

VITA E PERCEZIONE DELLA VITA

RIFLESSIONI A PARTIRE DALLE NEUROSCIENZE

*di Flavio Keller**

Si sviluppa nell'arco di due contributi un'ampia serie di riflessioni sulla vita compiuta dall'autore tenendo come punti di riferimento da una parte le ricerche che svolge da molti anni nel campo della neurofisiologia a livello molecolare e dall'altra la sua funzione nella formazione degli studenti in medicina. Una rivisitazione storica dei vari tentativi di definire scientificamente che cos'è la vita, in cui si analizza il fenomeno vita nelle caratteristiche che lo distinguono dai sistemi inanimati. Ma l'auto-poiesi, l'aumento dei gradi di libertà non sembrano costituire le sole risposte possibili nella definizione di essere vivente.

La vita è una presenza reale che si differenzia chiaramente da qualsiasi costruzione mentale. L'essere vivente nella sua concretezza si colloca agli antipodi dei grandi sistemi filosofici che hanno caratterizzato le epoche passate, oppure delle «chiacchiere» che sembrano caratterizzare l'epoca post-moderna. Per questa ragione, la riflessione sulla vita riveste oggi grande importanza.

Una caratteristica della vita biologica¹ che colpisce immediatamente è la facilità con la quale, in genere, siamo in grado di distinguere tra un essere vivente e un corpo inanimato. Sappiamo istintivamente se qualcosa è vivo e se noi stessi siamo vivi, attraverso una sorta di conoscenza per connaturalità. La vita ci è connaturale, tanto che utilizziamo analogie che fanno riferimento alla vita anche per definire fenomeni della natura inanimata, per esempio quando parliamo della nascita dell'Universo, della morte di una stella.

Questa facilità è in netto contrasto con le difficoltà che incontriamo quando dobbiamo rispondere alla domanda «che cos'è la vita». Una considerazione della natura della vita è impresa, difficile e perennemente esposta al pericolo di cadere in due opposti estremi: il meccanicismo da una parte, e un vitalismo irrazionalista dall'altra. Nella lunga storia della biofilosofia, a partire dal mondo greco, gli esseri viventi sono stati caratterizzati in base a differenti caratteristiche fondamentali: auto-movimento, auto-poiesi, generazione a partire da altri esseri viventi, auto-regolazione, auto-limitazione, capacità di rispondere a stimoli ambientali in modo finalizzato, identità sostanziale che sopravvive ai cambi materiali (identità dinamica), morta-

*Ordinario di Neurofisiologia presso l'Università "Campus Biomedico", Roma.

¹ Il termine «vita» è utilizzato con significati differenti. J. Seifert (*What is Life? The Originality, Irreducibility, and Value of Life*. Value Inquiry Book Series, vol. 51, H.C. Callaway, Editor, 1997, cap. 1) distingue βίος (la vita come ci appare in un corpo biologico) da ζωή (la vita in quanto tale, che caratterizza tutte le forme di vita concepibili, anche gli esseri spirituali, e che raggiunge la sua massima perfezione in Dio, nel quale secondo Boezio si ha la *interminabilis vitae total simul et perfecta possessio*). Questo saggio fa riferimento esclusivamente alla vita biologica.

lità, capacità di conoscere il mondo e se stessi (questo aspetto assume il suo massimo grado di sviluppo negli esseri spirituali), capacità di entrare in relazione (anche questo aspetto assume il suo massimo grado di sviluppo negli esseri spirituali). Al di là delle sue caratteristiche particolari, la questione di fondo è la seguente: la vita è qualcosa di speciale, oppure no? La biologia obbedisce o no a leggi speciali che non possono essere fatte rientrare nel quadro delle leggi universali della fisica?

Ricordo che mi aveva causato una profonda impressione una lezione del nostro professore di biologia al liceo, sulla trasmissione dei caratteri ereditari, dalla quale ne avevo concluso che non siamo altro che mezzi che veicolano materiale genetico alle future generazioni. Dopo la lezione andai da lui per chiedergli se le cose stessero proprio così, perché mi sembrava una cosa priva di senso. I miei compagni mi dissero poi che il professore era rimasto colpito dalla mia riflessione e ne aveva parlato anche alle altre classi.

Le ricerche di questi ultimi cinquant'anni hanno definitivamente dimostrato che la maggior parte dei fenomeni della biologia non possono essere ridotti alla fisica e alla chimica classiche (quelle che vengono insegnate al liceo, per intenderci) e il modello dell'orologio a esse associato (sia che esso obbedisca alla meccanica classica oppure alla meccanica statistica, vedi più avanti l'esempio dell'orologio di Schrödinger) non è adeguato agli esseri viventi.² Per afferrare in qualche modo le caratteristiche speciali dei fenomeni vitali si sono rese necessarie teorie matematiche e fisiche nuove, per esempio la teoria dei sistemi complessi, la termodinamica lontano dall'equilibrio, la teoria del caos, i frattali, la chimica stocastica eccetera. Inoltre, i progressi della biologia molecolare, della bioingegneria, dell'informatica e della robotica, oltre che a notevoli risultati applicativi, hanno portato e stanno portando a una più profonda comprensione dei principi peculiari sui quali si basano gli organismi viventi. È per questo che viene dedicata loro una particolare attenzione in queste pagine. È tuttavia chiaro che creare modelli *in silico* persino fisici di sistemi viventi - che possono arrivare a simulare un organismo vivente anche in modo talmente perfetto da risultare indistinguibili dall'organismo biologico³ - non significa ancora che questi organismi artificiali possano essere considerati vivi.

Uno dei punti centrali che dovrebbe emergere da questo breve saggio, è che gli organismi viventi sono caratterizzati da una peculiare organizzazione su molteplici livelli, che non si ritrova nella materia inanimata. È evidente che gli esseri viventi fanno parte della natura, e soggiacciono dunque alle leggi della natura, nel senso che non possono violarle: un corpo umano in caduta libera non è nulla di speciale da un punto di vista della legge della gravitazione: soggiace alla medesima accelerazione di gravità di un corpo qualsiasi, né più

² Afferma non senza ironia Gilson: «Si dice che i popoli primitivi prendano un orologio per un animale, solo il genio di Cartesio ha potuto prendere degli animali per degli orologi». E. Gilson, *Da Aristotele a Darwin e ritorno. Saggio su alcune costanti della biologia*, Marietti, 2003, p. 197.

³ Quando si parla di «indistinguibilità» è necessario specificare per chi: per esempio sono stati costruiti scarafaggi robotici che rilasciano segnali chimici specie-specifici (feromoni) così che gli scarafaggi naturali li accettano come con-specifici, anche se la loro forma esterna non somiglia per nulla a quella di uno scarafaggio.

né meno. Tuttavia queste leggi costituiscono un livello di analisi che non dice tutto quello che c'è da dire su un organismo vivente, e tantomeno sull'uomo.

Ed è proprio a questo punto che può e deve entrare in scena la filosofia. A me sembra che il suo ruolo dovrebbe essere quello di ripeterci costantemente la domanda fondamentale: «Siamo sicuri che quello che abbiamo detto su questa cosa è tutto ciò che c'è da dire?». In altre parole, la filosofia ha la funzione di garante dell'«intero» dell'essere.

Dunque che aiuto può dare il biologo o il medico nel rispondere alla domanda «che cos'è la vita»? Conviene innanzitutto segnalare quello che *non* è il suo compito: fare il filosofo dilettante, tentando improbabili estrapolazioni basate su una evidenza scientifica che è in costante progresso e che è dunque provvisoria. In positivo, mi pare che il ruolo del biologo dovrebbe consistere nel cercare di esprimere i concetti fondamentali della biologia attuale in un linguaggio che possa convogliare in maniera precisa questi concetti fondamentali a ricercatori di discipline differenti, particolarmente di discipline umanistiche, dunque anche al filosofo.

Non si tratta dunque di fare divulgazione scientifica nel senso usuale del termine. Si tratta, invece, del difficilissimo lavoro di costruire un terreno di ricerca che il filosofo possa percorrere insieme al biologo, evidenziando quelli che potrebbero essere temi fertili di ricerca interdisciplinare. Questa è la prospettiva che sta all'orizzonte di questo saggio. L'analogia con il terreno non è casuale; quando si perlustra un terreno è possibile che si ripassi dallo stesso punto più di una volta: le inevitabili ripetizioni dovrebbero essere viste in questo senso. È anche probabile incontrare sul cammino altri esploratori del passato o del presente, del cui punto di vista va ovviamente tenuto conto. Alcuni eminenti esploratori che incroceremo spesso sono fisici e matematici come Erwin Schrödinger (1887-1961), Michael Polanyi (1891-1976), Alan Turing (1912-1954) e Ilya Prigogine (1917-2003), e filosofi come Aristotele (384-322 a.C.), Hans Jonas (1903-1993), Étienne Gilson (1884-1978) e Cornelio Fabro (1911-1995). È ovvio che è necessario avvicinarsi a essi con profonda umiltà.



I processi elementari degli organismi viventi e la loro relazione con l'organismo in quanto tale

La materia che costituisce gli esseri viventi è una materia speciale, qualitativamente differente dalla materia inanimata, oppure è solo una forma particolare di organizzazione della materia in genere, caratterizzata da particolari proprietà che riassumiamo, quasi per convenzione, sotto il concetto di «materia vivente»? Étienne Gilson,

⁴ E. Gilson, *Op. cit.*, p. 187.

interpretando il pensiero di Aristotele afferma: «Sì, gli esseri viventi organizzati e quelli non organizzati [cioè la materia inerte] costituiscono due classi distinte, ma non vuol dire che consistano in due specie diverse di materia, solo che la loro materia è determinata da forme diverse».⁴

Se sottoponiamo un organismo vivente a un'analisi chimica convenzionale, troveremo gli stessi elementi chimici che ritroviamo in natura, cioè carbonio, ossigeno, azoto, idrogeno, fosforo, zolfo, sodio, potassio, cloro, calcio. Non troviamo nessun elemento nuovo. Dunque una prima conclusione, affrettata, potrebbe essere che gli organismi viventi non sono «nulla di speciale». Una conclusione più prudente è che questa analisi conferma ciò che la filosofia classica aveva già intuito: che gli organismi viventi sono parte della natura, quella che viene chiamata, nel linguaggio comune, «natura animata», per distinguerla dalla «natura inanimata». Se però approfondiamo l'analisi, possiamo osservare che tutti gli organismi viventi che conosciamo sono basati su una particolare chimica, quella del carbonio. Il carbonio è un elemento che è in grado di fornire una varietà enorme di strutture molto stabili legandosi con pochi altri elementi pesanti come azoto, ossigeno e fosforo. In tal modo si ottengono tutte le molecole della vita. Se non ci fosse questa enorme capacità del carbonio di dar luogo a catene molto lunghe e ordinate nello spazio, tutto quello che sappiamo della vita non funzionerebbe. In ogni caso non tutti gli elementi chimici sono adatti a sostenere la vita, almeno la vita che conosciamo ed è oggetto delle presenti considerazioni, ma solo un certo tipo di elementi. Se approfondiamo ulteriormente l'analisi chimica, scopriamo che molte molecole che costituiscono gli organismi viventi sono composti chiralì (dalla radice greca *χείρ*, mano), ossia non sovrapponibili con la loro immagine allo specchio. Per esempio, gli aminoacidi che costituiscono le proteine sono tutti L-aminoacidi (dove L sta per levogiro). Queste prime osservazioni sembrano confermare che non qualsiasi combinazione di elementi chimici può essere alla base dei processi vitali, almeno della vita nella complessità che conosciamo. La materia vivente è dunque una materia «qualificata». Aristotele direbbe che è una materia determinata da un tipo particolare di forma, quella che caratterizza appunto gli esseri viventi. Per questo motivo, i principali manuali di biochimica dedicano i primi capitoli allo studio delle caratteristiche fisico-chimiche delle «molecole centrali della vita», ossia degli acidi nucleici e delle proteine. Solamente macromolecole altamente complesse e organizzate quali gli acidi nucleici e le proteine sembrano essere in grado di fornire quella «finezza», quella «raffinatezza» di effetti che sono necessari per sostenere i processi vitali.

È tuttavia chiaro che le macromolecole sono solo una condizione



necessaria ma non sufficiente per la vita biologica. Infatti, se andassimo ad analizzare chimicamente lo stesso organismo un istante prima della morte e un istante dopo la morte, non potremmo rilevare differenze essenziali nella struttura delle macromolecole che lo compongono. Inoltre, possiamo isolare una macromolecola da un organismo, per esempio una molecola di emoglobina oppure un canale ionico, ricavarne le sue proprietà e utilizzare queste conoscenze per capirne la funzione nell'organismo.

Un concetto che è stato introdotto per operare una distinzione tra i singoli processi fisico-chimici di un organismo vivente e l'organismo in quanto tale è il concetto di «emergenza». Martin Mahner (1958-...) e Mario Bunge (1919-...) ⁵ distinguono due tipi di emergenza: l'emergenza intrinseca (ovvero globale) e l'emergenza relazionale (ovvero contestuale). L'emergenza intrinseca è una proprietà globale del sistema che non si trova in nessuno dei suoi componenti. L'emergenza relazionale è la proprietà che acquista un componente quando diventa parte di un sistema. Secondo questa distinzione, solo l'emergenza intrinseca sarebbe dunque caratteristica di un organismo vivente, mentre l'emergenza relazionale può essere trovata anche al di fuori dei viventi, per esempio nelle macchine (naturali o artificiali), dove le singole parti acquistano una nuova efficacia. Un esempio di emergenza relazionale in una macchina è un orologio, nel quale gli ingranaggi opportunamente assemblati fanno funzionare l'orologio. Un esempio in biologia sono le proprietà che acquista il ferro quando entra a far parte di un composto macromolecolare quale l'emoglobina.

⁵ M. Mahner e M. Bunge, *Foundations of Biophilosophy*, Springer, Berlino, 1997, p. 31.

⁶ È interessante notare per inciso che i corrispondenti termini moderni inglesi, *physicist* e *physician*, sottolineano la comunanza di prospettiva. Nel Medioevo, l'esercizio della medicina era suddiviso tra il *medicus fisicus* ed il *medicus chirurgus*, divisione giustificata dalla stretta separazione imposta dalle leggi medioevali tra l'arte della medicina e gli uffici manuali. Questa distinzione sopravvive ancora oggi nella distinzione tra *physician* e *surgeon*.

Il ferro ha una particolare capacità di legare l'ossigeno, un processo che prende il nome di ossidazione. Un atomo di ferro in un cristallo di ematite è legato all'ossigeno. Il nome «ematite» deriva dal colore rosso-sangue, assunto da questo minerale quando il ferro è legato all'ossigeno. La capacità del ferro di legare l'ossigeno viene sfruttata nell'emoglobina (Hb), una macromolecola biologica presente nei globuli rossi, che trasporta ossigeno nel sangue. Un atomo di ferro in un cristallo di ematite e in una molecola di Hb sono entrambi ferro, tuttavia quando l'atomo di Fe è incorporato all'interno di una struttura organica che si chiama eme, e l'eme è incorporato all'interno di quattro catene proteiche globulari, le globine, così da formare un complesso macromolecolare, l'atomo di Fe assume capacità totalmente nuove, che non possiede nella ematite. All'interno della molecola di Hb, il Fe diventa capace di legare oppure cedere O₂ a seconda delle condizioni esterne: lega l'ossigeno nei polmoni e cede l'ossigeno nei tessuti. In tal modo l'Hb diventa un mezzo efficace per il trasporto dell'ossigeno. Si badi bene: al fine di essere un mezzo di trasporto efficiente di O₂, non è sufficiente che il Fe leghi l'O₂, deve anche essere in grado di cederlo; un altro pigmento simile all'Hb, la mioglobina, presente nei muscoli, lega l'O₂ con una affinità 20 volte maggiore dell'Hb, ma non è in grado di cederlo in condizioni normali, per cui non serve come mezzo di trasporto di O₂, ma solo come riserva di O₂ in condizioni di ipossia. Una dimostrazione della complessità dei fattori che determinano le nuove proprietà del Fe nell'emoglobina, rispetto all'ematite, è che non è stato ancora possibile realizzare una «Hb artificiale», cioè una molecola organica capace di legare l'O₂ in modo simile all'Hb e sia quindi in grado di sostituire l'Hb del sangue.

Penso che la relazione tra materia inanimata e materia vivente possa essere caratterizzata come quella di una «parziale discontinuità», cioè né totale discontinuità né totale continuità. Per caratterizzare questo rapporto è opportuno introdurre la distinzione tra Natura (greco φύσις) e Tecnica (greco τέχνη, latino *ars*). La Natura è l'oggetto di studio del fisico e del medico⁶ oltreché del biologo, del geologo, eccetera. La Tecnica è primariamente dominio dell'ingegnere, e



produce tra l'altro macchine, che servono all'uomo per dominare la Natura e metterla al suo servizio (è da notare che per dominare la Natura occorre conoscerla). Sebbene la distinzione tra Natura e Tecnica appaia oggi molto meno netta che in passato (i fisici, i medici, i biologi collaborano con gli ingegneri per costruire strumenti per conoscere la φύσις e agire su di essa), essa permette di introdurre il concetto di macchina anche per caratterizzare i processi elementari degli organismi viventi. La materia vivente può dunque essere caratterizzata come un insieme di «macchine naturali» o «macchine biologiche», di natura fisico-chimica, più o meno complesse e di dimensioni che vanno dal microscopico (per esempio i motori molecolari) al macroscopico (per esempio il sistema cardio-circolatorio), che sostengono la vita degli organismi viventi. Il concetto di «macchina biologica» è importante perché esprime implicitamente il fatto che i processi vitali che avvengono nell'organismo possono essere analizzati con metodi matematici, e confrontati con il funzionamento delle macchine artificiali, costruite dall'uomo. Conosciamo i meccanismi di funzionamento di queste macchine biologiche grazie a tecnologie che ci permettono di isolarle e studiarle «in vitro», ossia al di fuori del contesto dell'organismo vivente. Per studiare le proprietà di queste macchine biochimiche vengono per esempio costruite delle macchine «ibride» naturali-artificiali.

Per esempio per studiare il meccanismo di funzionamento del motore molecolare actina-miosina, che è alla base della contrazione muscolare, la porzione della molecola di miosina che si lega al filamento di actina e, così facendo, genera forza, può essere agganciata a una biglia microscopica; in presenza di energia metabolica (ATP) le molecole di miosina «camminano» sui filamenti di actina trascinandolo con sé il carico della biglia! Questi artifici sperimentali permettono per esempio di calcolare la forza generata da un singolo motore molecolare, utilizzando la classica equazione della dinamica $F = m a$. Il meccanismo che è alla base di questo motore è il moto browniano, infatti i motori molecolari sono anche chiamati «motori browniani».

Tra l'altro il fatto che queste «macchine ibride» funzionino così bene suggerisce che vi sia un legame profondo tra Natura e Tecnica, che già Aristotele aveva espresso nel noto aforisma «L'arte imita la Natura, dunque è necessario che la Natura abbia una certa similitudine con l'arte».

Possiamo dunque pensare che la materia vivente sia una materia altamente differenziata costituita da un gran numero di macchine naturali (di natura fisico-chimica): un organismo vivente è costituito da un numero più o meno elevato di macchine fisico-chimiche, ma l'organismo vivente non è in sé una macchina fisico-chimica. Infatti, per quanto altamente differenziate, queste minuscole macchine fisico-chimiche soggiacciono separatamente al secondo principio della termodinamica (tendenza a passare da uno stato di ordine a uno stato di disordine) mentre l'organismo vivente è caratterizzato, come ha giustamente osservato Schrödinger, da un'entropia negativa (neg-entropia).⁷

La considerazione degli organismi viventi dal punto di vista termodi-

⁷ E. Schrödinger, *Che cos'è la vita?*, Sansoni, Firenze 1988.

namico si è enormemente arricchita grazie alla termodinamica lontano dall'equilibrio (*non-equilibrium thermodynamics*) sviluppata da Prigogine e collaboratori. Un organismo biologico è un sistema «termodinamicamente aperto», che è costantemente attraversato da un flusso di materia e di energia. Anche nella natura inanimata possiamo trovare esempi di sistemi fisici aperti che si mantengono lontano dall'equilibrio grazie al costante apporto di materia ed energia dall'esterno: un esempio classico è un uragano marino, che viene «alimentato» da un costante apporto di calore e acqua. Non a caso, alcuni biologi hanno evidenziato l'analogia tra un «vortice» e un organismo vivente.⁸ Negli organismi viventi, materia ed energia vengono utilizzate per mantenere attivamente il proprio ordine, la propria organizzazione, e ciò malgrado non troviamo apparentemente all'interno di esso nessun principio materiale che sia in grado di spiegare questo fatto: tutti gli elementi materiali che vi troviamo obbediscono alla seconda legge della termodinamica. Prigogine ha dimostrato come in un sistema aperto, anche se complessivamente vale il secondo principio della termodinamica, per il quale l'entropia del sistema aumenta costantemente nel tempo, è possibile raggiungere localmente dei minimi di entropia, cioè osservare l'insorgenza e il mantenimento dell'ordine in determinati punti, in apparente violazione del secondo principio (cfr. il concetto di neg-entropia di Schrödinger), dando luogo a fenomeni di auto-organizzazione.

«Se comprimiamo fra due lastre di vetro un sottile strato di liquido e lo riscaldiamo, vedremo formarsi nel liquido - per convezione - una caratteristica struttura a nido d'api, costituita da cellule esagonali. È un risultato sconcertante per chiunque sia fermo alla concezione del mondo tradizionale, basata sulle situazioni di equilibrio. Più calore riceve il sistema dall'esterno, più frenetico e disordinato dovrebbe essere il moto delle molecole del liquido. Perché mai da questo disordine dovrebbe emergere un'organizzazione? La struttura a nido d'api dei fenomeni di auto-organizzazione fu scoperta per la prima volta dal ricercatore francese Henri Bénard nel 1900. Un tentativo di spiegazione fu fatto da Lord Rayleigh nel 1916. Oggi si sa che quel caratteristico tipo di struttura è una conseguenza di quella che è stata chiamata l'instabilità idrodinamica di Rayleigh-Bénard.»⁹

È importante sottolineare la differenza tra un reticolo cristallino (organizzazione statica) e una struttura dinamica dissipativa come l'esempio della struttura a nido d'api o l'uragano, che richiedono il costante apporto di energia; si parla di struttura dissipativa perché l'entropia, invece di aumentare all'interno del sistema e portare all'aumento del grado di disordine, viene dissipata nell'ambiente per mezzo del calore. L'esempio dell'instabilità di Rayleigh-Bénard è rilevante per i processi vitali, perché dimostra che l'energia somministrata in determinate condizioni (non in «qualsiasi» condizione, la

⁸ Cfr.: G. Cuvier, *Le Règne Animal distribué d'après son Organisation*, Paris, Deterville, t.1, 1817.

⁹ Cfr.: P. Coveney, R. Highfield, *La freccia del tempo*, Rizzoli, Milano 1991.

¹⁰ Dunque, al contrario di quanto sosteneva Bichat (cfr.: *Recherches physiologiques sur la vie et la mort*, nuova ed., Masson e Charpentier, Parigi 1852) non esiste un vero e proprio antagonismo tra organismo vivente e natura inanimata, ma piuttosto un'armonia.

distinzione è importante) è in grado di creare e mantenere l'ordine, anzi è necessaria per il mantenimento dell'ordine. Il processo di Rayleigh-Bénard (e altri fenomeni di auto-organizzazione costruiti in laboratorio) altro non è che una struttura artificiale relativamente semplice nella quale vengono create le condizioni alle quali può avvenire un processo di auto-organizzazione. Anche l'organismo vivente trae materia ed energia dall'ambiente. Potremmo dunque affermare, per analogia, che un organismo vivente è quella struttura naturale che crea e mantiene le condizioni affinché, grazie allo scambio costante di materia ed energia con l'ambiente, avvengano dei processi di auto-organizzazione.¹⁰ L'insieme di queste condizioni è ciò che chiamiamo «vita», e quando l'organismo non è più in grado di mantenere queste condizioni, esso muore.

Ovviamente vi sono due differenze fondamentali tra sistemi fisici come l'uragano oppure il sistema di Rayleigh-Bénard, e un organismo vivente. La prima è la differenza di materia: abbiamo già visto che la materia vivente è una materia specifica, la materia inerte ha capacità limitate di auto-organizzazione. La seconda è che mentre nei sistemi fisici non avviene nessun processo metabolico, negli organismi viventi avvengono processi metabolici per i quali gli elementi chimici vengono scomposti e integrati nella struttura dell'organismo (assimilazione).

L'equivalente «filosofico» della termodinamica lontano dall'equilibrio è il concetto di «preoccupazione per il proprio essere» (*concern for their own being*) che, secondo Hans Jonas, caratterizza gli organismi viventi in quanto tali, ma non si trova nei singoli elementi o processi che li costituiscono. «È talmente costitutiva per la vita la possibilità di non-essere che il suo stesso esistere è essenzialmente un essere sospeso sopra l'abisso [...]: così l'essere è diventato una costante possibilità piuttosto che un determinato stato, da cogliere di volta in volta in opposizione al suo contrario sempre presente, il non-essere, che alla fine inevitabilmente lo ingoierà.»¹¹

In effetti, una delle caratteristiche della vita che maggiormente colpisce è questo percorrere costantemente la sottile linea di confine tra ordine e disordine, tra ordine rigido e anarchia. Se consideriamo un organismo vivente, la scena che appare ai nostri occhi è quella di «sito in costruzione», di provvisorietà, di cose non finite, persino di cose cominciate e non portate a termine. Si respira l'ambiente di un cantiere piuttosto che quello di un museo.

Un'espressione di questa «preoccupazione per il proprio essere» è che negli organismi viventi solo parte dell'energia metabolica serve per la funzione dell'organo, un'altra parte non trascurabile serve per mantenere la struttura dell'organo, così che se questa energia viene a mancare, non solo cessa la funzione ma, simultaneamente, l'organo si corrompe. Si potrebbe dire che il prezzo della vita è che gli orga-

¹¹ «So constitutive for life is the possibility of not-being that its very being is essentially a hovering over this abyss, a skirting of its brink: thus being itself has become a constant possibility rather than a given state, ever anew to be laid hold of in opposition to its ever-present contrary, not-being, which will inevitably engulf it in the end.» H. Jonas, *The Phenomenon of Life. Toward a Philosophical Biology, Introduction*, Northwestern University Press, 2001.

nismi viventi devono attivamente rinnovarsi per mantenere il proprio essere, la propria identità. Questo fatto è stato riconosciuto da Cornelio Fabro: «[È] ... una delle leggi fondamentali di ogni attività vitale e sensoriale ossia che il suo esercizio non va soltanto a vantaggio dell'organismo intero, ma dello stesso organo operante, per esempio la digestione, la respirazione [...] tengono in vita e sviluppano lo stesso apparato digerente e respiratorio.»¹²

Polanyi introduce a questo proposito un principio interessante, ossia il principio di controllo duale¹³ che può essere utilizzato per differenziare tra gli organismi viventi (e le macchine) e la materia inerte.

«Così la macchina nel suo insieme opera sotto il controllo di due principi distinti. Quello superiore è il principio del progetto della macchina e questo imbriglia quello inferiore, che consiste nei processi fisico-chimici su cui la macchina si basa. [...] In questa luce l'organismo sembra essere, come una macchina, un sistema che funziona secondo due principi differenti: la sua struttura serve come condizione al contorno che imbriglia i processi fisico-chimici mediante cui i suoi organi svolgono le loro funzioni. Così, può essere chiamato un sistema sotto controllo duale. La morfogenesi, il processo attraverso il quale si sviluppa la struttura degli esseri viventi, può essere quindi paragonato alla formazione di una macchina che agirà come confine per le leggi della natura inanimata.»¹⁴

«Controllo duale» indica un controllo da parte di un principio inferiore e contemporaneamente di un principio superiore. Secondo Polanyi, mentre la materia inanimata si trova sotto il controllo di un unico ordine di principi (le leggi della fisica e della chimica), le macchine e gli organismi viventi si trovano sotto il controllo di due differenti ordini di principi, un principio inferiore legato alle leggi della fisica e della chimica, ed un principio superiore non riducibile a queste leggi.

I sistemi chimici capaci di auto-organizzazione, precedentemente descritti, sono un esempio di principio di controllo inferiore meno deterministico rispetto ai principi che conosciamo dalla fisica e chimica classica, principio inferiore che viene «imbrigliato» da un principio superiore negli organismi viventi. Non c'è nulla di strano se, per capire i meccanismi sui quali si basa la vita, dobbiamo abbandonare la chimica e la fisica classica, e fare riferimento alla termodinamica del non-equilibrio, alla teoria del caos, eccetera, teorie che danno migliori risultati in presenza di sistemi complessi quali sono gli organismi viventi. Anche cento anni fa, nel primo modello dell'atomo, il moto degli elettroni attorno al nucleo era interpretato secondo il modello newtoniano del moto dei pianeti attorno al Sole, il modello fu poi superato con l'avvento della meccanica quantistica.

Il concetto di controllo duale sviluppato da Polanyi mi sembra utile perché permette di superare il riduzionismo di Schrödinger e di molti bio-

¹² C. Fabro, *L'io e l'esistenza e altri brevi scritti*, a cura di A. Acerbi, Edizioni Università della Santa Croce, Roma 2006, p. 79.

¹³ Vedi per esempio M. Polanyi, *The structure of consciousness, in Brain*, Vol. LXXXVIII, (1965), pp. 799-810.

¹⁴ M. Polanyi, *La struttura irriducibile della vita*, in *Conoscere ed essere*, Armando, Roma 1988, p. 266-267.

logi contemporanei, senza tuttavia cadere in un vitalismo irrazionalista. Nell'ultimo capitolo della sua opera *Che cos'è la vita?*, dal titolo *È la vita basata sulle leggi della fisica?*, Schrödinger esprime il suo pensiero in un modo che non mi sembra completamente privo di ambiguità: «Ciò ch'io desidero chiarire [...] è, in breve, che da tutto ciò che abbiamo imparato sulla struttura della materia vivente, dobbiamo essere preparati a vederla comportarsi in un modo che non può ridursi alle ordinarie leggi della fisica. E ciò non in base al fatto che sia o non sia in gioco una qualsiasi "nuova forza", la quale diriga il comportamento dei singoli atomi in un organismo vivente, ma perché la costruzione è diversa da tutto ciò che noi abbiamo fin qui esaminato nelle nostre esperienze in laboratorio di fisica. [...] Dal modello generale della sostanza ereditaria proposto da Delbrueck emerge che la materia vivente, mentre non elude "le leggi della fisica", quali sono state formulate sino ad oggi, coinvolge probabilmente "altre leggi della fisica" fino ad oggi sconosciute, le quali tuttavia, una volta scoperte, formeranno parte integrante di questa scienza, esattamente come le precedenti.»¹⁵

¹⁵ E. Schrödinger, *Op. cit.*, cap. VII.

Per usare la terminologia di Mahner e Bunge, mi sembra che Schrödinger ammetta per gli organismi viventi una emergenza relazionale del tipo che si trova in una macchina, ma non una emergenza intrinseca. Infatti più avanti nello stesso capitolo Schrödinger introduce proprio l'esempio del moto dell'orologio, che secondo lui va classificato tra gli eventi retti da leggi statistiche: la forza della molla serve per vincere il moto termico degli atomi degli ingranaggi e, per quanto la possibilità sia remota, non si può escludere che l'orologio, lavorando all'incontrario, possa produrre il riavvolgimento della molla, assorbendo energia termica dall'ambiente (un esempio di ordine dal disordine). Dall'esempio dell'orologio risulta patente che Schrödinger ha in mente il meccanicismo, seppure di tipo statistico. Mi sembra che nell'esempio dell'orologio è racchiuso anche il limite del suo concetto di neg-entropia: il riavvolgimento della molla dell'orologio è un evento caratterizzato da una probabilità prossima allo zero, ed è difficile che possa spiegare un fenomeno come la vita, che non è poi così raro. Di fatto abbiamo già visto che il processo di Rayleigh-Bénard è un modello molto più realistico dell'orologio di Schrödinger per la creazione di ordine a partire dal disordine, e non si tratta di un modello di tipo meccanicista.

Afferma invece Polanyi: «I principi superiori che caratterizzano un'entità complessa non possono essere definiti in termini di leggi che si applicano alle loro parti».¹⁶

Un esempio biologico reale di controllo duale è la chemotassi, un meccanismo attraverso il quale un organismo, per esempio un batterio, si muove verso una sorgente di nutrimento o un segnale. La strategia che è utilizzata dal batterio è chiamata *biased random walk*. Prendiamo per

¹⁶ «The higher principles which characterize a comprehensive entity cannot be defined in terms of the laws that apply to its parts themselves». M. Polanyi, *Op. cit.*, p. 804.

esempio un batterio che si muove verso una sorgente di glucosio.¹⁷ Il batterio possiede nella sua membrana dei recettori per il glucosio che possono assumere due differenti conformazioni, A e B, a seconda di come varia la concentrazione locale di glucosio. La conformazione A è assunta se la concentrazione di glucosio in prossimità dei recettori è costante o diminuisce; la conformazione B è assunta se la concentrazione locale aumenta. I recettori controllano il tipo di moto della ciglia del batterio, così che la conformazione A genera il moto di tipo X, caratterizzato da un battito coordinato delle ciglia tale che il batterio procede in linea retta; la conformazione B genera il moto di tipo Y, che è un moto scoordinato delle ciglia che fa costantemente ri-orientare il batterio. È facile intuire che un meccanismo del genere fa sì che il batterio continua a cambiare direzione a meno che non si trovi a muoversi nella direzione del gradiente, dunque verso la sorgente di glucosio. È evidente che i differenti tipi di moto X e Y sono entrambi compatibili con le leggi della fisica (in questo caso della meccanica dei fluidi). Invece, la legge «se A, allora X; se B, allora Y», che è alla base del comportamento «intelligente» del batterio, è una legge che va al di là delle leggi della fisica e della chimica, e rientra nella logica della biologia, è un meccanismo che contiene una scelta (inconsapevole) che serve a garantire il conseguimento di un risultato finale: muoversi verso la sorgente di nutrimento. Già Claude Bernard (1813-1878) segnalava il paradosso che la chimica e la fisica possono in ultima analisi spiegare ogni dettaglio del funzionamento dell'organismo, ma non possono spiegarne l'esistenza. Mi pare che questo paradosso possa essere superato considerando appunto che l'esistenza di un organismo è spiegabile a un altro livello, quello della logica.

Anche nel caso di un robot chemotattico, costruito per muoversi verso la sorgente di una determinata sostanza (per esempio per trovare il punto di fuoriuscita di un gas), il principio inventato dagli ingegneri è simile: il robot esegue un *biased random walk*, ossia un moto nel quale la probabilità di fare un passo in qualsiasi direzione, compresa quella dalla quale è venuto, è identica, a meno che non si trovi a muoversi nella direzione del gradiente, nel qual caso si muove contro gradiente (ossia da una concentrazione minore a una concentrazione maggiore).¹⁸

La matematica del *random walk* è molto interessante. Si può dimostrare che, per un gran numero di passi, il *random walk* arriva a convergere verso il moto browniano, così che può essere trattato matematicamente come moto browniano. Per esempio, la teoria del *random walk* è stata utilizzata durante la seconda guerra mondiale, per calcolare la distanza dal campo di prigionia che un prigioniero in fuga, che non conosce la zona, sarebbe in grado di percorrere in un determinato periodo di tempo.

¹⁷ Cfr.: P. Bourguin, J. Stewart, *Autopoiesis and Cognition, Artificial Life* 10:327-345 (2004).



¹⁸ Dal punto di vista dell'equazione della diffusione, ciò equivale a mettere il segno «>» davanti al coefficiente di diffusione.

Anche in questo caso gli ingegneri hanno seguito un principio di controllo duale: da una parte un principio mutuato dalla meccanica statistica, e dall'altra parte un principio che sfrutta la legge della diffusione. Insieme, questi due principi generano la «logica» del robot, ovvero producono il comportamento «intelligente». È da notare che non c'è competizione tra i due principi, perché il principio del *random walk* vale a meno che non subentri l'altro principio. C'è dunque un ordinamento gerarchico tra i due principi. D'altra parte, se il robot seguisse solo il principio rigidamente deterministico di muoversi contro il gradiente di concentrazione, non arriverebbe mai alla sorgente.

Possiamo fare un altro esempio di controllo duale più vicino all'esperienza comune: una partita di calcio è ovviamente condizionata dalle leggi della meccanica, la traiettoria del pallone è definita dalle equazioni newtoniane che descrivono il moto di un corpo nel campo gravitazionale, e queste leggi costituiscono il principio inferiore; tuttavia senza riferimento ad un principio superiore, in questo caso la «logica» del gioco, il gioco è incomprensibile. Dal punto di vista delle leggi fisiche, infatti, è assolutamente irrilevante che un calciatore calci il pallone nella rete avversaria oppure nella propria rete: possiamo capire la differenza tra queste due situazioni solamente se facciamo riferimento al principio superiore, la logica del gioco.¹⁹

Alla luce delle conoscenze che possediamo oggi, penso si possa affermare che le macchine naturali che costituiscono la materia vivente soggiacciono alle leggi della fisica e della chimica esattamente quanto le macchine artificiali (per esempio un orologio). Infatti, sia le macchine naturali che quelle artificiali obbediscono al secondo principio della termodinamica: lasciate a se stesse, esse tendono a raggiungere uno stato di completo equilibrio o massima entropia. Infatti, come un orologio lasciato a se stesso tende a raggiungere uno stato finale di completo equilibrio (la tensione nulla della molla, oppure il punto più basso del peso)²⁰, anche le macchine biologiche, lasciate a se stesse, tendono a raggiungere una condizione di equilibrio chimico. Esattamente come l'orologio, che per essere mantenuto in moto deve essere caricato, cioè gli deve essere fornita energia dall'esterno (perché il moto dell'orologio dissipa l'energia della molla nell'ambiente), anche le macchine biologiche devono ricevere energia dall'esterno per continuare a funzionare.

Però, a differenza dell'orologio, l'organismo vivente è un sistema termodinamicamente aperto, che è costantemente attraversato da un flusso di materia e di energia. Nell'orologio la forma è data una volta per sempre, quando viene costruito. Anche quando funzionano insieme, i pezzi dell'orologio continuano a essere quelli che erano quando erano separati (salvo l'eventuale usura dovuta all'attrito), non vi è reale comunicazione tra i pezzi, solo contiguità meccanica. Invece nell'organismo vivente: le componenti si adattano e comunicano le une con le altre (mostrano, come ha sottolineato Bernard, una sorta di «solidarietà organica o sociale»²¹); la

¹⁹ Un esempio simile è utilizzato da M. Polanyi, in op. cit. Qualcuno potrebbe obiettare che la logica del gioco potrebbe essere a sua volta spiegata da una teoria matematica: la teoria dei giochi. Questo è vero, tuttavia il punto è che queste leggi appartengono ad un livello diverso rispetto a quello della dinamica.

²⁰ L'esempio dell'orologio è sviluppato da H. Jonas in *Cybernetics and Purpose: a Critique, in The Phenomenon of Life. Toward a Philosophical Biology*, cap. 5. Northwestern University Press, 2001.

²¹ C. Bernard, *Introduction à l'étude de la médecine expérimentale*, Baillière, Paris 1865.

forma deve essere mantenuta attivamente fornendo l'energia necessaria ai processi autopoietici. Questa energia viene utilizzata dall'organismo per mantenere attivamente la propria organizzazione, la propria forma specifica, e ciò malgrado non troviamo all'interno di esso nessun principio materiale che sia in grado di spiegare questo fatto: tutti gli elementi materiali che vi troviamo obbediscono alla seconda legge della termodinamica. E non si vede attraverso quale emergenza l'interazione tra elementi intrinsecamente incapaci di mantenere il proprio ordine possa portare a un organismo che possieda questa capacità.

In effetti, il concetto di autopoiesi (auto-organizzazione) che abbiamo introdotto sopra appare più proficuo che il concetto di emergenza. Il concetto di «macchina autopoietica» o «automa cellulare» è stato introdotto da Humberto Maturana (1928-...) e Francisco Varela (1946-2001) nel 1973 per indicare una rete di processi (tipicamente reazioni chimiche) che riproducono i componenti della rete e la mantengono in uno stato di individualità e segregazione rispetto al mondo esterno.²² Una definizione recente di autopoiesi, che introduce il termine di «condizioni al contorno» (*boundary conditions*) è data da Paul Bourguine e John Stewart nell'opera citata: «*An autopoietic system is a network of processes that produces the components that reproduce the network, and that also regulates the boundary conditions necessary for its ongoing existence as a network.*» Detto in altri termini, un sistema autopoietico è un ente che ha in sé un principio immanente di organizzazione. L'esempio fondamentale di un sistema autopoietico biologico è una cellula. Nel lavoro citato, Bourguine e Stewart fanno un esempio concreto di un automa cellulare consistente in una membrana semi-permeabile sferica che isola un volume interno nel quale avvengono reazioni chimiche di reazione-diffusione. L'automa è caratterizzato da quattro reagenti fondamentali, A, B, C, D, e da quattro reazioni fondamentali elencate nel riquadro seguente.

²² H.R. Maturana, F.J. Varela, *Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living*, D. Reidel, 1980.

- 1) Formazione della membrana a partire dal reagente C; la membrana intatta è impermeabile a B, così che B viene confinato al suo interno; tuttavia, a causa della disintegrazione spontanea di C in D, si formano buchi nella membrana, attraverso i quali il reagente B va perso all'esterno;
- 2) Produzione di B a partire dalla reazione $A + A \rightarrow B$. Questa reazione avviene solo all'interno della cellula ed è catalizzata dalla membrana (C catalizza la formazione di B);
- 3) Diffusione di A; dato che A viene consumato all'interno della cellula, vi è un flusso netto di A dall'esterno all'interno;
- 4) Riparazione della membrana. La membrana intatta è impermeabile a B, che perciò si accumula all'interno; B è libero di diffondere all'interno della cellula; se urta contro il margine di un buco della membrana, allora B si trasforma in elemento C incorporato nella membrana, riparando così il buco. Se però il buco è troppo grande, allora vi è una elevata probabilità che B passi attraverso il buco senza ripararlo, e vada perso all'esterno.

Come si vede, si tratta di un sistema completamente autopoietico, dato che tutte le componenti del sistema sono prodotte dal sistema stesso. Abbiamo qui un vero e proprio salto ontologico: un'entità che tende a conservarsi e a autoripararsi. In termini filosofici, è un esempio di un'entità che ha in sé il proprio fine, esattamente come una freccia che, una volta scoccata, vola verso il bersaglio per conto suo.

«Le descrizioni della finalità naturale che ne collocano la causa fuori da essa sembrano concepite per giustificarne la negazione, ma quanto meno sbagliano oggetto. Può accadere che il metafisico e il teologo, in cerca di un fine supremo della natura, si ritengano giustificati a porre un Alfa, che sarebbe anche un Omega, come causa e fine di tutto ciò che esiste, ma il problema che si pone la biofilosofia non è questo. Quale che sia la sua origine trascendente, la finalità dell'organismo è la stessa che è nella freccia che, una volta scoccata dall'arciere, vola verso il bersaglio senza saperlo. Venti intenzioni esterne possono averla diretta verso il bersaglio, ma essa ci va ormai per conto suo ed è proprio essa che lo raggiunge. La direzione di un movimento fa parte del movimento stesso.»
(E. Gilson, *Op. cit.*, p. 201)

L'automa cellulare appena descritto è bensì dotato di capacità di regolare le condizioni al contorno (*boundary conditions*) necessarie per la sua esistenza e di autoripararsi, però è caratterizzato da una serie di limitazioni: una limitazione importante è che si tratta di una cellula isolata, una «monade». Cellule reali non sono monadi ma scambiano costantemente segnali con altre cellule nelle vicinanze, e anche con l'intero organismo (attraverso i cosiddetti ormoni). Questi segnali sono fondamentali affinché la cellula possa svilupparsi e mantenere la sua identità. Abbiamo già visto che oggi è possibile isolare, ricostituire e far funzionare molte delle macchine chimiche degli organismi viventi *in vitro*, a partire dagli elementi separati (è in gran parte grazie a questo che ne conosciamo la struttura e il funzionamento). Sono state anche costruite macchine chimiche artificiali o ibridi naturali-artificiali, con proprietà analoghe a quelle delle relative macchine naturali. Questo fatto dimostra però solo che ne abbiamo compreso a fondo la struttura e il modo di funzionare. Spingendo questo esempio verso un futuro forse non immediato, è pensabile che saremo in grado di costruire e far funzionare anche interi organismi biologici a partire dalle singole macchine fisico-chimiche che li costituiscono, dapprima magari magari semplici organismi unicellulari e poi pluricellulari.

Sono in corso esperimenti volti a determinare il «genoma minimo» di un organismo vivente, ossia il corredo genomico necessario e sufficiente per sostenere la vita di un organismo semplice: un «batterio sintetico». Si tratta di un esperimento molto interessante da almeno due punti di vista: per il concetto di autopoiesi, perché fino a oggi tutte le strutture autopoietiche (automi cellulari, processo di Rayleigh-Bénard, reazione di Belusov-Zabotinski, eccetera) sono strutture relativamente semplici che dimostrano come un certo tipo di ordine possa emergere spontaneamente, ma sono lontane dalla complessità di un organismo vivente; perché sarebbe probabilmente il primo esempio di creazione di una nuova specie da parte dell'uomo.

Se questi esperimenti riuscissero, essi dimostrerebbero però solo che abbiamo compreso la struttura e il modo di funzionare di un organismo in modo talmente profondo, che siamo in grado di creare le condizioni al contorno favorevoli affinché emergano nuove forme di vita senza passare attraverso forme di vita pre-esistenti (sarebbe una ulteriore confutazione del vitalismo, peraltro già confutato in base ad altre considerazioni, e il principio *omnis cellula e cellula* non sarebbe più valido) non già che abbiamo creato la vita. Come detto, già Aristotele aveva rilevato che l'arte imita la natura, dunque è necessario che la natura abbia una certa similitudine con l'arte. Le macchine biochimiche alla base dei processi vitali rappresentano tuttavia solo processi elementari, e costituiscono solo una forma «debole» di vita. La vita come principio superiore che coordina i processi vitali elementari non può essere ridotta alla loro somma, come dimostrato dal fatto che i singoli processi vitali possono continuare a

funzionare, per un certo tempo, anche dopo la morte dell'individuo (per esempio riflessi di difesa sostenuti dal midollo spinale, che continuano anche dopo la morte cerebrale).

Un'altra interpretazione della vita è quella di progressiva intensificazione dei gradi di libertà della materia. Si tratta di un concetto interessante perché sottolinea la continuità tra tutti gli organismi viventi, da quelli più semplici a quelli dotati di capacità di auto-determinarsi.

Una esemplificazione «al contrario» di come la vita possa essere caratterizzata come progressivo aumento dei gradi di libertà è il fenomeno del *rigor mortis*, l'irrigidimento dei muscoli dopo la morte; si tratta di un fenomeno «fisiologico» che riflette il progressivo raggiungimento di una particolare configurazione delle teste di miosina nel sarcomero, configurazione nella quale le teste sono irreversibilmente legate al filamento di actina, formando un preciso angolo, chiamato appunto «angolo di rigor».²³ Questo fenomeno è dovuto all'esaurimento delle scorte di ATP del muscolo. In questa configurazione i filamenti di actina e di miosina non sono più liberi di scorrere uno sull'altro, come durante la contrazione muscolare fisiologica, e ciò è appunto alla base dell'irrigidimento dei muscoli dopo la morte. Possiamo affermare che, dopo la morte, l'actina e la miosina vengono a formare un «cristallo» organico altamente differenziato, ma pur sempre inerte, ontologicamente equivalente a un cristallo minerale, per esempio un cristallo di quarzo. Questo «cristallo» biologico di actina e miosina, che una volta era plastico (poteva assumere un gran numero di gradi di libertà) e ora è rigido, e andrà piano piano dissolvendosi, rappresenta una sorta di effigie strutturalmente perfetta, ma priva di vita, di quello che era una volta l'organismo vivente, l'esatto contrario del mito di Pigmalione.

Quindi la vita può effettivamente essere vista come una progressiva intensificazione dei gradi di libertà della materia. Si potrebbe dire, con Polanyi, che l'organismo vivente, finché vive, è sotto un controllo duale, e se la forza del principio superiore diminuisce progressivamente fino a diventare uguale a zero, l'organismo muore, ovvero diventa materia inanimata.

In sintesi, una considerazione filosofica della natura della vita è impresa difficile, perennemente esposta al pericolo di cadere nel meccanicismo oppure nel vitalismo. Forse l'approccio più corretto è considerare la vita come un fenomeno originario (*Urphänomen*) che non può essere ricondotto ad altri concetti.²⁴ Può essere analizzato per capire quali sono le sue caratteristiche specifiche, che cosa distingue il vivente da ciò che non lo è (e persino questo può risultare difficile in certi casi, come nel caso dei virus), possono essere condotti esperimenti disegnati per capire quali sono le condizioni necessarie e sufficienti per l'esistenza di un organismo vivente (per esempio batterio con genoma sintetico minimo per garantirne la vita), ma il «fenomeno vita» non può essere spiegato a partire da altri fenomeni o proprietà. ❖

(continua)

²³ È sorprendente che la stessa configurazione, angolo di *rigor*, la troviamo durante la contrazione muscolare fisiologica, anzi è proprio questa la configurazione che genera la forza della contrazione muscolare, solo che in questo caso si tratta di una configurazione reversibile, dato che l'ATP produce in seguito il distacco delle teste, che sono pronte per un nuovo ciclo. Dunque, strettamente parlando, l'energia metabolica non serve a produrre la contrazione muscolare, bensì il rilassamento muscolare.

²⁴ Cfr.: J. Seifert, *What is Life? The Originality, Irreducibility, and Value of Life*, Value Inquiry Book Series, vol. 51, H.C. Callaway Editor, 1997, cap. 1.

Le immagini che corredano questo articolo sono fotografie di Anna Camisasca.