

“Crossing-over” sul vivente¹

Giuseppe Longo² & Giulia Frezza³

I. La genesi delle strutture: criteri costruttivi in matematica e in fisica

Per comprendere le strutture matematiche (ad esempio i numeri interi, reali, e così via) si può distinguere tra il modo in cui esse vengono a determinarsi, ad esempio la costruzione dei numeri interi attraverso la generalizzazione dell'operazione di successore, e il modo in cui invece le proprietà di tali strutture vengono provate o dimostrate. In ambito matematico, possiamo dire che porre l'accento sui principi di costruzione significa riconoscere il ruolo rilevante della costituzione dei concetti o delle strutture matematiche in quanto derivate da esperienze storiche e cognitive e da “pratiche concettuali” (Longo, Viarouge, 2009). Privilegiare questo aspetto comporta, di riflesso, una presa di distanza dall'approccio di tipo “essenzialista” per il quale le strutture matematiche sarebbero idealità pre-esistenti la cognizione⁴.

D'altra parte, comprendere come l'analisi fondazionale della matematica vada poggiata sulla *costituzione* delle strutture porta di conseguenza a un'analisi parallela dell'*oggetto della fisica* e della *percezione*. È interessante notare qui a margine come tale tipo di riflessione sia vicina a ciò che per Husserl era l'analisi della costituzione della fenomenicità percettivo-cinestetica. Da un lato, la cosa fisica diviene filo conduttore delle analisi delle idealità di coscienza nelle *Idee* del 1913 (Husserl, 1965); dall'altro la concretezza cinestetica del *Leib* si dispiega attraverso i vari livelli co-costitutivi assieme a “*Cosa e Spazio*” nella straordinaria descrizione che Husserl ne fa nel corso di lezioni noto come *Dingvorlesung* del 1904-05 (Husserl, 1973). In quest'ottica, il percorso costitutivo cognitivo-storico della matematica organizza il reale partendo da concetti e ancora prima da *pratiche preconettuali*, come le invarianti costitutive della memoria, la strutturazione di *Gestalt* visuali e percettive, l'esperienza dell'ordine e del fare paragoni (Benoist, 2002). Tutte queste strutture sono ricche di senso, proprio perché fanno riferimento al modo in cui le *esperienze attive* si sono costituite dando vita a “catene di atti” motori (Cattaneo *et al.*, 2007). Queste si strutturano nell'abitudine, venendo poi rimosse nella loro origine e restando così in forma soggiacente, come ragioni dimenticate (Attanasio, 2001). Quando il senso è colto subisce un processo di stabilizzazione e purificazione in un concetto matematizzato, per cui il rapporto specifico con il contesto originario da cui era emerso viene dimenticato. Per cui la matematica può descriversi come «genealogia dei concetti» (Riemann, 1994) e concettualizzazione storica progressiva e continua (Enriques, 1977; Castellana, 2005).

¹ In *Metafore del vivente. Linguaggi e sperimentazione in filosofia, biologia e scienze cognitive*, (a cura di) Gagliasso E. e Frezza G., FrancoAngeli, Milano 2010.

² CNRS, ENS, Paris, département. Informatique et CREA– Polytechnique; longo@ens.fr, <http://www.di.ens.fr/users/longo/>

³ Dipartimento di Filosofia, Università Roma TRE; Université Paris VII; gfrezza@uniroma3.it

⁴ L'approccio essenzialista o platonismo trae origine da una “volgarizzazione” del pensiero di Platone secondo la quale le idee persistono e costituiscono un mondo a sé, indipendente da quello reale.

Un esempio fra tutti, la traiettoria, come “*Gestalt* costitutiva” della matematica, ossia la linea senza spessore degli *Elementi* di Euclide (Longo, 2009a). La geometria di Euclide lungi dall’essere una geometria dello spazio, è una geometria delle figure dai bordi continui, costruite con “riga e compasso”, e sottoposte a traslazioni e rotazioni; in breve è una geometria del gesto e delle traiettorie. Pensiamo con ciò all’articolazione dei tre distinti fenomeni percettivi di quella che potremmo chiamare la prima forma di astrazione pre-concettuale (Teissier, 2005):

- 1) la saccade oculare che precede la preda;
- 2) la retta vestibolare che contribuisce a memorizzare e continuare il movimento inerziale;
- 3) la retta visiva che include la direzione rilevata e anticipata dalla corteccia visiva. Il cervello si prepara – anticipa – l’oggetto in movimento in modo che venga seguito dalla saccade oculare (Berthoz, 1998), determinando così una traiettoria anticipata dallo sguardo.

Nella costruzione del concetto matematico si instaura, dunque, una particolare dinamica tra formazione, cognizione e stabilizzazione. È cosa nota che in tale processo – e in particolare nella «funzione referenziante della lingua» (Bailly, Longo, 2006, p. 48 e sgg.) – quando si tratta di definire e inventare più propriamente i termini e i confini di una scoperta, sono i limiti stessi della lingua propriamente scientifica a venire a relazionarsi con la loro polisemicità d’origine; termini che assumeranno stabilità in seguito, portano nella loro storia il segno di intrecci semantici più complessi. Non insistiamo ulteriormente su questo punto che è oggetto di numerosi studi specialistici (Gagliasso, 2002). Mentre qui ci interessa sottolineare che tale distinzione offre una prospettiva sulla tematica dell’incompletezza, a partire dai teoremi di Gödel del ’31, per i quali risulta impossibile la riduzione teorica ed epistemica della semantica (fortemente generativo-creativa) alla sintassi formalizzante. L’approccio formalista delle «certezze incrollabili» (alla Hilbert) riteneva infatti che fosse possibile determinare la costruzione d’obiettività eliminando i significati, privando dunque la matematica di ogni genesi storico-psicologica, e rendendo così insensibili al problema dell’origine (Husserl, 1961)⁵. Mentre, per cogliere la costruzione dei concetti e dell’obiettività scientifica si tratta piuttosto di evidenziare proprio quelle invarianti cognitive che, come abbiamo visto, permettono di costruire l’obiettività *preservando* i significati o in termini husserliani di operare attraverso il «riattivamento» una ricerca della fondazione gnoseologica delle scienze (Ivi, p. 394).

A questo primo livello riscontriamo delle forti analogie o persino un’identità di principi di costruzione tra matematica e fisica. L’approccio epistemologico consiste dunque nell’analisi della costituzione delle invarianti del linguaggio e delle prove, in un percorso che si distingue da, ma che al contempo è affine all’analisi della costituzione dell’esperienza percettiva come mette bene in luce Husserl nel testo del

⁵ Analogamente il programma fregeiano si proponeva di rintracciare nella sola logica, per altro “significante”, le leggi del pensiero, soprattutto quelle legate al pensiero matematico, eliminando ogni empiricismo e psicologismo dalla logica stessa. Hilbert sostenne poi la “soluzione finale” del problema dei fondamenti formulata negli anni ’20 che propone di dimostrare con calcoli finitari potenzialmente meccanizzabili la coerenza e la completezza di ogni sistema formale rilevante ed indipendente dal significato.

1936 e pubblicato da Fink nel '39 col titolo "Vom Ursprung der Geometrie" nella *Revue Internationale de philosophie*:

Occorre anche tener presente che le proposizioni si danno alla coscienza come modificazioni riproduttive di un senso originario prodotto attraverso reali attività originarie e che quindi, già in sé stesse, rimandano a questa genesi (Husserl, 1961, p. 391)

Le leggi fisiche e matematiche non sono dunque a priori, assolute e fuori del mondo, né esiste un universo insiemista, sorta di assoluto newtoniano, in cui le matematiche sarebbero già iscritte. Diciamo con Husserl, oltre Husserl che *ogni costituzione è contingente* in quanto storica. Nel caso degli oggetti fisici, in microfisica ad esempio, l'attività di costruzione degli oggetti attraverso un ritaglio concettuale, è evidente: gli elettroni o il campo quantico non pre-esistono, sono il risultato di un'esplorazione attiva, di una "frizione" operata grazie agli strumenti di misura, unica forma di accesso al "reale" in fisica quantistica; luogo imprescindibile della polarità fra soggetto conoscente ed "oggetto". La matematica (e la fisica) risulta allora un gioco di strutture, di forze coesive che corrispondono ad una *dinamica interattiva del senso*; essa rende intelligibili delle parti di mondo perché le organizza, le correla e le struttura. Ma tale costruzione è in risonanza permanente con il mondo stesso e per questo la matematica aiuta a comprenderlo.

Se ci spostiamo ad osservare ora il rapporto di matematica e fisica, ponendo l'attenzione al modo in cui la stessa materia o la realtà si manifesta al soggetto cognitivo in livelli di organizzazione distinti, si evidenzia una polarità a seconda che si consideri la fenomenalità fisica o le nostre strutture cognitive. Con un approccio monista, ci si può interrogare dunque sull'associazione tra tali livelli che permette il costituirsi di una conoscenza: accoppiamento dominato da uno dei poli a seconda che si faccia appello a un approccio fisico o matematico. Mentre la differenza tra i due punti di vista si evidenzia nella natura dei principi di prova: la *dimostrazione* nel caso della matematica e la *misura* in fisica.

II. Il valore critico della metafora nella scienza

L'origine cognitiva dei concetti come abbiamo visto mostra l'intricazione tra soggetti, linguaggi, pratiche storico-sociali e scientifiche. Non entrando all'interno del vasto panorama di studi su tali argomenti, vale la pena ricordare in breve solo alcuni nodi concettuali per inquadrare meglio il punto che qui ci interessa.

Si tratta del riconoscimento di una dinamica complessa: pensiamo ad una sorta di struttura ad anelli retroattivi, tra linguaggio comune e linguaggi scientifici. La formazione di nuovi concetti determina uno spostamento di asse, una relativizzazione radicale dei modelli preesistenti o un processo di «riconsiderazione degli ordinamenti vigenti» che determina una nuova pertinenza per l'osservazione (Gagliasso, 2002). Quando il nuovo concetto funziona esso diviene uno strumento che ridefinisce i territori delle differenti discipline, a volte anche in modo inusitato, rispetto alla precedente pertinenza. Come ad esempio vedremo per il concetto di anti-entropia; in breve, in contrasto con la tendenza al disordine (entropia), il concetto fisico di entropia viene trasposto nel biologico e cambiato di segno divenendo un nuovo osservabile,

l'anti-entropia, come quantificazione della complessità biologica (differenziazione cellulare, diversi livelli di organizzazione, geometria del fenotipo...).

In generale, la storia del neonato termine prosegue così verso la sua introduzione nella comunità scientifica (fase pre-paradigmatica) riscontrandone più o meno il favore, a seconda degli “occhi” o dei “paraocchi” con cui si fa scienza.

A description of a phenomenon count as an explanation, I argue, if and only if it meets the needs of an individual or a community. The challenge, therefore, is to understand the needs that different kinds of explanations meet (Fox-Keller, 2002, p. 5).

Anche le metafore, come i modelli o le analogie seguono tale dinamica, e passano attraverso il vaglio delle varie “tappe epistemologiche”. Il processo sembrerebbe di natura chiasmica: dal linguaggio ordinario la metafora entra nel linguaggio scientifico, ma è qui che viene sottoposta alla normatività della scienza, per poi re-immetersi nel pensiero comune, spesso cristallizzandosi, e dando così vita ad una sorta di ridondanza, in un continuo circolo metalinguistico “...ordinario-metaforico-scientifico-ordinario...”.

È chiaro che questa complessa dinamica non sempre mantiene la rigorosità, e limpidezza proprie della scienza: nominiamo qui soltanto gli studi sull'oblio o la fortuna delle teorie del passato in ragione dell'ingerenza dei modelli dominanti o dello spirito del tempo (Fox-Keller, 2002) o anche il processo di reificazione ontologica dei concetti che emergono nell'uso delle metafore – nella storia recente pensiamo al “codice genetico” (Kupiec, Sonigo, 2003). Apriamo, in breve, una piccola parentesi riguardo la metafora del “codice genetico”. A oggi, varrebbe la pena quanto meno chiedersi perché l'eventuale informazione contenuta nel DNA venga interpretata alla luce della programmazione informatica, in quanto è sempre più comprovato che il contesto dell'espressione del DNA non è certo un *locus passivo* di iterazione dell'identico, ma piuttosto si potrebbe descrivere come uno *spazio attivo* di costituzione genetica in cui la *variabilità* è altrettanto importante della stabilità, cosa che non trova equivalenti in *Computer Science*, anzi contraddice principi costitutivi di tale scienza (Longo, Tendero, 2007).

Vista la portata di queste tematiche e la non ancora piena concordanza teorica rispetto all'uso della metafora nella scienza – di cui questo volume vuole rendere conto – ci sembra utile introdurre (in via puramente regolativa) un possibile criterio di “buono” e “cattivo” uso delle metafore nelle scienze. Si vuole in particolare mettere in risalto l'effettivo *potere d'intelligibilità* che le metafore sono in grado di offrire. Una *buona metafora* deve apportare maggiore intelligibilità, non veicolando, ad esempio, elementi non controllati e di cui non si è in grado di rendere conto da un punto di vista formale o ricorrendo a una strutturazione delle correlazioni formali sbagliata o implicita. L'implicita logica laplaciana, propria delle ipotesi “un gene-una proteina” e del «dogma centrale della biologia molecolare» (Crick, 1970), soggiace alla metafore informazionali e di programmazione troppo a lungo in uso in tale disciplina (la determinazione lineare implica la predittibilità).

D'altra parte, riuscire a mettere in comunicazione aree e campi tematici apparentemente tra loro distinti che possono invece venire a interrelarsi e talvolta a

convergere l'uno sull'altro, è ancora una caratteristica di una buona metafora. Facciamo un breve esempio positivo. L'analisi schizzata da Poincaré del movimento come "ragione" della traiettoria si configura nell' "isomorfismo di Poincaré-Berthoz" prima citato: ossia l'azione ci fa praticare un'identificazione o un isomorfismo tra l'esperienza/memoria inerziale (vestibolare) del movimento in linea retta e lo sguardo anticipatore, in avanti, che precede il movimento. Laddove tale metafora serve per mediare e connettere campi tematici in origine distanti tra loro essa può divenire utile anche per rompere un'idea preconcepita e solo formale del pensiero matematico, facendo riscoprire invece, come abbiamo visto, il senso della genesi cognitiva dei concetti: dall'attività cognitiva di inseguimento di una traiettoria, all'apprezzamento di un bordo, si giunge a quell'invariante pratico di "linea" che precede, co-costituisce, soggiace all'invariante linguistico e poi matematico di *linea* (Longo, Viarouge, 2009)

Quand'è allora che una buona metafora può venire esplicitata non perdendo quella capacità interpretativa che permette *più* e non meno intelligibilità? Quando la sua struttura matematica di fondo è "sotto controllo" e può venire esplicitata. Tale criterio ci sembra essere particolarmente utile nel caso del vivente, dove le metafore necessitano di attenzione specifica poiché si fondono questioni di diversa natura legate a variabilità, complessità e interazione. Con che ottica possiamo inquadrare assieme tali tematiche?

III. Alcune dualità concettuali tra fisica e biologia

Nel tentativo di una "filosofia naturale" di Bailly e Longo (2006) il confronto tra le invarianti in fisica e quelle del campo biologico è stato condotto attraverso *dualità* che qui evidenziamo e riassumiamo. Viene da domandarsi, visto il nodo tematico che si sta affrontando, se tale polarizzazione sia essa stessa una 'buona metafora', nel senso definito prima, per caratterizzare e rendere più intelleggibili alcune differenze fondamentali, ed evidenti a tutti sul piano puramente fenomenale, tra materia inerte e vivente. La risposta è negativa in virtù di ragioni non *de iure*, ma *de facto*, si direbbe: è solo in corso d'opera, durante l'elaborazione della ricerca di un'estensione della fisica che renda conto in termini fisici (certo!) della singolarità del vivente che sono state riscontrate tali caratteristiche *polarizzazioni*. Dalla constatazione pratico-metodologica si è introdotta poi la notazione teorica di "opposizione concettuale" che si distingue in modo netto da un impianto di tipo metaforico. La forza di tale procedura risiede in una logica incrociata che mostra in modo evidente il *rovesciamento* dei parametri e degli osservabili pertinenti tra la dimensione fisica e quella più propriamente biologica. Ricordiamo che nel distinguere due "dimensioni" non si intende compiere un salto di materialità, ma trovare un *approccio alla fenomenalità*.

L'aspetto duale e di opposizione concettuale si estende a più di un fenomeno indagato, come si vede chiaramente in figura 1 dove sono riportati entrambi gli ambiti disciplinari.

FISICA

BIOLOGIA

la variazione (la gaussiana)	la variabilità (processo di individuazione)
traiettorie specifiche (geodetiche) e oggetti generici	traiettorie generiche (possibili/compatibili con l'ecosistema) e oggetti specifici
(Schrödinger) l' energia è un operatore (Hf), il tempo è un parametro f(t,x)	l' energia è un parametro (allometria) , il tempo è un operatore (misurato dalla produzione di entropia ed anti-entropia)
criticità puntuale	criticità estesa
tempo reversibile (o irreversibile per degradazione- semplificazione termodinamica)	irreversibilità doppia del tempo (termodinamica e costituzione di complessità)
l'aleatorio è imprevedibilità non deterministica o deterministica all' interno di uno spazio di fasi	l'aleatorio è indeterminazione intrinseca dovuta al cambiamento dello spazio di fase (processi evolutivi di ontogenesi e filogenesi)

Figura 1. La differenziazione teorica tra teoria dell'inerte e quella del vivente si configura attraverso dualità concettuali

Molto in breve, si sono qui rappresentati veri e propri *scambi duali* o “*crossing-over*” tra teoria fisica e biologica: in fisica gli *oggetti* sono *generici* (come il grave di Galileo – uno vale l'altro...), ma le loro *traiettorie* sono *specifiche*, delle geodetiche. In biologia, invece, gli *oggetti* non possono essere descritti che come *specifici* (in ragione della variabilità individuale del vivente), mentre le *traiettorie*, filogenetiche, ontogenetiche, o le azioni, sono *generiche*: sono dei co-possibili, ossia dei percorsi compatibili con l'ecosistema cocostituito. Proseguiamo, l'*energia* in fisica è un *operatore* (quantistico), mentre il *tempo* è un *parametro*; in biologia la prospettiva si rovescia: l'*energia* è un *parametro* (scaling laws), mentre il *tempo* è l'*operatore* principale (in Bailly, Longo, 2009 esso è matematicamente identificato con la produzione simultanea di entropia e di organizzazione biologica, anti-entropia, nell'evoluzione e nell'embriogenesi).

La matematizzazione della fisica si basa su invarianti, tra cui le costanti, ma anche su determinazioni obiettive. Le rare invarianti che si trovano in biologia sono piuttosto associate a dei ritmi (numero respirazione, battiti cardiaci, cicli metabolici...); al di là del livello fisico-chimico (sottostante o di base), la “stabilità strutturale” del vivente si mantiene attraverso la “*variabilità*”: i ritmi biologici ed i fattori allometrici ne sono componenti essenziali proprio in quanto invarianti specifici e interspecifici su cui si tornerà in seguito.

Affinché ci sia deriva filogenetica e ontogenetica, e dunque evoluzione e formazione della specie e dell'individuo, la “stabilità strutturale” non può essere

un'invariante fisica, poiché essa viene violata costantemente in ragione della variabilità costitutiva dell'individuo vivente. In breve: senza variabilità e individuazione nessuna ontogenesi, nessuna evoluzione, nessuna vita. E aggiungiamo, in chiosa, che la riduzione di tali aspetti alle invarianti fisiche ricercate dalla biologia molecolare, semmai possibile, è lungi dall'essere raggiunta. Pertanto riuscire a estrarre invarianti *propriamente* biologiche, senza escludere tutti i tipici fenomeni di frizione fisica tra vivente e mondo-ambiente, non è compito facile. A partire da questa *eccentricità* del vivente rispetto alla Fisica (passaggio dalla centralità dell'invarianza alla "stabilità strutturale" e alla variabilità), vediamo che è possibile mettere in luce un quadro comprensivo di alcune delle caratteristiche che esprimono la "singolarità" fisica degli organismi viventi.

Per caratterizzare lo *stato vivente* della materia (Buiatti, 2000) ed i suoi processi sembra utile introdurre la nozione di *situazione critica estesa* (Bailly, Longo, 2008). Sappiamo dalla Fisica, e in particolare dagli studi degli anni Settanta (Nicolis, Prigogine, 1977) quanto le analisi dei sistemi lontani dall'equilibrio siano rilevanti per comprendere fisicamente gli organismi. Lo studio fisico delle situazioni critiche ha permesso di mettere in luce la presenza di esempi di auto-organizzazione (Bak *et al.*, 1988) offrendo lo spunto per tutta una corrente di studi riassumibile nell'idea di *criticità auto-organizzata emergente* dal caos, o "ordine spontaneo" (*order for free*) (Kauffman, 1993), e le varie teorie sull'emergere di complesse strutture di fenomeni dai componenti elementari sottostanti (McLaughlin, 1992).

Il concetto di *situazione critica estesa* vuole proporre un'estensione prima concettuale, poi matematica di tali teorie. L'elemento di partenza è che nel corso delle transizioni di fase si presentano una serie di caratteristiche che manifestano il passaggio dal *locale* al *globale* – divergenza della lunghezza di correlazione per cui variazioni infinitesimali creano modifiche finite, comparsa dell'ordine... – in cui la struttura globale è completamente coinvolta nel comportamento dei diversi elementi (struttura locale). La criticità estesa si oppone alla nozione di criticità in Fisica in quanto le transizioni critiche sono definite per valori *puntuali* dei parametri di controllo. Mentre nel caso del vivente la soglia della criticità è *estesa* nel tempo e si rappresenta con un volume non nullo nello spazio di tutti i parametri pertinenti. Intuitivamente ciò sta per la capacità d'adattabilità e plasticità del vivente, che "resiste" anche a variazioni dei parametri (tempo, temperatura, pressione ...) entro una soglia di tolleranza; nonché a rappresentare il fatto che per quanto il vivente possa essere robusto in relazione alle modificazioni dei parametri esso si trova sempre in una *situazione critica* in rapporto alla sua esistenza *estesa*, sebbene limitata, nel tempo. Esso è sempre su una "soglia" che cambia, dinamicamente: la sua intera struttura di correlazioni (di coerenza) è transiente fra una fase ed un'altra, nei limiti di una stabilità strutturale relativa all'ecosistema.

Un altro aspetto di devianza dai principi della Fisica è rappresentato dal fatto che è difficile poter concepire l'apprendimento – in senso lato – senza l'errore e la memoria dell'errore (Bailly, Longo, 2007). L'azione protensiva o diretta a un fine – e dunque non solo l'intenzione – alla base di tutti i comportamenti animali (a partire dall'ameba) è sempre solo una tra le molte possibili o meglio *co-possibili* con

l'ecosistema, ed è in forte dipendenza dalla specificità individuale, nel gioco continuo che correla imprevedibilmente specificità e varietà a individuo e specie. Nessun gradiente, o geodetica della fisica, è adeguato ad esprimere tale pluralità dei co-possibili, filogenetici e ontogenetici e dell'azione: si tratta sempre di percorsi generici, dei possibili evolutivi, come si diceva.

Come si è accennato, per chiarire meglio la nozione di temporalità che sembra essere centrale nello studio del vivente si introduce in (Bailly, Longo, 2008) un tempo specifico – interno – dell'organismo, una dimensione matematica compattificata aggiunta al tempo fisico lineare (il tempo orientato della termodinamica, ovviamente soggiacente ad ogni attività biologica). Tale temporalità aggiuntiva non è *storica*, come abbiamo visto ad esempio nel caso dell'azione e dei processi evolutivi, è piuttosto *iterativa*. Infatti non si prendono in considerazione misure di grandezza dimensionale come in Fisica (i secondi nel tempo), ma 'numeri puri' corrispondenti al numero delle iterazioni di processi biologici di base effettuate dall'individuo. Tali iterazioni riguardano le funzioni fisiologiche principali (numero dei battiti cardiaci, di respirazioni, di cicli metabolici...), dipendono dalla massa degli organismi considerati (allometria) e il loro numero è analogo per intere classi di organismi (West, 1997). Ad esempio tutti i mammiferi, dal topo alla balena, sono in una medesima classe caratterizzata dal numero di battiti cardiaci disponibili nella durata di vita media.

Infine, per descrivere più chiaramente gli aspetti di variabilità (errore, traiettorie co-possibili, individuazione...) vale la pena soffermarsi su un'ulteriore elemento. L'aleatorio della Meccanica Quantistica è "obiettivo", intrinseco alla teoria, concettualmente e matematicamente diverso dall'aleatorio classico che è epistemico. Tale aleatorio è intrinseco in quanto è associato ad ogni operazione di misura, poiché in Meccanica Quantistica, una misura dà soltanto un valore di probabilità. Tuttavia, caratteristica comune alle varie forme dell'aleatorio fisico è la predeterminazione degli spazi dei possibili: i risultati o le traiettorie caotiche sono date all'interno di uno spazio di possibilità matematicamente predeterminato (le sei facce del dado, il verso dello spin-up/down di un quantum, financo la creazione di quanta, sono descritti fra dei possibili...) (Bailly, Longo, 2006; 2007a). Nella Biologia dei sistemi, invece, gli osservabili propri dell'Evoluzione darwiniana, i fenotipi e le specie, come abbiamo visto, non possono essere "già dati", o comunque non c'è modo di descriverli in anticipo all'interno dello spazio di tutte le possibili evoluzioni, in una teoria globale. L'aleatorio biologico (evolutivo) deve dunque essere caratterizzato come *intrinsecamente imprevedibile, al livello stesso della descrizione dei possibili*.

L'esplicitazione matematica e le "buone metafore" possono servire almeno allo scopo di rilanciare il dibattito dando uno stimolo alla concettualizzazione nel doversi impegnare in una notazione rigorosa. Le estensioni teoriche delle teorie dell'inerte cui si è fatto cenno, ottenute per dualità – o usando il termine qui introdotto, per "*crossing-over*" – rispetto ai concetti corrispondenti della fisica, pensiamo possano contribuire a tale dibattito.

Bibliografia

- Attanasio A. (2001), *Gli istinti della ragione. Cognizioni, motivazioni, azioni nel "Trattato della natura umana" di Hume*, Bibliopolis, Napoli.
- Bailly F., Longo G. (2006), *Mathématiques et sciences de la nature. La singularité physique du vivant*, Hermann, Paris.
- Bailly F., Longo G. (2007), "Geometric schemes for biological time. Invited lecture", *Conference on "Episodic memory and time in neurophysiology"*, Strasbourg, October.
- Bailly F., Longo G. (2007a), "Randomness and Determination in the interplay between the Continuum and the Discrete", *Special issue: Mathematical Structures in Computer Science* 17(2), pp. 289-307.
- Bailly F., Longo G. (2008), "Extended Critical Situations", *Journal of Biological Systems*, Vol. 16, No. 2, pp. 309-336.
- Bailly F., Longo G., (2009), "Biological Organization and Anti-Entropy", *Journal of Biological Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 63-96.
- Bak P., Tang C., Wiesenfeld K. (1988), "Self-organized criticality", *Physical Review A* 38, pp. 364-374.
- Benoist J. 2002, "Struttura e Gestalt: una difficoltà della *Filosofia dell'aritmetica*", *Iride*, 37, dicembre, pp. 641-657.
- Berthoz A. (1998), *Il senso del movimento*, McGraw-Hill Companies, Milano (ed. or.1997).
- Castellana M. (2005), « Federigo Enriques, Gaston Bachelard et Ferdinand Gonseth. Esquisse d'une tradition épistémologique », *Revue de Synthèse*, 5e série, n.2.
- Cattaneo, L., Fabbri-Destro M., Boria S. et al. (2007), "Impairment of actions chains in autism and its possible role in intention understanding", *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 6, 104(45), pp. 17825-17830.
- Enriques F. (1977), "La geometria come parte della fisica e la critica al convenzionalismo" in (a cura di) Giorello G., *L'immagine della scienza*, Il Saggiatore, Milano (ed. or. 1906).
- Fox-Keller E. (2002), *Making sense of life*, Harvard Univ. Press, Cambridge, London.
- Gould S. J. (1990), *La vita meravigliosa. I fossili di Burgess e la natura della storia*, Feltrinelli, Milano (ed. or. 1989).
- Husserl E. (1961), Appendice III al Paragrafo 9°, in *La crisi delle scienze europee e la fenomenologia trascendentale*, (ed. or. 1939).
- Husserl E. (1965), *Idee per una fenomenologia pura e una filosofia fenomenologica* (libro I, II e III), Einaudi, Torino (ed. or. 1913).
- Husserl E. (1973), *Ding und Raum. Vorlesungen 1907*, (hrsg.) Claesges U., in *Husserliana*, vol. XVI – Husserl E., *Gesammelte Werke*, Martinus Nijhoff, Den Haag-Dordrecht/Boston/Lancaster.
- Kauffman S.A. (1993), *The origins of Order*, Oxford University Press, Oxford.
- Kupiec J.-J., Sonigo P. (2000), *Ni dieu ni gène*, Seuil, Paris.
- Longo G. (2009), "From exact sciences to life phenomena: following Schrödinger and Turing on Programs, Life and Causality. Concluding lecture at "From Type Theory to Morphological Complexity: A Colloquium in Honor of Giuseppe Longo", *Information and Computation, special issue*, n. 207, pp. 545-558,.
- Longo G. (2009a), "Theorems as Constructive Visions", *Invited Lecture, ICMI 19 conference on Proof and Proving*, Taipei, Taiwan, May 10-15 (in press).
- Longo G., Tendero P.-E. (2007), "The differential method and the causal incompleteness of Programming Theory in Molecular Biology", *Foundations of Science*, n. 12, pp. 337-366.
- Longo G., Viarouge A. (2009), "Mathematical intuition and the cognitive roots of mathematical concepts", *Topoi* (to appear).
- McLaughlin B. (1992), "The Rise and Fall of British Emergentism", in Beckermann A., Flohr H., Kim J., (eds.), *Emergence or reduction? essays on the prospects of nonreductive physicalism*, De Gruyter, Berlino, New York, pp. 49-93.
- Nicolis G., Prigogine I. (1977), *Self-organization in nonequilibrium systems*, J. Willey, N.Y.
- Riemann B. (1994), *Sulle ipotesi che stanno alla base della geometria e altri scritti scientifici e filosofici*, Bollati Boringhieri, Torino (ed. or. 1854).
- Teissier B. (2005), "Protomathematics, perception and the meaning of mathematical objects", in Grialou P., Longo G., Okada M. (eds.), *Images and Reasoning*, Keio University Press, Tokyo.
- West G.B., Brown J.H., Enquist B.J., "A general model for the origin of allometric scaling laws in biology", *Science*, 276, p.122-126.