

# Un corso innovativo in cui Chimica e Scienza della Complessità preparano le nuove generazioni ad affrontare le sfide globali del XXI secolo

**Pier Luigi Gentili**

*Dipartimento di Chimica, Biologia e Biotecnologie,*

*Università degli Studi di Perugia*

e-mail: [pierluigi.gentili@unipg.it](mailto:pierluigi.gentili@unipg.it)

---

**Abstract.** In the 21<sup>st</sup> century, humanity is spurred to face global challenges. Global challenges can be won if we prepare the new generations to deal with Complex Systems. Therefore, it is urgent that chemistry is integrated with the Science of Complexity and interdisciplinary courses on Complex Systems are proposed at the University and in Schools.

**Keywords:** Interdisciplinarietà; sistemi complessi; dinamica non-lineare; termodinamica fuori dall'equilibrio; reti; epistemologia della complessità

---

## 1. Introduzione

Uno dei principali obiettivi della ricerca scientifica è quello di risolvere problemi pratici e migliorare il benessere psicofisico dei singoli esseri umani [1]. Al giorno d'oggi ci sono più di otto miliardi di persone che vivono sulla Terra. Naturalmente, ogni persona "lotta" per raggiungere il proprio benessere psicofisico ogni giorno affrontando i propri problemi personali. Tuttavia, al di là delle necessità personali, il nostro mondo contemporaneo è particolare perché dobbiamo anche occuparci di sfide "globali". Lo sviluppo di mezzi trasporto sempre più veloci e delle tecnologie dell'informazione e delle comunicazioni sempre più pervasive ha trasformato radicalmente l'umanità. Gli esseri umani sono oggi molto più interconnessi di quanto non lo fossero nel passato. L'umanità nel suo insieme origina sulla Terra una vasta e dinamica rete. Ogni essere umano che appartiene a questa rete deve affrontare sfide che riguardano la rete nel suo insieme. Queste sfide sono dette "globali", anche perché sono multisetoriali. Infatti, coinvolgono l'umanità sotto diversi punti di vista, come quello ambientale, economico, sociale ed etico [2-4].

Le sfide globali devono essere affrontate con programmi mondiali. Per esempio, nel 2015, le Nazioni Unite hanno redatto un piano di azione, la famosa "Agenda 2030", che include 17 obiettivi che garantiscono lo sviluppo

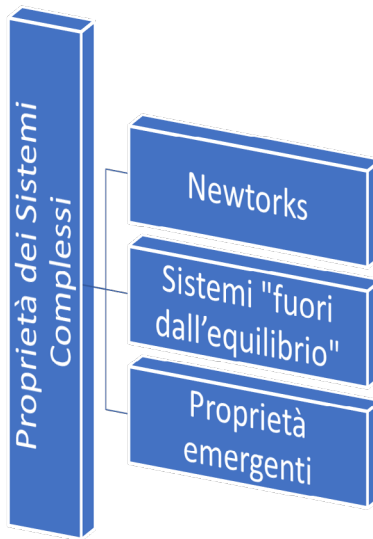
sostenibile se perseguiti su scala mondiale [5]. Al cuore dei 17 obiettivi ci sono gli esseri umani, le loro società, l'economia mondiale, le aree urbane, gli ecosistemi naturali e tutte le forme di vita che includono e il clima. Questi sono esempi di sistemi complessi [1]. All'apparenza sono diversi e, infatti, sono tradizionalmente indagati da discipline ben distinte, come la Medicina, la Biologia, la Psicologia, le Scienze Sociali, l'Economia, l'Ecologia, la Fisica, la Chimica, etc. Queste materie sono spesso mantenute ben distinte e insegnate separatamente, a parte poche eccezioni (eccezioni che si incontrano soprattutto nel mondo anglosassone). La conseguenza di una didattica mono-disciplinare è che formiamo "specialisti" che non hanno le conoscenze e le competenze per affrontare le sfide globali di questo secolo. Oggigiorno abbiamo bisogno di formare non solo "specialisti", ma anche un altro tipo di figura che può essere chiamata "ibrida" o "generalista" o "eclettica". Tale figura può essere formata insegnandole la Scienza della Complessità [4, 6, 7].

## **2. La Scienza della Complessità**

La Scienza della Complessità affronta la descrizione dei sistemi complessi da un punto di vista sia ontologico (individuando le caratteristiche che accomunano i vari sistemi complessi) che epistemologico (individuando i limiti conoscitivi che incontriamo nel descriverli e nel prevedere il loro comportamento). La Scienza della Complessità fornisce le conoscenze e le metodologie richieste per affrontare le sfide globali [6]. Essa richiede non la semplice multi-disciplinarietà, dove gli specialisti delle varie discipline offrono, ciascuno, la propria descrizione. Piuttosto, essa richiede l'inter-disciplinarietà, cioè il dialogo tra discipline per trovare metodologie di indagine e modelli comuni. Essa, infine, mira alla trans-disciplinarietà, cioè all'abbattimento delle barriere disciplinari e alla formulazione di una descrizione omogenea ed esaustiva dei diversi sistemi complessi [6, 7].

## **3. Proprietà dei sistemi complessi**

L'indagine dei sistemi complessi, sin qui svolta, ha evidenziato che almeno tre (Figura 1) sono le caratteristiche che li accomunano [1, 4, 6, 8].



**Figura 1.** Le tre proprietà che accomunano i diversi esempi di sistemi complessi

### ***Prima caratteristica***

I sistemi complessi possono essere descritti come reti, costituiti da nodi e relazioni. Del resto, l'aggettivo "complesso" deriva etimologicamente dal verbo latino "plectere" che significa intrecciare. Se pensiamo a una cellula, i nodi sono le molecole e le relazioni sono le reazioni chimiche. Nel cervello, i nodi sono i neuroni e le relazioni sono le connessioni tra dendriti e sinapsi appartenenti a diversi neuroni. In un ecosistema, i nodi sono le specie biologiche e le relazioni trofiche e simbiotiche sono ciò che li lega. I diversi sistemi complessi hanno, in genere, differenti architetture delle reti e, per la maggior parte di essi, nodi e relazioni sono diversi tra di loro e dal comportamento variabile. Le relazioni tra nodi sono generalmente reciproche: si hanno, cioè, azioni di feedback e, quindi, elevati gradi di non-linearità. La Scienza delle Reti è una delle teorie fondamentali per descrivere i sistemi complessi [7, 8].

### ***Seconda caratteristica***

I sistemi complessi sono "fuori dall'equilibrio" in senso termodinamico. Se il sistema complesso coinvolge solo materia inanimata, il suo comportamento è guidato da campi di forze. Se, invece, il sistema complesso coinvolge esseri viventi, il suo comportamento dipende anche dalla variabile "informazione" che ogni essere vivente codifica, raccoglie, memorizza, elabora

e invia per perseguire i propri scopi. La termodinamica fuori dall'equilibrio è un'altra teoria rilevante da insegnare per comprendere i sistemi complessi [7, 9, 10].

### ***Terza caratteristica***

I sistemi complessi esibiscono proprietà emergenti. Una proprietà è detta emergente quando è attribuibile alla rete nel suo complesso e non può essere interpretata come semplice somma delle proprietà di tutti i nodi e relazioni che costituiscono il sistema stesso. Per far comprendere il concetto di proprietà emergente, si possono fare numerosi esempi quali i fenomeni di auto-organizzazione nel tempo (processi periodici) e nello spazio (onde chimiche, strutture di Turing, convezione, etc.) e il caos deterministico [1]. Queste proprietà emergenti sono comprese ricorrendo ai principi della dinamica non-lineare, che è un'altra teoria fondamentale da insegnare per la conoscenza dei sistemi complessi [7]. Tuttavia, è bene evidenziare che esistono proprietà emergenti che non sono completamente razionalizzate e, quindi, tanto meno predicibili. Un esempio è il fenomeno vita. Gli esseri viventi hanno degli attributi che li distinguono nettamente dalla materia inanimata. Tuttavia, non sappiamo ancora come la vita si è originata sulla Terra. Inoltre, non siamo in grado di ottenere la vita da materia inanimata e non siamo in grado di predire l'evoluzione delle attuali forme biologiche [9, 10]. Un altro esempio di proprietà emergente non ancora ben compresa è l'intelligenza umana. Nonostante il termine intelligenza venga utilizzato in diversi ambiti disciplinari, come in filosofia, psicologia, neuroscienze e informatica, manchiamo ancora di una definizione universalmente valida e accettata di intelligenza, oltre al fatto che non siamo in grado di riprodurre qualunque prestazione dell'intelligenza umana. E ancora non sappiamo se l'intelligenza sia riconducibile unicamente all'attività del sistema nervoso. Perché ci sono proprietà emergenti non ancora ben comprese e che non possono essere predette? Ci sono almeno tre principali ragioni che delineano la cosiddetta "Complessità epistemologica" [1, 4, 6].

## **4. Complessità epistemologica**

Il primo contributo alla Complessità epistemologica è la Complessità descrittiva [6] che rappresenta le difficoltà che si incontrano nel descrivere certi sistemi complessi utilizzando un approccio riduzionistico. Le difficoltà possono derivare da:

- l'elevato numero di nodi, la loro diversità e variabilità di comportamento;
- l'elevato numero di relazioni, la loro diversità e variabilità;
- la sensibilità delle caratteristiche appena menzionate nei confronti del contesto.

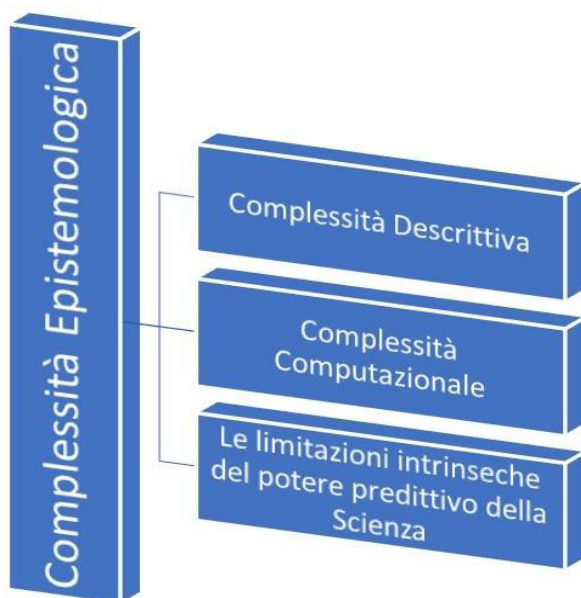
In altre parole, certi sistemi complessi e certe loro proprietà emergenti hanno le caratteristiche delle “forme variabili” che sono entità o eventi il cui riconoscimento è reso difficile dalle loro molteplici caratteristiche, dalla loro variabilità e dall’estrema sensibilità nei confronti del contesto [11]. Esempi di “forme variabili” sono le specie biologiche, le serie temporali aperiodiche caotiche, i sintomi e le forme in diagnosi medica, le relazioni non-lineari ignote tra variabili, gli eventi politici, sociali ed economici. Nonostante l’attività di ricerca volta al riconoscimento di “forme variabili” sia particolarmente attiva, manchiamo ancora di algoritmi universalmente validi ed efficaci per riconoscere qualunque “forma variabile”. La mancanza di una descrizione completa di certi sistemi complessi, li rende non-deterministici e, quindi, presentano un comportamento casuale. In queste situazioni la Complessità ontologica ed epistemologica si mescolano.

Il secondo contributo alla Complessità epistemologica deriva dalla Complessità computazionale [12]. Molti dei problemi computazionali che coinvolgono sistemi complessi sono risolvibili, ma intrattabili. Esempi sono problemi pratici come la pianificazione di azioni, il problema del “commesso viaggiatore”, ma anche l’equazione di Schrödinger, il protein folding e il machine learning. Secondo la teoria della Complessità computazionale, tutti i problemi risolvibili possono essere polinomiali (quando il numero di passaggi computazionali è una funzione polinomiale della dimensione del problema) o esponenziali (quando il numero di passaggi computazionali è una funzione esponenziale della dimensione del problema). Tutti i problemi polinomiali (P) sono trattabili, perché è possibile determinare la loro soluzione esatta in un intervallo di tempo ragionevole, qualunque sia la dimensione del problema. D’altro canto, i problemi esponenziali, che hanno grandi dimensioni, sono intrattabili perché è impossibile determinare la loro soluzione esatta in un tempo ragionevole, anche se si utilizzano i supercomputer più veloci al mondo. I problemi esponenziali intrattabili sono trasformati in problemi polinomiali non-deterministici (NP): si fissa un criterio arbitrario di accettabilità per una soluzione e, attraverso algoritmi euristici, si generano soluzioni che sono testate se essere accettabili o meno, il tutto in tempi ragionevoli. Nel frattempo, molti scienziati, anche attratti dal milione di dollari messo in palio dal “Clay Mathematics Institute”, che ha proclamato il “P versus NP” come uno dei problemi matematici del millennio, stanno cercando di verificare, in maniera rigorosa, l’esistenza di algoritmi che possano trasformare i problemi NP in P, o l’impossibilità di attuare questa trasformazione. Se, un giorno, qualcuno riuscisse a dimostrare che i problemi NP sono riducibili a problemi P, la Complessità computazionale si scioglierebbe come neve al Sole: tutto diverrebbe più efficiente e la nostra vita non sarebbe più la stessa [1, 6]. Tuttavia, se anche un giorno si dovesse dimostrare che tutti i problemi NP sono riducibili a problemi P e se anche si dovessero formulare algoritmi universalmente validi ed efficaci per riconoscere qualunque forma variabile, certe limitazioni intrinseche del potere predittivo della Scienza rimarrebbero. Per quanto riguarda il mondo microscopico, sappiamo che vale il principio

di Indeterminazione di Heisenberg. Secondo tale principio (formulato nella prima metà del XX secolo), non è possibile determinare accuratamente e contemporaneamente due proprietà rilevanti, come la posizione e la quantità di moto, per fare previsioni del comportamento dinamico di ogni singola particella. Pertanto, il sogno deterministico di Laplace di poter predire la dinamica dell'universo, a partire dalla descrizione dei suoi elementi microscopici, andò completamente in frantumi. Allora potremmo pensare di limitare la descrizione dei sistemi complessi su scala macroscopica. Tuttavia, certi sistemi complessi possono esibire ordine mediante fluttuazione e dinamiche caotiche. I fenomeni di rottura della simmetria, che sono generati da fluttuazioni microscopiche, sono razionalizzati, ma non riproducibili e predicibili nei loro dettagli. D'altro canto, ogni dinamica deterministica caotica è aperiodica ed estremamente sensibile alle condizioni iniziali. Poiché la determinazione delle condizioni iniziali è sempre affetta da inevitabili errori (quelli strumentali), ne deriva che le dinamiche caotiche siano imprevedibili a lungo termine per definizione.

## **5. Complessità bioetica**

Nonostante la Scienza sia consapevole delle limitazioni (Figura 2) che si incontrano nel comprendere e predire il comportamento di certi sistemi complessi, l'umanità sta sviluppando delle tecnologie che sono in grado di modificare i sistemi complessi naturali.



**Figura 2.** Contributi alla Complessità epistemologica

Basti pensare alle Biotecnologie, alle Nanotecnologie, all'Intelligenza Artificiale e alla Robotica. Sorge, allora, spontanea una domanda: "È sempre opportuno e giusto realizzare tutto ciò che la tecnologia rende fattibile?" [13]. Rispondere a questa domanda non è affatto semplice perché significa affrontare quella che può essere definita la Complessità bioetica [6, 13]. Come possiamo affrontarla? Come possiamo affrontare tutte le sfide globali del XXI secolo? Come possiamo raggiungere gli obiettivi dell'Agenda 2030? Alcune promettenti strategie sono di seguito riportate.

## 6. Strategie per il futuro

Abbiamo bisogno di preparare le nuove generazioni alle sfide globali di questo secolo con una didattica innovativa i cui due punti rilevanti sono di seguito riportati.

- È indispensabile l'interdisciplinarietà. Un corso interdisciplinare sui sistemi complessi è sicuramente essenziale per preparare le nuove generazioni a saper affrontare le sfide globali di questo secolo. In questo corso dovrebbero essere presentate le proprietà che accomunano i sistemi complessi, insieme alla Complessità epistemologica e a come affrontarla. Un esempio di questo tipo di corso [7] è tenuto per gli studenti universitari della Laurea Magistrale in Scienze Chimiche, indirizzo Chimico-Fisico, e per gli studenti universitari della Laurea Magistrale in Biotecnologie Molecolari ed Industriali dell'Università degli Studi di Perugia.
- È importante insegnare non solo l'approccio riduzionistico, che cerca di caratterizzare tutti i nodi e le relazioni che costituiscono il sistema complesso, ma anche l'approccio sistemico, che si focalizza sul comportamento del sistema nel suo insieme, tralasciando gli elementi costitutivi. Alternativamente si può ricorrere all'approccio mesoscopico che cerca di interpretare il comportamento del sistema complesso, caratterizzando quello di gruppi ("clusters") di nodi e relazioni che lo costituiscono.

Le sfide globali richiedono anche dei cambiamenti nella ricerca, come indicato sotto.

- È sicuramente indispensabile favorire lo sviluppo di gruppi di ricerca interdisciplinari.
- Dal momento che il comportamento dei sistemi complessi è alquanto dinamico, è necessario monitorarli costantemente, raccogliendo, memorizzando ed elaborando grandi quantità di dati, cioè i cosiddetti Big Data.
- Un modo alternativo e promettente per eseguire esperimenti è attraverso simulazioni computazionali, basate su modelli plausibili dei sistemi complessi.

- Per rendere la seconda e terza strategia della ricerca veramente promettenti, è necessario (a) migliorare le prestazioni delle nostre macchine computazionali, aumentandone la velocità ed estendendone lo spazio di memoria, (b) formulare nuovi e più efficienti algoritmi e (c) sviluppare modelli sempre più attendibili dei sistemi complessi.
- Gli attuali computer elettronici sono basati sull'architettura di von Neumann, il cui principale difetto è quello di avere la memoria e il processore separati fisicamente, per cui le informazioni devono costantemente fluire dalla memoria al processore e viceversa, rallentando i calcoli. La legge empirica di Moore ha descritto la loro costante evoluzione negli ultimi decenni: il numero di transistor per chip è raddoppiato ogni due anni. Miniaturizzando i transistor, cioè gli interruttori base per codificare ed elaborare informazione binaria, le prestazioni dei computer sono state migliorate costantemente. Tuttavia la legge di Moore cesserà di valere presto, perché i transistor saranno costituiti da pochi atomi. Ecco, allora, che le compagnie delle Tecnologie dell'Informazione e delle Comunicazioni stanno investendo miliardi di dollari per escogitare nuove architetture che possano andare oltre la legge di Moore. A tale riguardo delle idee possono provenire dalla linea di ricerca della Computazione Naturale ("Natural Computing") [1, 6].
- Nella linea di ricerca interdisciplinare del Natural Computing, scienziati, provenienti da diversi ambiti disciplinari, collaborano e traggono ispirazione dalla natura per proporre: (a) nuovi algoritmi, (b) nuovi materiali ed architetture per calcolare e memorizzare e (c) nuovi metodi e modelli per comprendere più a fondo i sistemi complessi. L'idea di base è che ogni stato distinguibile della materia e dell'energia può essere utilizzato per codificare informazione e ogni trasformazione naturale di questi stati è un tipo di computazione.

## **7. Conclusioni**

È urgente che la didattica si rinnovi e prepari non solo "specialisti", ma anche "generalisti" (dette anche figure "eclettiche" o "ibride") che abbiano "gli strumenti" e le conoscenze per affrontare le sfide globali dell'attuale secolo. Queste nuove figure possono essere preparate insegnando loro la Scienza della Complessità. Passerà del tempo prima che in Italia vengano istituiti corsi di laurea interdisciplinari incentrati sulla Complessità. È, pertanto, opportuno proporre singoli insegnamenti interdisciplinari sui sistemi complessi all'interno dei tradizionali corsi di laurea mono-disciplinari presenti nei diversi Atenei, come, per esempio, sta avvenendo presso l'Uni-



versità degli Studi di Perugia, dove un tale tipo di insegnamento è previsto sia nella Laurea Magistrale in Scienze Chimiche che nella Laurea Magistrale in Biotecnologie Molecolari ed Industriali e per i quali è anche stato scritto un libro di testo [1]. Questi insegnamenti dovrebbero essere organizzati e proposti anche nelle scuole italiane. Infatti, la multidisciplinarietà è intrinseca al sistema scolastico italiano. Ciò che si richiede è un proficuo dialogo interdisciplinare tra i professori, i quali, guidati dal desiderio di preparare le nuove generazioni alle sfide globali, possano organizzare lezioni trans-disciplinari sui sistemi complessi.

## Riferimenti

- [1] P. L. Gentili, *Untangling complex systems: A grand challenge for Science*, CRC Press, Boca Raton (FL), 2018.
- [2] Y. N. Harari, *21 lessons for the 21st century*, Penguin Random House, London (UK), 2018.
- [3] J. Martin, *The meaning of the 21st century: a vital blueprint for ensuring our future*, Riverhead Books, New York (NY, USA) 2007.
- [4] P. L. Gentili, G. Cardinali, P. Dominici, D. Grohmann, M. E. Menconi, C. Santi, The science of complex systems for preparing the new generation to tackle global challenges, *8th International Conference on Higher Education Advances (HEAd'22)*, 2022, 959-966.
- [5] General Assembly of the United Nations (2015): Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development; <https://www.refworld.org/docid/57b6e3e44.html> (Accessed November 14, 2023).
- [6] P. L. Gentili, Why is complexity science valuable for reaching the goals of the UN 2030 Agenda? *Rend. Fis. Acc. Lincei*, 2021, **32**, 117–134.
- [7] P. L. Gentili, Designing and teaching a novel interdisciplinary course on complex systems to prepare new generations to address 21st-century challenges, *J. Chem. Edu.*, 2019, **96**, 2704–2709.
- [8] M. E. J. Newman, Complex systems: A survey, *Am. J. Phys.*, 2011, **79**, 800–810.
- [9] S. I. Walker, P. C. W. Davies, G. F. R. Ellis, *From matter to life*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2017.
- [10] M. P. Banchetti-Robino, G. Villani, *From the atom to living systems: A chemical and philosophical journey into modern and contemporary Science* Oxford Academic, New York (NY, USA) 2023.
- [11] C. M. Bishop, *Pattern recognition and machine learning*, Springer, Singapore, 2006.
- [12] O. Goldreich, *Computational complexity. A conceptual perspective*. Cambridge University Press, Cambridge (UK), 2008.
- [13] P. L. Gentili, *The winged science to face bioethical complexity*. Gemma Ed., Ceccano (FR) Italia, 2023.