

LUCE, PANE, VITA. IL SENSO DEL METABOLISMO

di Giorgio Dieci*

Il nostro essere vivi dipende da un numero impressionante di trasformazioni chimiche continuamente in atto e che implicano ininterrottamente una nostra relazione profondissima con quell'«altro da noi» che è l'ambiente: acqua, ossigeno, sali inorganici, nutrienti organici (e quindi ultimamente luce solare).

L'articolo intende far cogliere la bellezza e la grandiosità del metabolismo, sia mostrando le architetture di certe proteine fondamentali (per esempio i centri di reazione fotosintetici), o i geniali network di vie metaboliche interconnesse, sia richiamando alcune intuizioni di scrittori e filosofi.

* Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Parma

Il termine «metabolismo», uno dei più caratteristici e centrali della Biologia, deriva dalla parola greca μεταβολή, che significa esattamente cambiamento, mutamento, trasformazione. A quale trasformazione si riferisce il metabolismo? Per non far prevalere il carattere scontato e quindi noioso del già saputo, è fondamentale prendere molto sul serio questa domanda, e contemplare la risposta nella totalità delle sue implicazioni.

Si potrebbe rispondere, in modo semplice ma non banale, che il metabolismo è la trasformazione continua di ciò che non è vivo in ciò che è vivo, della materia inanimata in materia vivente.

Difficilmente riusciremmo a immaginare una trasformazione più radicale, noi che siamo vivi, e conosciamo quindi per esperienza diretta, per così dire dall'interno, questo stato di vivente che è la sede stessa del manifestarsi della natura nostra e del mondo. Eppure il nostro essere vivi è profondamente radicato in ciò che vivo non è, e questo risuona già nei versetti del libro della Genesi: «Con il sudore del tuo volto mangerai il pane; finché tornerai alla terra, perché da essa sei stato tratto: polvere tu sei e in polvere tornerai!» (Gen. 3,19).



Metabolismo: dalla materia inanimata alla materia vivente

Un esperimento volto a cogliere il metabolismo, esperimento apparentemente troppo elementare per essere proposto come tale, potrebbe essere questo: prendete della materia inanimata, e trasformatela in materia vivente. Può essere realizzato? Chi è in grado di compiere questo esperimento? A quali condizioni? E che cosa vuol dire poi «materia vivente»? La materia non è sempre la stessa, vivente o no?

Riguardo alla fattibilità dell'esperimento, la risposta è semplice: ognuno di noi realizza la trasformazione della materia inanimata in materia vivente ogni volta che si nutre. Una versione più accurata dell'esperimento, e dai risultati più direttamente tangibili, potrebbe essere questa: prendere un brodo di coltura sterile, inocularvi pochissimi batteri e verificare come, il giorno dopo, sia stata prodotta una quantità inverosimile

di cellule batteriche, la cui massa comincia a essere considerevole, mentre prima era impercettibile; una parte della materia non vivente che costituiva il brodo di coltura è stata trasformata in materia vivente.

L'insieme dei processi che rendono questa trasformazione possibile è il «metabolismo», come dice anche una definizione (una fra tante) un po' datata, ma che rimane valida: «l'insieme dei processi chimici e fisici mediante i quali la sostanza vivente viene prodotta, mantenuta, degradata e mediante cui a essa è permesso di compiere le sue funzioni [Grande Dizionario Enciclopedico, UTET, 1970]».

Il metabolismo si presenta così come la chiave per comprendere il mistero dell'origine della vita. Ci siamo anche chiesti, tuttavia, a quali condizioni possa essere compiuta la trasformazione straordinaria a cui allude il termine metabolismo.

A quali condizioni? Sfido chiunque a prendere una qualsivoglia miscela di tutte le sostanze organiche e inorganiche presenti nei viventi, ma in assenza di forme di vita preesistenti, e a far emergere da queste un vivente.

La nostra mente è molto portata ad ammettere la realizzabilità di questo processo, soprattutto sulla base della constatazione che a un periodo lontanissimo in cui non vi era traccia di viventi sulla Terra è seguito un periodo lunghissimo, che dura tuttora, in cui la vita permea il pianeta: quindi a un certo punto deve essere avvenuto questo passaggio straordinario – l'origine della vita.

Nello stesso tempo, se ci limitiamo a ciò che possiamo veder accadere, c'è una condizione fondamentale per l'attuarsi della trasformazione di materia inanimata in materia vivente: che vi sia già qualcosa di vivente, in grado di compiere questa trasformazione.

La più estrema delle trasformazioni

Tutte le domande sul metabolismo si possono quindi ricondurre a questa: «che cosa c'è, nei viventi, che rende possibile la trasformazione in vivente di ciò che non è vivente?».

Spiegare il metabolismo significa allora innanzitutto rendersi conto di un impressionante dispiegamento di forze e risorse già in atto in ogni vivente. Questo può sembrare un passo incompleto, rispetto a quello che occorrerebbe per fare luce sull'istante iniziale della vita sul nostro pianeta.

Eppure già solo il tentativo di rispondere in modo esauriente a questa domanda: come accade che le molecole, gli atomi che compongono il pane e formaggio che ho mangiato diventino in poco tempo parte delle fibre muscolari attraverso cui posso muovermi, o dei neuroni che rendono possibile il mio pensiero, già solo questo ci porta in un microcosmo di delicatissima e meravigliosa complessità.

Prima di esplorare alcune stanze periferiche di questo microcosmo, un nulla rispetto alla totalità dei suoi spazi, vorrei far notare che la trasformazione del pane in ciò che sono io è forse la più estrema delle trasformazioni che possiamo immaginare (non ci inganni la quotidianità di questo fatto: si tratta della straordinarietà che permea e nutre istante per istante l'apparente ordinarietà del nostro vivere).

André Sentenac (1939-...), un grande biochimico francese nel cui laboratorio ho avuto la fortuna di lavorare per due anni, si stupiva sempre di come le giugliole e le caramelle scadenti che ogni tanto qualcuno, per disfarsene, abbandonava sul tavolo della cucina dell'Istituto di ricerca, sparissero con grande rapidità, inghiottite da dottorandi e post-doc (io compreso) che passavano di lì fra un esperimento e l'altro: «È favoloso che questa roba possa essere così facilmente trasformata in pura scienza!» diceva con sincero entusiasmo.

All'inizio del dialogo *L'anima e la danza* di Paul Valery (1871-1945), l'autore fa dire a Socrate parole molto suggestive su questo tema. La scena è quella di un banchetto che volge alla fine. Erissimaco, sazio delle ottime vivande, sentendo il bisogno di qualcosa di più secco e spirituale, si rivolge a Socrate che sta dicendo qualcosa fra sé e sé.

«*Erissimaco*: Cosa mormorano le tue labbra, caro Socrate?

Socrate: Esse mi dicono dolcemente: l'uomo che mangia è il più giusto degli uomini... [...].

L'uomo che mangia, dicono, nutre i suoi beni e i suoi mali. Ogni boccone che egli sente fondersi e disperdersi in lui stesso, va a portare forze nuove alle sue virtù così come, indistintamente, ai suoi vizi. Esso sostiene i suoi tormenti così come ingrassa le sue speranze; e in qualche punto si ripartisce fra le passioni e le ragioni. L'amore ne ha bisogno come l'odio; e la mia gioia e la mia amarezza, la mia memoria con i miei progetti, si dividono come fratelli la stessa sostanza di un'imbeccata.»

Lo stesso tipo di prodigio viene notato anche da Ernst Gombrich (1909-2001), nel suo scritto *In memoria di Frances A. Yates*. Parlando del glorioso *Warburg Institute* nel 1945, appena finita la guerra, Gombrich racconta che esso era sistemato in locali dove «ebbi il privilegio di assistere al trionfo dello spirito sulla materia. Nel buio e squallido seminterrato c'era una mensa *self-service* che somministrava alcuni dei cibi più scadenti che si potessero trovare anche in quei tempi di austerità. Non tutti i miei colleghi avevano il coraggio di affrontare quegli orrendi intrugli di carne tritata dall'aspetto assai dubbio, di patate schiacciate e di verdure fradice, ma io non credo che Frances Yates o Rudi Wittkower abbiano mai prestato attenzione a ciò che mangiavano. Io sì, ma spesso sedevo insieme a loro a uno di quei lunghi tavoli, per ascoltare le loro ispirate conversazioni. I deprimenti locali della mensa si trasformavano, come per incanto, in una di quelle accademie che formavano l'oggetto delle indagini di Frances».[1]

Che cosa, quindi, permette a ogni vivente di trasformare in sé - di *assimilare* - continuamente porzioni di materia senza vita?

Il fenomeno della nutrizione

Prima di cercare di rispondere a questa domanda cruciale vorrei, per rendere ancora più ampia la sua portata, soffermarmi ancora sul fenomeno della nutrizione, a partire da un'esperienza che tutti facciamo continuamente: l'esperienza della fame e della sete.

Queste esperienze strettamente connesse fra loro si manifestano come una forma radicale di bisogno, di dipendenza. Grazie all'esperienza della fame e della sete, sappiamo che il nostro essere si connota innanzitutto come un essere dipendente. Questo sembra un fatto scontato, ma mi pare importante rimetterlo al centro e contemplarlo.

Tutti abbiamo la possibilità di riconoscere la fame e la sete come la forma primordiale del nostro dipendere, talmente primordiale che ogni nuovo nato, ancora a occhi chiusi, cerca per prima cosa il seno della madre. E prima della nascita (ma di questo nessuno ha memoria) il dipendere era ancora più profondo, sconfinando nel vero e proprio «essere fatti».

Nell'esperienza di ognuno la nutrizione, l'atto del nutrirsi è il modo in cui più chiaramente si esplicita, esteriormente e interiormente, la nostra dipendenza dalla realtà materiale. È espressione ed esperienza di questa dipendenza anche la respirazione, il cui significato è infatti strettamente connesso a quello della nutrizione.

Detto questo, c'è una considerazione molto importante da fare, che ci permette di andare oltre l'esperienza della dipendenza per inserirla in un contesto più largo, che si estende fino a lambire le rive del mistero in cui tutto il mondo naturale, e noi con esso, siamo immersi.

La nutrizione consiste nel prendere porzioni di materia dall'ambiente per trasformarle in noi stessi. Ma dire questo significa già riconoscere che noi stessi siamo qualcosa di radicalmente diverso dalla materia che assumiamo.

Se io non fossi qualcosa di diverso, non direi che trasformo qualcosa in me stesso (anche il batterio in cui si trasforma il brodo di coltura testimonia l'irrompere continuo di un modo di essere nuovo e diverso). Ma, nello stesso tempo, il fatto che dobbiamo nutrirci indica una nostra dipendenza radicale da questa materia inanimata da cui siamo così diversi.

Nei viventi, libertà e dipendenza sono unite da un nesso inscindibile, misterioso. Ciò che è morto dipende? No. Si può dire allora che sia libero? Nemmeno.

Il metabolismo è ciò che la scienza riesce a vedere di questo nesso.

«La vita è essenzialmente relazionalità con qualcosa» [2], e il metabolismo è ciò che la scienza riesce a vedere di questo impianto relazionale.

Il fenomeno dell'assimilazione

Adesso pensiamo a noi stessi che facciamo nostro, mangiandolo, un panino al prosciutto. Come accade che un panino al prosciutto venga trasformato in ciò che noi siamo? Limitandosi a un certo livello immediato, si potrebbe dire che il panino al prosciutto è fatto di polisaccaridi, grassi e proteine.



Questi componenti possono essere ulteriormente scomposti (i polisaccaridi in molecole di zucchero, le proteine in amminoacidi), e questi composti organici possono entrare a far parte dell'insieme di molecole e macromolecole organiche che costituiscono le nostre cellule. Questo è vero, ma è solo una parte della storia.

Ci sono infatti almeno tre aspetti che è importante considerare per evitare di banalizzare il fenomeno della assimilazione.

Tre aspetti dell'assimilazione

Reimpiegare i mattoni (per esempio monosaccaridi o amminoacidi) per fare nuove costruzioni macromolecolari richiede energia; questa è ricavata anch'essa dalla demolizione dei nutrienti e in tutti i viventi si presenta soprattutto nella forma della molecola di ATP (adenosin-trifosfato).

Si può cioè distinguere nei sistemi metabolici un catabolismo, il cui esito sono componenti molecolari semplici ed energia chimica utilizzabile, e un anabolismo, il cui esito sono nuove molecole (piccole o grandi) sintetizzate a spese dell'energia ricavata dalle reazioni del catabolismo.

Oltre a essere fondamentale per le biosintesi organiche, l'energia che il catabolismo rilascia viene anche trasformata in lavoro meccanico (motilità, movimento), energia elettrica (attività nervosa), calore (termoregolazione), luce (bioluminescenza).

Infine, va sottolineato che l'energia ricavata dai nutrienti non è utilizzata solo per le biosintesi e per le attività elencate sopra, ma anche per il puro e semplice mantenimento in uno stato ordinato e organizzato di tutte le strutture cellulari.

Questo è un aspetto che viene generalmente trascurato, ma è impressionante vedere ciò che la biochimica cellulare mostra, per esempio, del traffico delle proteine neo-sintetizzate in ogni cellula, attraverso il quale migliaia di specie proteiche diverse raggiungono ognuna la sua specifica destinazione attraverso sistemi di generazione di ordine accoppiata al consumo di energia metabolica.

Questo fornisce l'occasione per sottolineare come, anche solo per l'operare continuo di questi sistemi negli organismi viventi, sia inesatto paragonare l'organismo a una macchina. Secondo la visione di Cartesio (1596-1650), la macchina (riconducibile alla struttura anatomica) funziona grazie al calore della combustione del cibo (metabolismo).

Questa visione è molto riduttiva, perché negli organismi la struttura stessa -ognuna delle nostre cellule-, mentre è l'esecutrice del metabolismo, simultaneamente continua a esserne anche il risultato. L'energia in gioco nel metabolismo serve alle nostre cellule innanzitutto per l'ininterrotta costruzione di se stesse, e quindi anche di noi come organismi. Senza rendercene conto, noi veniamo continuamente costruiti attraverso il metabolismo¹.

Un quarto aspetto

Nel pensare a tutto ciò che rende possibile il fenomeno dell'assimilazione, c'è poi un quarto aspetto importantissimo da tenere in considerazione, anche se noi lo lasceremo a margine.

Che cos'è che dà a una cellula la sua forma, a un organismo la sua forma, a un uomo la forma di uomo e alla medusa la forma di medusa?

Una parte importante della risposta è che c'è qualcosa che sta scritto in ognuna delle nostre cellule fin dal momento in cui eravamo una sola cellula: è un insieme unico e imponente di istruzioni, il nostro DNA; ma questo non basta: è anche un impianto molecolare e strutturale unico che possiede la capacità di leggere correttamente e produttivamente queste istruzioni, e di metterle in atto.

E, come evidenziato sopra, è solo se c'è già un organismo in atto che i nutrienti si possono trasformare in esso.

Nell'alludere al grande tema dell'informazione genetica, e del suo ruolo nel conferire e mantenere la forma degli organismi, ho usato i verbi «scrivere» e «leggere», i quali non impropriamente ci introducono in una dimensione di segni, codici e significati prescindendo dalla quale nessun sistema vivente sarebbe comprensibile [3].

Non solo quindi per un primordiale principio di «libertà» inerente al metabolismo, ma anche per l'assetto fondamentale semiotico degli organismi viventi, vale l'affermazione di Hans Jonas (1903-1993) dell'esistenza in essi di qualcosa di radicalmente «estraneo a soli, pianeti, atomi» [4].

Il metabolismo dal punto di vista chimico

Dal punto di vista chimico, il metabolismo si basa su un numero altissimo di reazioni, dell'ordine delle migliaia o decine di migliaia. Ma un punto fondamentale è questo: devono essere e sono reazioni intrinsecamente molto lente nell'ambiente di reazione delle cellule.

Perché? Perché questo rende possibile il loro essere controllate una per una attraverso catalizzatori altamente specifici. Questi catalizzatori, detti enzimi, sono macromolecole di natura proteica.

Grazie all'esistenza in ogni cellula di migliaia di enzimi diversi, ognuno dedicato in modo altamente selettivo a una particolare reazione chimica, ogni reazione del metabolismo non è lasciata a se stessa, ma a un controllore rigorosissimo, che la fa avvenire in concerto con tutte le altre reazioni tenendo conto di quanto accade dentro e fuori la cellula.

Ogni enzima infatti è a sua volta controllato nella sua velocità di sintesi (mediante il controllo dell'espressione del gene che per esso codifica) e di degradazione, nonché nella sua efficienza di catalizzatore, in questo caso attraverso modificazioni chimiche (per esempio fosforilazioni) operate su di esso da altri enzimi, oppure attraverso l'interazione con piccole molecole o addirittura ioni (regolazione allosterica).

E tutti questi sistemi di regolazione risentono in modo finissimo delle condizioni interne (per esempio abbondanza o carenza di certe molecole del metabolismo) ed esterne (per esempio ormoni o altre molecole di segnalazione) alla cellula, in modo che dalle variazioni nella concentrazione/attività degli enzimi prenda corpo una risposta cellulare a mutamenti anche piccoli delle condizioni di vita e di crescita.

Esiste quindi in ogni cellula un intricato *network* di migliaia di reazioni metaboliche interconnesse nel quale sarebbe necessario addentrarsi per apprezzare pienamente in che modo è organizzato il metabolismo, cioè la piattaforma di assimilazione alla vita di ciò che vivo non è.

Da dove viene, ultimamente, il pane?

Ma la nostra esplorazione, necessariamente limitata, non si porterà in questa direzione. Ci interrogheremo invece riguardo alla provenienza ultima della materia e dell'energia che formano il terreno di applicazione e la possibilità stessa di esistenza del metabolismo.

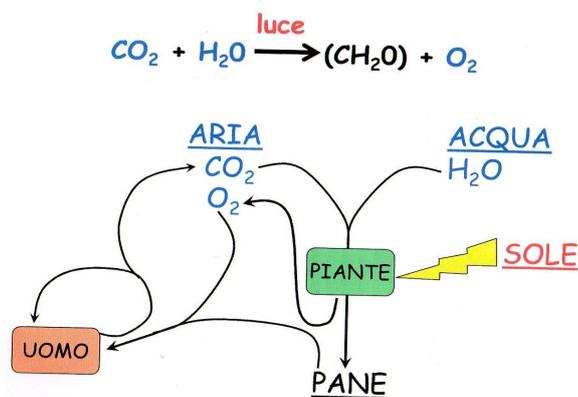
Questa energia, grazie alla quale la materia presente sulla Terra può andare incontro alla prodigiosa trasformazione in viventi, in noi stessi, da dove viene innanzitutto? Per porre la domanda in modo volutamente semplificato e reso essenziale: da dove viene, ultimamente, il pane?

Credo che a tutti noi sia stato detto almeno una volta che l'*input* energetico originario, che rende possibile la vita, viene dalla stella chiamata Sole, e che c'è un processo primario, soprattutto legato al Regno vegetale e denominato fotosintesi clorofilliana, che permette la sintesi dei carboidrati (i costituenti fondamentali del pane) a partire da molecole semplici del cosiddetto mondo inorganico.

Anziché riassumere qui nozioni ben note relative a questo processo, vorrei soffermarmi a contemplarne l'essenza stupefacente, chiamando in causa solo elementi naturali fondamentali come l'acqua, l'aria, il Sole e la sua luce, le piante e l'uomo.

Nelle piante, grazie all'energia portata dalla luce solare, una componente dell'aria (l'anidride carbonica, CO₂) viene sposata all'acqua (H₂O) per generare zuccheri («pane») e ossigeno (O₂, l'aria nella sua componente per noi più direttamente vitale).

L'uomo vive grazie a pane e ossigeno, che attraverso di lui, in un flusso metabolico che è lo stesso che lo mantiene vivo, ridiventano CO₂ e acqua. Dire che il pane è fatto di aria, acqua e Sole, e che il nostro vivere di pane libera di nuovo da esso aria e acqua, che grazie al Sole ridiventano pane e quindi vita, non è quindi un esprimersi attraverso immagini simboliche, ma è dire in modo semplice la formula vertiginosa del nostro dipendere, formula del cui dispiegamento ciclico il mondo vegetale, nello stesso tempo a noi così familiare e così straniero, rappresenta il perno profondo e silenzioso.

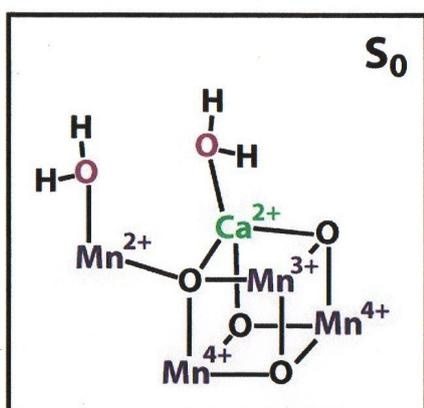


Nella fotosintesi clorofilliana, la luce del Sole viene raccolta da pigmenti (clorofille e altri) e, grazie a trasferimento di energia per risonanza, l'energia solare viene fatta convergere su una coppia di clorofille speciali, dove viene così indotta una separazione di carica: un elettrone viene perso.

Molti elettroni vengono sottratti in questo modo, trasferiti ad altre molecole e infine utilizzati per la trasformazione di CO₂ a carboidrato. L'ammanto di elettroni, lì dove essi sono stati sottratti, verrà colmato da quelli strappati all'acqua, dalla quale si svilupperà così ossigeno – a noi necessario quanto il pane.

La sede di questo processo di foto-ossidazione dell'acqua è il cosiddetto *oxygen evolving complex* (OEC), costituito da proteine che si trovano immerse nel sistema membranario (membrana tilacoidale) posto all'interno dei cloroplasti, organelli esclusivi delle cellule vegetali.

Fondamentale per il meccanismo attraverso cui il complesso estrae elettroni dall'acqua è, al cuore del suo sito attivo dell'OEC, un nucleo inorganico contenente quattro ioni manganese.



Centro del manganese del
fotosistema II
(oxygen-evolving complex)



manganese

25	54.938
2062	1.6
1244	
Mn	
[Ar]3d ⁵ 4s ²	
7.43	2,3,4,6,7

È vertiginoso pensare come una delle più grandiose innovazioni mai verificatesi sul nostro pianeta, e cioè la comparsa dei cicli biogeochimici di ossigeno e carbonio, a cui è strettamente legata la possibilità di vita nostra e di tutti gli altri viventi che ci sono più familiari, si fondi su atomi di manganese intrappolati nella notte dei tempi nel cuore di macromolecole organiche di microorganismi simili agli attuali cianobatteri i quali, come risultato di un processo di endosimbiosi ancora avvolto nel mistero, poterono divenire i cloroplasti delle attuali cellule vegetali...

Considerazioni analoghe vengono suscitate dalla contemplazione della fissazione dell'azoto atmosferico. Per fissazione dell'azoto si intende la sua trasformazione in ammoniaca, forma nella quale gli atomi di azoto possono entrare a far parte delle principali biomolecole (prime fra tutte gli amminoacidi e i nucleotidi, e quindi, a partire da essi, le proteine e gli acidi nucleici).

Questa trasformazione chimica, resa ardua dalla relativa inerzia dell'azoto molecolare (N₂), dipende dall'attività di complessi metallo-enzimi chiamati nitrogenasi, posseduti da diversi microorganismi, ma non dalle piante né dagli animali. Le nitrogenasi catalizzano una reazione (N₂ + 8H⁺ + 8e⁻ → 2NH₃ + H₂) in cui ancora una volta è fondamentale un nucleo inorganico chiamato cofattore ferro-molibdeno, per la presenza di un atomo di molibdeno (ma in certi casi anche vanadio!) essenziale per l'attività dell'enzima.

Le piante godono direttamente di questa prodigiosa fissazione dell'azoto da parte dei microorganismi, o perché questi vivono come simbiotici nelle radici stesse delle piante, o perché comunque l'azoto rilasciato nel terreno come ammonio può, dopo altre trasformazioni, essere assorbito dalle piante. Da esse l'azoto fissato può poi arrivare fino agli animali e quindi all'uomo.

L'esistenza di tutte le nostre proteine e acidi nucleici, e quindi anche di tutti i processi

straordinari di cui queste macromolecole sono protagoniste in ognuna delle nostre 10^{14} cellule, dipende dal fatto che atomi di molibdeno (un elemento a cui certamente non tendiamo ad associare l'idea di vita) giacciono, come intrappolati e asserviti, nel cuore attivo delle nitrogenasi, a loro volta disperse in innumerevoli cellule batteriche i cui nomi ci dicono poco (*Rhizobium*, *Azotobacter*, *Anabaena*...) ma la cui esistenza oscura è fondamentale per la nostra.

Osservazione conclusiva

Spero che questo breve racconto, così frammentario e incompleto da lasciare – nonostante il titolo - quasi totalmente non visitato il territorio immenso del metabolismo, possa comunque portare qualcun altro, oltre a me, a cogliere più pienamente il significato di un versetto del libro della Sapienza (11,24) che Papa Francesco, nella sua Enciclica *Laudato si'*, riporta parlando del mistero dell'Universo: «Tu infatti ami tutte le cose che esistono e non provi disgusto per nessuna delle cose che hai creato; se avessi odiato qualcosa, non l'avresti neppure formata». ²

Giorgio Dieci
(Dipartimento di Bioscienze, Università degli Studi di Parma)

Indicazioni bibliografiche

- [1] In Frances A. Yates, *L'arte della memoria*, Torino (Einaudi) 1993, pp. XVIII-XIX.
- [2] Hans Jonas, *Organismo e libertà*, Torino (Einaudi) 1999, p.11.
- [3] Marcello Barbieri (2008). *Biosemiotics: a new understanding of life*, Naturwissenschaften vol. 95, pp.577-599.
- [4] Hans Jonas, op. cit., p. 9.

Note

- ¹ Scrive Hans Jonas a questo riguardo: «...il cibo è qualcosa di più del combustibile: oltre al rifornimento di energia cinetica per il funzionamento della macchina (cosa che comunque non vale per le piante) il suo ruolo fondamentale è quello di costruire continuamente la macchina stessa [...] e questo proprio divenire è esso stesso una prestazione della macchina: per una tale prestazione non esiste tuttavia niente di analogo nel mondo delle macchine» [*Organismo e libertà*, op. cit., p. 108].
- ² L'articolo fa riferimento alla *lectio magistralis* tenuta dall'autore durante il Convegno *ScienzaFirenze 2016* dal titolo: [Le trasformazione nello studio dei fenomeni naturali](#).

