



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI TORINO

Laurea Honoris Causa

JOHN MICHAEL KOSTERLITZ

PRESENTAZIONE
PROFESSOR MICHELE CASELLE

Aula Magna Cavallerizza Reale
16 FEBBRAIO 2018

Ordering Metastability and Phase Transitions in Everyday Life

Magnifico Rettore, Professor Kosterlitz, cari colleghi, gentile pubblico,

il titolo del mio intervento riprende quello del famoso articolo del 1973 di M. Kostelitz e D. Thouless. Il mio obiettivo è spiegare il significato dei termini "**Ordering**", "**Metastability**" e "**Phase Transitions**" che compaiono nel titolo e spiegare perché queste idee e questi risultati sono importanti non solo per chi studia Fisica Teorica, ma per tutti noi.

Il contesto teorico in cui nasce il lavoro di Kosterlitz è quello della cosiddetta "Meccanica Statistica".

Nata verso la fine dell'800 grazie alla geniale intuizione di Boltzmann, ha avuto il suo pieno sviluppo nel corso del '900 ed è diventata in questi ultimi anni il contesto teorico di riferimento per lo studio dei sistemi complessi.

La Meccanica Statistica entra in gioco quando si studiano sistemi (fisici o biologici) macroscopici

composti da molti enti elementari microscopici: un gas composto da molecole, una cellula da proteine, un sistema sociale da individui...

L'obiettivo è descrivere le proprietà macroscopiche del sistema, che possono essere estremamente complesse e con una varietà di comportamenti differenti, a partire da poche regole semplici con cui interagiscono tra loro gli enti microscopici

La parola chiave in questo gioco è "proprietà emergenti". Nonostante a livello microscopico le regole del gioco siano semplici, esse possono generare a livello macroscopico fenomeni totalmente inaspettati:

complessità e variabilità macroscopica dovuta a meccanismi che però sono semplici a livello microscopico!

Gli esempi sono infiniti: dagli tsunami, all'ebollizione dell'acqua, alla differenziazione dei tessuti cellulari. L'obiettivo della Meccanica Statistica è prevedere l'insorgere di questi fenomeni emergenti e la loro evoluzione in funzione dei "parametri di controllo" di cui disponiamo per controllare il sistema a livello microscopico: la temperatura se si tratta di un gas, la concentrazione di una data proteina se si tratta di cellule, il campo magnetico se si tratta di un un ferromagnete, la virulenza di un particolare patogeno se si studia la diffusione delle epidemie....

La prima parola chiave del titolo è proprio la più importante di queste proprietà emergenti: la capacità, per opportuni valori dei parametri di controllo, di formare **strutture ordinate**:

- le molecole di acqua si compattano ordinatamente a formare un cristallo di ghiaccio,
- i domini magnetici microscopici di un ferromagnete si orientano tutti nella stessa direzione,
- le proteine sulla membrana di una cellula si polarizzano in modo da permettere alla cellula di spostarsi.

E veniamo alle altre due parole del titolo: **transizione di fase** e **metastabilità**.

Tipicamente i sistemi complessi ammettono più stati ordinati in modo diverso ("fasi") in competizione tra loro. La Meccanica Statistica ci insegna che, al variare dei parametri di controllo, il sistema cercherà sempre di andare nella situazione più stabile (nel linguaggio della Meccanica Statistica "verso lo stato di minima energia"). Configurazioni ordinate che erano stabili possono diventare "**metastabili**" al variare dei parametri e transire (a volte in modo violento!) verso configurazioni più stabili. Di nuovo gli esempi sono infiniti:

- la transizione liquido/vapore al crescere della temperatura,
- la magnetizzazione di un pezzo di ferro immerso in un campo magnetico,
- la diffusione esplosiva di un virus su Internet.

In questo contesto si inserisce il lavoro di Mike Kosterlitz e David Thouless che sono riusciti, con una intuizione geniale, ad immaginare un **nuovo tipo di struttura ordinata**, da loro stessi definita "**topologica**" in cui gli enti elementari del sistema si organizzano in **vortici**.

Questi vortici diventano a loro volta gli ingredienti elementari di un nuovo livello di descrizione, più profondo, ricco di strutture e di informazioni sulla fisica del sistema.

Anche a questo livello si possono avere transizioni di fase, che sono però di natura completamente diversa da quanto eravamo abituati a vedere in passato. Sono transizioni tra fasi in cui esistono pochissimi vortici e, se sono presenti, essi sono sempre e solo in coppia con vortici di segno contrario (detti "antivortici") e fasi in cui i vortici invece diventano tantissimi e dominano l'intero sistema.

Questo cambiamento di prospettiva ha influenzato profondamente la Fisica di questi ultimi 40 anni. Da allora si è capito che strutture "topologicamente non banali" compaiono in moltissimi sistemi e sono sovente i gradi di libertà giusti per descrivere il sistema.

Un esempio paradigmatico di questo cambiamento di prospettiva è rappresentato dal confinamento dei quark. Uno dei problemi aperti più importanti in fisica. I quark sono i costituenti elementari della materia. Protoni, neutroni, mesoni, sono tutti composti di

quark. Ma i quark non sono mai presenti in natura come particelle isolate. Sono sempre "confinati" in opportune combinazioni dentro gli adroni.

Quale sia il meccanismo responsabile di questo confinamento e come funzioni nessuno lo ha ancora veramente capito. L'unico risultato ormai assodato è che a generare il confinamento sono proprio oggetti topologicamente non banali, che hanno nomi esotici, istantoni e monopoli, ma che in sostanza sono molto simili (e sono stati ispirati) ai vortici di Kosterlitz e Thouless.

E' interessante guardare al lavoro di Kosterlitz e Thouless anche da un altro punto di vista:

Il vero problema che uno si trova ad affrontare quando cerca di studiare un sistema complesso usando i metodi della Meccanica Statistica è come superare il gap tra descrizione a livello microscopico e fenomenologia a livello macroscopico. Gli approcci che si usano per superare tale gap sono essenzialmente di due tipi: "Bottom up" e "Top down".

Nell'approccio "Bottom up", partendo dalle regole microscopiche si simula il sistema usando un computer in una sorta di "esperimento virtuale" e si osservano le proprietà emergenti a cui si è interessati.

Nell'approccio "Top down", partendo da alcune proprietà molto generali del sistema (le "simmetrie" del sistema) suscettibili di una descrizione matematica sufficientemente potente si cerca

di organizzare/aggregare gli enti elementari che compongono il sistema in strutture più complesse che rappresentano, come si dice nel gergo dei fisici, i veri gradi di libertà del sistema e ricavare in questo modo leggi universali che possano spiegare i fenomeni emergenti osservati.

I vortici di Kosterlitz e Thouless sono un esempio perfetto di questa strategia.

I due approcci "Top down" e "Bottom up" sono complementari e c'è tra loro una virtuosa sinergia, le simulazioni "Bottom up" possono essere usate per raffinare e mettere alla prova le previsioni ottenute con i metodi "Top down" o per aiutare i fisici a trovare i veri gradi di libertà del sistema su cui esercitare la loro abilità di fisici teorici. Tutte le volte che un'idea nuova getta un ponte tra i due approcci – e questo è il caso del lavoro di Kosterlitz e Thouless – entrambi si rafforzano e permettono di studiare sistemi nuovi che prima sembrava impossibile affrontare.

Per questo negli ultimi anni questi metodi hanno permesso di affrontare e risolvere problemi apparentemente molto lontani dalla Fisica e tipici invece della Biologia, o legati alle neuroscienze o alla frontiera dell'intelligenza artificiale.

Vorrei concludere ringraziando, a nome mio e di tutta la comunità scientifica torinese, Michael Kosterlitz per il suo eccezionale contributo alla nostra comprensione della natura e della fisica dei sistemi complessi. La spinta generata dalle idee di Michael Kosterlitz non si è fermata in questi quarant'anni ed è destinata a portare ancora molti frutti.

Grazie a tutti voi per l'attenzione.