

## **IL METODO DELLA FISICA E LE PROBLEMATICHE DELLA BIOLOGIA**

ALESSANDRO SERGI <sup>[a]</sup>\* AND GIACOMO TRIPODI <sup>[b]</sup>

(Conferenza del 17 maggio 2007)

**ABSTRACT.** Following the ancient Hermetic aphorism *solve et coagula*, we investigate the nature of the interface between physics and biology by moving up and down the different temporal and spatial scales which enter the description of natural phenomena. Various indications seem to support both the existence of such an interface and the possibility of finding methods, languages, and targets shared by such two disciplines. However, this possibility becomes remote if one moves further and further from the microscopic level of atoms and molecules (and, correspondingly, of molecular biology). We conclude that the biologically founded epistemology proposed by Maturana and Varela as well as cultural anthropology and sociology cannot yet be treated with the methodology of physics.

### **1. Introduzione**

L'etimologia greca della parola fisica è  $\phi\upsilon\sigma\iota\zeta$ , cioè *natura*. In questo senso, fondamentale, lo scienziato della natura, a qualsiasi livello, non può che essere un *fisico*. Eppure in questi tempi di estrema specializzazione, tale significato unificante di fisica è stato un pò perso di vista cosicchè le varie scienze naturali (fisica, chimica, biochimica, biologia, geologia, paleontologia, meteorologia, etc.) possiedono linguaggi propri che custodiscono gelosamente, guardando quasi con sospetto e diffidenza le altre specializzazioni (forse per difendere i rispettivi primati accademici nei diversi ambiti). Allo stesso tempo, la pressione sociale (anche all'interno della stessa accademia) è fortissima al fine di costituire nuovi progetti di ricerca multidisciplinare. Forse, non si è troppo lontani dal vero nell'attribuire alla biologia il ruolo di scienza dominante nel contesto storico attuale. Le motivazioni, più che fondate, non sono difficili da individuare. Essa solo, la biologia (assieme alla medicina, sua sorella applicativa), promette l'elisir di lunga vita e la sconfitta di tutte le malattie. Che cosa quindi vi potrebbe essere di più fondamentale per l'*Homo sapiens*? Eppure, a parte le promesse dei mega-progetti scientifici (quali il progetto genoma), fatte molte volte solo allo scopo machiavellico di reperire fondi e garantire vite agiate ai sacerdoti-scienziati, per i loro imperscrutabili fini [2], le difficoltà e gli ostacoli per poter mantenere le promesse sono tali e tanti da costringere gli scienziati naturalisti alla sinergia. Allora, da ragioni squisitamente applicative rinasce forte l'esigenza di costituire un sapere unificato.

Ma possono, ad esempio, fisica e biologia parlarsi davvero? È possibile trovare linguaggi, metodi ed obiettivi condivisi per scienze in apparenza tanto distanti? Nel tentativo di

rispondere a questi interrogativi, gli autori si sono confrontati nell'ambito di un incontro promosso dall'Accademia Peloritana dei Pericolanti [1]. Questo contributo propone, dopo una riflessione successiva all'incontro stesso, una rilettura unificata delle diverse tematiche e dei diversi approcci emersi nel corso della "Conversazione", attraverso le esposizioni degli autori e i successivi interventi dei partecipanti. La maggior parte di questi interventi ha evidenziato come sia possibile, tutto sommato, trovare una interfaccia tra fisica e biologia (tra l'altro questa interfaccia è facilmente riscontrabile nella biologia molecolare). Allo stesso tempo, problemi insormontabili sembrano frapporsi all'unificazione delle due discipline quando la biologia si *estrapola*, seguendo le suggestioni dell'epistemologia *biologica* di Maturana e Varela [3], nell'antropologia culturale o nella sociologia.

## 2. Il metodo scientifico della fisica

Immaginando di risalire le diverse scale temporali e spaziali (quasi come gli angeli della *Scala di Giacobbe*), e volendo procedere dal livello più basso, quello cioè di atomi e molecole, è opportuno iniziare da una descrizione del metodo che la *fisica* adotta per descrivere il mondo fenomenologico. La descrizione di tale metodo permetterà di chiarire quale possa essere la visione che un fisico ha della biologia (presa qui anche come paradigma della scienza della complessità).

Il fisico, quale scienziato della natura, propone fundamentalmente una teoria economica della conoscenza. Tale approccio economico alla conoscenza si riscontra nella corrente filosofica dell'Empiriocriticismo, che ebbe nel fisico Ernst Mach il suo esponente più noto, che con le sue idee influenzò l'Einstein e l'Heisenberg giovani. Le caratteristiche principali di tale approccio possono essere identificate nel pragmatismo, nella riduzione delle informazioni (il cui aspetto più evidente è la ricerca della semplicità nel complesso) e nella coscienza (progettando teorie e metodi di calcolo o esperimenti) della finitezza delle risorse a disposizione dell'uomo.

Per pragmatismo, si intende la coscienza che lo scopo fondamentale delle teorie della fisica è quello di descrivere la fenomenologia così come essa è accessibile all'uomo ed ai suoi mezzi. Quindi, la fisica sin dall'inizio si pone su di un piano diverso da quello della metafisica e non ricerca la verità ma metodi efficaci di descrizione (e di previsione) dei fenomeni naturali: tali metodi sono giudicati *veri* dalla comunità dei fisici solo se *funzionano*. Non ci si pone neanche il problema della loro unicità e non si sprecano energie per cercare di cambiare metodi funzionanti per motivazioni filosofiche. Seguendo tale atteggiamento pragmatico, la fisica è solita auto-limitare il proprio campo di investigazione a quell'insieme di problemi ai quali il suo metodo può essere applicato, bollando come metafisico (e quindi non di interesse e *non scientifico*) quanto cade al di là.

Per riduzione delle informazioni, si intende una procedura analoga a quella dei software che comprimono l'occupazione di memoria dei file su computer. In tal senso, la fisica ricerca i principi generali che permettano di evitare lunghi elenchi di fenomeni e tende a trovare punti di vista unificanti sul mondo fenomenologico. A tal fine, il linguaggio della matematica, con la sua logica deduttiva, viene utilizzato in maniera intensiva, cosicché i principi generali del mondo fisico vengono interpretati come assiomi di un sistema matematico coerente (e non chiuso, poichè la sua coerenza è assunta per confronto con il mondo della fenomenologia, cosicché il teorema di Gödel non è applicabile alla fisica!). A partire da

questi assiomi, la matematica permette di ricostruire (scompattare, sempre nel gergo del computer) le informazioni. Nel seguito questo aspetto verrà approfondito, insistendo come questo avvenga in realtà in un mondo virtuale di modelli matematici che lo scienziato deve poi interpretare cercando un accordo con la fenomenologia.

Alla luce di quanto sopra, si comprende come la fisica sia costantemente alla ricerca della semplicità nella complessità e di come adotti costantemente una forma evoluta del “rasoio di Occam” [4], evitando la moltiplicazione sfrenata di concetti e parametri nelle sue teorie.

Nel cercare di perseguire tutto questo, al giorno d’oggi, la fisica tiene conto della finitezza delle risorse spaziali e temporali dei suoi strumenti ed ha abbandonato (crediamo definitivamente) la speranza (metafisica) nel supercalcolatore di Laplace. Invece, i limiti di memoria e di tempo nei calcoli (ed anche di misura negli esperimenti) entrano sin dall’inizio nella formulazione delle teorie moderne [7]. Forse, l’esempio più eclatante di tale nuovo atteggiamento è riscontrabile nelle lezioni [8] in occasione della premiazione per il Nobel per la Chimica, del fisico Walter Kohn. In tale occasione, Kohn (forse per la prima volta) ha sostenuto che la funzione d’onda (ente matematico fondamentale e fondante per la meccanica quantistica degli atomi e delle molecole) di un numero di atomi superiore a cento è un ente metafisico poichè non esiste in tutto l’universo (nè mai esisterà) una memoria di computer sufficiente ad immagazzinare l’informazione necessaria[9]. È interessante menzionare che attualmente la coscienza dei limiti intrinseci al pensiero umano ha indotto anche le scienze cognitive a paragonare l’ideale della *razionalità classica* (od olimpica, con risorse infinite) con la realtà della *razionalità limitata* (si veda a questo proposito [10] e le referenze lì contenute).

A conclusione di questo *excursus*, qualcuno potrebbe dire che la conoscenza fisica è molto di più. Sicuramente non può essere di meno.

**2.1. L’albero della conoscenza fisica.** Il metodo della conoscenza fisica può essere rappresentato pittoricamente mediante la Tabella **2.1**. Questa può essere vista come delineante un vero e proprio *albero* (in assonanza con il titolo del libro di Maturana e Varela [3]) dove non siano stati disegnati i rami a causa dell’estrema complessità e dei circuiti retroattivi che sarebbero necessariamente apparsi nel disegno, complicando inevitabilmente la figura e depauperandola della sua valenza chiarificatrice.

Quello che in questo contributo chiameremo *albero della conoscenza fisica* inizia con lo stadio dell’osservazione della natura, uno stadio accessibile a tutti indistintamente. Tuttavia, la curiosità e la riflessione filosofica (si parla qui di filosofia naturale, ovviamente) si sono manifestati nella storia, in maniera fortissima, solo in un, tutto sommato, sparuto gruppo di individui che hanno elaborato delle idee generali e semplificatrici sulla natura stessa. Queste idee costituiscono dei modelli veri e propri della fenomenologia catturandone solo le caratteristiche ritenute essenziali dal filosofo-scienziato naturalista. La ricerca empirica di laboratorio si connota quindi come una ricerca pre-indirizzata dalle idee e dai modelli (anche matematici) della riflessione naturalistica. Ad esempio, non è possibile misurare la forza se non si definisce il concetto stesso di forza come causa del moto dei corpi. Tuttavia, non è affatto necessario utilizzare il concetto di forza per studiare il moto dei corpi. Ad esempio la teoria della gravitazione di Einstein ne fa a meno utilizzando al

suo posto il concetto di curvatura metrica così come ne fa a meno la meccanica quantistica alla quale è sufficiente il concetto di energia potenziale (che diviene analogo all'indice di rifrazione delle onde). È quindi possibile affermare che ambedue le teorie più fondamentali dei nostri tempi fanno a meno del concetto di forza che, quindi, nel loro ambito, non può essere empiricamente misurata (anche se si possono farraginosamente definire concetti analoghi). Ciò non dovrebbe sorprendere il lettore. Infatti, tale evenienza non è null'altro che una conseguenza del fatto che la realtà venga in parte creata dal nostro stesso linguaggio. Filosofie di liberazione, quali lo Zen, non fanno altro che partire da questa osservazione [5], così come la riflessione filosofica occidentale recente [6] ci ha consegnato l'idea che i limiti del nostro stesso mondo siano in realtà dettati dai limiti del nostro linguaggio.

Le idee sulla natura dell'albero in Tab. 2.1 si riflettono attraverso la sperimentazione e si specializzano nella prima forma di teoria, quella fenomenologica. Da questa vengono poi sintetizzate le teorie generali che utilizzano dei concetti universali ed astratti. La simulazione al computer si è poi aggiunta in tempi recenti all'albero della conoscenza fisica quale terzo polo, oltre a sperimentazione e teoria. La simulazione ha uno status particolare (e fondante) per lo studio dei sistemi complessi e dei fenomeni storici, dato che permette di riprodurre sul computer situazioni ed evoluzioni temporali (storie del sistema) non accessibili altrimenti allo sperimentatore.

È opportuno sottolineare come le Teorie astratte di alto livello (a grana grossa) siano basate su pochi principi (assiomi). Per tale ragione, la matematizzazione della fisica è essenziale al fine di ricostruire, in maniera economica ed altamente efficiente, i processi in un mondo virtuale di modelli. Ciò avviene appunto grazie al linguaggio matematico che permette di sintetizzare la conoscenza fisica per mezzo di un sistema logico deduttivo non chiuso (gli assiomi vengono costantemente aumentati di numero). Grazie alla logica matematica ed agli algoritmi per il computer elettronico è possibile effettuare delle previsioni di nuovi eventi o fenomeni nel mondo dei modelli. Una volta identificati questi fenomeni virtuali è possibile partire con una ricerca sperimentale di analogie nel mondo fenomenologico.

In conclusione, è opportuno sottolineare come i dati sperimentali acquisiti possano essere spiegati da una infinità di sistemi teorici diversi. Lo scienziato sceglie il più semplice tra questi che spieghi soddisfacentemente la fenomenologia. Nel far questo, la fisica segue un principio di economia nella formulazione delle teorie che può essere visto come una forma raffinata del rasoio di Occam [4] che permette di sbilanciarsi il meno possibile nel formulare ipotesi esplicative.

**2.2. La logica della scienza.** Lo scienziato naturalista adotta gli strumenti del pensiero per studiare il mondo della fenomenologia. La descrizione, ed eventuale spiegazione, di quest'ultima è l'ultima *ratio* del fisico. In tal senso, come ampiamente argomentato da Edwin Thompson Jaynes [11], la logica della scienza non può che essere una logica induttiva, che permetta di passare dal particolare della fenomenologia all'universale del pensiero. In particolare, lo strumento che permette di vagliare le varie ipotesi, a partire dai dati sperimentali che esse devono spiegare è la teoria della probabilità (vista non nella sua interpretazione frequentista ma come inferenza statistica che permetta di prendere decisioni sulla

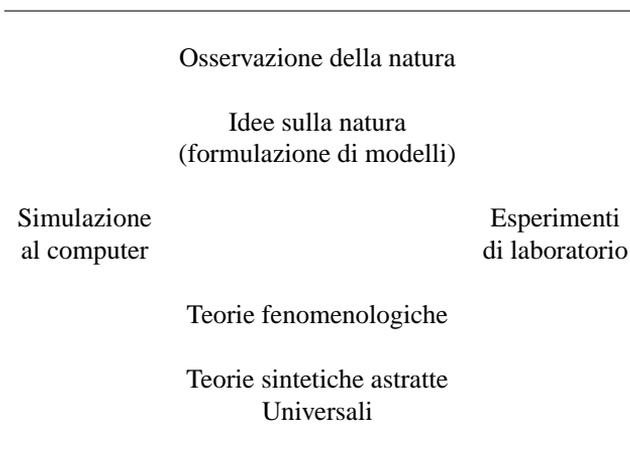


TABELLA 1. L'albero della conoscenza fisica.

validità di una certa ipotesi anche quando si posseggano informazioni limitate).

In quest'ottica i passi del metodo scientifico sono quindi l'acquisizione dei dati sperimentali (assumendo una qualche idea precedente ad essi, come discusso nelle sezioni precedenti), la formulazione di ipotesi e teorie che spieghino i dati stessi ed il calcolo delle probabilità delle ipotesi stesse (passo questo necessario poichè, come si può immaginare, solitamente è possibile formulare *diverse* ipotesi alternative che spieghino gli *stessi* dati). Le procedure mentali che portano alla formulazione di nuove ipotesi sono, a tutt'oggi, essenzialmente sconosciute. Sostanzialmente, ragionamento astratto, procedure euristiche e concetti (universali) a grana grossa vengono utilizzati da queste procedure mentali che classificheremo quindi come *creatività*, tralasciando di occuparcene ulteriormente nel seguito.

Gli strumenti messi a disposizione dalla teoria della probabilità per discriminare tra le varie ipotesi interpretative sono vari. Quelli fondamentali sono i principi di massima entropia e di invarianza, per valutare le probabilità iniziali (il più delle volte degli stessi dati sperimentali), e il teorema di Bayes, per il calcolo vero e proprio della probabilità delle ipotesi, assegnati i dati sperimentali. La discussione di quest'ultimo teorema permette di evidenziare alcuni punti salienti del ragionamento induttivo e per tale motivo viene brevemente riportata di seguito. Innanzitutto, si designa con  $\mathcal{P}(D|A)$  la probabilità  $\mathcal{P}$  dei dati sperimentali condizionata dalle nostre conoscenze (o credenze) a priori  $A$ . Questo mostra come qualsiasi assegnazione di probabilità non è altro che una probabilità condizionata, almeno da ciò che già sappiamo o crediamo di sapere. Quindi,  $\mathcal{P}(D|A)$  è la probabilità (condizionata) *a priori* dei dati sperimentali. Analogamente,  $\mathcal{P}(I|A)$  esprime la probabilità *a priori* dell'ipotesi  $I$ , volta a spiegare i dati stessi. Infine,  $\mathcal{P}(D|IA)$  denota la probabilità dei dati condizionata dall'assunzione di validità sia delle conoscenze *a priori*  $A$  che dell'ipotesi stessa  $I$ . Immaginando di sapere calcolare queste probabilità (ad esempio, per mezzo dei principi di massima entropia o di invarianza precedentemente discussi), il teorema di Bayes permette di stimare la probabilità *a posteriori*,  $\mathcal{P}(I|DA)$ , delle ipotesi

(assumendo la validità dei dati e delle conoscenze *a priori*) per mezzo della formula:

$$(1) \quad \mathcal{P}(I|DA) = \frac{\mathcal{P}(D|IA) \mathcal{P}(I|A)}{\mathcal{P}(D|A)} .$$

L'equazione (1), anche conosciuta come formula di Bayes, definisce un modello di razionalità induttiva la cui validità si estende ben al di là del campo prettamente scientifico. Purtroppo per l'*Homo sapiens*, inoltre, le recenti ricerche sperimentali delle scienze cognitive hanno mostrato come l'uomo possieda una naturale e pericolosa inclinazione a non seguire la perfezione del modello di ragionamento bayesiano, commettendo così errori madornali nelle sue induzioni [10]. In ogni caso, anche nel caso di ragionamento induttivo perfetto, il concetto stesso di probabilità mostra come nella scienza naturale ci si confronti inevitabilmente con la possibilità di errore. A questo proposito, il confronto e l'accordo o disaccordo con la comunità scientifica internazionale *dovrebbe* costituire una rete di protezione rispetto a svarioni nella formulazione di ipotesi esplicative. Ci pare interessante sottolineare come tale processo di accordo collettivo sia reminescente della procedura atta a formulare i concetti nella filosofia di Socrate.

### 3. La Fisica e la Complessità

Che cosa vuol dire complessità? La definizione di complesso non ha un carattere assoluto ma, come nel caso delle assegnazioni di probabilità, dipende dalle conoscenze dell'osservatore e la storia della scienza è colma di esempi di fenomeni considerati complessi e successivamente spiegati con successo ed economia di pensiero. Ovviamente, in questo contesto è opportuno scartare l'interpretazione di complesso come sinonimo di incomprensibile, almeno in senso assoluto. Se complesso significasse incomprensibile allora la complessità sarebbe per definizione fuori dall'indagine scientifica. In maniera auto-referenziale, la complessità può essere definita come la scienza dei sistemi complessi. Esempi specifici sono dati da ambiti scientifici quali quelli della cibernetica, delle scienze sociali, dell'organizzazione dei sistemi viventi, del caos deterministico e dei sistemi disordinati. Per complessità, allora, si intende, di volta in volta, una caratteristica diversa e specifica quale la frustrazione, la retroazione e l'imprevedibilità. Edgar Morin in "Le vie della complessità" ha individuato una serie di caratteristiche atte a definire il problema complesso. Esse vengono elencate di seguito. Sono l'irriducibilità del caso, la singolarità, località e temporalità, la complicazione/incalcolabilità, la complementarità ordine/disordine, l'organizzazione (principio ologrammatico), la vaghezza dei confini oggetto-soggetto, organismo-ambiente etc., l'includibilità dell'osservatore (intendendo con questo la necessità per ogni teoria di includere una spiegazione che renda possibile la formulazione di se stessa).

Il nodo principale attorno al quale si è svolto il dibattito sulla complessità è l'opposizione alla rappresentazione della realtà attraverso l'approccio riduzionista (*divide et nosce*). Tale approccio alternativo al riduzionismo prende il nome di olistico e richiede una comprensione ecologica e d'insieme dei sistemi (il tutto è diverso dalle parti ed è molto di più di esse). In realtà, la fisica non è nè riduzionista nè olistica, bensì costruttivista (come la discussione dell'albero della conoscenza fisica dovrebbe mostrare): essa contempla contemporaneamente le parti ed il tutto e si propone di raccordare parti e tutto in una descrizione coerente dal potere predittivo. Insomma, la fisica cerca di fare come il saggio

cinese che guarda contemporaneamente alla nervatura della foglia ed alla foresta. Allora, dovendo scegliere un motto caratterizzante sceglieremo quello dell'ermetismo: *solve et coagula*, analisi e sintesi.

Dunque, la fisica tratta (o cerca di trattare) una molteplicità di scale di lunghezza e di tempo, ognuna con le proprie leggi, e ne cerca un raccordo coerente. In quest'ottica i sistemi complessi possono essere definiti come quei sistemi costituiti da molte componenti che interagiscono tra loro in maniera non lineare. Quando queste caratteristiche portano all'esistenza di diverse scale di lunghezza e di tempo rilevanti ed ad un loro accoppiamento circolare, allora si è in presenza della complessità così come definita da Morin. In questi casi il sistema totale non si comporta come la banale somma delle parti ma presenta tutta una gamma di proprietà *emergenti* (dalla dinamica delle parti) che non sono riscontrabili nella singola parte isolata dal contesto (diremmo che l'architettura non è la scienza dei mattoni).

La caratteristica della fisica, ed in particolare della fisica statistica che costantemente si confronta con la complessità dei sistemi che studia, è quella di cercare continuamente la connessione tra i vari livelli di descrizione di un fenomeno. Inoltre, la sua storia mostra inequivocabilmente che quando si ricerchi un approccio con valenza predittiva è necessario considerare dettagliatamente il livello più basso: quello microscopico. Se si vuole, questo è il motivo che spinge anche i più acerrimi sostenitori dell'approccio olistico unilaterale ad andare dal meccanico quando la loro macchina si rompe oppure dal medico/farmacista quando stanno male, per ricevere la somministrazione di qualche particolare molecola. Tuttavia, la fisica sa benissimo che il livello microscopico **non** determina univocamente quello macroscopico. Questo concetto è patrimonio comune degli studiosi di meccanica statistica, la teoria "ponte" tra micro e macro. Questa teoria fisica realizza un collegamento tra le coordinate microscopiche del sistema,  $x$ , che entrano nella specificazione delle variabili dinamiche microscopiche,  $a(x; r)$ , e le grandezze (*emergenti*) macroscopiche,  $A(r, t)$ , funzioni dello spazio e del tempo,  $(r, t)$ . Tale corrispondenza viene realizzata integrando (sommando) su tutte le coordinate microscopiche, "pesate" dalla funzione di distribuzione  $f(x, t)$  secondo l'equazione:

$$(2) \quad A(r, t) = \int d^N x f(x, t) a(x; r) .$$

L'equazione (2) mostra come le proprietà emergenti altro non siano che proprietà medie, collettive, del sistema osservato microscopicamente. Tuttavia, per realizzare tale visione è necessaria, come lo stesso formalismo suggerisce, la conoscenza della funzione di distribuzione  $f(x, t)$ . Questa obbedisce ad una equazione microscopica, detta equazione di Liouville [12], che non ammette soluzioni univoche a meno di effettuare delle ipotesi supplementari sul livello macroscopico nell'ambito di un'analisi termodinamica del problema: dal punto di vista logico, è come se, prima di risolvere il problema, lo scienziato dovesse già conoscere la soluzione (od almeno le sue caratteristiche generali). Il risultato, arcinoto, è che le funzioni di distribuzione non dipendono soltanto dalle coordinate microscopiche ma anche da un insieme di parametri termodinamici, macroscopici,  $\beta$ , cosicchè si deve scrivere, più correttamente,  $f(x, t; \beta)$ . Ovviamente, questo significa che non è possibile realizzare il ponte tra micro e macro senza assumere una loro autoconsistenza (circolarità) in base alla quale se il micro influenza il macro, il macro influenza il micro. Questa

circularità tra i livelli è ubiqua in fisica anche se il suo riconoscimento richiede estrema sottigliezza. Infatti, le leggi della fisica sono in genere espresse per mezzo di equazioni differenziali, generalmente, alle derivate parziali e questo fatto, se si vuole, esprime come l'infinitesimo (il microscopico) permette di ricostruire la realtà fenomenologica macroscopica. Tuttavia, queste equazioni possono essere risolte solo imponendo delle condizioni al contorno quali il valore delle funzione stessa e/o delle sue derivate su intere superfici o volumi nello spazio-tempo: questo aspetto è chiaramente non propriamente riduzionistico e rappresenta l'influenza di proprietà integrali, collettive, sulla dinamica microscopica (infinitesimale).

L'equazione (2) mostra come le proprietà dei livelli più alti derivino da una contrazione d'informazione (la somma sulle coordinate microscopiche) operata sui livelli microscopici. Per meglio evidenziare questo aspetto, riscriviamo l'Eq. (2) nella seguente forma:

$$(3) \quad A = f_1 * a_1 + f_2 * a_2 + \dots + f_n * a_n = \sum_{i=1}^n f_i a_i ,$$

che ammonta ad una riscrittura in forma discreta dell'integrale in Eq. (2). Una contemplazione dell'Eq. (3) evidenzia due problemi fondamentali. Il primo è un chiaro esempio di problema inverso: nota la proprietà macroscopica (emergente)  $A$  non è affatto banale identificare l'evoluzione dinamica delle  $a_i$  (o le  $a_i$  stesse) dalle quali  $A$  emerge, dato che una molteplicità di scelte è possibile. Il secondo problema è che anche quando la dinamica microscopica delle  $a_i$  è nota, queste possono essere combinate in infiniti modi diversi per generare infinite proprietà collettive  $A$  ma non esistono sistemi univoci per pre-determinare la  $A$  più significativa per il problema in esame.

La discussione precedente evidenzia come la circolarità dei livelli è inevitabilmente presente nei sistemi statistici (che sono quindi dei sistemi complessi) e che le teorie fisiche tengono conto anche di questo aspetto. Tuttavia, per tradizione e per difficoltà oggettive nel risolvere i problemi in maniera esatta, la fisica tende a formulare modelli dove le scale temporali e spaziali sono separate (in linguaggio tecnico, si dice che si tratta di modelli con memoria trascurabile). In questo caso, teorie perturbative o di campo medio sono sufficienti ad ottenere i risultati eccellenti dei quali la fisica è giustamente fiera. Tali successi sono giustificati dal fatto che diversi fenomeni naturali mostrano un accoppiamento debole dei livelli. Ad esempio, lo studio e la soluzione dei problemi dell'idrodinamica può non interessarsi del livello della cromodinamica (cioè di quello che accade all'interno dei nuclei atomici del fluido in esame).

Esiste anche una certa resistenza culturale ad affrontare od a rappresentare esplicitamente la circolarità dei sistemi statistici poichè, a parte nel caso di alcune tecniche di calcolo ricorsive ed autoconsistenti, il ragionamento logico viene considerato come rigoroso proprio quando evita le circolarità. La matematica formale dei sistemi logico-deduttivi ha mostrato, attraverso l'opera di Gödel che in sistemi coerenti e chiusi, con un numero finito di assiomi, esistono inevitabilmente delle proposizioni indecidibili, cioè delle quali non si è in grado di dimostrarne la verità o falsità formale. Per eliminare l'incertezza il sistema formale deve essere aperto, cioè deve consentire la continua addizione di assiomi volti a risolvere i casi di incertezza. Questa è una caratteristica che con una mossa logica inattesa è stata indicata da Hofstadter, nel suo capolavoro divulgativo sull'intelligenza artificiale [13], come la stessa ricetta per la costruzione dei livelli: il sistema diviene via via

più complicato, sotto la spinta delle sue dinamiche (sia interne che esterne) in risposta a delle fasi di criticità (di indecisione, nel linguaggio logico-formale) [14].

#### 4. Fisica e Biologia

La biologia può essere considerata come il paradigma delle scienze della complessità e come tale pone all'indagine fisica dei problemi formidabili (ed affascinanti). Tipicamente, i livelli di descrizione dei sistemi biologici sono fortemente accoppiati. Il dogma fondamentale della biologia dettava un passaggio di informazione unidirezionale dai geni all'organismo (fenotipo) al comportamento. Tuttavia, i tempi recenti hanno sempre più evidenziato come il comportamento possa attivare e disattivare i geni stessi realizzando quella circolarità che costituisce il marchio della complessità. La ricerca biologica su grande scala sembra, per il momento, ignorare essa stessa queste circolarità affidandosi unicamente alla determinazione di liste enumerative di geni (progetto genoma) o di proteine, od altre molecole, rilevanti per la vita [15].

Un suggestivo tentativo di teorizzazione della complessità biologica, fondata su di inevitabili circolarità, è stato proposto in anni recenti da Maturana e Varela [3]. Essi hanno proposto, per la prima volta, una definizione di sistema vivente basata non su un lungo (e controverso) elenco di proprietà ma su di un'unica caratteristica: l'autopoiesi. In altre parole, per Maturana e Varela i sistemi viventi sono essenzialmente dei sistemi autopoietici, cioè sistemi la cui essenziale attività (metabolica ed anabolica) è finalizzata a produrre e mantenere se stessi. Maturana e Varela hanno poi esteso la loro teoria sino ad affrontare il problema stesso della conoscenza, fondando la loro epistemologia sulla biologia. Secondo tale approccio, la cognizione è identificata con l'azione (per antonomasia) di un sistema vivente. In tal senso, lo status epistemologico della biologia è particolare poiché essa è il fondamento di una teoria della conoscenza che deve spiegare se stessa (dato che la conoscenza è l'azione di un sistema vivente che riflette su se stesso). Ovviamente, tale idee, molto profonde, sono correntemente oggetto di raffinamento e precisazioni. Ad esempio, è stato sottolineato come l'autopoiesi sia solo una condizione necessaria della vita (il vivente è autopoietico) ma non sufficiente e che la cognizione (biologicamente fondata) sia distinguibile dall'autopoiesi stessa, di modo che cognizione ed autopoiesi siano assieme condizione necessaria e sufficiente per la vita [16]. Ovviamente, quello di autopoiesi non è l'unico concetto generale offerto dalla biologia alle scienze naturali in generale. Concetti quali mutazione, selezione ed evoluzione sono matematicamente esprimibili ed hanno per esempio portato alla formulazione dei cosiddetti algoritmi genetici nell'ambito della simulazione al computer od alle reti neurali.

Di fronte a queste problematiche, la fisica brancola ancora nel buio e tende a rinchiudersi nella torre d'avorio dei suoi tecnicismi microscopici (per altro di estremo successo). Infatti, la fisica ha già trasmesso al campo della biologia tecniche sperimentali e di simulazione al computer, fondando, in un certo senso, il campo della biologia molecolare. Non a caso, Erwin Schrödinger, premio Nobel della fisica come uno dei padri della meccanica dei quanti, in "What is Life?" fu il primo a suggerire, partendo proprio dai principi della meccanica quantistica, la possibilità che il "codice della vita" potesse essere riposto in un cristallo aperiodico [17]. Di fatto, nel campo della biologia molecolare i fisici adottano, nella

maggior parte dei casi, la strategia di studiare e caratterizzare i processi molecolari fondamentali sui quali si fonda la vita così come la conosciamo sulla terra. Si veda [15] per una rassegna di questo approccio. In questa prospettiva, il problema del folding delle proteine è una dei problemi fondamentali della biofisica contemporanea. Risolvere il problema del folding significherebbe essere in grado di predire la struttura tridimensionale delle proteine a partire da una sequenza di aminoacidi. Nota la struttura tridimensionale delle proteine è già possibile simularne al computer l'attività enzimatica mediante tecniche standard di dinamica molecolare cosicchè sarebbe superfluo specificare ulteriormente l'importanza che avrebbe una tale conquista scientifica. Al momento, il limite asintotico di questo approccio alla biologia molecolare od alla biofisica è la descrizione e la comprensione della complessità della singola cellula vivente.

Tuttavia, desideriamo in questo contesto argomentare che tale approccio di indagine biofisica non è l'unico che valga la pena di adottare. A tal fine, chiediamo al lettore di immaginare un super-esperimento (tipo deposizione epitassiale). Si supponga che matematici, fisici, chimici e biologi si mettano assieme ed utilizzando un ipotetico cannoncino iper-tecnologico, atomo per atomo, riescano a costruire (ad esempio utilizzando qualche forma di algoritmo genetico oppure le reti neurali) un organismo vivente. Si potrebbe allora affermare di aver compreso la vita oppure l'organismo vivente appena costruito? La nostra personale risposta sarebbe negativa. Infatti, abbiamo già argomentato, nelle precedenti sezioni, di come la comprensione umana sia fondata su concetti astratti a grana grossa e non sulla bruta capacità di manipolazione tecnologica, per quanto sofisticata. Sotto questa luce, si comprende come sia possibile un approccio alternativo alla biofisica, fondato su di una spinta all'universale ed alla generalizzazione. Tale approccio tende all'elaborazione di un linguaggio di alto livello (sull'esempio di quanto già fatto da Maturana e Varela) per trattare i processi con memoria tipici del vivente. Seguendo tale prospettiva [18, 19] non è necessario studiare la vita così come essa si presenta nella fenomenologia ma si possono anche costruire modelli matematici (ad esempio autopoietici) simulabili al computer. In tal maniera, si pensa di determinare più facilmente un linguaggio generale con il quale poi meglio descrivere e comprendere la vita come essa è. Ovviamente, in tutto questo i linguaggi a grana grossa e la logica induttiva (inferenza statistica) rigorosa dell'albero della conoscenza fisica sono strumenti preziosissimi. In questo contesto, è possibile notare come la fisica posseda già una strategia altamente efficace per affrontare la complessità. Essa cerca costantemente relazioni semplici tra oggetti matematici sempre più complicati. Un esempio per tutti, può essere preso dal campo della gravitazione universale e dalla seguente equazione:

$$(4) \quad R_{ik} = 0 .$$

L'equazione (4), proveniente dalla teoria della gravitazione di Einstein [20], denota l'assenza di campi gravitazionali mediante il porre a zero una matrice di grandezze, identificate mediante gli indici  $i, k$ , variabili da 1 a 4, cosicchè l'Eq. (4), estremamente semplice in apparenza, rappresenta un sistema di sedici equazioni. Tuttavia, occorre rimarcare come l'Eq. (4) nasconda la complessità del problema nella definizione del tensore di Ricci  $R_{ik}$ , un oggetto matematico dalla complessità mostruosa. Riteniamo che questo esempio possa essere utile a comprendere che la presunta semplicità delle equazioni della fisica sia

solo illusoria ed in realtà facente parte di una ben precisa strategia conoscitiva. Riteniamo che il precedente argomento dovrebbe quantomeno ridimensionare la solita critica dei complessologi alle semplici equazioni della fisica che, a loro dire, non potrebbero essere riscontrate nelle scienze complesse: crediamo che, a patto di rendere sempre più complicati gli enti matematici, sia sempre possibile scrivere una equazione apparentemente semplice che descriva (od esprima) un processo complesso. Ciò è dimostrato dalla stessa esistenza di una scienza come la termodinamica [21] che introduce relazioni matematiche semplici tra grandezze macroscopiche complicatissime (se descritte con dettaglio microscopico).

## 5. Dalla biofisica all'antropologia culturale

Le idee di Maturana e Varela (si veda ad esempio [3]) costituiscono senza dubbio un primo passo (fondamentale) verso la costruzione di un linguaggio universale per la biologia. In particolare, l'idea di autopoiesi costituisce un buon punto di partenza per investigazioni secondo le direttive del metodo di conoscenza della fisica [16, 18, 19]. Tuttavia, occorre rilevare come l'orizzonte, ancora lontano, per la verità, di questo metodo sia per il momento la *singola* cellula. In altre parole, al momento in cui questo contributo per gli Atti viene scritto, fisica e biologia si scoprono vicine e utili, l'una all'altra, nello studio di segmenti dell'attività metabolica della cellula, coinvolgenti in particolare enzimi proteici e membrane lipidiche. Assieme sognano di caratterizzare e comprendere la singola cellula ma ancora la biologia è lasciata sola nell'affrontare i problemi degli organismi pluricellulari con tutti i loro epifenomeni. Il singolo organismo biologico (ad esempio, l'*Homo sapiens*) si trova ad un livello di complessità al momento (e forse per sempre) inaccessibile al metodo della fisica. Certo, una discussione qualitativa lungo le linee delineate da Maturana e Varela può essere comunque fruttuosa. In particolare, il concetto stesso di autopoiesi permette di caratterizzare i sistemi biologici in una maniera che non ha precedenti nel mondo inanimato. Tipicamente, la definizione di sistema nel caso non-autopoietico è in larga misura arbitraria e dipendente dai fenomeni sistemici che si desidera investigare. Se però l'autopoiesi viene scelta come funzionalità fondante del sistema biologico allora essa determina un limite minimo di complessità del sistema come soglia al di sotto della quale essa non può manifestarsi e quindi il sistema non è vivente. Frazioni di componenti cellulari e virus non sono autopoietici, e pertanto vanno interpretati come espressioni della funzionalità di sistemi di maggiore complessità. Si comprende allora come l'autopoiesi sia stata assunta da Maturana e Varela come criterio organizzativo per caratterizzare il sistema vivente come una unità isolata dal resto dell'ambiente. Ci si trova quindi in presenza della inevitabile dualità tra la chiusura organizzativa dei sistemi viventi e la loro apertura strutturale rispetto all'ambiente con il quale scambiano energia, materia, entropia. Vi sono casi in cui l'attività autopoietica della cellula si manifesta solo in presenza di altre cellule: il fenomeno del *quorum sensing* (percezione analogica della dimensione dell'insieme) esprime proprio questa proprietà. In tal senso, la dubbia autopoiesi della singola cellula indebolisce molto il concetto di unicellularità, in quanto la capacità di generare se stessa diventa una proprietà dell'insieme di cellule che reciprocamente condizionano la loro funzionalità, anche se la loro posizione relativa è variabile a caso.

**5.1. Un fondamento biologico per i fenomeni sociali.** Secondo il linguaggio di Maturana e Varela, un accoppiamento strutturale, costante nel tempo, tra unità autopoietiche

costituisce una prima forma di società integrata. Tale effetto è finanche tipico della stessa società umana: che cosa è questa se non una forma di accoppiamento stabile tra organismi fondato sul linguaggio? A tal proposito, la teoria biologicamente fondata della cognizione [3, 16] permette di apprezzare la circolarità dell'attività del soggetto biologico che desidera conoscere se stesso (od altri sistemi biologici) anche ad un livello sociale. Dopo tutto, l'attività di ricerca scientifica è anch'essa una forma di attività sociale: nelle parole di Newton siamo solo nani sulle spalle di giganti e senza la trasmissione del sapere scientifico, proprio per mezzo della società, non staremmo oggi qui a scrivere di queste problematiche. In tale prospettiva, l'attività di ricerca scientifica si configura come un epifenomeno dell'accoppiamento strutturale di un numero molto grande di unità autopoietiche altamente complesse, come l'*Homo sapiens*. Tale concetto può essere esteso. Infatti, nei sistemi biologici sufficientemente complessi emerge una funzione definibile come *percezione dell'optimum riproduttivo* [22]. Da tale percezione, si genera una attività finalistica volta alla costituzione delle condizioni perchè tale optimum venga raggiunto. Nell'uomo si manifesta con l'elaborazione di principi normativi dei comportamenti sociali. Questa evenienza non è altro che una manifestazione dell'*autonomia* del vivente, cioè della capacità che hanno i sistemi viventi di esprimere regole normative ed auto-normative come epifenomeni, come proprietà emergenti dalla loro stessa attività. In tal senso, è possibile affermare che non solo la cognizione ma anche il diritto ha le sue radici nella complessità biologica. L'attività del vivente genera comunque nuovi livelli cognitivi [13], cosicchè diviene possibile, sulla scia dell'antropologia culturale, supporre un fondamento biologico alle stesse normative religiose, viste come risposta a tutti quegli interrogativi che trascendono l'esperienza (uno dei primi livelli dell'albero della conoscenza fisica) dell'unità autopoietica *Homo sapiens*.

**5.2. Caratteristiche della conoscenza biologica.** Intendendo per biologia quella scienza amplissima che abbraccia tutte le scale di tempo e spazio comprese tra il livello molecolare e quello della cultura o dei comportamenti di una società di organismi viventi, è evidente che i dati osservati da tale scienza hanno un carattere prettamente storico e di unicità temporale. Essi non sono rigorosamente ripetitivi, ma possiedono una specificità storica relativamente al tempo in cui divengono attuabili e alle condizioni in cui si realizzano. Ovviamente non è possibile applicare ad essi la teoria della probabilità intesa come teoria frequentista, semplicemente perchè le frequenze degli eventi di interesse sono praticamente nulle: gli eventi sono unici e pressochè irripetibili. Per fortuna, il ragionamento induttivo sul quale l'albero della conoscenza fisica si fonda è applicabile, quasi senza colpo ferire, ad eventi unici o rari che vengono naturalmente sussunti nel concetto di probabilità condizionata. Inoltre, il metodo stesso della simulazione al computer, che ha dato vita allo stesso studio scientifico dei sistemi complessi, permette di avere accesso, tramite opportuni modelli matematici, alle "storie" più probabili di un dato sistema. In linea di principio, è quindi possibile considerare il modello matematico (ecologico) di un pianeta o di una popolazione e di evolverne *in silico* (cioè sulle memorie di silicio del calcolatore) tutte le storie più probabili secondo la teoria del modello stesso. Ovviamente, non si tratterebbe di calcoli semplici da effettuare o da interpretare scientificamente ma non bisogna scoraggiarsi. D'altronde cinquant'anni fa si sarebbe sorriso all'idea di una scienza quale l'archeologia

computazionale (che tuttavia ancora non è in grado, nel limite della conoscenza degli autori, di effettuare delle simulazioni sulla storia delle civiltà) ma al giorno d'oggi essa è una realtà, ad esempio all'Università di Pisa.

Forse, più che la loro natura storica, quello che caratterizza ancor di più i dati della biologia è che essi hanno una validità nella realtà empirica prossima all'uomo (di nuovo una conseguenza della circolarità della conoscenza biologica). In tal senso, i dati della biologia hanno un significato indipendente dalla loro interpretazione scientifica professionale. Fuori dal mondo specialistico della biologia molecolare e risalendo le scale sino alla botanica od alla medicina, in grande misura non esiste neanche un linguaggio specialistico cosicché non esiste neppure una effettiva soglia di conoscenze di accesso alla comunità dei ricercatori. Invece, in virtù della condivisione, in larga misura, dei linguaggi si ha una coincidenza delle società umane con l'insieme dei ricercatori in biologia. Questa evenienza determina che la pressione dello spirito del tempo (l'hegeliano *zeitgeist*) sulla biologia sia molto più alta che in altri rami del sapere. Ciò è in relazione al fatto che ogni individuo è in qualche misura un collettore di dati relativi ad organismi animali o vegetali, esaltando l'interfaccia tra la società e la ricerca. L'ologramma generato dalla percezione (consapevole o meno) della conoscenza globale è presente nella mente di tutti i componenti di una società, e condiziona l'interpretazione dei fatti.

## 6. Conclusioni

In questo contributo abbiamo cercato di delineare l'interfaccia tra fisica (intesa come scienza della natura propriamente detta) e biologia. A tal fine abbiamo descritto il metodo della conoscenza fisica come un metodo induttivo e costruttivo di concetti (non necessariamente riduzionisti) ed abbiamo evidenziato come esso abbia un potere predittivo, anche nel caso di sistemi complessi, grazie al calcolo (su computer). Il metodo fisico funziona utilizzando un universo di modelli matematici che fa da cuscinetto tra il mondo del pensiero o delle esperienze di laboratorio ed il mondo fenomenologico. Grazie alla teoria della probabilità, vista come logica vera e propria della scienza, la conoscenza fisica contempla al suo interno la possibilità di errore e tende naturalmente alla formulazione di concetti universali che rendano più economica la conoscenza umana (evitando le lunghe enumerazioni di fenomeni). La fisica ha ispirato la biologia molecolare (purtroppo, in questo campo, come evidenziano i vari progetti genoma, proteina e così via, ci si sta limitando alla mera enumerazione). Sulle scale della biologia molecolare l'interfaccia tra fisica e biologia è in realtà una vera e propria sovrapposizione ed interfertilizzazione. Tuttavia, già al livello della singola cellula il metodo della fisica è seriamente sfidato dall'accoppiamento tra le scale temporali e spaziali tipico dei sistemi biologici.

Quando dalla fenomenologia della cellula si passa a quella degli organismi e delle loro società, sino ad arrivare all'antropologia culturale, l'interfaccia tra fisica e biologia si fa sempre più evanescente per svanire quasi del tutto. Inoltre l'assenza di linguaggi specialistici rende l'accesso alla collezione ed alla discussione di dati empirici praticamente appannaggio dell'intera società. Questo fatto massimizza l'influenza dello spirito e dei pregiudizi culturali del tempo sulle direttive della ricerca biologica.

Tuttavia non bisogna perdere le speranze. Negli ultimi tempi le teorie sul vivente di Maturana e Varela hanno evidenziato il ruolo dell'autopoiesi e della cognizione, di fatto

iniziando a creare un linguaggio di alto livello molto simile a quello delle teorie tipiche della fisica statistica e delle proprietà collettive (emergenti) dei sistemi complessi. Le idee di Maturana e Varela sono inoltre suscettibili di essere espresse matematicamente per mezzo di opportuni modelli su calcolatore. Questo inizia ad avvenire nel campo della biologia costruttiva: il recente libro di Kaneko [18] costituisce un esempio rilevante ed un punto di accesso alla bibliografia di questo settore già molto sviluppato.

### Ringraziamenti

A. S. ringrazia il Professore Paolo V. Giaquinta per tutte le sollecitazioni culturali ed i pensieri condivisi. Questi si ritrovano in quanto scritto.

### Riferimenti bibliografici

- [1] *Saperi a confronto: L'interfaccia tra scienze "dure" e scienze della vita*, incontro di studio organizzato dalla Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali dell'Accademia Peloritana dei Pericolanti, nell'ambito del ciclo "Conversazioni in Accademia" (Messina, 17 Maggio 2007).
- [2] K. Mullis, *Ballando nudi nel campo della mente* (Baldini & Castoldi, Milano, 1998).
- [3] H. Maturana e F. Varela, *L'albero della Conoscenza* (Garzanti, Milano, 1999).
- [4] Il rasoio di Occam afferma che *Entia non sunt multiplicanda sine necessitate*; cioè gli enti non devono essere moltiplicati senza necessità. Come si vede un vero e proprio criterio di economia della conoscenza.
- [5] A. W. Watts. *La Via dello Zen* (Feltrinelli, Milano, 2006).
- [6] L. Wittgenstein, *Tractatus Logico-Philosophicus* (1922).
- [7] A. Sergi e P. V. Giaquinta, *On Computational Strategies within Molecular Dynamics Simulation*. Unpublished (2007).
- [8] W. Kohn, *Rev. Mod. Phys.* **71** 1253 (1999).
- [9] Forse tale concetto è molto più chiaro ai fisici della materia che a quelli delle alte energie o dell'astrofisica, visto che, purtroppo, parte di questi ultimi si ostina a disquisire della funzione d'onda dell'universo anche se essa non è né calcolabile né misurabile.
- [10] M. Piattelli Palmarini, *L'illusione di sapere* (Mondadori, Milano, 1995).
- [11] E. T. Jaynes, *Probability Theory. The Logic of Science* (Cambridge University Press, Cambridge, 2003).
- [12] M. Toda, R. Kubo, and N. Saito, *Statistical Physics I* (Springer, Berlin 1983); R. Kubo, M. Toda, and N. Hashitsume, *Statistical Physics II* (Springer, Berlin 1985).
- [13] D. R. Hofstadter, Gödel, Escher, Bach: Un'Eterna Ghirlanda Brillante (Adelphi, Milano, 1984).
- [14] Ad un livello elementare, è noto a tutti come la teoria dei numeri costituisca un sistema aperto: definiti i naturali e l'addizione è possibile definire la sottrazione. Da qui però è necessario introdurre i numeri con il segno e così via sino ad arrivare ai numeri complessi od ai numeri trascendenti.
- [15] T. R. Lezon, J. R. Banavar e A. Maritan, *J. Phys. Condens. Matter* **18** 847 (2006).
- [16] M. Bitbol e P. L. Luisi, *J. R. Soc. Interface* **1**, 99 (2004).
- [17] E. Schrödinger, *What is life? The Physical Aspect of the Living Cell* (Cambridge University Press, Cambridge, 1968).
- [18] K. Kaneko, *Life: An introduction to Complex Systems Biology* (Springer, Berlin, 2006).
- [19] U. Alon, *An Introduction to System Biology. Design Principles of Biological Circuits* (Chapman & Hall, Boca Raton, 2007).
- [20] A. Einstein, *Il significato della relatività* (Newton, Roma, 1997).
- [21] H. B. Callen, *Thermodynamics and an Introduction to Thermostatistics* (Wiley and sons, New York, 1987).
- [22] G. Tripodi, *Complessità* **1** 118 (2006).

---

[a] Alessandro Sergi  
Dipartimento di Fisica  
Università degli Studi di Messina,  
Contrada Papardo, 98166 Messina, Italy  
\* **E-mail:** asergi@unime.it

[b] Giacomo Tripodi  
Dipartimento di Scienze Botaniche  
Università degli Studi di Messina,  
Contrada Papardo, 98166 Messina, Italy

---

Presented: May 17, 2007  
Published on line on July 23, 2007