Padova, 30 gennaio 2023

**DOTTORATO AD HONOREM GIORGIO PARISI**

***LECTIO MAGISTRALIS***

***Un mucchio di rifiuti sparsi a caso, l’ordine più bello. Eraclito***

La parola “complesso” scivola tra le mani di chi cerca di darne una defi­nizione precisa. A volte se ne sottolinea il significato di “complicato”, ossia composto da molti elementi (una centrale nucleare è un sistema complesso, in quanto composto da cento­mila pezzi differenti); altre volte si sottolinea il significato di “incomprensibile” (l'atmosfera è un sistema complesso, in quanto non si possono fare previsioni a lunga scadenza). Molto spesso, nei convegni sui sistemi complessi, capita che ciascuno degli oratori usi la parola con un’accezione differente. A parte i problemi di definizione, le vere difficoltà nascono quando, dopo aver dichiarato che un dato sistema è complesso, si vuole utilizzare questa affermazione per ottenere risultati positivi e non per lavarcisi le mani, limitandosi ad affermare che il sistema è complesso e quindi nessuna predizione è possibile.

In questi ultimi decenni l’attenzione si è concentrata sui sistemi complessi, composti da elementi diversi che interagiscono fra di loro secondo leggi più o meno complicate, ed in cui sono presenti un certo numero di meccanismi che ne stabilizzano il comportamento collettivo. La teoria dei sistemi complessi, che i fisici hanno messo a punto, si colloca a metà strada tra un punto di vista riduzionista tradizionale, che peraltro sembra non portare da nessuna parte, e un punto di vista olistico globale in cui invece si trascura la natura dell’interazione tra costituenti.

Questa teoria parte sempre dai sistemi complessi e dall’analisi del comportamento dei suoi singoli costituenti ma aggiunge l’idea che i dettagli minuti delle proprietà dei componenti sono irrilevanti e che il comportamento collettivo non cambia se cambiano di poco le leggi che regolano le interazioni fra i componenti.

La teoria dei sistemi complessi ha tantissime sfaccettature e punti di vista diversi, e io vorrei oggi, anche se in modo approssimativo, affrontare l’aspetto fondamentale che nei sistemi complessi esistono equilibri multipli. Comincerei con un riferimento, anche se molto lontano dalla fisica, che è la teoria di Eldredge e Gould sull’evoluzione delle specie, elaborata nel 1972, la quale parla di equilibri punteggiati (punctuated equilibria), assumendo che nell’evoluzione vi siano lunghe stasi separate (punteggiate) da cambiamenti veloci con un processo che non è continuo. È ancora presto per dire quanto questa idea sia corretta, dal momento che ci sono ancora molte discussioni a proposito, ma essa rivoluziona la teoria dell’evoluzione, ammettendo che in un sistema complesso come quello di una singola specie ci siano dei periodi lunghi di equilibrio separati da transizioni veloci che portano ad un nuovo punto di equilibrio. Questo può succedere negli ecosistemi, nelle glaciazioni, nelle ere geologiche e via dicendo.

Possiamo dire in generale che un sistema complesso può stare in molti stati di equilibrio, mentre un sistema semplice può stare in pochi o in un solo stato di equilibrio. Se prendiamo un sistema semplice, l'acqua, e la mettiamo a temperatura ambiente in un bicchiere, allora a seconda della temperatura della stanza e della pressione questa può stare in forma o liquida o gassosa. Se prendiamo invece un animale, sistema complesso, questo può fare tante azioni diverse e passare da uno stato all'altro in modo veloce.

Il sistema complesso con cui abbiamo maggiore familiarità è il nostro cervello. Prendiamo per esempio una parte fondamentale del nostro cervello, quella responsabile della memoria. Se decidiamo di memorizzare qualcosa o un ricordo, la nostra memoria può rimanere in uno stato di ricordo attivo per un periodo relativamente lungo di 5-10 secondi per poi passare velocemente a ricordarne un'altra. La memoria, quindi, ha un enorme numero di stati di equilibrio, ognuno dei quali corrisponde a un nostro possibile ricordo e il vasto numero di cose e situazioni da memorizzare dipende dal grandissimo numero di questi stati di equilibrio.

Quest’idea di sistemi dotati di tanti punti di equilibrio era diffusa in diverse branche della scienza già negli anni 70, ma non era affatto chiaro come si potesse attaccare il problema usando le tecniche standard della fisica. Questi sistemi erano complessi, differenti gli uni dagli altri, e anche se i fisici avessero avuto cognizione, cosa che non avevano, della teoria degli equilibri punteggiati, una tale cognizione sarebbe stata inutile. Come diceva già Einstein, per fare dei progressi, per poter modellizzare un sistema fisico, bisogna trovare un modello da studiare che sia il più semplice possibile. Una volta trovato, questo modello va studiato nel dettaglio e poi usato come trampolino per studiare altri problemi. È quello che ha fatto per esempio il nostro Galileo Galilei che, riguardo la teoria tradizionale sull’attrito, ha cominciato a studiare un caso limite, in cui l’attrito era trascurabile e, analizzando questo modello, ha trovato tutta una serie di comportamenti. L’esemplificazione, seppur forzata, di un mondo senza attrito, è stata fondamentale per capire fino in fondo la fisica del mondo senza attrito, per procedere da un modello semplice in cui inserire poi l’attrito e altri ingredienti trascurati. Quindi, la scelta di un modello semplice da cui partire per la sperimentazione è stata fondamentale.

Negli anni 60/70 su questo principio è nata l’idea dei vetri di spin.

Il modello più semplice che possiamo considerare è il seguente: in una stanza ci sono tante persone che si conoscono, e che sono tra loro simpatiche e antipatiche. Dobbiamo dividerle su due tavoli: cominciamo in maniera casuale e poi permettiamo loro di poter cambiare posto fino a che non si raggiunge uno stato di soddisfazione generale e in cui non si può ulteriormente migliorare la soddisfazione. In questa situazione non è facile calcolare qual è la situazione ottimale e dal punto di vista matematico questo è uno dei sistemi più complicati.

Un ruolo fondamentale è giocato dalla frustrazione. La frustrazione negli esseri umani e negli animali deriva da bisogni insoddisfatti. Freud ha messo in relazione la frustrazione con le condizioni inibitorie che ostacolano la realizzazione di un dato obiettivo. Nella letteratura psicologica si possono trovare molte definizioni diverse ma, a grandi linee, una situazione è definita frustrante quando un ostacolo fisico, sociale, concettuale o ambientale impedisce la soddisfazione di un desiderio. Nel contesto dei vetri di spin la frustrazione nasce quando ci sono obbiettivi che sono incompatibili tra di loro.

Facciamo un esempio: io sono amico sia del signor Bianchi che del signor Rossi e vorrei sedermi al tavolo con entrambi, ma purtroppo loro si detestano e per me diventa quindi difficile essere simultaneamente molto amico di entrambi. Questa situazione, che incontriamo spessissimo nella vita, diventa di per sé frustrante ed è sempre più complessa quando sono coinvolti tanti individui.

Prendiamo come altro esempio le tragedie di Shakespeare, dove ci sono due (o a volte più) gruppi tra loro contrapposti e ogni personaggio deve decidere da che parte stare. Prendiamo tre personaggi di questo dramma, Anna, Beatrice e Carlo. Se tutti e tre si stanno simpatici a vicenda, non c’è nessun problema: sceglieranno lo stesso gruppo. Altrettanto semplice sarà la soluzione se due di loro si stanno simpatici e ambedue provano antipatia, ricambiata, per il terzo. In questo caso la coppia affiatata sceglierà un gruppo e il personaggio rimanente opterà per l’altro. Ma cosa accadrà se tutti e tre si stanno antipatici tra loro? Risulterà un certo grado di frustrazione perché due persone che provano reciproca antipatia dovranno necessariamente stare nello stesso gruppo. Una tripletta di questo genere è frustrata. Quando molte triplette sono frustrate, evidentemente la situazione inizia a diventare instabile, alcuni possono cambiare gruppo cercando di trovare uno stato in cui la frustrazione totale sia più bassa. Possiamo definire la “tensione drammatica” come il numero di triplette frustrate diviso il numero totale di triplette. Studi dettagliati hanno mostrato come nelle tragedie di Shakespeare la tensione drammatica così definita sia abbastanza bassa all’inizio della tragedia, raggiunga un massimo circa a metà della rappresentazione, per poi decrescere verso la fine.

Questo sistema dal punto di vista matematico corrisponde ai vetri di spin, quando si sostituiscono le parole simpatico e antipatico con ferromagnetico, che significa mettersi nella stessa direzione, e antiferromagnetico, cioè andare in direzioni opposte, e identifichiamo i gruppi di amici e nemici con insiemi di spin orientati in direzioni differenti.

*Fisica velocissima dei vetri di spin*

L’analisi teorica sui vetri di spin fatta da Sherrington e Kirkpatrick negli anni 70 era inconsistente e per caso io mi sono interessato a questo tema. Dal Natale del 78, lavorando e studiando in maniera indefessa per circa sei mesi, ho trovato alla fine un rimedio che dava finalmente risultati consistenti.

*Descrizione della teoria, biglietto della lotteria*

Dal momento in cui la mia teoria è stata formulata, fino a quando ne è stata dimostrata la correttezza in tutti i dettagli sono passati trent’anni. E ne sarebbero passati molti di più se il fisico matematico Francesco Guerra non avesse avuto delle idee brillantissime che hanno dimostrato la correttezza di quello che avevo fatto. I vetri di spin sono stati un inizio dello studio di tantissimi altri sistemi che hanno caratteristiche simili. Uno dei primi sistemi con queste caratteristiche sono state le reti neurali, poi considerate alla base dell’intelligenza artificiale.

Sviluppi nella fisica:

* Dynamics: aging, modified fluctuation-dissipation relation on long time scales.
* Structural glasses: relevance of replica symmetry breaking for the glass transition.
* Jamming for hard spheres: the exponents for the jamming transition.
* Interfaces and polymers in random media, pinning.
* Heteropolymers and the folding of biopolymers (RNA, proteins).

Sviluppi in altre discipline

• Artificial neural networks.
• Computation of the capacity of associative memories. • Learning and generalizations.
• Relation to neurobiology.
• Optimization and computer science.
• Simulated annealing.
• Random travelling salesman, matching, assignment.
• Constraint satisfaction problems : K-SAT, coloring ... • Error correcting codes.
• Compressed sensing.

Inoltre, tutto questo è stato applicato a equilibri ecologici, ed a problemi di ottimizzazione di varia natura. La teoria dei sistemi complessi è stata quindi applicata a vari sistemi, la cui caratteristica più interessante è costituita dall’esistenza di un gran numero di stati di equilibrio differenti. In poche parole, ciò che non si modifica col tempo non è complesso, mentre un sistema che può assumere molte forme diverse lo è certamente. Se ci guardiamo intorno, guardiamo noi stessi, gli animali, gli ecosistemi, la terra, il clima, abbiamo complessità intorno a noi. La cosa più interessante per me, durante questo lavoro, è stato mettere giù gli strumenti fisici con cui affrontare la complessità. A tale proposito vi è un mio lavoro degli anni 80, *Facing complexity* in cui sottolineavo i problemi che nascevano a guardare in faccia la complessità, senza cercare di nasconderla sotto il tappeto.

Ovviamente i sistemi, per rimanere complessi, devono avere un equilibrio interno, perché quello che può succedere è che il sistema smetta di essere complesso e vada in una situazione diversa, in uno stato non più modificabile. Allora quello che succede quando guardiamo i sistemi complessi reali, come una cellula vivente, un cervello, una società o un essere vivente completo come un animale, vediamo sempre che in questi sistemi c’è una costante competizione, ma anche una cooperazione fra un grandissimo numero di elementi che a seconda dei casi possono essere proteine, neuroni, o gli attori, le persone che compongono questa società.

Questi sistemi non sono mai in equilibrio, ma tuttavia oscillano e fluttuano attorno a un qualche stato definito di equilibrio. Per esempio, un cane che dorme, si sveglia, corre, ecc. fa azioni completamente diverse, ma rimane in qualche modo un essere vivente. In questa situazione lo stato è flessibile, malleabile, è capace di adattarsi ai cambiamenti nell’ambiente attraverso la transizione tra vari stati possibili senza in questo modo perdere l’identità: in altre parole noi dormiamo, ci svegliamo ecc. e non cambiamo identità. Tuttavia, è possibile che questo sistema delicato di cooperazione, di competizione, di stimolazione e in qualche modo di inibizione (per esempio nel cervello ci sono neuroni che stimolano e neuroni che inibiscono), di controlli e di sistemi di bilanciamento sia violato: in tal caso quello che succede è che il sistema cambia, le interazioni tra i sottosistemi si modificano, il sistema globale incomincia a non essere più complesso e avviene qualcosa di anomalo. Esempi sono un tumore nella cellula, una malattia nei sistemi nervosi e una dittatura nella società. A questo punto, la complessità del sistema degrada e il funzionamento del sistema, nella sua interezza, è severamente danneggiato o addirittura eliminato.

Quindi vorrei concludere, prendendo spunto da quello che scrive il mio amico Imre Kondor, asserendo che la perdita della complessità è pericolosa, e ricordare il monito attribuito un grande storico ottocentesco, Jacob Burckhardt, che ha studiato a fondo i processi politici e sociali: “La negazione della complessità è l’essenza della tirannia”.

Grazie.