

«To understand life, throw away the matter  
and keep the underlying organization»  
La rilevanza filosofica del motto di Rashevsky

1. *Introduzione*

In riferimento a Rashevsky, è pressoché inevitabile ritrovarsi a sollevare la stessa domanda che si poneva Don Abbondio: «Carneade, chi era costui?» – «Rashevsky, chi era costui?». Nicolas Rashevsky (1899-1972) fu il fondatore di quella che lui chiamava «biofisica matematica» e che oggi chiamiamo «biologia matematica»<sup>1</sup>. Rashevsky fondò nel 1939 la prima rivista esplicitamente dedicata alla biologia matematica, «The Bulletin of Mathematical Biophysics» (attualmente «Bulletin of Mathematical Biology»), nonché nel 1947 a Chicago il primo programma al mondo di dottorato in biologia matematica. Gli interessi di Rashevsky non si limitarono alla sola biologia. In effetti, Rashevsky cercò di applicare strumenti matematici anche ad aspetti di psicologia e di sociologia<sup>2</sup>.

Rosen ricorda anche che la profondità del lavoro di Rashevsky era difficile da catturare. Con le sue parole: «per quanto abbia avuto il beneficio di un costante contatto con Rashevsky e il suo modo di pensare, mi ci sono voluti anni per catturare pienamente le implicazioni di molte delle cose che ha fatto»<sup>3</sup>. Fra gli studiosi di primo piano che esplicitamente ricordano Rashevsky come una figura che ha influenzato la loro formazione si possono ricordare, oltre al già ricordato Robert Rosen, anche Marvin Minsky, Anatol Rapoport, Herbert A. Simon e Alvin Weinberg<sup>4</sup>.

Rashevsky studia fisica e i suoi primi lavori sono lavori da fisico. Ad esempio studia il processo per cui, quando cresce, una goccia di liquido ad un certo punto si divide in due gocce (un processo governato dalla tensione superficiale del liquido). Si chiede quindi se la stessa dinamica possa spiegare (almeno in parte) anche la divisione cellulare.

Il lavoro di Rashevsky si può dividere in due fasi principali: nella prima fase Rashevsky applica usuali metodi riduzionistici a vari problemi biologici, mentre nella seconda sviluppa una strategia del tutto diversa.

A partire dal 1950, Rashevsky si rende conto che per quanto brillanti – e sinanco indispensabili – fossero i metodi che aveva applicato sino a quel punto, essi non riuscivano a rispondere ad alcune domande fondamentali. Per questa ragione, Rashevsky incomincia a sviluppare una diversa metodologia, che chiamerà «biologia relazionale» – un termine utilizzato per la prima volta nel saggio *Topology and life*. La biologia relazionale deve essere nettamente distinta dalla «biologia metrica», di natura prettamente quantitativa<sup>5</sup>. La biologia relazionale è esplicitamente antimeccanicistica; sottolinea gli aspetti *funzionali* invece di quelli *materiali* e per questa ragione è del tutto contraria alle metodologie prevalenti nella biologia contemporanea e in particolare a quelle della biologia molecolare.

## 2. Le origini della biologia relazionale

Nel terzo titolo della sua *groundbreaking* quadrilogia (che comprende *Elementi fondamentali di misura e rappresentazione dei sistemi naturali*<sup>6</sup>, *Sistemi anticipanti*<sup>7</sup>, *La vita in sé stessa*<sup>8</sup>, e *Saggi sulla vita in sé stessa*<sup>9</sup>, Robert Rosen, l'allievo di Rashevsky che più di ogni altro ne ha assunto l'eredità, nota che verso il 1950 Rashevsky incominciò a chiedersi «cos'è la vita?» e si rese conto di non poter rispondere alla domanda usando l'approccio riduzionistico che aveva utilizzato sino a quel momento<sup>10</sup>. Sino a quel punto l'analisi dei fenomeni biologici era stata prettamente quantitativa, puntando ad analizzare i fenomeni biologici *separatamente* l'uno dall'altro. Per quanto produttiva la strategia del *dividi et impera* si fosse rivelata, essa non riusciva, con gli strumenti che poteva utilizzare, ad affrontare le attività dell'organismo come unità integralmente unificata.

Le perplessità di Rashevsky avevano a che fare con la seguente situazione: nel corso delle attività di analisi e modellazione di particolari fenomeni biologici, ciò che alla fine sparisce sempre è l'organismo in quanto tale. Rashevsky incominciò quindi a chiedersi *perché* alla fine dei conti non si ha mai a che fare con l'organismo: dove è sparito l'organismo? E, è possibile recuperarlo? È possibile sviluppare una metodologia di ricerca e analisi che non debba sistematicamente prescindere dall'organismo in quanto tale? Nel

porsi queste domande, Rashevsky incomincia a lottare con il suo stesso riduzionismo<sup>11</sup>.

Nel primo lavoro sui fondamenti della nuova prospettiva, il già citato *Topology and Life* del 1954, Rashevsky presenta la visione che lui stesso aveva sino a non molto prima condiviso. La riassumo con le parole di Rosen: finora abbiamo immaginato di poter scomporre un organismo in una serie di sottosistemi *fisici*, di poter capire il loro funzionamento individuale con l'ausilio dei soliti metodi fisici e matematici, con l'idea che, una volta completato un tale lavoro di analisi, l'organizzazione biologica originale a cui questi sistemi materiali appartengono riemergerà *per se stessa*, come una delle *conseguenze* della natura di questi diversi sistemi. Ovviamente, questo è il classico credo riduzionista<sup>12</sup>. L'unico problema è che non è semplicemente vero che l'intero originale riesce ad emergere *per se stesso* dai sottosistemi individuali in cui era stato frantumato. In altri termini, la scomposizione in sistemi individuali reciprocamente isolati perde irreversibilmente *informazione*.

La nuova strategia di Rashevsky si articola a partire dall'osservazione secondo cui ciò che veramente interessa sono le caratteristiche organizzative comuni a tutti i sistemi viventi; la loro struttura materiale interessa solo nei limiti in cui essa supporta o manifesta queste caratteristiche generali. Ne segue che sinora abbiamo studiato la realtà biologica nel modo sbagliato. Finora abbiamo astratto, o gettato via, tutte le caratteristiche organizzative globali a cui siamo veramente interessati, rimanendo con un sistema puramente materiale che abbiamo studiato con metodi puramente materiali, sperando di ricattare l'organizzazione globale a partire da questi studi materiali. Ma questo non è successo. Perché non provare allora a rovesciare l'impostazione, *partendo* direttamente dalla organizzazione? Perché non astraiano *la fisica e la chimica*, lasciando solo la pura organizzazione, che possiamo formalizzare e studiare in termini completamente generali, ricatturando successivamente la fisica, attraverso un processo di *realizzazione* (o concretizzazione)?<sup>13</sup>

In quegli stessi anni stava però iniziando l'età d'oro della biologia molecolare e la quasi totalità dei biologi non prestò la minima attenzione alla proposta di Rashevsky. La biologia relazionale di Rashevsky fu quindi velocemente dimenticata. Fra i pochissimi che cercarono di sviluppare le idee di Rashevsky va ricordato in particolare Robert Rosen, che riuscì a semplificare e generalizzare la prospettiva relazionale di Rashevsky. Dei pochi altri che continuarono nella stessa direzione, va notato che per sopravvivere

sono stati costretti per molti anni a fare altro. Due soli esempi: Ion Baianu che sino a non molti anni fa ha fatto il biochimico «canonico» e solo recentemente è tornato a innovativi studi teoretici;<sup>14</sup> Aloisius Louie, allievo di Rosen, che non è mai riuscito ad entrare all'università e solo dopo il suo pensionamento è ritornato ai temi del dottorato sviluppato sotto la guida di Rosen.<sup>15</sup>

### 3. *Principi biologici*

Le tecniche di biofisica matematica hanno ottenuto importanti risultati in molti diversi campi. A giudizio dello stesso Rashevsky<sup>16</sup>, forse i più importanti risultati sono quelli ottenuti nella teoria del sistema nervoso centrale, il test quantitativo sulle preferenze estetiche per alcune forme geometriche<sup>17</sup>, i lavori sulle trasposizioni gestaltiche<sup>18</sup>. Nonostante questi successi, «non c'è traccia di una teoria matematica di successo capace di trattare le attività integrate dell'organismo come un intero»<sup>19</sup>.

Nonostante tutti i patenti successi dell'usuale lavoro di ricerca, i lavori che ne risultano si risolvono tutti nel costruire modelli fisici o fisico-matematici di diversi fenomeni biologici. La costruzione di modelli, da sola, non può però bastare. Una scienza (Rashevsky dice: «una biologia matematica», ma la sua tesi si può – e forse si deve – generalizzare) richiede di puntare a qualcosa di più. Deve formulare alcuni principi («matematici», afferma Rashevsky) generali, simili a quelli che valgono in fisica. Un modello va bene per un caso particolare. Un principio generale vale per tutti i casi. Un principio non spiega un caso individuale, ma fornisce la base per la costruzione di una spiegazione<sup>20</sup>.

Lo sviluppo di una vasta molteplicità di modelli ha lentamente fatto emergere la mancanza di qualcosa di importante. Se è necessario conoscere perché le cellule si dividono o come il sangue circola, questa conoscenza non è però completa. Ad esempio, non ci dice la relazione che questi fenomeni hanno con l'intero organismo. Non c'è nulla nelle teorie che sono state sinora sviluppate che dia anche una minima indicazione sulle possibili connessioni fra l'eventuale risposta errata di una rete neurale che conduce a fare un movimento muscolare sbagliato che ci porta a tagliarci accidentalmente un dito e la successiva perdita di sangue dalla ferita che innesca un processo di cura in cui la divisione cellulare svolge un ruolo importante. Questa sequenza di eventi non è intrinsecamente quantitativa. La sua descrizione in-

volve una serie di relazioni *qualitative* fra diversi insiemi di fenomeni. Per Rashevsky, queste attività *integrate* dell'organismo sono probabilmente le più essenziali manifestazioni della vita<sup>21</sup>.

L'aspetto qualitativo diventa ancora più evidente quando si considerano le similitudini che esistono fra diversi organismi, similitudini che esistono nonostante le loro differenze quantitative e anche nonostante la diversità dei meccanismi fisico-chimici che possono essere coinvolti. Sia un paramecio sia un uomo cercano cibo, lo digeriscono, espellono le componenti residuali e assimilano il resto. Nei due casi, i fenomeni non sono solo quantitativamente differenti, ma si basano anche su meccanismi fisico-chimici differenti. Ciò non di meno, la similitudine relazionale fra i due casi è del tutto palese<sup>22</sup>.

Stiamo cercando principi che connettano i diversi fenomeni fisici che si manifestano in un organismo e che riescano ad esprimere l'unità biologica dell'organismo e del mondo organico come un intero<sup>23</sup>. La mancanza di principi generali di questa natura fa sì che la biologia matematica sia ancora nella sua fase pre-Newtoniana<sup>24</sup>.

I primi tentativi in una tale direzione, come l'applicazione della topologia alla psicologia da parte di Kurt Lewin<sup>25</sup> o le ancora precedenti osservazioni di D'Arcy W. Thompson<sup>26</sup> si limitano a notare relazioni troppo superficiali per essere utilizzabili e non usano nessuna vera matematica<sup>27</sup>. Diverso il caso di Woodger, che ha portato a risultati formalmente molto più sofisticati<sup>28</sup>. A questo proposito, Rashevsky ricorda che qualche anno prima, in una conversazione, Tarski gli disse che «la differenza fra l'approccio di Woodger e il suo è che a Woodger interessano gli aspetti logici, mentre a lei interessano gli aspetti biologici dei problemi»<sup>29</sup>. Per quanto le prospettive di Woodger e di Rashevsky fossero essenzialmente differenti, merita comunque notare che entrambe sono prettamente relazionali<sup>30</sup>.

La ricerca di principi generali è stata una delle preoccupazioni costanti di Rashevsky, anche prima della sua svolta antiriduzionista. In questa sede mi limito a notare i due casi che seguono.

Per vedere all'opera la rilevanza dei principi, proviamo ad elaborare ulteriormente l'esempio precedentemente descritto del cibo. Va da sé che una semplice funzione fisiologica in un protozoo diventa un complicato insieme di similari funzioni fisiologiche in un organismo superiore. Queste sono situazioni ben note in topologia, in cui uno spazio topologico può essere mappato su un altro spazio topologico in un modo tale che ad ogni punto del primo spazio corrispondono diversi (anche infiniti) punti nel secondo spazio. Da questa situazione possiamo derivare il seguente:

*Principio della mappatura bio-topologica*: gli spazi topologici che rappresentano i diversi organismi derivano tutti da uno o al massimo da pochi spazi primitivi per via di una stessa trasformazione, eventualmente caratterizzata da una serie di parametri, ai cui valori corrispondono i diversi organismi<sup>31</sup>.

Si noti che, nei limiti in cui la mappatura topologica è corretta, in questo principio non c'è nulla d'ipotetico. Il non ammetterlo equivarrebbe a riconoscere che non esiste alcuna regolarità fra le diverse mappature, che già sappiamo esistere. La presenza di queste mappe topologiche non determina in alcun modo la natura fisico-chimica delle operazioni fisiologiche coinvolte<sup>32</sup>. Il fatto che l'organismo O realizzi una determinata funzione fisiologica F con il meccanismo fisico-chimico M non implica che un diverso organismo O' ottenuto per trasformazione da O realizzi la corrispondente funzione fisiologica F' con il meccanismo fisico-chimico M'.

Un secondo principio è il *Principio di design ottimale*: dato un insieme di funzioni biologiche da realizzare, un organismo presenta un possibile design ottimale per l'esecuzione di tali funzioni rispetto all'economia dei materiali utilizzati e del consumo energetico<sup>33</sup>. Ad esempio, l'angolo ottimale nella divisione delle vene può essere calcolato e sembra che la rete delle vene effettivamente mostri un tale angolo ottimale di divisione. Rosen scrisse un intero volume dedicato allo studio dell'ottimalità biologica<sup>34</sup>.

Due osservazioni sono necessarie. In primo luogo, il principio di ottimalità è meno inoffensivo di quanto a prima vista possa sembrare. In effetti, esso gioca esplicitamente contro la *received view* secondo cui l'ottimizzazione biologica è governata solo dalla selezione naturale e in particolare si contrappone all'idea che l'evoluzione per selezione naturale sia puramente casuale<sup>35</sup>. In secondo luogo, l'espressione «*possibile design ottimale*» indica che l'ottimizzazione a cui si fa riferimento è *locale* invece che *globale*<sup>36</sup>. In altre parole, l'idea è che di norma una struttura già presente viene modificata per lo svolgimento di una nuova funzione seguendo criteri di ottimalità. La costruzione di strutture completamente nuove è molto più rara.

#### 4. Da Rashevsky a Rosen

Rosen riprende il programma di Rashevsky e lo sviluppa ulteriormente. In termini tecnici, passa dalla topologia alla teoria delle categorie, che aveva studiato negli anni '50 a Chicago direttamente con uno dei suoi fondatori,

Saunders Mac Lane. Lasciando da parte tutti gli aspetti tecnici<sup>37</sup>, nella sua quadrilogia Rosen sviluppa forse il più sistematico tentativo di scienza *naturale* post newtoniana<sup>38</sup>. L'idea fondamentale è che sia la fisica sia la biologia sono particolari concretizzazioni di una disciplina ancora più generale, la teoria dei sistemi complessi, dove però «complesso» non va inteso nel modo ordinario. Per Rosen la differenza fondamentale è fra sistemi semplici e sistemi complessi, dove «semplice» è sinonimo di «meccanico» o «algoritmico». I sistemi complessi, per complemento, sono sistemi che non sono completamente catturabili da un algoritmo, sono cioè sistemi che non si possono compiutamente catturare con strumenti puramente meccanici.

Quelle menzionate sono solo le proprietà più elementari dei sistemi complessi (nel senso di Rosen). Altre due proprietà significative sono la non-frazionabilità e l'impredicatività. Non frazionabilità significa che esiste almeno una proprietà dell'intero che non è assegnabile a un sottoinsieme dell'intero. Più precisamente, un sistema è non frazionabile se non può essere separato in due sottosistemi disgiunti e completi tali che esiste una proprietà del sistema intero che appartiene a uno solo di tali sottosistemi. L'impredicatività – nota anche come auto-riferimento – è una caratteristica di quelle proprietà che vengono definite facendo riferimento all'insieme a cui appartengono. A volte l'impredicatività conduce a paradossi (il più noto dei quali è il paradosso di Russell degli insiemi che non contengono se stessi come elementi), anche se di solito le impredicatività sono innocue e sono regolarmente usate in matematica. La riduzione alla sua frazione algoritmica (ricorsività) corrisponde a una violenta amputazione delle capacità della matematica. C'è molta matematica che va al di là dei limiti della ripetizione meccanica di un complesso di regole.

Ancora più importante è però un altro punto: i sistemi semplici possono essere completamente catturati da appropriati modelli. Essi cioè ammettono un modello massimale, un modello che riesce a dire tutto quello che c'è da dire sul sistema modellato. I sistemi complessi, invece, non ammettono modelli massimali. Un sistema complesso, nel senso di Rosen, non è mai interamente catturabile da alcun modello.

Da questo non segue che lo sforzo di modellare un sistema complesso sia inutile. Quello che ne segue invece è che (1) tutti i modelli sono parziali e nel tempo divergono, e (2) per catturare più aspetti di questi sistemi si deve procedere sviluppando una molteplicità di modelli (parziali). Esistono strategie per massimizzare questi sforzi, coordinando fra di loro i diversi sistemi in modi appropriati. Il recente lavoro di A. Louie e R. Poli<sup>39</sup>, ad esem-

pio, usa la dicotomia struttura-funzione modellata da appropriate categorie e dai corrispettivi funtori. In ogni caso, massimizzare non significa ottenere la completezza.

Durante gli ultimi cinquanta anni, diversi studiosi hanno lavorato su idee simili. A questo proposito si possono ricordare Bateson, Capra, Hofstadter, Luhmann, Maturana e Varela. Per quanto i problemi di riferimento e le terminologie adottate siano differenti, i problemi sottostanti risultano essere molto simili. Rispetto a tutti loro, Rosen è andato più avanti e più a fondo, riuscendo anche a dare alle sue idee la chiarezza di una struttura matematica. Per una delle tante beffe del destino accademico, le sue idee sono di gran lunga meno note e discusse delle più frammentarie e confuse idee degli altri studiosi citati.

## 5. *Ulteriori sviluppi*

Epigraficamente, quali ulteriori sviluppi della biologia relazionale si possono intravedere? Nei limiti in cui mi è consentito fare riferimento al mio lavoro, la principale idea si può riassumere nei seguenti termini: I sistemi biologici e *tutti* i sistemi che si appoggiano su di essi – i sistemi cognitivi e i sistemi sociali – sono complessi, nel senso di Rosen.

Un'esemplificazione può aiutare. Uno dei problemi fondamentali della sociologia come teoria è il problema della riproduzione dei sistemi sociali. «Riproduzione» in questo caso non ha il solito significato biologico di generazione di un nuovo individuo. Nell'ambito della teoria dei sistemi sociali, la riproduzione va intesa come la capacità del sistema di mantenere la sua identità a fronte del continuo cambiamento dei suoi elementi componenti. I sistemi sociali sono sistemi in grado di sopravvivere ai loro membri – nuovi individui nascono, altri muoiono, altri ancora passano da un sistema sociale ad un altro. Nonostante questi cambiamenti, i sistemi sociali mostrano una notevole stabilità. La risposta più ovvia al problema della riproduzione dei sistemi sociali è stata fornita da Pareto: la riproduzione di un sistema sociale (la sua continuità temporale) è data dalla riproduzione degli individui che compongono il sistema. Per quanto ovvia questa risposta appaia, essa solleva tuttavia un problema. Parsons in particolare si rese conto che la riproduzione dei singoli individui non può assumere il ruolo di una risposta autenticamente sociologica. Per quanto la riproduzione degli individui possa essere tanto socialmente condizionata quanto si vuole, essa rimane una que-

stione essenzialmente biologica. Per fondare la sociologia come scienza ed evitare di ridurre i problemi sociologici a problemi biologici, è necessario trovare una forma autenticamente sociale di riproduzione. La risposta di Parsons è che la riproduzione di un sistema sociale è data dalla riproduzione dei ruoli (sociali), vale a dire dalla riproduzione degli schemi di azione che sono tipici di quel sistema. La riproduzione di un sistema sociale è dunque il risultato di ordine superiore rispetto alla riproduzione dei ruoli o schemi di azione che vi si realizzano. Questa risposta fornisce una base molto più solida alla teoria sociale. Ma non è la fine della storia. Successivamente, Luhmann si rese conto che gli stessi ruoli o schemi di azione hanno bisogno di una loro riproduzione, perché i ruoli implementano punti di vista, interessi, valori, e – più in generale – significati. A sua volta, la riproduzione dei ruoli implica la riproduzione dei loro significati. In breve, la riproduzione di un sistema sociale è fondata nella riproduzione dei significati dei ruoli attivi nel sistema sociale.

I seguenti punti sinottici possono ulteriormente chiarire i passaggi che abbiamo svolto:

- La serie Pareto-Parsons-Luhmann mostra chiaramente una transizione verso livelli crescenti di astrazione. Al fine di trovare risposte migliori, i sociologi hanno dovuto scavare in acque sempre più profonde.
- Il processo di riproduzione non implica mancanza di variazione. Al contrario, la riproduzione è proprio il processo che consente la generazione di variazioni vincolate.
- Parsons e Luhmann hanno staccato la riproduzione dei sistemi sociali, dalle loro basi materiali. Sia i ruoli che i significati, infatti, sono ben lungi dall'essere entità materiali.

L'ultimo commento richiede un ulteriore commento: ciò che questi studiosi hanno dimostrato è che la riproduzione dei sistemi sociali non è governata dalla riproduzione della loro sottostante base materiale. È inutile dire che «non essere governati» non significa «essere esistenzialmente indipendenti». In altri termini, i sistemi sociali hanno bisogno di una base materiale di supporto. Tuttavia, il risultato importante è che, una volta che tale base è in qualche modo data, la riproduzione del sistema superiore segue le sue proprie leggi relazionali. Mentre né Parsons né Luhmann sono stati in grado di affrontare questo importante problema ontologico, che può essere adeguatamente articolato solo nel quadro fornito dalla teoria dei livelli di realtà<sup>40</sup>, hanno comunque avuto il merito di sollevare il problema e di articolare alcuni aspetti della sua complessità.

I sistemi biologici, quelli psicologici e quelli sociali sono sistemi *sopra* una base materiale. In ogni caso si tratta di sistemi che non si possono capire studiando la loro base materiale. La base materiale è una condizione esistenziale che rende possibile i sistemi al di sopra di essa, ma non spiega le loro specificità categoriali. La principale differenza fra i sistemi biologici, da una parte, e mente e società, dall'altra, è che i sistemi biologici sono anch'essi sistemi materiali (per cui la struttura è del tipo 'sistema materiale sopra un altro sistema materiale') mentre menti e società sono immateriali (per cui la struttura è del tipo 'sistema immateriale sopra un sistema materiale'). In entrambi i casi, il sistema superiore dipende (esistenzialmente) dal sistema inferiore ed è categorialmente autonomo rispetto ad esso; in entrambi i casi esistono relazioni «verticali» che hanno effetti causali in entrambe le direzioni. I dettagli però sono diversi perché le categorie ontologiche di riferimento sono differenti<sup>41</sup>.

## 6. Conclusione

Sinotticamente, Rashevsky ha mostrato come costruire una scienza che rispetti essenzialmente i suoi fenomeni, senza doverli necessariamente ridurre ad altro o limitare le domande ammissibili esclusivamente a domande sulle loro parti. Rosen ha successivamente semplificato e generalizzato l'impostazione relazionale inaugurata da Rashevsky, tratteggiando gli elementi portanti di una visione generale che invita a riconsiderare le tradizionali partizioni scientifiche in domini separati. Ulteriori sviluppi basati sulla differenza fra scienze materiali e scienze di fenomeni che pur richiedendo una base di supporto materiale sono in sé stessi immateriali, pongono le basi per una rilettura sistematica delle scienze della mente e delle scienze sociali. Ritornando a Rosen, le differenze fra i principi costitutivi dei fenomeni fisici e quelli dei fenomeni biologici inocula il sospetto di dover modificare almeno una delle attitudini di fondo che ha accompagnato la scienza moderna, quella secondo la quale la biologia è una *specificazione* della fisica. Se quanto abbiamo visto è effettivamente corretto, se ne ricava l'idea complementare che vede i fenomeni della vita come la matrice categoriale del reale, rispetto alla quale la realtà inanimata non ne rappresenta che una specifica semplificazione.

Roberto Poli

<sup>1</sup> «Biofisica» ai tempi significava «fisica della materia vivente», cf. T. H. ABRAHAM, *Nicolas Rashevsky's Mathematical Biophysics*, «Journal of the History of Biology», 2004, pp. 333-385, p. 348.

<sup>2</sup> N. RASHEVSKY, *Physico-Mathematical Aspects of the Gestalt-Problem*, «Philosophy of Science», 1934, pp. 409-419; *Outline of a Mathematical Theory of Human Relations*, «Philosophy of Science», 1935, pp. 413-430. Per ulteriori informazioni su Rashevsky, si veda la voce *Nicolas Rashevsky*, «Wikipedia: [http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas\\_Rashevsky](http://en.wikipedia.org/wiki/Nicolas_Rashevsky)» (consultata il giorno 11.9. 2010; ABRAHAM, *Nicolas Rashevsky*, cit.; P. CULL, *The Mathematical Biophysics of Nicolas Rashevsky*, «BioSystems», 2007, pp. 178-184; R. ROSEN, *Nicolas Rashevsky 1899-1972*, «Progress in Theoretical Biology», 1972, pp. xi-xiv; ID, *Reminiscences of Nicolas Rashevsky*, inedito (senza data).

<sup>3</sup> R. ROSEN, *Nicolas Rashevsky*, cit., p. 81.

<sup>4</sup> T. H. ABRAHAM, *Nicolas Rashevsky*, cit., p. 335 nota.

<sup>5</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, «Bulletin of Mathematical Biophysics», 1954, pp. 317-348.

<sup>6</sup> R. ROSEN, *Fundamentals of Measurement and Representation of Natural Systems*, North Holland, New York 1978.

<sup>7</sup> R. ROSEN, *Anticipatory Systems. Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*, Pergamon Press, Oxford, 1985.

<sup>8</sup> R. ROSEN, *Life Itself. A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*, Columbia University Press, New York 1991.

<sup>9</sup> R. ROSEN, *Essays on Life Itself*, Columbia University Press, New York 2000.

<sup>10</sup> R. ROSEN, *Life Itself. A Comprehensive Inquiry into the Nature, Origin, and Fabrication of Life*, cit., p. 111.

<sup>11</sup> R. ROSEN, *Anticipatory Systems. Philosophical, Mathematical and Methodological Foundations*, cit., p. 171.

<sup>12</sup> *Ivi*, pp. 171-172.

<sup>13</sup> *Ivi*, p. 172.

<sup>14</sup> I. BAIANU (a cura), *Complex Systems Biology and Life's Logic in Memory of Robert Rosen*, numero speciale di «Axiomathes» 2006; I. BAIANU, R. GLAZEBROOK e J. F. BROWN, *A Category Theory and Higher Dimensional Algebra Approach to Complex Systems Biology, Meta-systems and Ontological Theory of Levels: Emergence of Life, Society, Human Consciousness and Artificial Intelligence*, in B. IANTOVICS (a cura), *Understanding Intelligent and Complex Systems*, Acta Universitatis Apulensis, Alba Iulia (in corso di stampa); I. BAIANU e R. POLI, *From Simple to Super- and Ultra-Complex Systems: A Paradigm Shift Towards Non-Abelian Emergent System Dynamics*, in corso di referato.

<sup>15</sup> A.H. LOUIE, *(M,R)-Systems and their Realizations*, «Axiomathes», 2006, pp. 35-64; ID., *Functional Entailment and Immanent Causation in Relational Biology*, «Axiomathes», 2008, pp. 289-302; ID., *More Than Life Itself*, Ontos Verlag, Frankfurt 2009; A. H. LOUIE e S. W. KERCEK, *Topology and Life Redux: Robert Rosen's Relational Diagrams of Living Systems*, «Axiomathes», 2007, pp. 109-136; A.H. LOUIE e R. POLI, *The Spread of Hierarchical Cycles*, «International Journal of General Systems», 2011, pp. 237-261; R. POLI e A.H. LOUIE, *The Impredicative Nature of Mind*, in corso di referato.

<sup>16</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., pp. 318-319.

<sup>17</sup> N. RASHEVSKY, *Mathematical Biophysics*, University of Chicago Press, Chicago 1948; N. RASHEVSKY e V. BROWN, *Contributions to the Mathematical Biophysics of Visual Aesthetics*, «Bulletin of Mathematical Biophysics», 1944, pp. 163-168.

<sup>18</sup> N. RASHEVSKY, *Physico-Mathematical Aspects of the Gestalt-Problem*, cit.; ID., *Mathematical Biophysics*, cit.; J.T. CULBERTSON, *Consciousness and Behavior: A Natural Analysis of Behavior and Consciousness*, Brown, Dubuque 1950; W. PITTS e W.S. McCULLOCH, *How we Know Universals: The Perception of Auditory and Visual Forms*, «Bulletin of Mathematical Biophysics», 1947, pp. 127-147.

<sup>19</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., p. 319.

- <sup>20</sup> N. RASHEVSKY, *The Devious Roads of Science*, «Synthese», 1963, pp. 107-114, p. 110.
- <sup>21</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., pp. 319-320; vedi anche N. RASHEVSKY, *The Devious Roads of Science*, cit.
- <sup>22</sup> *Ivi*, p. 110.
- <sup>23</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., p. 321.
- <sup>24</sup> *Ivi*, p. 320.
- <sup>25</sup> K. LEWIN, *Principles of Topological Psychology*, McGraw-Hill, New York 1936; ID., *Field Theory in Social Science: Selected Theoretical Papers*, Harper & Bros, New York 1951.
- <sup>26</sup> D.W. THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge University Press, Cambridge 1917.
- <sup>27</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., p. 322.
- <sup>28</sup> J.H. WOODGER, *The Axiomatic Method in Biology*, Cambridge University Press, Cambridge 1937; ID., *Biology and Language*, Cambridge University Press, Cambridge 1952.
- <sup>29</sup> N. RASHEVSKY, *The Devious Roads of Science*, cit., p. 113.
- <sup>30</sup> *Ivi*, p. 112.
- <sup>31</sup> N. RASHEVSKY, *Topology and Life. In Search of General Mathematical Principles in Biology and Sociology*, cit., p. 325.
- <sup>32</sup> *Ivi*, p. 339.
- <sup>33</sup> N. RASHEVSKY, *Mathematical biophysics: Physico-mathematical Foundations of Biology*, 2 vols, Dover, New York 1960, vol. 2, p. 292; P. CULL, *The Mathematical Biophysics of Nicolas Rashevsky*, cit., p. 180.
- <sup>34</sup> R. ROSEN, *Optimality Principles in Biology*, Butterworth Publishers, Stoneham MA.
- <sup>35</sup> P. CULL, *The Mathematical Biophysics of Nicolas Rashevsky*, cit., p. 180.
- <sup>36</sup> *Ivi*, p. 181.
- <sup>37</sup> Ottimamente ricostruiti e ulteriormente sviluppati in A.H. LOUIE, *More Than Life Itself*, cit.
- <sup>38</sup> Vedi i riferimenti forniti alle note 6-9.
- <sup>39</sup> A.H. LOUIE e R. POLI, *The Spread of Hierarchical Cycles*, cit.
- <sup>40</sup> R. POLI, *The Basic Problems of the Theory of Levels of Reality*, «Axiomathes», 2001, pp. 261-283; ID., *Levels of Reality and the Psychological Stratum*, «Revue Internationale de Philosophie», 2006, pp. 163-180; ID., *Three Obstructions: Forms of Causation, Chronotopoids, and Levels of Reality*, «Axiomathes», 2007, pp. 1-18.
- <sup>41</sup> R. POLI, *The Complexity of Anticipation*, «Balkan Journal of Philosophy», 2009, pp. 19-29; ID., *An Introduction to the Ontology of Anticipation*, «Futures», 2010, pp. 769-776; ID., *The Complexity of Self-reference. A Critical Evaluation of Luhmann's Theory of Social Systems*, University of Trento, Trento 2010; A.H. LOUIE e R. POLI, *The Spread of Hierarchical Cycles*, cit.; R. POLI e A.H. LOUIE, *The Impredicative Nature of Mind*, cit.