

Reti e complessità: dal nuovo libro di Guido Caldarelli

di Guido Caldarelli

02-11-2022

La complessità del mondo che stiamo costruendo si articola in strutture di reti in cui le connessioni sono scelte tra un gran numero «disordinato» di possibilità. La conoscenza della matematica delle reti complesse diventa quindi un prerequisito per districarsi all'interno della realtà. Con lo studio delle reti è infatti possibile provare a comprendere come si creano l'ordine o il disordine e prevedere il comportamento di sistemi caotici anche in ambiti delicati come quelli sociali ed economici. Guido Caldarelli - Professore ordinario di Fisica teorica, modelli e metodi matematici all'Università Ca' Foscari di Venezia e uno dei massimi esperti internazionali di scienza delle reti e sistemi complessi - in *Senza uguali*. Comprendere con le reti un mondo che non ha precedenti, uscito nel 2022 per Egea Editore propone uno strumento per orientarsi in un ambito di ricerca non più specialistico, ma allargato a fenomeni che caratterizzano il nostro presente. Pubblichiamo di seguito, per gentile concessione dell'editore, un estratto del testo.

Il mondo che ci circonda diventa ogni giorno più connesso e più complesso. Se da un lato la connessione sembra una proprietà facile da intuire, la complessità sembra invece un concetto più sfuggente, legato in qualche modo alla difficoltà di spiegare situazioni e risolvere problemi apparentemente semplici[1]. Proviamo allora a darne una definizione operativa.

Forse la complessità è data dal numero di variabili in gioco? Sappiamo da tempo che un sistema con un gran numero di componenti può generare comportamenti inattesi. Già nel 1972[2], in un celebre articolo intitolato *More is different*, si sosteneva appunto che l'aggiungere componenti («more») a volte non solo aumenta le dimensioni del sistema, ma lo rende qualcosa di totalmente diverso («different»). Facciamo un esempio. Una porzione ragionevole (macroscopica come noi) di qualunque materiale è composta da un numero sterminato di atomi o molecole (circa 10^{24} , cioè 1 seguito da 24 zeri, o di più); se vogliamo stabilire una proprietà generale del materiale stesso, per esempio se è un conduttore o un isolante, non riusciamo a farlo a partire dall'esame di un atomo, di un singolo componente. È lo stesso principio per cui, posti di fronte a un mattone o una sbarra di acciaio, non sappiamo dire se diventeranno parte di una cattedrale o di un palazzetto dello sport: solo quando saranno tutti insieme capiremo l'esito della costruzione. A essere precisi, il paragone non è molto calzante, visto che ogni edificio ha un progetto, mentre i sistemi complessi non sono frutto del lavoro di un architetto, ma il risultato di qualche forma di evoluzione aleatoria o autorganizzata, analoga a quella delle specie in natura: per questo motivo sono detti sistemi autorganizzati.

Questa prima idea di complessità, però, non è sufficiente a descrivere tutte le proprietà di tali sistemi. Il fisico Giorgio Parisi, premio Nobel per la fisica nel 2021, ha notato che una delle caratteristiche più importanti dei sistemi complessi è la capacità di trovarsi in molti stati diversi ma in pratica equivalenti a uno stato fondamentale[3], così che in alcuni casi si possa passare da uno stato di equilibrio all'altro con una certa facilità. Questa proprietà generale, e inaspettata, nasce dall'interazione fra le molte parti, ed è tanto caratteristica da poter essere posta come definizione: in un sistema complesso compare la «metastabilità», ovvero si passa con rapidità da uno stato di equilibrio a un altro.

Inoltre, i sistemi complessi sembrano diventare sempre meno prevedibili al crescere del numero di

componenti. Per contrastare questa imprevedibilità, il metodo scientifico compie un primo passo importante: trovare un modello del fenomeno, una sua caratterizzazione quantitativa che ci permetta di costruirne una copia semplificata, in cui le quantità definite evolvono secondo leggi matematiche precise. Nel caso di un sistema complesso, il modello più semplice e naturale potrebbe essere quello in cui le componenti sono schematizzate come palline e le loro relazioni sono linee che le uniscono, a formare una rete. Questo modello corrisponde a una struttura matematica nota come grafo (che chiameremo rete nei casi reali) e rappresenta per quasi tutti i casi concreti che vedremo in questo libro il modello matematico. Se per Galileo l'universo era «scritto in lingua matematica», la lingua in cui la Natura ci parla della sua complessità è spesso quella delle reti e dei grafi. Un sistema complesso, dunque, ha queste proprietà:

- è composto da molte parti che interagiscono tra loro;
- l'interazione delle parti ha una struttura non pianificata, ma in qualche modo autorganizzata;
- molti stati del sistema devono essere equivalenti allo stato fondamentale;
- si può spesso rappresentare grazie alla struttura matematica del grafo, che visualizza le connessioni fra le parti;
- in caso di tanti stati possibili, le loro reti hanno proprietà equivalenti.

La complessità è più frequente di quanto pensiamo

A ben vedere, sono proprietà piuttosto comuni, quelle che ci fanno capire quanto la complessità sia un fenomeno naturale. La natura stessa, infatti, comprende tutto ciò che ci circonda, le specie animali e vegetali, gli ecosistemi e tutte le interazioni possibili fra loro. L'evoluzione non è pianificata: tutte le specie coevolvono a partire da mutazioni casuali o aleatorie modificando l'ambiente, che a sua volta seleziona le specie più adatte a sopravvivere nelle mutate condizioni. L'esperienza ci dice che nei processi evolutivi difficilmente si arriva a un solo stato possibile, ma si produce uno spettro di situazioni. La complessità è isolabile anche a livello della singola specie (anche la più semplice delle specie passa in una pluralità di stati differenti) nonché del singolo individuo, così come alla scala dell'intero pianeta.

Il mondo sembra disordinato, fatto di cose molto diverse, e non sembra esserci un motivo per cui si instauri una relazione invece di un'altra. Ma, come un cuoco non comprenderà mai le materie prime dove capita, e andrà invece alla ricerca di specifici fornitori, così in un sistema complesso ogni parte sceglie con cura con chi interagire. Vedremo che in quasi tutti i casi ci sono leggi molto specifiche che regolano le interazioni. Nel modello matematico potremo anche dire che l'esistenza di una relazione fra i vertici nasce dalle proprietà dei vertici stessi[4].

La complessità del mondo si articola quindi in strutture di reti in cui le connessioni sono scelte tra un gran numero «disordinato» di possibilità, tutte più o meno equiprobabili. Il fatto sorprendente è che queste strutture, indipendentemente dalla loro configurazione specifica, hanno molte proprietà in comune, come vedremo capitolo per capitolo.

Qui però dobbiamo precisare un fatto molto importante, e cioè che il «disordine» dei sistemi complessi è di un tipo particolare. Illustriamolo con un esempio. Nella nostra cerchia di conoscenze ci saranno persone di varie altezze, qualcuna più alta e qualcuna più bassa di noi, in modo casuale. Ma questa casualità ha dei limiti: è ovvio che nessuna sarà alta 10 millimetri o 2 chilometri. Le variazioni delle altezze (e di molti altri fenomeni naturali) sono di tipo «gaussiano» (dal grande matematico tedesco Carl Friedrich Gauss). Nelle quantità che variano con leggi gaussiane c'è un valore medio che è anche il più probabile, e la probabilità di scostarsi molto da questo valore va

rapidamente a zero quanto più ce ne allontaniamo: è per questo che, se la media delle altezze è, poniamo, 170 centimetri, non conosciamo nessuno alto 10 millimetri o 2 chilometri.

Ma esistono molte altre situazioni in cui la legge gaussiana non si applica. Pensiamo alla ricchezza. Sappiamo bene che esistono persone 10, 100, 1.000 volte più ricche di noi, ovvero di uno, due, tre «ordini di grandezza» (un ordine di grandezza è la potenza di 10 che misuro), e anche di più; e purtroppo che la stessa cosa si applica nell'altra direzione (ci sono persone più povere di noi di qualche ordine di grandezza). In situazioni come queste, il valore medio in sé può perdere parte della sua importanza (quando le variazioni sono grandi come il sistema).

Per affrontare queste situazioni dobbiamo affidarci alla loro rappresentazione per mezzo di reti che, quasi sempre, presenteranno un disordine di tipo diverso da quello descritto dal modello gaussiano. Grazie alle reti possiamo studiare tecniche per prevedere il comportamento futuro dei sistemi disordinati anche in ambiti inusuali come, in particolare, i sistemi sociali ed economici. Si pensi, per esempio, al sistema del commercio[5], dove le connessioni fra i vari attori si aggiornano in continuazione in maniera autorganizzata[6]. Questo è un mondo dove la «casualità» misurata sulle reti presenta variazioni dal valor medio molto rilevanti.

Studiare il ruolo preciso del disordine nei sistemi complessi esula dagli obiettivi di questo libro, ma possiamo riassumerlo nei suoi tratti essenziali partendo da una considerazione: le strutture complesse riflettono il disordine nei loro componenti o addirittura lo creano per trarne qualche vantaggio[7]. Quali sono i vantaggi di una struttura non omogenea? Be', la specializzazione, tanto per dirne una. Torniamo all'esempio della cucina. Se sono un fornitore di materia prima di alta qualità, attirerò molti ristoratori; ma in certi casi potrebbe far premio il prezzo minore, rispetto alla qualità. La scelta, qui come altrove, è spesso dettata non da un singolo principio, ma da una serie di decisioni che devono armonizzarsi fra loro. Il sistema di preferenze di un ristoratore sarà la combinazione di una serie di «preferenze elementari», più semplici, il che crea la complessità del sistema. Nel corso di questo processo evolutivo non tutto va sempre come auspicato. Se ho molto successo con una certa materia prima e mi ci specializzo, si crea una rete fatta a stella in cui tutti vengono da me. Ho messo fuori dal mercato la concorrenza e il numero di nodi della rete è diminuito. Ma questa è una configurazione fragile evolutivamente. Come ci insegna il mito di Achille, anche chi è apparentemente invincibile ha un punto debole. Basta un incidente di percorso (per quanto poco probabile) o un sabotaggio del fornitore più di successo perché tutti i ristoranti di una città vadano in crisi, creando nuove opportunità per nuovi fornitori.

Che cosa ci insegna questo esempio? Che un sistema complesso può essere ottimizzato, ma spesso si ottiene questo risultato aumentando la sua fragilità. Per essere stabile ha bisogno di «vari tipi» di disordine. Nelle prossime pagine vedremo come questa e altre idee innovative, sviluppate negli ultimi anni dai ricercatori, ci permettano di partire da modelli semplici di interazioni per astrarre regole valide ben al di là del contesto in cui queste regole sono apparse. Ci accorgeremo, in particolare, di come aumentare il numero delle parti cambi completamente il comportamento di un sistema, di come il disordine porti stabilità, e di come l'ordine o il disordine si creino nell'evoluzione di un sistema.

Prospettive

Queste idee sono nate nel campo della fisica statistica, ma possono costituire uno strumento per comprendere fenomeni sociali più vasti[8]. I cittadini, le particelle del sistema sociale[9], stanno diventando sempre più numerosi e sempre di più sono collegati, in maniera diretta o indiretta, vivendo tutti insieme in grandi città o allacciati dai social network. Incidentalmente, tutte queste relazioni producono dati. La prospettiva che poi qualcuno legga e usi questi dati può forse richiamare le paure di una società dominata da un Grande Fratello, come nel romanzo distopico 1984 di Orwell, e in effetti molte aziende hanno compreso la potenzialità offerte dallo studio dei dati

prodotti dagli utenti. Quando compriamo qualcosa su Amazon o eBay, o su qualsiasi altro sito che richieda una registrazione, la nostra storia di acquisti e di pagine visitate diventa il nostro profilo. Basta costruire una semplice rete per trovare utenti con profili simili; se qualcuno di questi clienti affini compra o vede qualcosa di nuovo, perché queste aziende non dovrebbero proporre il prodotto o il servizio anche agli altri della cerchia? Una profilazione di questo tipo può non limitarsi ai prodotti, ma allargarsi per esempio alle idee politiche, con effetti che molti hanno giudicato preoccupanti[10]. Se, a quanto pare, pratiche di questo tipo sono difficili da eliminare, è bene che tutti siano informati della situazione (il che è uno degli scopi di questo libro) e conoscano gli strumenti a disposizione per governarne gli effetti.

A ben pensarci, oltre alla pervasività dei sistemi di reti sociali in cui siamo immersi, oltre alla disponibilità di dati personali sulle nostre abitudini che vengono memorizzate dalle aziende c'è un ulteriore punto che accresce l'importanza di queste analisi. Ai sondaggi di opinione e alle indagini di mercato si può non rispondere o decidere di mentire, per qualsivoglia motivo: ma nessuno mente a Google. Se mi chiedono quanto guadagno posso vantarmi di cifre fuori misura; ma se devo comprarmi una macchina e cerco su Google un rivenditore, non guardo quelli della Ferrari se ciò che posso permettermi è al massimo un'utilitaria. Google raccoglie i dati di tutte queste ricerche, e sono dati quasi sempre sinceri.

È probabile che contando le ricerche giornaliere con la stringa «cerco lavoro» o simili si avrebbe una stima sicuramente aggiornata (istantanea, quasi) e forse più affidabile di quelle attuali sul tasso di disoccupazione. Naturalmente analisi e dati dovrebbero essere resi pubblici, perché tutti possano verificare le procedure ed eventualmente contestare le conclusioni[11].

Un esempio di approccio a fenomeni sociali tramite le reti si è visto con la recente pandemia di Covid-19. Il tracciamento è un'operazione fondamentale, che pone ovvi problemi di privacy: si devono avvisare i contatti di una persona infetta e bisogna sapere in media quante persone vengono infettate da un positivo, il tutto proteggendo le identità dei coinvolti. Anche senza i dati reali dei contatti, si possono comunque realizzare simulazioni al calcolatore di scenari possibili partendo dai dati aggregati sulla mobilità, sulle fasce di età e così via[12]. In queste analisi le reti recitano un ruolo di particolare importanza, perché ci danno la mappa microscopica delle interazioni fra gli elementi, ovvero le informazioni sulle strutture che poi determinano la complessità alle scale più grandi.

Le reti sono uno strumento particolarmente efficace non solo come modello matematico della complessità, ma anche come mezzo per rappresentarla. L'immediatezza visiva di questo strumento è il primo passo verso la comprensione. Non a caso, nelle lingue indoeuropee «vedere» e «capire» hanno la stessa radice. Da una supposta radice proto-indoeuropea[13] *weyd derivano infatti video («vedo») e videor («mi sembra opportuno») in latino; (v)oida («so perché ho visto») in greco antico; veda («conoscenza») in sanscrito; wise («saggio») in inglese; wissen («sapere») in tedesco. Oggi una cosa che abbiamo compresa è «chiara» («bianca luminosa» per i cinesi); gli anglofoni dicono I see per segnalare che hanno compreso il nostro punto di vista. Ricapitolando, abbiamo tutti chiaro che «vedere» è il primo passo per «comprendere».

Grazie alle rappresentazioni tramite le reti, visibili e quindi comprensibili anche a chi non ha conoscenze specifiche, questo libro vuole proporsi come una guida per orientarsi in un ambito di ricerca non più specialistico e settoriale, ma allargato a fenomeni che ci aiutano a comprendere il mondo in cui viviamo. È un orientamento divenuto essenziale per capire che cosa succede a noi tutti, cittadini di questo mondo iperconnesso, sia per accettarne le (molte) conseguenze positive, sia per evitarne le (poche, ma molto serie) derive antidemocratiche. Forse nel bagaglio del cittadino moderno c'è posto anche per un po' di fisica statistica: se il lettore alla fine ne sarà convinto, questo libro avrà ottenuto lo scopo che si era prefisso.

-
- [1] Giorgio Parisi, *In un volo di storni. Le meraviglie dei sistemi complessi*, Rizzoli, Milano 2021.
- [2] Philip W. Anderson, *More is different*, «Science», n. 4047, 1972, pp. 393-396.
- [3] Andrea Capocci, *Clima e ricerca pubblica, le emergenze di un premio Nobel*. Intervista al fisico Giorgio Parisi, «il manifesto», 7 ottobre 2021.
- [4] Guido Caldarelli, Andrea Capocci, Paolo De Los Rios e Miguel A. Muñoz, *ScaleFree Networks from Varying Vertex Intrinsic Fitness*, «Physical Review Letters», vol. 89, n. 25, 2002.
- [5] Zdzislaw Burda, Alfred Krzywicki e Olivier C. Martin, *Adaptive networks of trading agents*, «Physical Review» E, vol. 78, n. 4, 2008.
- [6] Diego Garlaschelli, Andrea Capocci e Guido Caldarelli, *Self-organized network evolution coupled to extremal dynamics*, «Nature Physics», vol. 3, 2007, pp. 813-817.
- [7] Albert-László Barabási e Réka Albert, *Emergence of scaling in random networks*, «Science», vol. 286, 1999, pp. 509-512.
- [8] Guido Caldarelli, Sarah Wolf e Yamir Moreno, *Physics of Humans, Physics for Society*, «Nature Physics», vol. 14, 2018, p. 870.
- [9] Mark Buchanan, *The Social Atom*, Bloomsbury, New York 2007.
- [10] Carole Cadwalldr, *The great British Brexit robbery: how our democracy was hijacked*, «The Guardian», 7 maggio 2017.
- [11] Accademia Nazionale dei Lincei, *Dati pubblici, governo delle epidemie e democrazia*, Documento della Commissione Covid-19, 1° giugno 2020.
- [12] Si vedano ad esempio le pubblicazioni di progetti come Gleanviz, <https://www.epicx-lab.com> e <https://www.mobs-lab.org>
- [13] Enciclopedia Italiana Treccani, *Indoeuropei*.