

# L'Universo complesso

A photograph of a large acacia tree silhouetted against a dark blue night sky. The sky is filled with numerous stars and a prominent, colorful nebula or galaxy, likely the Milky Way, visible in the upper right quadrant. The tree's branches are intricate and sprawling, creating a natural frame for the celestial scene.

Una passeggiata al confine tra ordine e caos

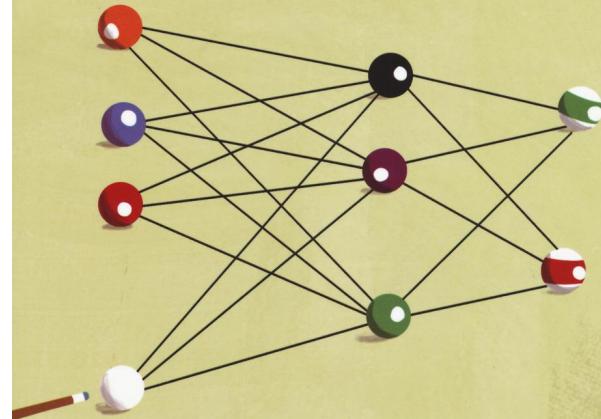
# Fonti - 1

## Alessandro Pluchino

Fisico teorico, docente presso il Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Catania

E' associato all'Istituto Nazionale di Fisica nucleare - INFN

Ha vinto un Ig Nobel nel 2010 per avere dimostrato matematicamente che le aziende sarebbero più efficienti se talvolta promuovessero i propri dipendenti in modo casuale.



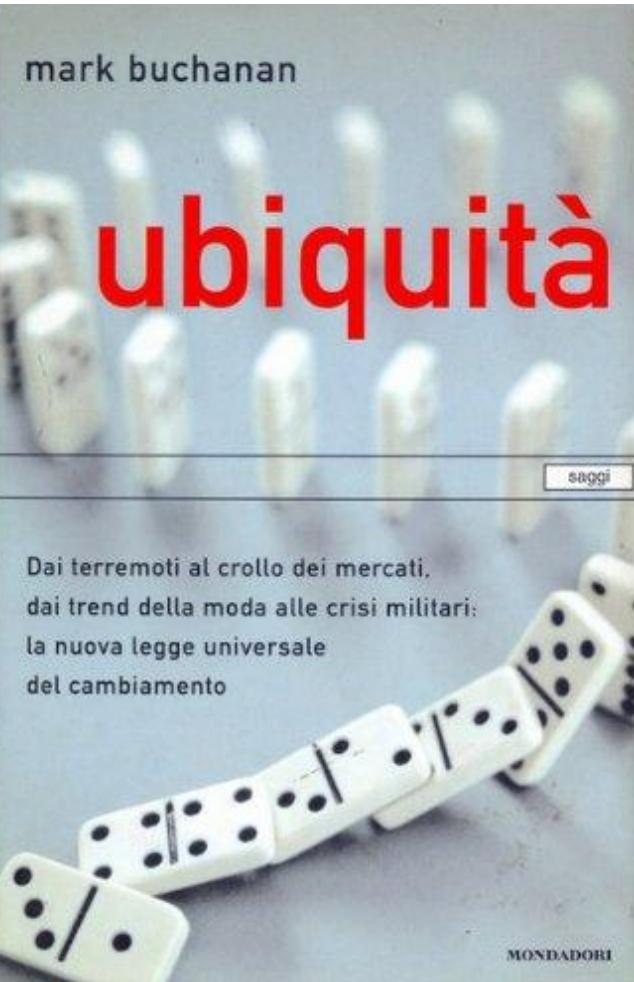
# Fonti - 2

## Mark Buchanan

Fisico e divulgatore scientifico statunitense.

È stato redattore della rivista scientifica internazionale *Nature*, a del popolare magazine *New Scientist*. È stato columnist del *New York Times*.

Ha ricevuto a Torino il Premio Lagrange sui sistemi complessi, edizione 2009, nella sezione speciale relativa alla divulgazione scientifica



# Fonti - 3

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PARMA

CORSO DI LAUREA IN FISICA



## COMPLESSITÀ E AUTO ORGANIZZAZIONE CRITICA

Relatore: Chiar.mo Prof. Mario Casartelli

Correlatore: Chiar.mo Dott. Davide Cassi

Candidato: Davide Bettati

ANNO ACCADEMICO 1994–95

# La scienza della complessità

Nel corso della storia la scienza ha studiato 3 ambiti.

- **L'ordine:** sistemi semplici con poche variabili.  
Es: moto della Terra rispetto al Sole. **XXVII sec.** **Complessità nulla.**
- **Il disordine:** sistemi descritti da milioni/miliardi di variabili.  
Es.: molecole di un gas. Sec. **XVIII/XIX.** **Complessità nulla.**
- **La complessità:** sistemi con tante o poche variabili correlate tra loro. Sec. **XX/XXI.** Aggiornamento del metodo scientifico:  
⇒ Teoria  
⇒ **Simulazione** (dati computazionali)  
⇒ Verifica sperimentale

# Battiti di ali di farfalla: quando determinismo ≠ prevedibilità

- Edward Norton Lorenz, matematico e meteorologo statunitense, costruì un modello matematico dell'aria che si muove nell'atmosfera terrestre
- Il modello è **deterministico**, cioè se sono note le condizioni iniziali, le equazioni di evoluzione determinano univocamente la sua traiettoria.
- Studiando le precipitazioni si rese conto che **minime variazioni dei parametri iniziali del suo modello producevano enormi variazioni nella sua evoluzione**.
- La dipendenza così marcata con i parametri iniziali prese il nome di “effetto farfalla (Butterfly effect)”.
- “*Può, il batter d'ali di una farfalla in Brasile, provocare un tornado in Texas?*” fu il titolo di una conferenza tenuta da Lorenz a Washington il 29 dicembre 1972 al convegno annuale dell'AAAS.



# La terza via

- Quando Lorentz studiò la traiettoria del suo modello cercò di capire se il sistema si assestava su uno stato stazionario o su un “anello” che si ripeteva di continuo.
- Si accorse che esso sceglieva una “terza via”, nella quale il movimento rimaneva sempre entro certi limiti, ma non ripeteva mai la stessa traiettoria.
- Disegnava una doppia spirale in 3D, un **“attrattore strano”** simile a una farfalla con le ali aperte. Un **“disordine ordinato”**.

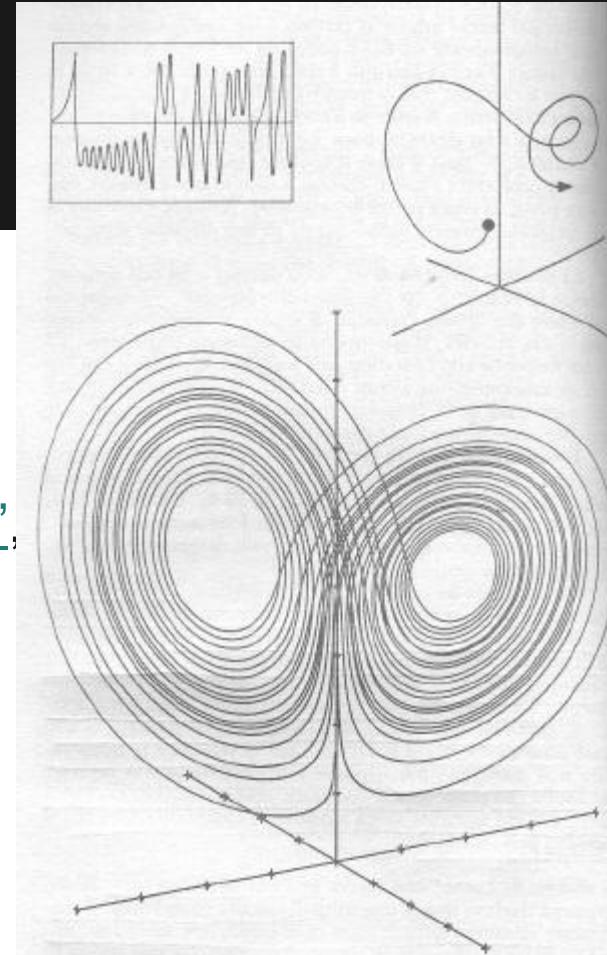


Immagine tratta da Caos / James Gleick. - Rizzoli ed., 1989. Pag. 34.

# Ordine + Disordine

## La complessità è il giusto mix

- Troppo ordine o troppo disordine non sono interessanti.
- Per capire il perché pensiamo ad una partita a poker: quello che la rende interessante è quella *miscela sapiente di disordine e di ordine*.
- Se il mazzo di carte fosse completamente ordinato (Asso, 2, 3, 4 ...) la partita sarebbe *totalmente prevedibile*.
- Se regnasse il disordine totale esisterebbero solo sequenze caotiche di carte e quindi tutto sarebbe affidato alla fortuna perché *nulla sarebbe prevedibile*.

# Imprevedibilità

## La complessità è non lineare



- Lo spessore di un foglio A4 è circa di 0,15 mm
- Immaginiamo di piegarlo a metà, poi ancora a metà e così via per 50 volte.
- Proviamo adesso, senza fare calcoli, basandoci solo sul nostro intuito, a dire quale sarà o spessore risultante.
- La risposta è **168.884.986 Km**
- La distanza della Terra dal Sole è di circa 149.600.000 km
- Il nostro intuito ci porta così lontano perché *tende a ragionare in modo lineare*, cioè con la “+” e non con la “x”, con effetti che apparentemente sono proporzionati alle cause.
- *Ma i problemi in natura spesso sono NON lineari.*

# Invarianza di scala

## La firma della complessità

- L'attrattore di Lorentz è formato da un numero infinito di superfici vicinissime e molto simili tra loro.
- Questa proprietà si chiama **auto similarità** o autosomiglianza e definisce i frattali, oggetti geometrici che si ripetono nella loro forma allo stesso modo su scale diverse, e dunque ingrandendo una qualunque parte si ottiene una figura simile all'originale.
- L'invarianza di scala è una forma esatta di auto-similarità; la sua firma matematica è la legge di potenza (es.  $y=x^k$   $k=\text{cost. positiva}$ )
- *Le nuvole non sono sfere, le montagne non sono coni, le coste di un'isola non sono cerchi e le corteccce non sono lisce, e nemmeno i fulmini viaggiano secondo una linea dritta. (Benoît Mandelbrot)*

# Frattali: la geometria della natura

## **Geologia**

- Morfologia delle coste
- Distribuzione epicentri e magnitudo dei terremoti
- Forme del letto dei fiumi

## **Astronomia**

- Distribuzione delle galassie
- Diametro dei crateri su Marte, Venere e Luna
- Anelli di Saturno

## **Biologia**

- Ramificazioni vasi sanguigni
- Rami delle piante

## **Fisica e Chimica**

- Superficie dei solidi su scala molecolare
- Aggregazione delle particelle di fuliggine
- Turbolenza
- Scariche elettriche e fulmini



Rob Gonsalves, "The Sun Sets Sail"

# Frattali: il tutto è più della somma delle parti

## La complessità: more is different

- La frase “More is different” è di Philip Warren Anderson (nobel fisica 1977), che nel 1972, con un articolo sulla rivista Science, scrive che *nei sistemi complessi costituiti da numerosi elementi interagenti emergono proprietà non riconducibili a quelle dei singoli elementi costituenti* ([Science 4/8/1972, Vol. 177, N. 4047, pp. 393-396](#)).
- È il manifesto dell'**emergentismo**, corrente filosofica che si oppone al riduzionismo metodologico.
- Probabilmente **esistono leggi o principi organizzatori che consentono la generazione di isole di ordine dal disordine**, diminuendo localmente l'entropia.

# Perché esiste l'ordine?

- Le cose si rompono da sole. Per ripararle dobbiamo spendere energia.
- Cioè **AUMENTA L'ENTROPIA** (grado di disordine)
- Eppure **in tanti casi aumenta anche l'ordine**
- Le prime forme di vita sulla Terra erano simili ai batteri
- Homo sapiens ha scoperto arte, musica e cultura

Perché?

Sullo sfondo  
Cartolina a olio di  
Fulvio Bettati

# Non isolarsi: sistemi aperti

## Il 1° segreto per produrre ordine dal disordine

- **L'entropia cresce**, fino all'equilibrio termico (stato di massima entropia), **in un sistema isolato** ...
- ... cioè in un sistema che non scambia energia con l'esterno
- **La Terra NON è un sistema isolato**: riceve energia dal Sole

In realtà nessun sistema è del tutto isolato  
a parte l'intero universo  
(e non ne siamo del tutto sicuri)



# Utilizzare correttamente l'energia

## Il 2° segreto per produrre ordine dal disordine

Ilya Prigogine (nobel chimica 1977) elabora una nuova termodinamica non lineare legata ai sistemi biologici.

- Un sistema complesso biologico può essere ordinato al suo interno, solo se è immerso in un **grande flusso di energia** che lo attraversi, **senza però fermarsi per molto tempo**. Un eventuale ristagno di energia distrugge anche la coerenza interna del sistema.
- Un sistema biologico è quindi una **struttura “dissipativa”** che fa parte di un sistema aperto. **La vita ha successo perché concilia stabilità e mutamento, producendo ordine dal disordine.**

# Automi cellulari

## Life (John Conway's Game of Life)

- Un automa cellulare è un modello matematico minimale in grado di generare, a partire da semplici regole deterministiche, schemi/modelli/disegni (pattern in inglese) di complessità così elevata da ricordare strutture di tipo biologico.
- **Life** è l'esempio più famoso di automa cellulare. E' stato sviluppato dal matematico inglese John Conway verso la fine degli anni sessanta.
- Life è un reticolo bidimensionale di celle quadrate che si estende all'infinito.
- Ogni cella può assumere solo due stati possibili: vivo o morto.
- Lo stato di ogni cella viene aggiornato insieme a quello delle altre sulla base dello stato dei suoi 8 vicini:
  - **se una cella viva ha 2 o 3 celle vive vicine allora rimane viva**, se ne ha di meno o di più muore
  - se una cella morta ha 3 celle vive vicine allora torna in vita.

# Il significato di “Life”

- La griglia è un “mondo”.
- Le “celle” rappresentano cellule, ma anche sistemi viventi più complessi.
- Il cambiamento di stato della cella rappresenta la sua evoluzione.
- Il cambiamento di stato di tutte le celle è un cambio generazionale.
- La morte di una cella viva con poche celle vive adiacenti rappresenta la morte per “isolamento”.
- La morte di una cella viva con troppe celle vive adiacenti rappresenta la morte per “sovrapopolazione”.
- La nascita di una cella viva da una cella morta per la vicinanza di celle vive rappresenta la “riproduzione”.

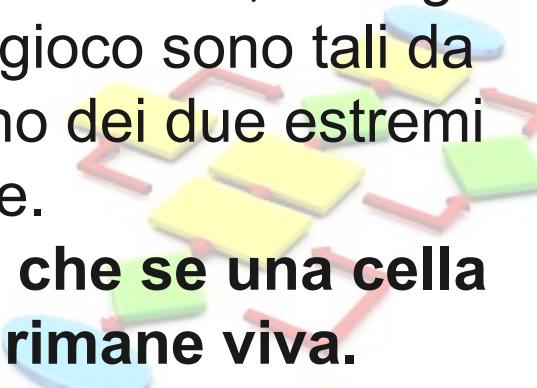
# Strutture emergenti

Due sono le caratteristiche importanti delle creature virtuali:

1. **Emergono spontaneamente** da configurazioni iniziali completamente casuali dopo un tempo sufficientemente lungo
2. A noi sembra che si muovano delle strutture, ma in realtà nulla si muove, sono le celle che cambiano configurazione.  
**A muoversi è “una specie di impulso di energia** che acquista un’esistenza indipendente dalle celle che lo costituiscono” (La firma della complessità / Alessandro Pluchino. Pag. 110).

# L'importanza della regola

- Nel gioco “Life” la complessità, e dunque la vita, emerge spontaneamente solo se le regole del gioco sono tali da evitare che il sistema precipiti verso uno dei due estremi del troppo ordine o del troppo disordine.
- In particolare è importante la regola che se una cella viva ha 2 o 3 celle vive vicine allora rimane viva. Alterando questi numeri la vita non nasce più. In poche parole **la vita nasce o non nasce a seconda del tipo di relazione** esistente tra una cella e le altre celle.



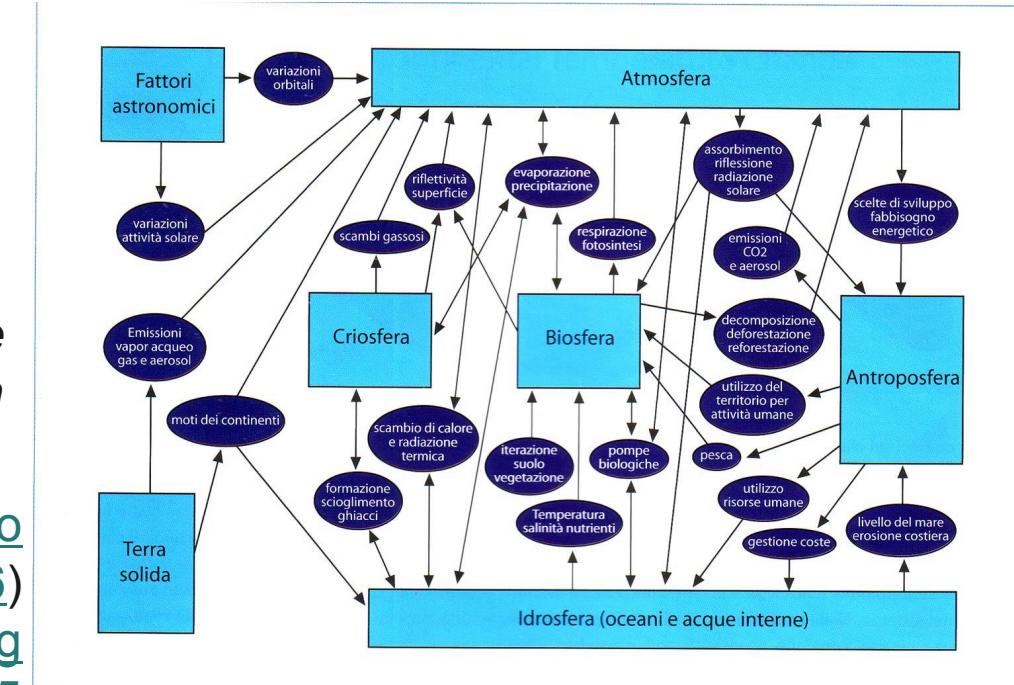
Spunti di riflessione - Relazione

# Tutto è relazione

*Occorre prendere coscienza del legame che unisce tutte le cose, dell'interconnessione di ogni ente con il tutto e dell'interdipendenza che ne discende, visione traducibile in filosofia dicendo che la prima categoria dell'essere non è la sostanza ma è la relazione.*

Vito Mancuso  
(Questa vita, pag. 136)

Ripreso da Antonello Pasini- Blog  
"Il Kyoto fisso" - 25 agosto 2015



Schema delle interazioni dinamiche  
tra l'antroposfera e il resto del sistema Terra

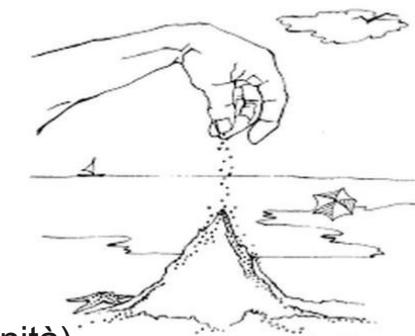
# Un pugno di sabbia (o riso)

Il Sandpile (mucchietto di sabbia) abeliano è un automa cellulare

- definito su un reticolo bidimensionale;
- nel quale ogni cella assume un valore da 0 a 7;
- nel quale i primi vicini sono le 4 celle indicate dai punti cardinali.

La regola di evoluzione di questo modello è la seguente.

- Lo stato iniziale è una superficie piatta, senza sabbia (ogni cella = 0).
- In una cella random cade un **granello di sabbia** (il valore cresce di un'unità).
- I granelli cadono random fino a quando in una cella ce ne sono più di 3.
- Quando in una cella cade il 4° granello il suo valore precipita a 0 e i 4 granelli vengono distribuiti sui primi vicini, cioè nasce una **valanga** a causa della **pendenza** eccessiva.
- Se al termine del processo esistono ancora celle che hanno più di 3 granelli si itera il passaggio precedente.
- Quando ogni cella ha meno di 4 granelli ricomincia la caduta random di un singolo granello su una cella.
- Quando la cella con troppi granelli è sul bordo del reticolo il granello può anche uscire dalla pila.



# L'eterno conflitto tra ordine e caos

Tre caratteristiche importanti del Sandpile.

- E' un **sistema aperto** perché la sabbia viene aggiunta dall'esterno ed esce dai confini.
- E' un **sistema dissipativo** perché la valanga rappresenta la dissipazione di un'unità di energia descrivibile matematicamente.
- Dopo una certa quantità di tempo cade nel *self-organized critical state*, un insieme di stati che rappresenta la **soglia del caos** e dalle caratteristiche seguenti:
  - quando il sistema è in una situazione in cui la maggior parte delle celle ha 3 granelli di sabbia è ovviamente **sensibilissimo alle perturbazioni**;
  - ogni valanga provoca una reazione a catena che precipita il sistema in uno stato in cui emergono gruppi di celle ad "altezza critica" (3 granelli di sabbia) di **ogni dimensione**;
  - mano a mano che la pila cresce le valanghe diventano sempre più frequenti e la loro grandezza sempre maggiore, fino a quando esistono valanghe di ogni dimensione, fino a quando cioè c'è **invarianza di scala**;
  - anche i **tempi di durata delle valanghe** presentano **invarianza di scala (rumore 1/f)**;
  - **è un attrattore**, perché la risposta alle perturbazioni di uno stato critico è il ritorno ad un altro stato critico, uno stato cioè appartenente alla stessa classe di stati.

# Criticità auto-organizzata

## Il fascino indiscreto della “soglia del caos”

La **criticità auto-organizzata** (in inglese SOC - Self-organized criticality, 1987, Bak/Tang/Wiesenfeld) è la tendenza dei sistemi dinamici aperti e dissipativi - molti in natura - a cadere in una *classe di stati*, detta “stato critico” uno stato cioè che ha le seguenti caratteristiche:

- **è un attrattore**, cioè il sistema **evolve spontaneamente** in questa classe di stati **indipendentemente dalle condizioni iniziali**;
- **è un frattale**, presenta cioè **invarianza di scala**.

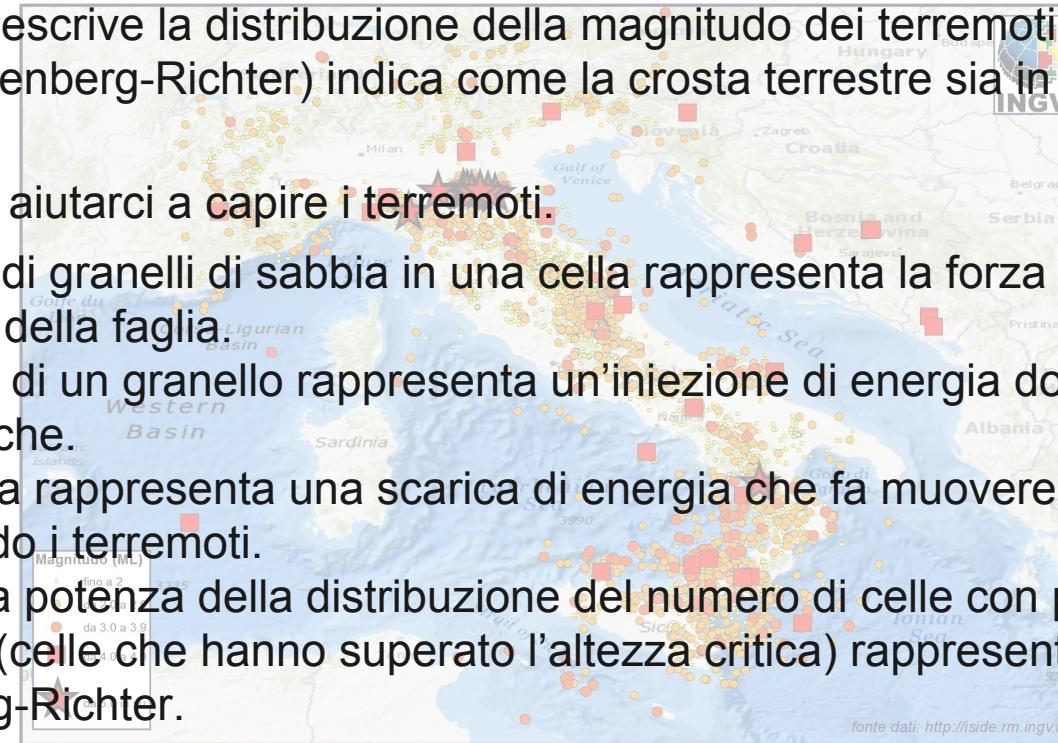
Il **Sandpile** è il primo automa cellulare nel quale è stata rilevata la presenza della criticità auto-organizzata. Esistono diversi modelli di sandpile, ma anche cambiando le regole di evoluzione presentano tutti le stesse caratteristiche, che conducono verso la “*soglia del caos*”.

# Sandpile e terremoti

La legge che descrive la distribuzione della magnitudo dei terremoti (legge a potenza di Gutenberg-Richter) indica come la crosta terrestre sia in uno stato critico stazionario.

Il sandpile può aiutarci a capire i terremoti.

- Il numero di granelli di sabbia in una cella rappresenta la forza locale in una posizione della faglia.
- La caduta di un granello rappresenta un'iniezione di energia dovuta al moto delle placche.
- La valanga rappresenta una scarica di energia che fa muovere una placca provocando i terremoti.
- La legge a potenza della distribuzione del numero di celle con più di tre granelli di sabbia (celle che hanno superato l'altezza critica) rappresenta la legge di Gutenberg-Richter.



# Il senso della criticità autoorganizzata

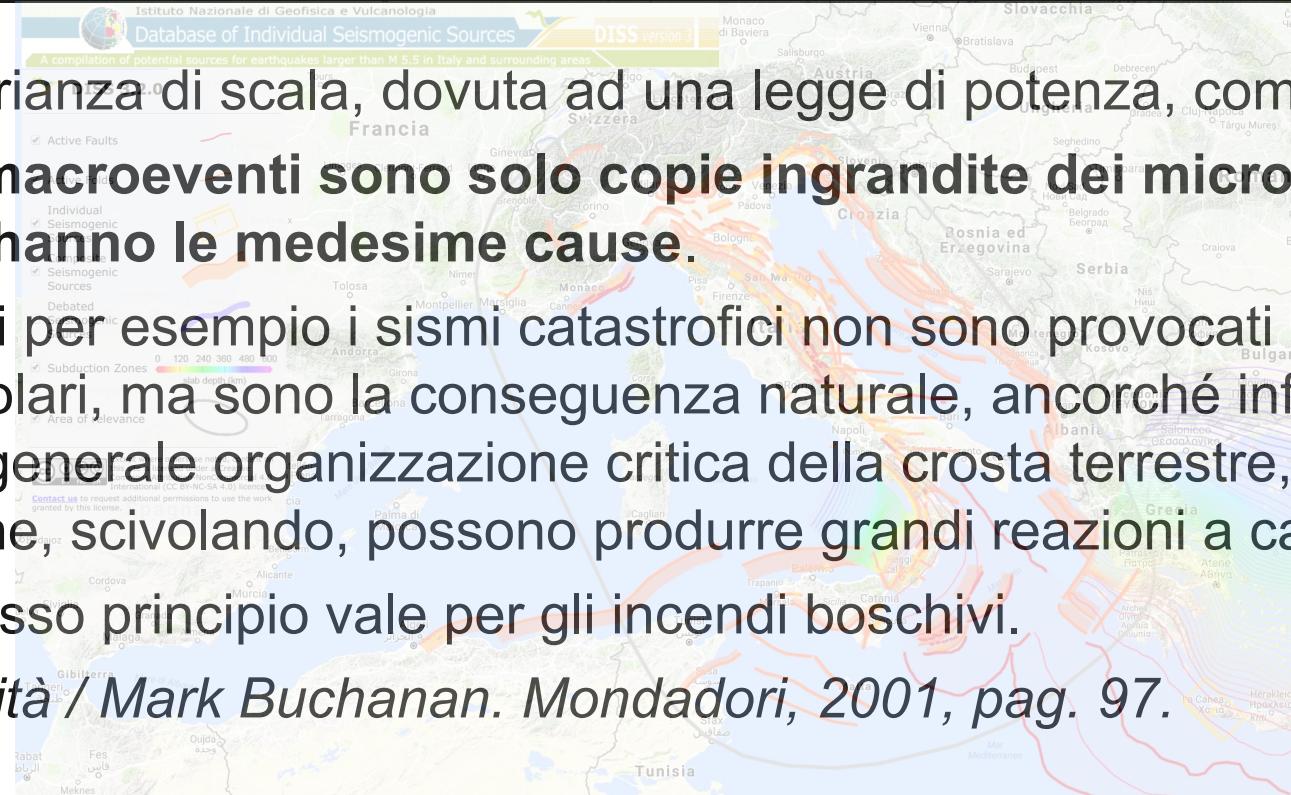
L'invarianza di scala, dovuta ad una legge di potenza, comporta che

- **i macroeventi sono solo copie ingrandite dei microeventi**
- **e hanno le medesime cause.**

Quindi per esempio i sismi catastrofici non sono provocati da fattori particolari, ma sono la conseguenza naturale, ancorché infrequente, della generale organizzazione critica della crosta terrestre, le cui placche, scivolando, possono produrre grandi reazioni a catena.

Lo stesso principio vale per gli incendi boschivi.

*Ubiquità / Mark Buchanan. Mondadori, 2001, pag. 97.*



Spunti di riflessione - Ordine (logos) e disordine (caos)

# Addomesticare il caos

*Nella scienza dei sistemi complessi il caos non ha lo stesso significato che gli si attribuisce nel linguaggio comune, dove è sostanzialmente un sinonimo di confusione, casualità, imprevedibilità. I fenomeni caotici non sono fenomeni casuali! Non tutto può accadere in un sistema complesso! **Noi vediamo un logos anche nel caos, riusciamo a stabilire "leggi" del caos!** Il caos ha una sua dinamica, il caos non è anarchico, il caos tende a raggiungere nuove "stabilità".*

Antonello Pasini

Blog “Il Kyoto fisso” - 30 agosto 2016

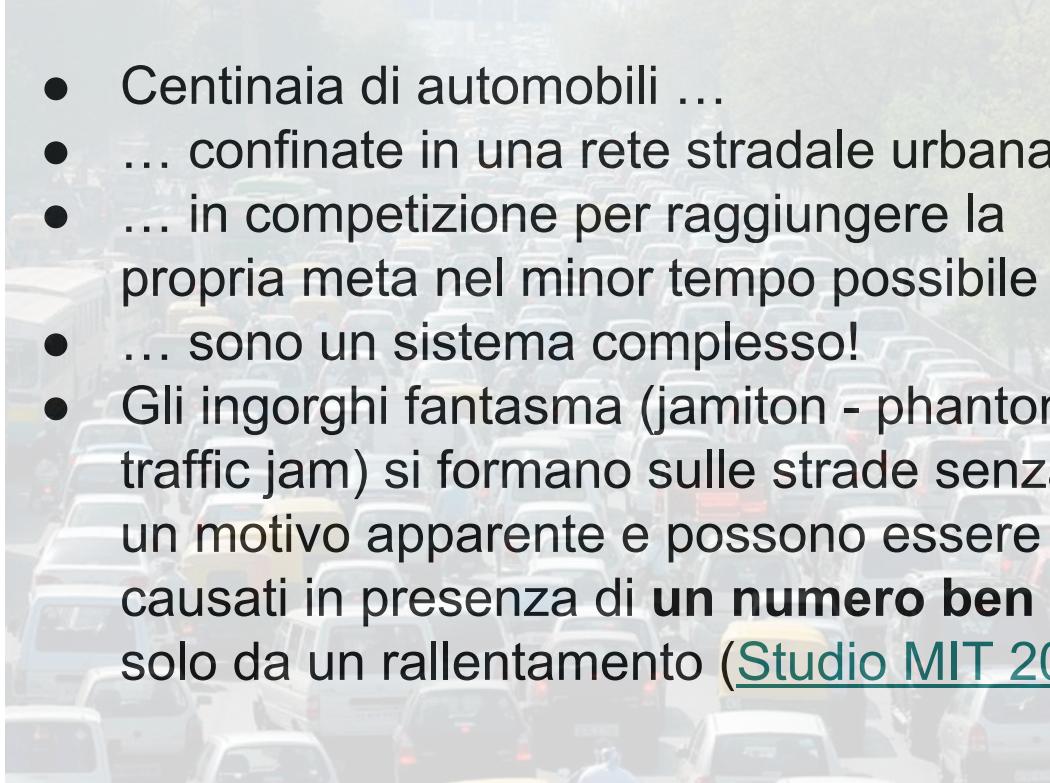
# Descrizione “dinamica” di un sistema complesso

E’ un sistema:

- costituito da numerosi elementi ...
- ... interagenti tra loro ...
- ... all’interno di un ambiente confinato ...
- ... che cooperano o entrano in competizione per accaparrarsi delle risorse limitate.

# Lo strano caso degli INGORGHI FANTASMA

- Centinaia di automobili ...
- ... confinate in una rete stradale urbana ...
- ... in competizione per raggiungere la propria meta nel minor tempo possibile ...
- ... sono un sistema complesso!
- Gli ingorghi fantasma (jamiton - phantom traffic jam) si formano sulle strade senza un motivo apparente e possono essere causati in presenza di **un numero ben preciso** di automobili anche solo da un rallentamento ([Studio MIT 2009](#)).



# La dinamica degli ingorghi fantasma

Il fenomeno appena descritto è un'onda, descrivibile matematicamente

- solitaria
- autorinforzante
- **che si sposta senza cambiare forma**
- e che è **indipendente dagli “elementi” che la costituiscono.**

Per chiarire tutto con un video (anzi due ...)

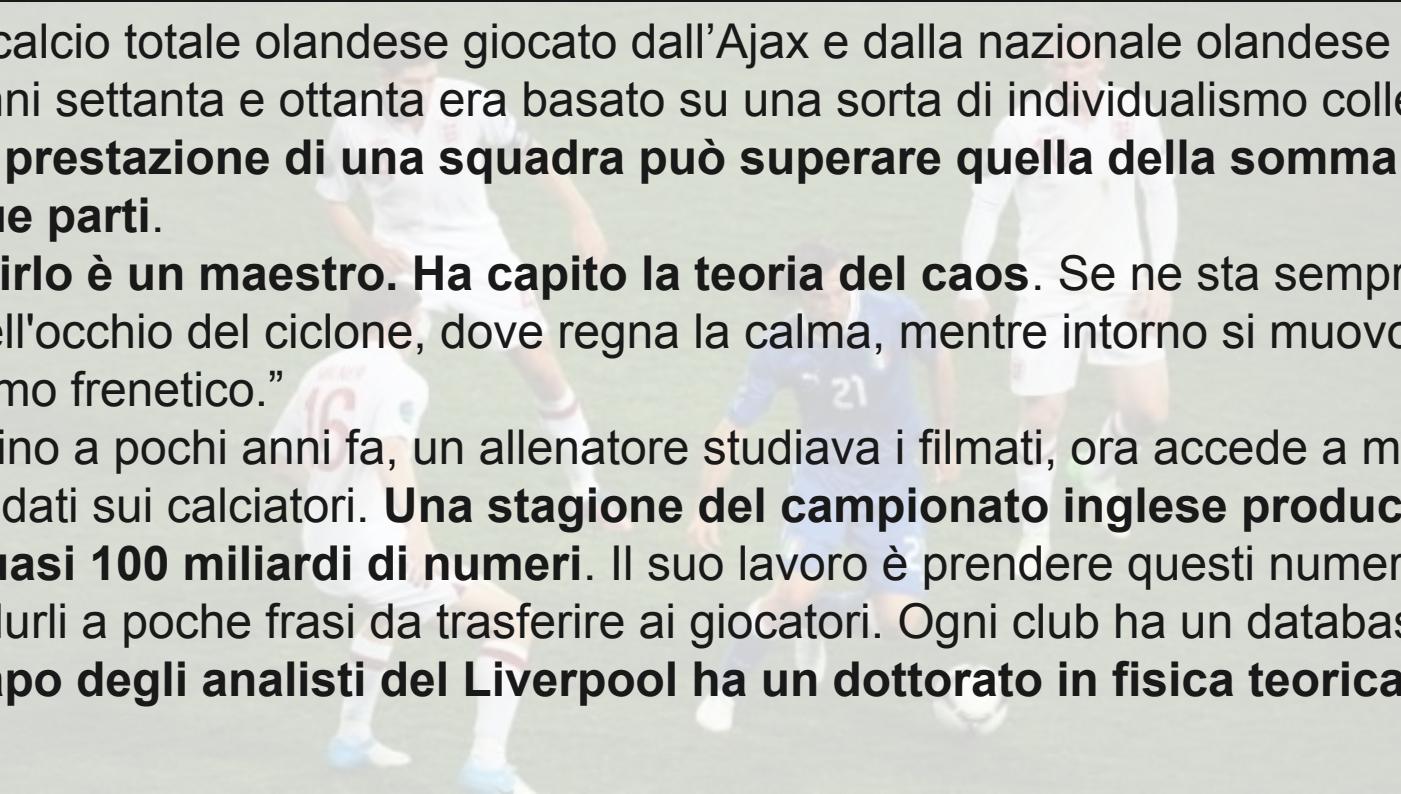
- [Come nasce un jamiton \(dal vivo\)](#)
- [Simulazione di un jamiton](#) (dal canale youtube del MIT)

# Descrizione “topologica” di un sistema complesso

E' un sistema:

- composto da una rete di nodi ...
- ... **collegati** tra loro per mezzo di link  
(legami) ...
- ... che esprimono **relazioni** di qualsiasi tipo  
tra i nodi stessi.

# Quando la scienza scende in campo

- 
- Il calcio totale olandese giocato dall'Ajax e dalla nazionale olandese negli anni settanta e ottanta era basato su una sorta di individualismo collettivo: **la prestazione di una squadra può superare quella della somma delle sue parti.**
  - **"Pirlo è un maestro. Ha capito la teoria del caos.** Se ne sta sempre nell'occhio del ciclone, dove regna la calma, mentre intorno si muovono a ritmo frenetico."
  - "Fino a pochi anni fa, un allenatore studiava i filmati, ora accede a migliaia di dati sui calciatori. **Una stagione del campionato inglese produce quasi 100 miliardi di numeri.** Il suo lavoro è prendere questi numeri e ridurli a poche frasi da trasferire ai giocatori. Ogni club ha un database. **Il capo degli analisti del Liverpool ha un dottorato in fisica teorica.**"

# Lo strano caso della OLA MEXICANA

Anche il fenomeno della Ola Mexicana negli stadi è stato descritto matematicamente.

Una ola ha sempre le seguenti caratteristiche.

- velocità di propagazione: 12 metri/sec
- larghezza: dai 6 ai 12 metri
- senso di rotazione quasi sempre orario.

Ipotesi di partenza:

- gli spettatori (elementi) possono avere tre tipi di comportamento: eccitato, attivo, passivo
- gli spettatori imitano il comportamento altrui (fondamento neurologico: neuroni specchio)



# Atomi sociali e “sociofisica”

- Quando siamo in un ingorgo stradale possiamo fare ben poche cose, a parte aspettare che l'ingorgo si risolva.
- Quindi la nostra identità conta ben poco: siamo come particelle indistinguibili di un'unica vasta struttura collettiva.
- Un fisico direbbe che i nostri “gradi di libertà” sono limitati.
- Quando siamo in uno stadio valgono considerazioni analoghe.
- In due parole siamo “**Atomi sociali**” ([Mark Buchanan, 2008](#)).
- Per decifrare le dinamiche della società Buchanan propone di pensare alle persone come atomi che seguono regole abbastanza semplici: nasce la “fisica sociale” o “sociofisica”.

# Sociofisica: alcune ricerche

- Quando scegliamo tra due prodotti identici ci comportiamo *come* le colonie di formiche in presenza di due identiche sorgenti di cibo.
- Politica, elezioni: quando discutiamo dei candidati le nostre opinioni si influenzano e competono tra loro *come* momenti magnetici elementari.
- Le forti diseguaglianze nella distribuzione della ricchezza in una popolazione di individui dotati delle medesime capacità emergono da *dinamiche simili* a quelle della formazione dei terremoti ([effetto S. Matteo](#))
- L'adozione di strategie casuali può migliorare l'efficienza delle organizzazioni sociali gerarchiche e delle istituzioni politiche proprio *come* piccole dosi di rumore migliorano l'efficienza e la stabilità di sistemi fisici e biologici ([principio di Peter](#)).

Spunti di riflessione - Emergentismo

# Verso una nuova umanità?

*Nei sistemi complessi costituiti da numerosi elementi interagenti emergono proprietà non riconducibili a quelle dei singoli elementi costituenti.*

Philip Warren Anderson

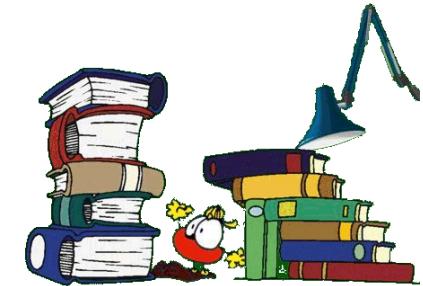
*Credo che l'uomo, come specie, si trovi di fronte a una svolta della sua storia, e che già ora sussista potenzialmente la possibilità di procedere verso un imprevedibile sviluppo superiore dell'umanità.*

Konrad Lorenz

# Per approfondire

## Libri

- [Una fortuna cosmica / Paul Davies. - Mondadori, 2007.](#)
- [L'atomo sociale / Mark Buchanan. - Mondadori, 2008.](#)
- [Caos / James Gleick. - Rizzoli, 1989.](#)
- [La complessità dell'Universo / Giuliano Romano. Gremese, 2008.](#)
- [La geometria della natura / Benoit B. Mandelbrot. - Teoria, 1989.](#)



## Video

- [Frattali: l'ordine oltre il disordine. | Giuseppe Mingione \(Università di Parma\) | TEDxArezzo](#)
- [Esempio di evoluzione del John Conway's Game of Life](#)
- [Esempio di evoluzione dell'automa cellulare Sandpile di Bak, Tang e Wiesenfeld](#)

## Articoli divulgativi

- [David Sumpter: "L'Euclide dei nostri anni? È Lionel Messi" \(Repubblica, 14/10/2017\)](#)
- [La matematica del gol \(Le scienze, 04/09/2017\)](#)

## Simulazioni on line

- [John Conway's Game of Life \(sito MIT\)](#)
- [Modelli vari di automi cellulari tra cui Life, Forest Fire e Sandpile \(NetLogo web\)](#)

# Titoli di coda

Grazie!

davide.bettati@gmail.com

THANK YOU