante, la matematica è una delle maggiori creazioni umane; per fortuna essa non era "già là", nell'universo assoluto newtoniano pre-dato dalla teoria degli insiemi. Finora si è inventato tutto ciò di cui aveva bisogno la fisica e non solo. In certi casi, ci sono voluti decenni per avere un quadro coerente per idee fisico-matematiche nuove, per esempio la funzione  $\delta$  di Dirac nelle distribuzioni di Schwartz (Schwartz 1951). Lo statuto matematico dell'integrale di Feynman in fisica quantistica non è sempre molto chiaro, per ora è "una soluzione senza equazioni", un'invenzione significativa. Come si dice in (Longo 2015), la biologia merita di interagire in modo co-costitutivo con le matematiche contemporanee e non solo con quelle create per la fisica del XIX secolo, come le analisi in termini di geodetiche (alla Maupertuis o alla Hamilton, tra 1750 e 1850) di traiettorie filogenetiche.

Si è provato a descrivere la creatività della vita a partire dalla vita, in termini di imprevedibilità intrinseca dello spazio delle fasi (in un certo senso, dell'ecosistema), e a partire dal ruolo della storia in biologia. Una comprensione della creatività in termini di incomprendibilità della descrizione dei fenotipi può collegare questo approccio a quelli matematici della teoria algoritmica dell'informazione (Calude 2002), a un livello puramente epistemico; la *descrizione*

*linguistica* dei fenotipi può essere impossibile prima della loro apparizione, essa può così essere considerata come incomprimibile nel tempo - non c'è nessun modo di generare anticipatamente la lista completa dei fenotipi di un'epoca futura. Ciò deve restare epistemico ed espresso solo in termini "linguistici" per il fatto che il quadro computazionale *discreto* della teoria algoritmica dell'informazione è molto incompleto per quanto riguarda le dinamiche fisiche che dovrebbero essere sempre più spesso comprese nel continuo (Longo e Montévil 2017). Tutto ciò è vero *a fortiori* per l'evoluzione biologica. È bene ricordare che in matematica una struttura è discreta quando la sua "topologia naturale" è discreta, cioè quando l'accesso ai dati o la misura sono esatti. Raramente questo ha senso in fisica e ancora meno in biologia; le dinamiche fisiche complesse, dunque almeno le non-lineari, e le dinamiche biologiche dipendono sempre da fluttuazioni e da variazioni che si comprendono meglio in topologie e metriche continue. L'aleatorio, in quanto imprevedibilità relativa alla teoria data, al cuore di questo approccio, ha senso solo con una misura quantistica indeterminata o con una misura classica approssimata, nel continuo matematico delle teorie classiche e relativistiche. In tal modo, l'incomprimibilità temporale della descrizione dei fenotipi può soltanto riferirsi alle forme contingenti della conoscenza e ha una debole oggettività scientifica - essa può dare un quadro delle difficoltà.

Riassumendo, ai problemi della misura sincronica si è aggiunto il problema della conoscenza e della misura diacronica o l'approssimazione dell'accesso al passato. Inoltre, si è passati da una visione dell'aleatorio in quanto imprevedibilità interna allo spazio delle fasi, come in linea principio avviene in fisica, alla costruzione stessa dello spazio delle fasi; ciò che è imprevedibile non è il valore numerico di un osservabile dato, anzi il numero delle dimensioni pertinenti, come in fisica statistica, ma lo spazio stesso degli osservabili. La sua comprensione richiede una valutazione qualitativa della natura, al di là della stessa valutazione probabilistica.

## Il ruolo della diversità e degli eventi rari

Si è discusso ampiamente della diversità in quanto componente della stabilità strutturale della vita, negli organismi, nelle popolazioni e nelle specie. La diversità dipende anche dall'aleatorio, che non è per nulla un "rumore" (ammesso che questa parola abbia un senso) in biologia come si è sottolineato in (Bravi e Longo 2015) attraverso una critica tecnica della "*noise biology*" in buona parte basata sulla fisica statistica. In questo articolo, si è giustificato il ruolo costruttivo della diversità per la stabilità degli organismi o lo si è esemplificato con numerosi riferimenti (il sistema immunitario, i polmoni, il fegato<sup>28</sup>, ecc.).

La diversità è il risultato della specificità di ciascuna cellula individuale e di ciascun organismo; per esempio, anche le cellule del fegato sono il prodotto di una (corta) storia che è sufficiente per generare diversità attraverso una cascata di rotture di simmetrie (in questo caso, attraverso la copia del DNA e la divisione del proteoma ad ogni divisione cellulare). Pertanto, ogni cellula e più in generale ogni individuo biologico sono *rari* in quanto sono esseri specifici e storici.

Ciononostante, questa diversità, in quanto individualità o specificità interna ad una gamma di fattibilità, contribuisce alla stabilità globale di un organismo, di una popolazione o di una

---

<sup>28</sup>Per quanto riguarda il fegato, in opposizione al sistema immunitario ed anche ai polmoni, in (Bravi e Longo 2015) si è ipoteticamente accettata la tesi della "biologia del rumore" (*noise biology*) per criticarla (vale a dire che l'aleatorio, in quanto "rumore", dovrebbe essere analizzato con il teorema del limite centrale. . .). Si è osservato che nel fegato solo la produzione enzimatica media è rilevante, contrariamente agli organi menzionati. Ciononostante, anche in questo caso, l'approccio statistico è errato. In effetti, anche un organo in apparenza così "uniforme" contribuisce alla sua stabilità e a quella dell'organismo attraverso un'importante aneuploidia e poliploidia delle sue cellule (quasi il 50%). Attraverso questa forma di diversità cellulare, il fegato risponde meglio alle intossicazioni e alle lesioni; "dei sottoinsiemi di epatociti aneuploidi, che sono differenzialmente resistenti alle lesioni, restano in buona salute e rigenerano il fegato e restaurano la sua funzione" (Ducan 2013).

specie, nella forma indicata precedentemente. Tipicamente, in una specie la diversità può essere compatibile con la riproduzione sessuale, che si consideri o no l'inter-riproducibilità come un criterio (debole ma) sufficiente per distinguere una specie.

Devono essere tuttavia considerati alcuni casi chiave. Una diversità debolmente fattibile o non completamente fattibile può all'improvviso diventare pertinente, allorché un cambiamento dell'ecosistema modifica la gamma di fattibilità e rende possibile (*enables*) la singolarità di un piccolo numero di individui e accresce le differenze specifiche. Ciò può condurre alla speciazione sotto queste forme (allopatriche, peripatriche, ecc.), che sono spesso il risultato di eventi rari di migrazioni individuali o di piccoli gruppi, come mostra (Zelnik, Solomon e Yaari 2015). Secondo (Venditti, Meade e Pagel 2010), in numerosi casi “nuove specie emergono a partire da eventi singolari, ciascuno raro ma sufficiente a causare la speciazione”. Nella maggior parte dei casi, l'esplorazione permanente di novità, grazie all'instabilità ecosistemica, genetica o alla loro interazione, porta a dei “mostri speranzosi” (*hopeful monster*), nel senso ampio di Goldsmith (1960), ripreso in (Gould 2002) - essi sono ora compresi meglio come una complessa commistione di cambiamenti cumulativi e di salti puntuali (Chouard 2010), che aprono nuovi cammini filogenetici possibilizzati (*enabled*) da una nuova nicchia ecologica co-costruita. Quando questa è sufficientemente importante, l'inevitabile variazione, propria di tutte le riproduzioni, può generare un “mostro” rispetto agli individui esistenti, grazie ad un effetto cumulativo o ad un cambiamento repentino. Questo può (*hopefully*) trovare il suo cammino in un ecosistema cangiante. Si noti che in generale un *hopefulmonster*, fattibile o no, fallisce, ma in rari casi sopravvive e forma una nuova specie, verosimilmente grazie ai rari cambiamenti dell'ambiente. Uno degli esempi più famosi di fenomeni evolutivi, il cancellamento evolutivo dei fringuelli delle Galapagos, è oggi compreso come legato a eventi “El-Niño” rari e forti che hanno modificato l'approvvigionamento alimentare dei fringuelli (B. R. Grant e P. R. Grant 1993).

In questo quadro concettuale, il tempo storico è quindi scandito dai cambiamenti pertinenti, per la maggior parte rari, dello spazio delle fasi evolutivo<sup>29</sup>. In certi casi, comunque, la speciazione può prodursi all'interno di un insieme di simmetrie pre-date. È il caso di nicchie particolari che favoriscono la sopravvivenza di rari mostri ciechi e contribuiscono così alla formazione di 170 specie di “pesci ciechi” (pesci cavernicoli). Si può spiegare in modo simile la perdita delle ali dei kiwis, specie di uccelli del genere Apterygiformi che vivono in Nuova Zelanda. In questo caso, certi mostri speranzosi privi d'ali sono stati favoriti da un ecosistema senza predatori e da un terreno brulicante d'insetti. Probabilmente, la scarsità di insetti volanti, propria di queste isole, ha reso il piccolo uccello goffo più efficace dei suoi cugini volanti che si sono estinti.

Ciononostante, eccetto questi casi particolari, la complessità fenotipica tende mediamente ad aumentare nel corso dell'evoluzione, in seguito a una diffusione aleatoria delle asimmetrie degli spazi (Gould 1996), seguendo la misura delle complessità anatomiche, formalizzate in (Bailly e Longo 2009). I casi di *exaptations* menzionati nelle sezioni 4 e 7 corrispondono ad un aumento della complessità e di strutture radicalmente nuove, come l'orecchio interno, le piume, ecc. Allo stesso modo, si possono menzionare le corna gigantesche e molto articolate del megalocero (grande cervo dell'Irlanda del quaternario), un fenotipo nuovo e insolito, come pure le sue spalle, attraverso le quali si comprende la deformazione necessaria dovuta a criteri fisici di allometria relativi al supporto di siffatte corna; ora, le sue grandi spalle sono diventate il supporto possibile, *spandrel* secondo la terminologia di Gould (Gould 2002), per delle corna sessualmente attraenti,

---

<sup>29</sup>La rarità, tuttavia, può essere storica o relativa. Nell'evoluzione sperimentale degli *Escherichia coli*, delle mutazioni estremamente rare possono divenire molto frequenti in modo inatteso, in seguito ad una storia particolare della popolazione. Segnatamente, la loro espressione fenotipica può dipendere, in maniera contingente, dalle mutazioni precedenti all'interno di una storia di 30.000 generazioni (Blont, Borland e Lenski 2008). Ciononostante, sulla base di questi autori, tutto ciò non è il risultato di un cambiamento cumulativo e graduale; gli eventi rari possono diventare frequenti dopo una lunga storia in un ambiente raro (nel caso menzionato, un luogo artificiale con glucosio limitato e che vincola anche il citrato (Blont, Borland e Lenski 2008)).

necessarie dal punto di vista fisico. Ognuno di questi casi è il risultato di eventi rari nel corso dell'evoluzione; talvolta l'apparizione di un *hopefulmonster* e di un contesto favorevole (*enabling*) sono eventi rari. La combinazione sporadica di eventi altrettanto sporadici forma le parti o le reti della storia filogenetica.

È bene sottolineare che tutto ciò si allontana dalle interpretazioni comuni in biologia matematica, frequentemente caratterizzate dall'applicazione dei quadri matematici della fisica alla biologia. Come già posto in evidenza, René Thom ha presentato lucidamente la filosofia che dirige queste analisi, cioè che "il quadro globale delle soluzioni possibili [...] preesiste al rumore che influenza il sistema". Così, una "fluttuazione diventa pertinente, ma soltanto nel quadro di una biforcazione pre-esistente". È la ragione per la quale, dopo Thom, l'insistenza di Prigogine sul rumore (Amsterdamski 1990) non può essere al cuore dell'analisi scientifica: ciò che importa a Thom è la "definizione di tutti i sotto-gruppi nei quali [il gruppo di] la simmetria data può rompersi" (Amsterdamski 1990, pp. 70-71). Una rottura di simmetria in uno spazio delle fasi pre-dato è, forse, una maniera (molto parziale) di descrivere ciò che ha prodotto i pesci ciechi o i kiwis, ma non rappresenta quanto avviene nella maggior parte dei cambiamenti evolutivi, come mostrano gli esempi forniti di *exaptation* e sovraccarico, che aumentano la complessità attraverso la creazione di nuovi fenotipi. Riassumendo, in una dinamica fisica non-lineare, una fluttuazione causa la scelta di un cammino o di un altro in un insieme pre-dato di possibilità, come spiega Thom. Inoltre, quando il sistema incontra una biforcazione (una transizione critica), una fluttuazione produce *sempre* ciò che spingerà la dinamica su un cammino (una forma) o un altro tra quelli possibili e pre-dati. In fisica, la struttura matematica del mondo o almeno lo spazio delle fasi di una teoria data, deve essere posto *a priori*: si tratta di requisiti necessari per scrivere le equazioni. In tutte le *n*-forcazioni, le fluttuazioni possono essere divise in *n* classi di equivalenza di probabilità differenti, ciascuna conducendo ad uno degli *n* cammini possibili. In ognuna delle *n* divisioni, le fluttuazioni sono generiche e non-rare. Oltre questo, non c'è scienza possibile, afferma Thom - e questa visione plasma implicitamente la modellizzazione matematica ancora dominante in biologia (unitamente ad altre scienze storiche, come l'economia (Koppl et al. 2015)).

In una scienza storica, al contrario, è la diversità e la rarità di eventi ed osservabili *nuovi* che fanno la storia, perché in una popolazione gli organismi, specifici e diversificati, che possono produrre una speciazione, sono per la maggior parte rari. Inoltre, questi organismi si estinguono con maggior frequenza; raramente essi co-costituiscono all'interno di un ecosistema compatibile (*enabling*) i detti cammini evolutivi che non sono pre-dati e modificano, così, lo spazio delle fasi (ad esempio, con orecchie interne, piume, ali, braccia umane, ecc., che cambiano il vivente e la sua interazione con l'ecosistema).

Evidentemente, un'analisi dei vincoli fisici, ad esempio dei vincoli allometrici, possono mettere in risalto certe ottimizzazioni strutturali necessarie. Le spalle del Megalocero, già menzionato, ne sono un esempio. Tuttavia, sono state arricchite da un supplemento di peli multicolori (il loro ruolo di "*spandrel*"), che non sono né necessari né ottimali. Il tentativo è così di comprendere la differenza tra questi due fenotipi pertanto correlati, in particolare attraverso la cascata di eventi rari perfettamente sconosciuti che hanno lasciato tracce di entrambi nel lignaggio germinale.

La derivabilità fisico-matematica del primo fenotipo dovrebbe essere chiara. Si aggiunga che, dopo Hamilton, si comprende una geodetica non in quanto dovuta ad una "direzione", ad un "fine" (il fiume non punta al mare scegliendo il percorso ottimale, né un raggio di luce il suo obiettivo), ma in quanto risultati della massimizzazione *locale* di un gradiente (per ogni punto, il fiume segue la pendenza localmente massima, lo stesso fa la luce in una varietà riemanniana, afferma la relatività: un *integrale* di gradienti locali dà il loro percorso ottimale). Condizionati da vincoli più complessi, l'allometria e altri criteri fisici possono, allo stesso modo, fornire *a priori* degli elementi di comprensione di questa struttura ossea, in quanto conseguenza delle corna

giganti (la cui esistenza è un'altra questione, prossima a quella dei peli). Il secondo fenotipo non è affatto necessario: in altri casi non esiste affatto una pelliccia supplementare, o ce n'è sul petto, sul dorso... con la stessa funzione. Questi peli non sono per nulla ottimali: al massimo hanno dato un vantaggio selettivo per i cervi che li avevano, *ma nessun gradiente locale può permettere di derivare questo vantaggio globale per la riproduzione*, una direzione, un "fine", che gli si attribuisce *a posteriori*<sup>30</sup>.

In conclusione, non è il rumore che governa il mondo, ancor meno il mondo del vivente, poiché l'aleatorio, da un lato, gli è funzionale non solo attraverso degli usi statistici su grandi numeri, ma anche (o soprattutto) come componente della diversità e dell'adattamento su piccoli numeri dunque grazie non a degli strumenti, ma alla differenza nelle diffusioni (per esempio, la distribuzione asimmetrica del proteoma nel momento della riproduzione cellulare) o ad eventi rari; dall'altro, esso è fortemente canalizzato dalla chiusura dei vincoli dell'organismo (Montévil e M. 2015), a partire dal DNA, vincolo fondamentale dell'evoluzione e dello sviluppo. Esso non è più governato da un universo matematico pre-dato con tutte le sue biforcazioni possibili "pre-esistenti", in uno spazio di tutte le geodetiche possibili: la chiusura dei vincoli è una traccia storica cangiante, che trova il suo "senso" storico in un organismo ed in un ecosistema; l'interazione tra i due impedisce sviluppi incompatibili, rende possibile (*enables*) l'*exaptation* e il sovraccarico, ma non forza nessuna geodetica, eccetto qualche struttura fisica, conseguenza diretta o indiretta delle funzionalità biologiche, la cui determinazione e imprevedibilità merita un'altra analisi (e, un giorno, una nuova matematica<sup>31</sup>).

In che senso, però, un evento raro è raro?

## Di nuovo sulla frequenza degli eventi rari

Ben al di là della fisica del rumore, che si riferisce alle fluttuazioni frequenti ma deboli, un dominio molto interessante della fisica tratta delle "fluttuazioni ampie e rare", principalmente nelle code delle distribuzioni e dunque a probabilità molto deboli (Bertini et al. 2015; Vulpiani et al. 2014). Questa teoria delle *deviazioni importanti* (*large fluctuations*), nei sistemi sia all'equilibrio sia lontani dall'equilibrio, arricchisce notevolmente l'analisi tradizionale della fisica classica e della fisica statistica: essa sottolinea l'importanza delle fluttuazioni rare negli spazi delle fasi pre-dati. Queste modificano le probabilità delle dinamiche possibili in un modo pertinente e inatteso, lungi dall'equilibrarsi in media. Infatti, la distribuzione delle probabilità delle fluttuazioni deboli (in altri termini, del rumore) è sempre gaussiana, obbediente al teorema del limite centrale; al contrario, per le fluttuazioni importanti, si osserva un comportamento fortemente distinto da quello gaussiano (Hurtado, Lasanta e A. 2018). Molti esempi sono forniti in (Kogan 2018), laddove l'analisi delle fluttuazioni importanti e degli eventi rari è condotta sin nei dettagli, sottolineandone l'importanza. In un certo senso, questi nuovi approcci vanno ben al di là del principio fisico di Cournot per il quale "è praticamente certo che un evento con una probabilità molto debole non avverrà" (ed è così trascurabile dall'analisi).

Ciononostante, queste singolarità appartengono sempre a un insieme pre-stabilito di eventi o ad un possibile sotto-gruppo di un gruppo dato di simmetria in uno spazio delle fasi pre-

---

<sup>30</sup>La frase "i geni scelgono una forma sugli scaffali delle forme possibili" è incoerente o incompleta: è la lista delle coppie "forma e funzione" che non è data, o "forma e senso", o ancora "forma e interpretazione". Quando Marconi nel 1900 usa un cacciavite di metallo, ereditato da suo nonno, come antenna per la sua prima trasmissione radiofonica, quale scienza, quale Dio avrebbe potuto, nel 1820, quando il cacciavite venne prodotto, includere nel suo spazio dei possibili questo "fenotipo"?

<sup>31</sup>Sulla base di quanto è stato proposto riguardo gli spazi delle fasi e le dinamiche biologiche qui, nei due libri e negli articoli che precedono questo testo, i seguenti lavori (Montévil 2017; Montévil, Speroni et al. 2016) e (Sarti e Citti 2017) aprono nuove maniere di intendere la modellizzazione e possono essere degli strumenti matematici originali per le analisi del vivente.

definito. In biologia, al contrario, è solo *a posteriori* che si può considerare come “possibile” un *hopefulmonster* che ancora non esiste o che risulta da un’*exaptation* o da uno *spandrel* o da un’infinità di altri eventi rari che scandiscono il tempo storico del cambiamento degli spazi delle fasi dell’evoluzione. In questo modo, però, se non si può attribuire una probabilità ad un fenotipo che non esiste ancora, che significa il termine “raro”? Quella della rarità è una valutazione *a posteriori*, come per la maggior parte o per la totalità delle valutazioni evolutive per cui “questo fenotipo è migliore di quell’altro”. Similmente, un fenotipo che non esiste ancora può essere considerato *a posteriori* come raro, all’interno di una popolazione diversificata, quando le sue prime occorrenze e/o condizioni di possibilità ecosistemiche sono state osservate *a posteriori* in una piccola popolazione. In altri termini, si tratta di una valutazione *a posteriori* riguardante un nuovo fenotipo o un successo imprevedibile di un fenotipo valutato “anormale”.

Rispetto ad un esempio di un evento evolutivo temporalmente vicino, (Harms e Thornton 2014) riconoscono prima di tutto che “è difficile sapere quanto prodotto in un passato remoto” al fine di comprendere pienamente le funzioni biologiche presenti e ricostruiscono, dunque, un evento bio-fisico raro come “l’evoluzione della specificità al cortisolo di un recettore ai glucocorticoidi ancestrali”. Ulteriori esempi possono essere trovati anche negli approcci più classici di modellizzazione, come quelli che si riferiscono al fatto che “la sopravvivenza delle speci emerge a partire da eventi rari di migrazioni individuali” (Zelnik, Solomon e Yaari 2015), di cui si è già parlato.

La differenza decisiva tra gli approcci fisici sulle fluttuazioni importanti e sugli eventi rari e l’analisi biologica sugli eventi rari e sul loro ruolo può essere così riassunta:

*Nelle poche teorie fisiche in cui gli eventi rari sono analizzati, e non relegati a margine di una gaussiana e dimenticati, le dinamiche fisiche influenzate in modo pertinente da eventi rari sono considerate come rare. In biologia, al contrario, tutte le traiettorie evolutive sono influenzate, addirittura scandite nei loro tempi storici, dagli eventi rari.*

Si noti che questi eventi biologici sono rari per quanto riguarda la loro specificità biologica, vale a dire, la loro storicità; ogni evento è *individualmente* raro, quand’anche eventi di *questo tipo* si producano costantemente nel corso dell’evoluzione e contribuiscano alla costruzione di *tutti* i cammini evolutivi. Si tratta del risultato della produzione della variazione e della diversità dunque di uno degli invarianti fondamentali delle dinamiche biologiche: ciò che hanno in comune, il loro “tipo”, non è una struttura coerente predeterminabile, ma il fatto di essere rari.

## Conclusioni

Questo tentativo di comprensione scientifica di un componente possibile dell’innovazione evolutiva e della “creatività” biologica e cognitiva si ispira alla metodologia matematica in fisica, laddove la nozione di creatività non ha senso. Essa è al massimo un cattivo nome per l’aleatorio e l’imprevedibilità, presenti nelle strutture di coerenza auto-organizzate o che si formano nelle transizioni critiche, sebbene abbiamo senso nella descrizione delle dinamiche dei sistemi biologici. In questi sistemi si è cercato di comprendere la novità come la costruzione continua di nuovi spazi delle fasi sulla base delle tracce di eventi passati, spesso rari e sempre re-interpretati. *La radicalità della novità biologica non risiederà quindi nella sua improbabilità, ma, molto più profondamente, nell’impossibilità di attribuirle delle probabilità.*

Il fine di quest’analisi è contribuire alla costruzione di un quadro scientifico rigoroso, in particolare unificando l’ontogenesi e la filogenesi (Longo, Montévil, Sonnenschein et al. 2015; Soto e Longo 2016), in continuità con gli sforzi dei due libri scritti rispettivamente con Bailly e

Montévil. Il trasferimento metodologico “revisionista” proposto qui e nei libri appena citati, oltre la matematica e la fisica verso la biologia, è un tentativo di oggettivizzare un’intuizione comune: il ruolo congiunto dell’ereditarietà e della produzione di diversità nell’evoluzione (e nello sviluppo) in quanto principio di non-conservazione dei fenotipi - per dirla con Darwin, l’ereditarietà è una “discendenza con modificazioni”. Questo oltrepassa i principi di conservazione (dell’energia, della quantità di moto...), delle simmetrie nelle equazioni in fisica e dell’aleatorio nelle teorie dell’inerte, delle rotture di simmetria in uno spazio pre-dato (Longo e Montévil 2017). Ciò che si propone è compatibile con queste teorie, ma le intende con nuovi principi, che trattano nuovi osservabili: i fenotipi e gli organismi.

Le costruzioni teoriche devono essere basate sugli *attriti* con “il reale” che canalizza ogni sforzo verso la conoscenza. Le osservazioni, gli esperimenti e le azioni sulla natura forniscono tali attriti e canalizzazioni, una pratica di conoscenza aperta da Galilei e Darwin. Il trasferimento di teorie e tecniche della fisica (matematica) in quanto tali verso la biologia è un approccio idealista, che si fonda su conoscenze costruite in quadri concettuali pre-dati e, in seguito, sul trasferimento di presunte “idee pure” che appartenerebbero ad un dominio platonico assoluto; una pratica comune ma implicita che R. Thom ha spiegato con grande coerenza. Ora, queste idee e strutture matematiche sono state concepite nel corso di storie concettuali specifiche, nel dialogo molto fecondo tra fisica e matematica, anzi nell’autonomia auto-generativa della matematica; non sono il prodotto di indagini concrete sui sistemi biologici, che hanno la loro fenomenalità propria e i propri dati empirici. L’unificazione è un fine difficile che viene dopo, come sanno benissimo i fisici da Newton a tutti coloro che lavorano al fine di interfacciare fisica quantistica e relatività, passando per Boltzmann, avendo tutte queste ricerche avuto all’origine da nuove branche della matematica.

Qui si è fatta semplicemente l’ipotesi esplicita - e si spera corretta - per cui in biologia la costruzione dell’oggettività scientifica potrebbe approssimativamente seguire la feconda metodologia della fisica, sebbene la si debba considerare a partire da un nuovo oggetto di conoscenza e senza, tuttavia, operare un trasferimento astratto di teorie e tecniche. Si è pertanto conferito un ruolo centrale alle nozioni derivate di invarianze matematiche e alle loro trasformazioni, con l’obiettivo di adattare questo metodo alla storicità e alla variabilità dei sistemi biologici. Si è così sviluppata una visione interdisciplinare in cui l’importanza della storia, dei contesti relazionali e dei cambiamenti è al cuore di tutte le analisi. Il filo conduttore, comune alle differenti parti di questa riflessione preliminare, si basa sul ruolo della ricostruzione dinamica delle tracce del passato nella comprensione del presente e nella formazione del futuro dei differenti sistemi biologici, che si tratti di evoluzione o di cognizione. La descrizione di questo fenomeno, all’interno di un dominio, aiuta la comprensione nell’altro, partecipando alla costruzione di quadri concettuali differenti, ma analoghi. È possibile anche applicare il trasferimento di questo metodo ad altre scienze storiche, come è stato fatto in economia, per quanto riguarda il cambiamento degli spazi delle fasi (Felin et al. 2014; Koppl et al. 2015).

Gli abusi concettuali in queste analisi incrociate, dalla fisica alla biologia e alle scienze cognitive, sono certamente numerosi. Ciononostante, l’approccio comune, ammettendo che sia solo moderatamente corretto, può fornire la base per migliori ricerche in ogni disciplina storica. È bene tenere a mente che qui si è trasferito anche un *risultato negativo*, vale a dire l’analisi di una forma di imprevedibilità, basata sull’importanza del passato e sulla problematicità della misura, che è una posizione duale se comparata ai trasferimenti illeciti e positivisti degli strumenti matematici della fisica alla biologia o, allo stesso modo, alle scienze umane e storiche - come è successo frequentemente in economia. Più precisamente, questa prospettiva implica una critica radicale di questi principi che sono utilizzati nelle analisi cosiddette scientifiche delle dinamiche sociali e storiche dell’umanità, come la teoria dell’equilibrio matematico che predomina costantemente in economia, benché sia totalmente inadeguata per quest’oggetto di studio - sia sufficiente osser-

vare che già è inadeguata per alcuni sistemi fisici leggermente complessi, che sono normalmente lontani dall'equilibrio. In effetti, gli argomenti esposti riguardo la storicità in biologia valgono *a fortiori* per l'analisi delle società e della storia umana, in cui il legame tra memoria e azione e il ruolo degli eventi rari (i "cigni neri" della borsa, ad esempio) sono allo stesso modo cruciali. Se tutto ciò è corretto, lo stesso studio di queste forme di imprevedibilità dello spazio dei possibili può contribuire a una comprensione dell'innovazione evolutiva come pure umana. Questo è ampiamente fondato su un'analisi del ri-uso e della re-interpretazione, anzi delle trasformazioni, dipendenti dal contesto, di tracce del passato relativamente invarianti, gli invarianti storicizzati.

**Ringraziamenti** Claus Halberg e i rilettoni della versione inglese di questo articolo mi hanno fatto molti commenti pertinenti e costruttivi.