

Viaggio nella giungla delle reti

a cura di DANIELA DELLA VOLPE

Se parliamo di reti non possiamo non pensare al World Wide Web che in soli due decenni è diventato un immenso groviglio di pagine e collegamenti. Altre reti non hanno più di qualche anno, pensiamo ai social network come Facebook o MySpace. Altre ancora sono più vecchie, ma... materiali: la rete elettrica o quella telefonica, per esempio. In realtà, anche escludendo questi casi famosi, le reti si nascondono dove meno ce lo aspettiamo... in quelli che i fisici chiamano sistemi complessi. In questa giungla di nodi e link ci facciamo guidare dalla ricercatrice Ginestra Bianconi: seguiteci!

XlaTangente Ginestra, entriamo subito in argomento. Puoi dirci, innanzi tutto, che cos'è un sistema complesso?

Ginestra Bianconi Esistono varie definizioni di sistema complesso; a me piace quella per la quale un sistema è complesso se

- 1) è composto da molti elementi;
- 2) evolve probabilisticamente: ovvero, ci sono elementi di disordine nella sua evoluzione;
- 3) è tale che in esso emergono proprietà collettive che non possono essere spiegate partendo dalle proprietà dei singoli elementi.

XlaT Qualche esempio?

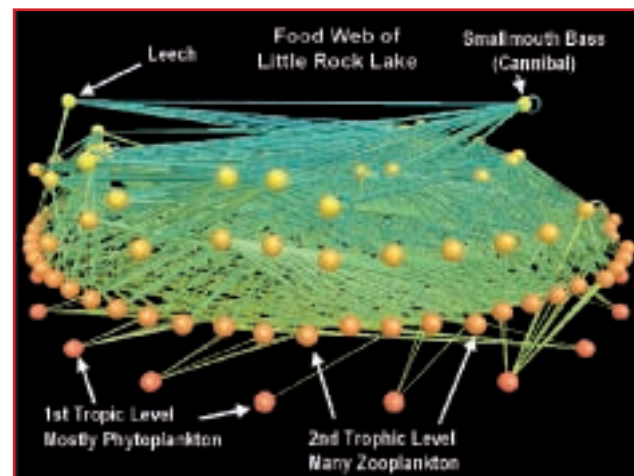
G.B. Il paradigma è la cellula vivente, che è composta da un grande numero di proteine e molecole che interagiscono probabilisticamente.

Altri esempi sono i sistemi sociali. In una scuola superiore, per esempio, ogni studente ha una serie di amicizie che formano una rete di conoscenze: Alessio è amico di Barbara, Barbara è amica di Carlo ecc... O ancora, gli ecosistemi sono sistemi complessi dove la sussistenza di una specie dipende dalla presenza delle altre.

XlaT Qual è il ruolo della teoria delle reti nei tentativi di descrivere i sistemi complessi?

G.B. Gli esempi di sistemi complessi sono molto disparati, ma un aspetto che li accomuna è che la loro evoluzio-

ne e la loro funzione dipendono in maniera cruciale dall'esistenza di interazioni. Per esempio, la cellula vivente non è semplicemente descrivibile come un insieme di molecole indipendenti, così come una società non è semplicemente la somma di individui. Anche in un ecosistema la sussistenza stessa di una specie dipende dalla presenza e dall'abbondanza di altre specie.



Network ecologico di Little Rock Lake (dati provenienti dal gruppo di Neo Martinez, Berkeley). Le specie sono disposte nel network in modo tale che specie a livello trofico più elevato si trovano più in alto. Come potete vedere in questi reti esistono anche cicli ovvero esistono, addirittura, specie cannibali!



Rete dei collegamenti aerei all'interno degli Stati Uniti. Questa rete, come Internet, è un network a invarianza di scala con degli aeroporti altamente collegati chiamati "hub".

Quindi per descrivere un sistema complesso è cruciale studiare le interazioni tra i suoi elementi. Bene, qui intervengono le reti che permettono di svelare lo "scheletro" di tali interazioni. La rete, infatti, è la versione fisica di quello che i matematici chiamano "grafo", ovvero un insieme di nodi che sono connessi tra di loro da archi ("link"). Una rete complessa è un grafo in cui i nodi corrispondono a elementi di un sistema complesso e gli archi corrispondono alle interazioni tra questi elementi.

Alla fine degli anni '90 del secolo scorso, sono diventati accessibili molti dati sulle reti complesse. Basta pensare al caso davvero sorprendente della rete Internet o, nell'ambito della Biologia, ai nuovi esperimenti capaci di rilevare contemporaneamente migliaia di interazioni tra proteine.

Quel periodo ha segnato da un parte l'inizio della ricerca sulle reti e dall'altra ha rivoluzionato la ricerca sui sistemi complessi: finalmente è stato possibile ricucire la frattura tra modelli astratti ed evidenza sperimentale.

Xlat Quali domande si pone la ricerca sulla teoria delle reti?

G.B. Ti faccio solo un primo elenco che raccoglie le questioni che, secondo me, sono fondamentali in questo campo.

- 1) Esistono proprietà topologiche comuni a una larga classe di reti complesse?
- 2) Se sì, quali sono le cause di tali proprietà, che potremmo chiamare universali?
- 3) Quali sono, invece, le differenze tra reti complesse che permettono di distinguere, per esempio, tra una rete di proteine interagenti e una rete sociale?
- 4) C'è un legame tra la dinamica che si presenta nelle reti e la loro topologia?
- 5) Come evolvono le reti complesse?

Negli ultimi anni ci sono stati molti progressi che hanno portato a rispondere almeno in parte ad alcune di queste domande, ma la maggior parte delle questioni è ancora aperta.

Xlat Quali sono stati i contributi più rilevanti in questo campo?

G.B. Penso che grandi progressi siano stati quelli che hanno portato alla definizione di caratteristiche universali dei sistemi complessi (Non voglio sembrarti pignola, ma voglio farti osservare, visto che hai una formazione matematica, che in questa situazione quando si parla di "caratteristiche universali" si considerano proprietà comuni non a tutte le reti, ma a molte, diverse reti).

Per esempio, avrai sentito parlare della proprietà di "piccolo mondo" delle reti complesse, fenomeno che per le reti sociali è conosciuto anche sotto il termine "sei gradi di separazione".

Per descrivere la proprietà di "piccolo mondo" prendiamo il caso di una rete sociale di un gruppo di studenti. In ogni interazione tra studenti c'è una componente casuale che gioca un ruolo importante: ad esempio, Alessio e Barbara sono amici perché sono capitati nella stessa classe, Barbara e Carlo perché frequentano la stessa palestra, ecc... Tuttavia possiamo immaginare che se Alessio è amico sia di Barbara che di Carlo, allora è più probabile che Barbara e Carlo siano amici fra loro ovvero possiamo immaginare che nella rete delle interazioni possano nascere gruppi coesi di persone amiche; si dice allora che emergono fenomeni di "clustering", ovvero di insiemi di nodi molto interconnessi.

Tuttavia, anche se queste reti sono molto coese, le interazioni sociali permettono altre relazioni con le persone più disparate. Infatti è possibile raggiungere una persona qualsiasi del mondo attraverso una rete di amici di amici percorrendo nella rete sociale solo pochissimi passi (i famosi sei gradi di separazione).

Ora però la cosa più strana è che questa proprietà di "piccolo mondo" non è solo una caratteristica delle reti sociali, ma si ritrova in reti in apparenza molto diverse da queste: la rete neurale di un verme chiamato *C. elegans* o le reti di reazioni chimiche presenti nella cellula, chiamate anche reti metaboliche, per esempio.

Un'altra proprietà universale delle reti complesse è quella di essere ad "invarianza di scala", cioè di avere pochi nodi con un grandissimo numero di link e moltissimi nodi con pochissimi link. Tecnicamente si dice che queste reti hanno una distribuzione di grado che decade a potenza.

Anche in questo caso, la cosa incredibile è che reti a invarianza di scala si trovano nello studio delle reti tecnologiche (in Internet, la rete fisica delle connessioni tra *routers* e nel World Wide Web la rete virtuale di pagine web e degli iper-link), ma anche in quello delle reti di trasporto (la rete delle connessioni aeree tra gli aeroporti) e in quello delle reti biologiche (la rete di interazione tra le proteine).

Xlat Quali sono le proprietà delle reti che questa topologia "universale" comporta?

G.B. L'invarianza di scala, che è caratteristica di molte reti complesse, ha, fra le sue conseguenze, queste tre che mi sembra ti possano aiutare a capire meglio come "funzionano" le reti:

- a) la robustezza, ovvero la capacità di sopravvivere ai guasti. Internet, ad esempio, continua a funzionare bene anche se un certo numero scelto a caso di *routers* diventa inefficiente;

b) la vulnerabilità agli attacchi. Se facciamo ancora riferimento alla rete fisica di Internet, possiamo osservare che essa si distrugge rapidamente se i *routers* inefficienti sono quelli più connessi (e la presenza di nodi altamente connessi è proprio una caratteristica delle reti ad invarianza di scala);

c) la grande vulnerabilità alla diffusione di epidemie. Basta pensare alle epidemie “virtuali” di virus informatici che in Internet hanno una vita molto lunga proprio a causa del fatto che questa rete è ad invarianza di scala.

XlaT Quali discipline sfruttano la teoria delle reti?

G.B. La teoria delle reti è un campo interdisciplinare in rapida evoluzione. Le discipline coinvolte sono la Biologia e in particolare la “systems biology” (ndr. Leggete il n. 9 di *XlaTangente!*) che si occupa della complessità biologica al di là delle proprietà della singola molecola; l’Economia che si occupa di “teoria dei giochi” associata alle reti (un problema tipico: data una rete di interazioni economiche, quale sarà, per il singolo agente rappresentato da un nodo, l’accordo economico più vantaggioso?); la Sociologia che si occupa di problemi legati all’integrazione di gruppi etnici e alla diffusione di opinioni nei *social network*; l’Ingegneria che si occupa di coordinazione tra infrastrutture interagenti (rete elettrica, Internet). Anche se ho dimenticato qualcosa, mi sembra già un bell’elenco!

XlaT Ginestra, tu ti sei laureata in Fisica. Perché i metodi della Fisica teorica sono importanti in questo campo?

G.B. Due sono i modi d’approccio della Fisica moderna. Il primo, riduzionista, mette al centro le interazioni fondamentali (gravità, interazioni forti, interazioni deboli e elettrodinamica) con cui i costituenti ultimi della materia interagiscono. L’altro è interessato all’emergere dell’universalità di fenomeni macroscopici che si manifesta in sistemi con grande numero di componenti, e questo a prescindere dalle interazioni fondamentali.

Questo secondo approccio riesce a descrivere fenomeni molto vari, come la transizione liquido-gas dell’acqua quando la temperatura viene alzata al di sopra di una certa temperatura critica o come la transizione ferromagnete-paramagnete. Una descrizione che si basasse esclusivamente sulle interazioni fondamentali non riuscirebbe in alcun modo a descrivere che cosa lega queste due transizioni di fase, mentre ciò è possibile con il secondo approccio.

Questo sembra quindi l’approccio più appropriato per cogliere gli aspetti universali delle reti complesse, perché riesce a trovare aspetti comuni presenti in sistemi molto diversi.

XlaT Ti sei occupata in particolare di Meccanica statistica. In che modo questa disciplina contribuisce alla comprensione delle reti? Tu, di quale aspetto ti occupi?

G.B. Il mio approccio alla teoria delle reti viene proprio dalla Meccanica statistica ovvero da quel campo della Fisica teorica che si è sviluppato a partire dalla spiegazione microscopica e probabilistica della termodinamica. In particolare, la Meccanica statistica si occupa di sistemi costituiti da molte particelle, che interagiscono



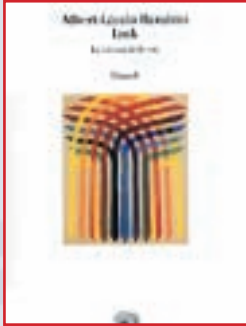
Rete che descrive in tempo reale la rete di interazioni sociali durante le pause tra un seminario e un altro in una conferenza scientifica (tecnica sviluppata nel gruppo Lagrange dell’Istituto ISI di Torino). Questo network è, a differenza dei precedenti, altamente dinamico e composto da diversi sottografi sconnessi tra di loro.

no in maniera probabilistica, e descrive i fenomeni detti di transizione di fase dello stato macroscopico della materia.

Un problema classico di Meccanica statistica è la caratterizzazione della transizione di fase tra liquido e gas che avviene alla temperatura di ebollizione dell’acqua. Per esempio, in un lavoro ho trovato una transizione di fase in modelli di evoluzione di reti complesse che ha dei legami formali con una transizione di fase molto particolare chiamata condensazione di Bose-Einstein. Nelle reti questo fenomeno corrisponde all’emergere di un nodo “condensato”, ovvero collegato con una larga percentuale degli altri nodi e formante una specie di stella. Questo per esempio nel World Wide Web potrebbe spiegare l’emergere di potenti motori di ricerca come Google, una specie di asso piglia tutto.



Rete di interazione tra le proteine nel lievito *S. cerevisiae*. I nodi rappresentano le proteine, i link le interazioni tra esse e i colori dei nodi l’effetto che comporta la rimozione della proteina per la cellula (verde = rimozione non letale, rossa = rimozione letale, gialla = non conosciuto). I nodi più connessi sono letali con maggiore probabilità. Figura tratta dall’articolo H. Jeong et al. *Nature* 2001.



Albert-László Barabási
Link
La scienza delle reti
Einaudi, Torino, 2004, euro 23,00

Se la scienza delle reti vi incuriosisce, non potete perdervi questo bellissimo libro, scritto dal supervisore di Ginestra Bianconi durante il suo dottorato negli Stati Uniti. Ritroverete il nome di Ginestra nell'ottavo capitolo, dove si parla proprio della sua ricerca riguardo ai legami tra la scienza delle reti e quel fenomeno quantistico noto come *condensazione di Bose-Einstein*.

Barabási illustra, con un linguaggio semplice e preciso, molti aspetti delle reti, mostrando una grande quantità di esempi in tanti campi diversi, tra i quali non mancano riferimenti all'attualità. Essendo una scienza relativamente giovane, molti suoi modelli nascono per spiegare situazioni e problematiche che abbiamo sott'occhio ogni giorno: dalla sicurezza del World Wide Web ai meccanismi delle reti sociali, dalle crisi economiche alla diffusione delle malattie ecc.

Nonostante l'autore non entri quasi mai nei dettagli matematici, egli riesce a far sì che il lettore abbia l'impressione di aver capito i particolari (!). Ragionamenti e argomentazioni qualitative sono spiegati e trasmessi in modo chiaro ed efficace.

Non stupitevi troppo se dopo la lettura di questo libro vedrete ovunque attorno a voi una giungla di reti!

XlaT Che cosa ti ha insegnato l'esperienza di dottorato in USA, nel gruppo di Barabási?

G.B. Lavorare nel gruppo di Barabási è stata un'esperienza importante per me. László era sempre pieno di nuove idee e i miei colleghi lavoravano tutti su aspetti molto innovativi della teoria delle reti, dallo studio dei network metabolici allo studio della robustezza di Internet. In quegli anni ho imparato a lavorare in maniera indipendente e ad appassionarmi di reti.

XlaT Qual è il problema aperto che vorresti fosse risolto dai "giovani" ricercatori nei prossimi decenni?

G.B. L'evoluzione delle specie interagenti in network ecologici complessi negli ultimi 540 milioni di anni sembra dominata da eventi catastrofici di estinzione di molte specie. Negli ultimi mesi stiamo assistendo a una crisi finanziaria che si configura come una serie di fallimenti a catena in una economia di mercato molto interconnessa. Molte altre reti complesse sono invece "robuste", cioè hanno una risposta circoscritta a perturbazioni esterne.

La domanda a cui vorrei si trovasse una risposta è: sotto quali condizioni i sistemi complessi evolvono verso una maggiore robustezza, oppure evolvono verso un punto critico in cui sono dominati da grandi fluttuazioni? Ma è solo un esempio di domanda, te ne potrei fare molte altre. Credo che la ricerca scientifica abbia estremo bisogno di giovani che si occupino di reti e di complessità.

XlaT Grazie Ginestra!

Ginestra Bianconi

Ginestra Bianconi si è laureata all'Università di Roma "La Sapienza" nel 1998 con una tesi in Meccanica statistica. Ha poi svolto la sua attività scientifica presso il gruppo di Albert-László Barabási alla Notre Dame University in Indiana (USA), conseguendo il dottorato nel 2002. Attualmente lavora al Centro Internazionale di Fisica Teorica (ICTP) di Trieste.



Rete di amicizie nei dati Add Health riguardanti scuole USA negli anni 1994-1995. I colori riportano sei classificazioni di etnicità in cui gli studenti si sono identificati. Una questione aperta è definire un buon indicatore per quantificare il diverso grado di segregazione presente in queste due scuole. Figura tratta da G. Bianconi et al. *preprint 2008*.