

ELIANO PESSA*

RETI, SISTEMI E PROPRIETÀ EMERGENTI

1. Introduzione

A partire dalla fine degli anni '80 si è assistito ad una rapida crescita del numero di lavori che utilizzavano le reti come strumento concettuale di descrizione e previsione nei più disparati ambiti scientifici¹. Tale circostanza ha ben presto consentito di introdurre la nomenclatura di *Network Science*², che indica collettivamente un gran numero di contributi teorici e sperimentali, aventi essenzialmente in comune il fatto di servirsi dell'apparato matematico della teoria dei grafi e di alcune sue conseguenze³. D'altra parte l'interesse per la *Network Science* è pienamente giustificato dal fatto che con il suo apparato concettuale è possibile prevedere i possibili scenari dei comportamenti collettivi di sistemi che, dal punto di vista dei metodi matematici tradizionali, sono intrinsecamente complessi e intrattabili analiticamente.

Questa possibilità non esisteva negli strumenti usati dagli approcci scientifici proposti in tempi passati, come il meccanicismo o la teoria dei sistemi dinamici e di conseguenza la *Network Science* è apparsa a prima vista come una sorta di approccio di livello superiore in grado di affrontare problemi inaccessibili al tradizionale approccio riduzionista. A questo proposito va subito chiarito che, senza entrare in dettagli tecnici sui numerosi e importanti contributi forniti dalla teoria dei sistemi dinamici, i vari modelli proposti da quest'ultima (per esempio quelli basati sulla teoria della biforcazione) non sono in grado di riprodurre gli andamenti spazio-temporali delle caratteristiche fisiche dei fenomeni di emergenza più semplici, come quelli osservati nei casi di rotture di simmetria e di transizioni di fase⁴. La dimostrazione di questo fatto, avvenu-

* Università degli Studi di Pavia.

¹ Nell'ambito dell'ampia bibliografia sull'argomento ci limitiamo a citare S.H. STROGATZ, *SYNC: the emergent science of spontaneous order*, Hyperion, New York 2003; A.L. BARABASI, *Link: la nuova scienza delle reti*, tr. it. di B. Antonielli D'Oulx, Einaudi, Torino 2004; M. NEWMAN - A.L. BARABASI - J.D. WATTS, *The Structure and Dynamics of Networks*, Princeton University Press, Princeton (NJ) 2006.

² Vedi in proposito T.G. LEWIS, *Network Science: Theory and Applications*, Wiley, Hoboken (NJ) 2009.

³ Vedi per una approfondita discussione in proposito L. BIGGIERO, "Nuovi" strumenti di studio dei fenomeni sociali e naturali: riflessioni sull'impiego delle metodologie di analisi reticolare e di simulazione, in E. GAGLIASSO - R. MEMOLI - M.E. PONTECORVO (a cura di), *Scienza e scienziati: colloqui interdisciplinari*, Franco Angeli, Milano 2011, pp. 98-169.

⁴ La dimostrazione matematica di questa impossibilità è contenuta, ad esempio, nei fondamentali

ta già negli anni Ottanta, ha orientato gli studi della Sistemica verso direzioni sicuramente più interessanti, ma nel contempo irte di difficoltà tecniche. A questo proposito possiamo citare la teoria dei Sistemi Aperti e Lontani dall'Equilibrio, dei Sistemi Caotici Stocastici, dei Sistemi Multipli, dei Metasistemi e delle Metastrutture⁵, dei Sistemi Quantistici e Classici-Quantistici⁶, delle reti quantistiche a Topologia variabile⁷. Una delle possibili strategie usate per fronteggiare le cospicue difficoltà incontrate nello studiare questi sistemi è stata quella di focalizzarsi su sistemi che possano in qualche modo essere rappresentati come costituiti da insiemi di opportune unità elementari (o di base), tra loro interagenti. Tali sistemi vengono spesso chiamati *Sistemi collettivi*. Certamente questa strategia non è nuova e risale agli albori della Scienza. Tuttavia, anche se a prima vista essa appare 'anti-sistemica', la moderna disponibilità di nuovi strumenti matematici e di potenti mezzi di simulazione tramite computer del comportamento dei sistemi collettivi ha fatto sì che dei modelli abbastanza semplici di tali sistemi abbiano evidenziato in modo inaspettato e imprevedibile dei comportamenti globali assai complessi. Siccome, poi, è assai naturale descrivere un sistema collettivo come se fosse un particolare tipo di rete, i risultati citati in precedenza hanno dato origine ad una diffusa convinzione secondo cui l'approccio basato sulle reti sembra la chiave fondamentale per comprendere i sistemi complessi. Ma è questa convinzione pienamente corretta? Quali sono le possibilità effettive della *Network Science*? Quali sono i suoi limiti? Per rispondere a questi interrogativi occorre innanzitutto verificare quali sono le potenzialità insite in approcci quali il meccanicismo e la teoria dei sistemi e quali sono le ragioni che impediscono di sfruttare efficacemente queste potenzialità. Occorre poi chiedersi cosa è possibile descrivere utilizzando i sistemi collettivi finora effettivamente usati nell'ambito della *Network Science* e quali sono i limiti di queste possibilità descrittive. Alcune considerazioni che scaturiscono dalla presenza di questi limiti conducono a ritenere che occorra opportunamente generalizzare i criteri finora posti alla base della correttezza dell'indagine scientifica. A questo argomento sarà dedicato un modesto spazio nel paragrafo finale di questo lavoro.

2. Gli approcci scientifici tradizionali

Non è qui il caso di menzionare l'approccio meccanicista, così come reso popolare nella versione fornita da Laplace. Qui basta ricordare che esso si è rivelato poco adatto di fronte alle insormontabili difficoltà incontrate già a livello di previsioni nel campo della Meccanica Celeste⁸. Sono state, per altro, tali difficoltà a stimolare la nascita,

lavori di A. NITZAN - P. ORTOLEVA, *Scaling and Ginzburg criteria for critical bifurcations in nonequilibrium reacting systems*, «Physical Review A», 21 (1980), pp. 1735-1755 e di D.L. STEIN, *Dissipative structures, broken symmetry, and the theory of equilibrium phase transitions*, «Journal of Chemical Physics», 72 (1980), pp. 2869-2874.

⁵ Vedi a questo riguardo G. MINATI - I. LICATA, *Meta-Structural properties in Collective Behaviours*, «International Journal of General Systems», 41 (2012), pp. 289-311; IDD., *Meta-Structures as MultiDynamics Systems Approach. Some introductory outlines*, «Journal on Systemics, Cybernetics and Informatics (JSCI)», 13 (2015), pp. 35-38.

⁶ Vedi in proposito H.-T. ELZE, *Quantum-classical hybrid dynamics – a summary*, «Journal of Physics: Conference Series», 442 (2013), 012007.

⁷ Un esempio in proposito è dato da M.H. FREEDMAN - L. GAMPER - C. GILS - S.V. ISAKOV - S. TREBST - M. TROYER, *Topological phases: An expedition off lattice*, «Annals of Physics», 326 (2011) pp. 2108-2137.

⁸ Vedi, ad esempio, M. VALTONEN - J. ANOSOVA - K. KHOLSHEVNIKOV - A. MYLLÄRI - V. ORLOV -

grazie a personaggi come Poincaré e Lyapunov, della moderna teoria dei sistemi dinamici⁹ e dell'approccio che focalizza l'attenzione sugli aspetti *asintotici* dei comportamenti¹⁰. Anche lo sviluppo della Meccanica Statistica, iniziato contemporaneamente grazie a Boltzmann e Gibbs, rientra in questo stesso quadro concettuale.

Come è noto, l'approccio asintotico ha dato luogo ad importanti avanzamenti concettuali, tra i quali vanno menzionati l'introduzione dei processi caotici deterministici (che rendono impossibile un approccio meccanicista *à la Laplace*) e la *teoria delle biforcazioni*¹¹. In particolare quest'ultima mostra come una unica legge di evoluzione temporale consenta di descrivere cambiamenti da un dato tipo di comportamento ad un tipo differente di comportamento solo cambiando, magari di poco, i valori numerici di alcuni parametri presenti nella legge stessa. Si ha così la possibilità di descrivere cambiamenti nella struttura dei comportamenti senza il bisogno di cambiare la forma delle leggi che li governano. A parte l'utilità in campo fisico-matematico delle applicazioni di questi risultati, essi sono apparsi particolarmente interessanti per le possibili utilizzazioni nella descrizione matematica dei fenomeni biologici. A questo riguardo va ricordato che Von Bertalanffy li pose a fondamento della sua proposta di una *Teoria Generale dei Sistemi*¹². Inoltre Prigogine li usò nella costruzione della sua teoria matematica delle *Strutture dissipative*¹³. Non va poi dimenticato che l'attuale approccio sistemico si è sviluppato a partire da queste basi iniziali¹⁴.

Dove si incontrano le limitazioni dell'approccio asintotico? Principalmente nello studio dei processi di emergenza «intrinseca». Senza entrare in ulteriori dettagli in proposito, rimandando ad una opportuna bibliografia¹⁵, qui basta ricordare che tali processi riguardano la comparsa, a partire da un dato sistema di partenza, di fenomeni collettivi che avvengono ad un livello più elevato di quello adottato per la descrizione dei componenti del sistema di partenza. Tali fenomeni sono imprevedibili in linea di principio (pur non essendo incompatibili con i modelli descrittivi adoperati) e modificano con la loro comparsa il funzionamento stesso del sistema originario. Mentre i processi di emergenza intrinseca sono diffusi in ambito biologico, sociale, economico e psicologico, essi sono più difficili da evidenziare in ambito strettamente fisico, almeno se ci limitiamo ad utilizzare la fisica classica. Se invece si utilizza una descrizione basata sulle teorie quantistiche essi possono essere parzialmente descritti a prezzo

K. TANIKAWA, *The three-body problem from Pythagoras to Hawking*, Springer AG, Switzerland 2016.

⁹ Vedi in proposito D. AUBIN - A. DAHAN DALMEDICO, *Writing the history of dynamical systems and chaos: Longue durée and revolution, disciplines and culture*, «Historia Mathematica», 29 (2002), pp. 273-339.

¹⁰ L'aggettivo 'asintotico' è qui usato per sintetizzare le considerazioni, anche se nella storia della scienza non viene usato per indicare uno specifico approccio; tuttavia è usato comunemente in matematica per denotare i campi di studio introdotti da Poincaré; vedi, ad esempio, J. AWREJCWICZ - V.A. KRYSKO, *Introduction to Asymptotic Methods*, Chapman Hall - CRC, Boca Raton (FL) 2006.

¹¹ Vedi, su questo argomento, testi standard come D.H. SATTINGER, *Topics in Stability and Bifurcation Theory*, Springer, Berlin 1978; J. GUCKENHEIMER - P. HOLMES, *Nonlinear oscillations, dynamical systems and bifurcation of vector fields*, Springer, Berlin 1983; P. GLENDINNING, *Stability, Instability and Chaos: An introduction to the theory of Nonlinear Differential Equations*, Cambridge University Press, Cambridge 1994.

¹² Vedi L. VON BERTALANFFY, *The theory of open systems in Physics and Biology*, «Science», 111 (1950), pp. 23-29; Id., *General System Theory*, Braziller, New York 1968.

¹³ Vedi G. NICOLIS - I. PRIGOGINE, *Self-organization in Nonequilibrium Systems*, Wiley, New York 1977.

¹⁴ Vedi per una descrizione più dettagliata G. MINATI - E. PESSA, *Collective Beings*, Springer, Berlin 2006.

¹⁵ Vedi in proposito ibi, cap. 4 e 5; E. PESSA, *Processi di auto-organizzazione e interazioni sistemi-ambiente*, «Rivista di Filosofia Neo-Scolastica», CIV (2012), 4, pp. 623-643.

di ovvie consistenti limitazioni sulla prevedibilità delle loro caratteristiche. Questa circostanza ha comunque consentito lo sviluppo di una teoria quantistica delle transizioni di fase (come il passaggio di una sostanza dallo stato paramagnetico a quello ferromagnetico, dallo stato di conduttore a quello di superconduttore, dallo stato di liquido a quello di superfluido, ecc.). Senza introdurre aspetti tecnici, qui ci limitiamo ad osservare che, da un lato, vi sono seri ostacoli concettuali nell'applicare i metodi usati in questa teoria al mondo biologico, economico e sociale e, dall'altro, gli studi compiuti hanno evidenziato come nel contesto delle possibili transizioni di fase non vi è la presenza di una *universalità*, ovvero di caratteristiche valide per tutte le transizioni. Non vi è dunque la speranza, partendo dalla teoria fisica delle transizioni di fase, di ricavare in modo semplice previsioni sugli scenari comportamentali dei processi collettivi di un sistema senza dover utilizzare informazioni dettagliate sulle componenti che costituiscono il sistema stesso. Al contrario, sembra che le descrizioni basate sulla *Network Science* siano proprio in grado di superare questo ostacolo.

3. Le reti

In termini generici una rete è costituita da componenti elementari, spesso chiamate *nodi* (o talvolta «vertici»), e da legami (o collegamenti) tra i nodi, chiamati *links* (o «spigoli»). I *links* possono essere «direzionali» se dipendono dall'ordine in cui vengono presi in considerazione i nodi che essi permettono di connettere. Sono invece «adirezionali» in caso contrario. In alcuni casi i nodi sono considerati degli elementi statici, mentre in altri casi sono dotati di una loro dinamicità, per esempio quando ogni nodo è dotato di una sua attivazione interna che può dipendere dal segnale che gli proviene da un'attività esterna, veicolata lungo i *links* da quella prodotta da altri nodi. Anche i *links* sono in alcuni casi statici, mentre in altri sono associati a dei pesi, ovvero numeri che misurano la «forza» con cui trasmettono il segnale che li percorre. Naturalmente qui per ragioni di spazio ci limitiamo a un brevissimo cenno sulle reti, trascurando il fatto che le reti vengono descritte da un insieme assai cospicuo di differenti proprietà, che qui non abbiamo modo di descrivere in dettaglio¹⁶.

Nella maggior parte dei casi i modelli della *Network Science* sono costituiti da modelli costituiti da nodi e *links* statici. Questi modelli vengono di solito costruiti in modo casuale, aggiungendo, a partire da una piccola rete iniziale, sempre nuovi nodi e nuovi *links* in modo da rispettare un opportuno criterio. La legge usata nell'effettuare queste aggiunte viene poi messa in relazione con le caratteristiche globali della rete ottenuta al termine di questo processo. Queste caratteristiche dunque emergono da una dinamica casuale che sarebbe difficile monitorare con procedimenti analitici. Le caratteristiche stesse, poi, descrivono alcune proprietà della rete finale utili soprattutto per prevedere il suo comportamento di fronte a perturbazioni esterne. Alcuni di questi modelli sono giustamente famosi, perché dotati di caratteristiche particolarmente

¹⁶ Vedi vaste rassegne quali quelle contenute in S. BOCCALETTI - V. LATORA - Y. MORENO - M. CHAVEZ - D.-U. HWANG, *Complex networks: Structure and dynamics*, «Physics Reports», 424 (2006), pp. 175-308; L. DA F. COSTA - F.A. RODRIGUES - G. TRAVIESO - P.R. VILLAS BOAS, *Characterization of complex networks: A survey of measurements*, «Advances in Physics», 56 (2007), pp. 167-242; R. COHEN - S. HAVLIN, *Complex Networks: Structure, Robustness and Function*, Cambridge University Press, Cambridge 2010.

interessanti e praticamente implementati in un gran numero di reti reali. Tra di essi citiamo gli «Small Worlds» e le reti «Scale Free».

Vi sono tuttavia, anche modelli di reti che non sono statici. Un esempio è costituito dal cosiddetto «modello dei tratti»¹⁷. Si tratta di un modello di interazione sociale in cui i nodi rappresentano individui, ciascuno dotato di tratti (o caratteristiche peculiari). Ad ogni istante entra un nuovo individuo che si connette con quelli già presenti in funzione della somiglianza tra i suoi tratti e quelli degli altri individui. In questo, come in altri modelli dello stesso tipo, può verificarsi col tempo, in presenza di opportuni valori dei parametri del modello, la comparsa di *clusters*, formati da insiemi di nodi particolarmente vicini gli uni agli altri. Fenomeni di questo tipo, che somigliano in qualche modo alle biforcazioni osservate nella teoria dei sistemi dinamici, si osservano anche in altri modelli di reti che si evolvono dinamicamente col tempo¹⁸.

Tra i modelli di reti che si evolvono col tempo ne citiamo due, entrambi ben noti e largamente usati: il primo è costituito dalle reti di *Coupled Maps*, formate da insiemi di unità reciprocamente connesse, ciascuna delle quali fornisce in uscita una opportuna trasformazione non-lineare dell'ingresso ricevuto¹⁹, e il secondo consiste nelle *Reti Neurali Artificiali* (RNA)²⁰. Senza entrare in dettagli riguardo a quest'ultimo e notissimo argomento, che vanta non solo una enorme bibliografia ma anche una estesissima attività di ricerca evidenziata da istituti di ricerca, società scientifiche dedicate, cattedre universitarie e quant'altro, qui ci limitiamo a osservare come lo studio dei processi di emergenza nelle RNA si sia rivelato particolarmente difficile, tanto che molti dei risultati ottenuti, analogamente a quanto accade per le *Coupled Maps*, sono derivati da estese simulazioni su computer del comportamento dei modelli presi in considerazione.

In conclusione, mentre i vantaggi dell'uso di un approccio *network-based* sembrano evidenti quando si ha a che fare con modelli statici o particolarmente semplici, questi vantaggi sembrano diminuire o addirittura sparire quando si ha a che fare con reti sufficientemente complesse in grado di evolversi col tempo. In situazioni del genere, poi, anche i metodi tradizionali della teoria dei sistemi dinamici appaiono del tutto inadeguati e l'unica possibilità di avere informazioni sembra essere quella di ricorrere a simulazioni su computer. Questo non perché le RNA o le *Coupled Maps* non siano dei casi di reti. Anzi, esistono ben precise dimostrazioni di equivalenza tra questi ultimi modelli e vari tipi di reti²¹. Il vero problema è che, in generale, il fatto che

¹⁷ Vedi D. CALLAWAY - J. HOPCROFT - J. KLEINBERG - M. NEWMAN - S. STROGATZ, *Are randomly grown graphs really random?*, «Physical Review E», 64 (2001), 041902.

¹⁸ Vedi S.N. DOROGOVTSV - J.F.F. MENDES, *Evolution of Networks. From Biological Nets to the Internet and WWW*, Oxford University Press, New York 2003.

¹⁹ Vedi J. ITO - K. KANEKO, *Self-organized hierarchical structure in a plastic network of chaotic units*, «Neural Networks», 13 (2000), pp. 275-281; ID., *Spontaneous structure formation in a network of dynamic elements*, «Physical Review E», 67 (2003), 046226; S. JALAN - R.E. AMRITKAR - C.-K. HU, *Synchronized clusters in coupled map networks. I. Numerical studies*, «Physical Review E», 72 (2005), 016211.

²⁰ Tra i numerosi testi standard sull'argomento citiamo C.M. BISHOP, *Neural networks for pattern recognition*, Oxford University Press, Oxford 1995; R. ROJAS, *Neural Networks: A Systematic Introduction*, Springer, Berlin 1996.

²¹ Tra l'ampia bibliografia sull'argomento citiamo K.S. NARENDRA - K. PARTHASARATHY, *Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Networks*, «IEEE Transactions on Neural Networks», 1 (1990), pp. 1-27; T. VELOZ - P. RAZETO-BARRY, *Reaction Networks as a Language for Systemic Modeling: Fundamentals and Examples*, «Systems», 5 (2017), p. 11.

il sistema di cui ci si occupa è descrivibile come una rete non elimina affatto la complessità del sistema stesso e le difficoltà che incontriamo nello studiarlo. Naturalmente non è detto che la complessità in quanto tale costituisca un problema. In certi tipi di sistemi adattivi la presenza della complessità può costituire una sorta di 'risorsa' che consente di sopravvivere ed evolversi durante l'interazione con l'ambiente. Va tuttavia detto che attualmente non disponiamo di modelli adatti a descrivere questo tipo di sistemi. Se ne avessimo, la Sistemica avrebbe fatto un grande passo in avanti, ma per il momento tutto quello che possiamo fare è osservare i comportamenti e le evoluzioni, sapendo che, ogni qualvolta tentiamo di modellizzare sistemi del genere, la loro intrinseca complessità, pur giustificando l'esistenza dei sistemi stessi, impedisce per ora di comprenderli con i mezzi della matematica, che incontra difficoltà insormontabili, pur usando un approccio basato sulle reti.

4. *Serve un nuovo approccio alla scienza?*

Se le reti, considerate come l'ultimo e il più avanzato approccio alla scienza, presentano anche loro dei problemi, ci si può chiedere cosa convenga fare. A questo punto bisogna fare il conto di quali sono le risorse disponibili per lo scienziato che intende studiare un particolare aspetto del mondo. Come è evidente, nel momento attuale ce ne sono tre: l'effettuazione di esperimenti, la costruzione e lo studio teorico di modelli, le simulazioni su computer. Tuttavia, nessuna di queste risorse è in grado di fornire informazioni attendibili. Qui l'aggettivo «attendibili» sta ad indicare informazioni che consentano alla comunità degli essere umani, in generale, e dei ricercatori in particolare (qui per comodità ci limitiamo a questa sola parte dell'umanità) di migliorare lo stato di adattamento di fronte alle continue sfide che l'ambiente ci pone. In gran parte queste sfide sono collegate al fatto che l'ambiente ci appare disordinato, non comprensibile, non prevedibile. Questo non implica che l'uso, poniamo, della statistica o del calcolo delle probabilità significhi una rinuncia alla comprensione: se conosco, ad esempio, i limiti posti da un principio di indeterminazione mi adatto al mondo molto meglio di quando non li conosco.

Venendo ora ai problemi dell'uso delle risorse disponibili, possiamo iniziare dicendo che gli esperimenti sono difficili da eseguire e da progettare e i risultati che si ottengono possono essere errati o inutili sotto vari punti di vista. Anche i modelli, come abbiamo visto, non sempre sono in grado di fornire risultati utili, specie quando non possiamo o non sappiamo studiarli matematicamente in modo completo. Non va meglio, tuttavia, per le simulazioni su computer, nelle quali è facile ottenere risultati non attendibili per la presenza di artefatti, cattiva progettazione degli algoritmi o del software di simulazione, insufficiente memoria del computer. In definitiva, comunque vadano le cose, l'attività di ricerca scientifica si configura come una sorta di gioco *rischioso*, nel senso che rischiamo sempre di ottenere informazioni non attendibili²², dove l'attendibilità è intesa nel senso definito in precedenza. Tuttavia esistono delle situazioni migliori di altre, che si verificano quando almeno due delle risorse che abbiamo citato forniscono informazioni tra loro abbastanza coerenti. In tali casi il gio-

²² Vedi al riguardo anche P. HUMPHREYS - C. IMBERT (eds.), *Models, Simulations, and Representations*, Routledge, New York 2011.

co, pur sempre rischioso, può continuare: si è ottenuta una informazione in più (quella della coerenza osservata) che si può aggiungere a quelle già possedute e la scienza fa un piccolissimo passo in avanti.

Una volta presentate queste considerazioni sugli approcci della scienza, preferisco chiudere questo lavoro con un esempio finale di gioco ‘rischioso’, che in un certo senso sembra far rivivere il sogno di Von Bertalanffy di una teoria generale dei sistemi. Questo esempio è noto come «framework della Dual-phase evolution»²³ e si applica a sistemi che in qualche modo sono adattivi nei confronti dell’ambiente. In questo *framework* si fa uso della possibilità di avere processi di emergenza capaci di alterare lo stato di connettività dei sistemi studiati (descritti in termini di reti). Conviene in proposito distinguere tra elevata e bassa connettività. La prima, che supporta interazioni di tipo globale, favorisce la resistenza alle perturbazioni esterne e la tendenza dei sistemi a cadere in stati governati da attrattori stabili. La seconda, che privilegia le interazioni locali, tende a favorire la formazione di sotto-sistemi e l’esplorazione di nuovi tipi di dinamica. Ora, se un sistema cerca di essere veramente adattivo, deve poter saltare in continuazione dall’uno all’altro di questi due tipi di connettività. Ne consegue che la sopravvivenza o la formazione o addirittura l’emergenza di un sistema adattivo è in effetti basata non su un singolo processo di emergenza ma su una serie lunga e continua di differenti processi di emergenza, che fanno continuamente cambiare il tipo di connettività. Ovviamente l’implementazione modellistica di questo *framework* appare ancora assai difficile, anche se potrebbe spiegare molti fenomeni interessanti, specie in biologia, quali la formazione di strutture modulari e la comparsa di livelli gerarchici (provateci!).

Abstract

In tempi recenti gli approcci teorici basati sul concetto di «rete» hanno assunto un ruolo fondamentale nella maggioranza delle discipline scientifiche, specie nei contesti riguardanti i sistemi complessi. Questo fatto solleva un certo numero di questioni filosofiche, tra cui quella riguardante la possibilità che l’approccio basati sulle reti diventi un nuovo paradigma della scienza, che rimpiazza quelli finora adottati. A questo proposito il presente contributo cerca di valutare l’utilità di questo approccio, evidenziando, nel contempo, le sue limitazioni. Queste ultime sembrano indicare l’opportunità di una generalizzazione dell’approccio scientifico tradizionale. Una breve descrizione di questa generalizzazione sarà l’oggetto della parte conclusiva di questo lavoro.

Parole chiave: reti, scienza dei sistemi, approccio sistemico, emergenza, simulazioni su computer

In more recent times the theoretical approaches based on the concept of «network» assumed a capital role in most scientific domains, chiefly when dealing with complex systems. This circumstance raises a number of philosophical problems, including the one related to the possibility that the network-based approach can represent a new paradigm of scientific research, replacing the ones so far adopted. In this regard the present contribution tries to assess the usefulness of the network-based approach while, at the same time, evidencing its lacks. The latter seem to point to a wider generalization of traditional scientific approaches. A short sketch of this generalization will constitute the conclusion of this paper.

Keywords: Networks, System Science, Systemic Approach, Emergence, Computer Simulations

²³ Vedi in proposito G. PAPERIN - D.G. GREEN - S. SADEDIN, *Dual-phase evolution in complex adaptive systems*, «Interface», 8 (2011), pp. 609-629.