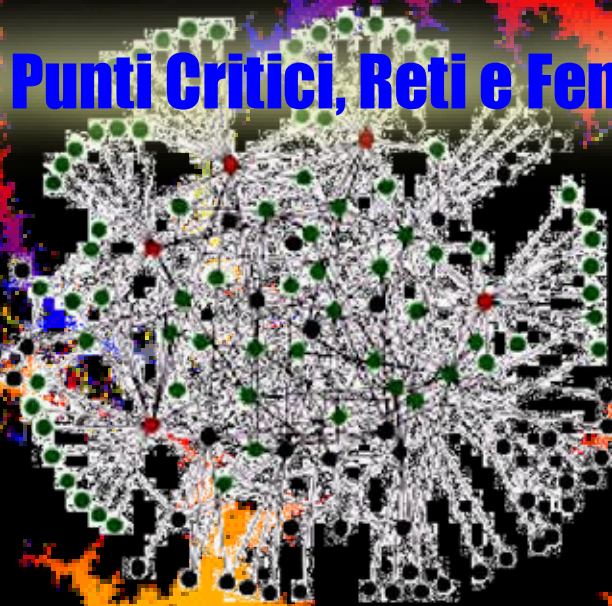


Introduzione alla Nuova Scienza della Complessità

Simulazioni, Punti Critici, Reti e Fenomeni Emergenti

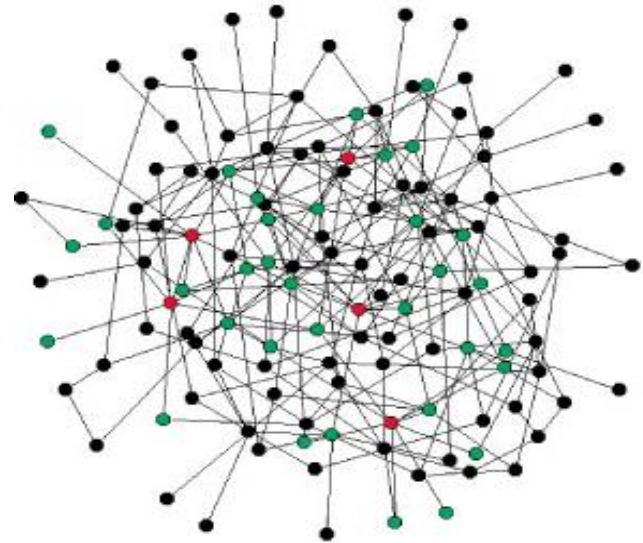


Due possibili descrizioni di un sistema complesso

Da un **punto di vista dinamico** è possibile descrivere un sistema complesso come un insieme costituito da numerosi elementi, detti anche “**agenti**” (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...), che **interagiscono** tra loro di solito in maniera **non lineare** spostandosi all'interno di un certo **spazio** (reale o virtuale) e secondo certe regole:



Da un **punto di vista topologico** (cioè se ci interessa invece sapere “chi interagisce con chi”) è anche possibile descrivere un sistema complesso come una **rete** (network) costituita da un certo numero di **nodi** (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...) collegati tra loro per mezzo di **links** che esprimono delle relazioni tra i nodi:

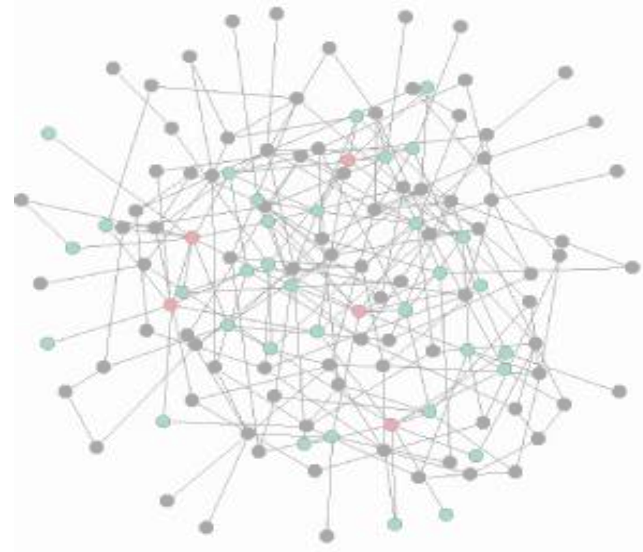


Due possibili descrizioni di un sistema complesso

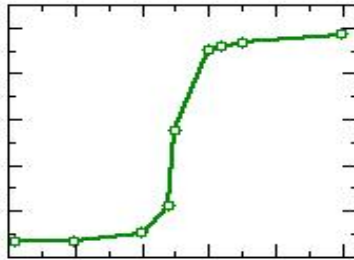
Da un **punto di vista dinamico** è possibile descrivere un sistema complesso come un insieme costituito da numerosi elementi, detti anche “**agenti**” (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...), che **interagiscono** tra loro di solito in maniera **non lineare** spostandosi all'interno di un certo **spazio** (reale o virtuale) e secondo certe regole:



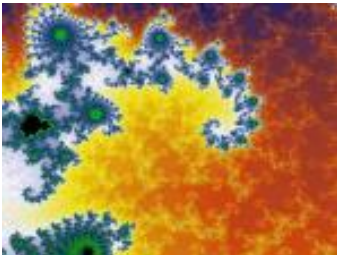
Da un punto di vista topologico (cioè se ci interessa invece sapere “chi interagisce con chi”) è anche possibile descrivere un sistema complesso come una rete (network) costituita da un certo numero di nodi (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...) collegati tra loro per mezzo di links che esprimono delle relazioni tra i nodi:



**Non linearità e
Soglie Critiche**



**Autosimilarità e
Invarianza di Scala**



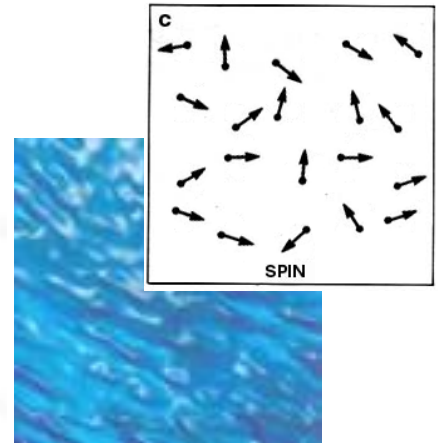
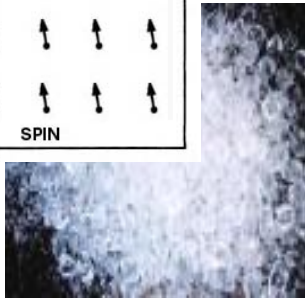
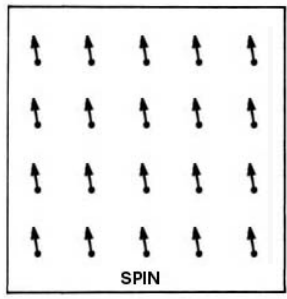
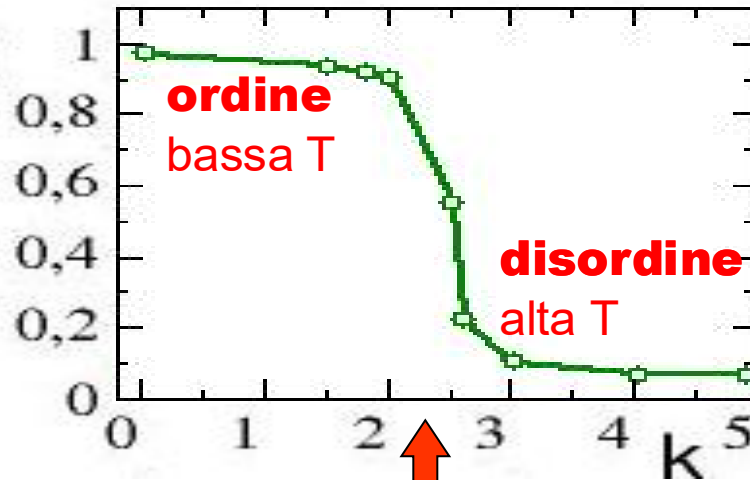
**Proprietà tipiche
dei sistemi complessi**

Dal Punto Critico allo Stato Critico...

Riassumendo, abbiamo visto che dal punto di vista **dinamico**, a causa di **fenomeni cooperativi ed effetti moltiplicativi**, la **non linearità** spesso si manifesta attraverso la presenza di **SOGLIE CRITICHE**, dopo le quali la **struttura spaziale** di un sistema e/o il suo **comportamento nel tempo** cambia drasticamente...

parametro d'ordine

→ M



parametro di controllo

ad es. la temperatura dell'acqua o di un magnete

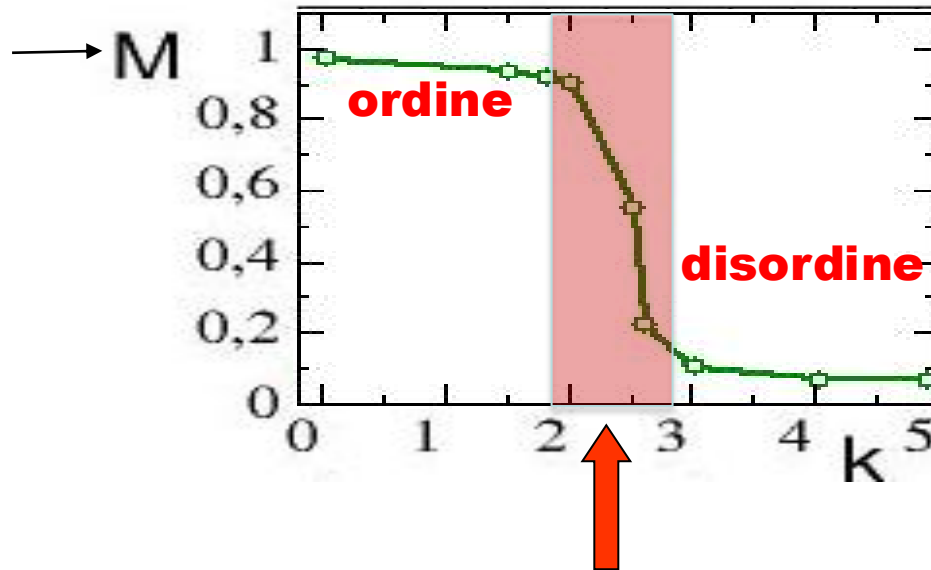
Temperatura Critica

Bisogna regolare il parametro di controllo per portare il sistema al punto critico

Dal Punto Critico allo Stato Critico...

In molti **sistemi complessi** questi fenomeni cooperativi sono ancora più eclatanti e fanno sì che essi si portino **SPONTANEMENTE** alla soglia critica e si stabilizzino in un quello che viene chiamato **STATO CRITICO**, situato al confine tra ordine e disordine, **senza bisogno di regolare alcun parametro di controllo...**

**parametro
d'ordine**



**parametro di
controllo**



Stato Critico

**Il sistema si porta SPONTANEMENTE
nello stato critico**

Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfeld**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della **“Criticità Auto-Organizzata”** (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa **“firma matematica”**....



Valanghe

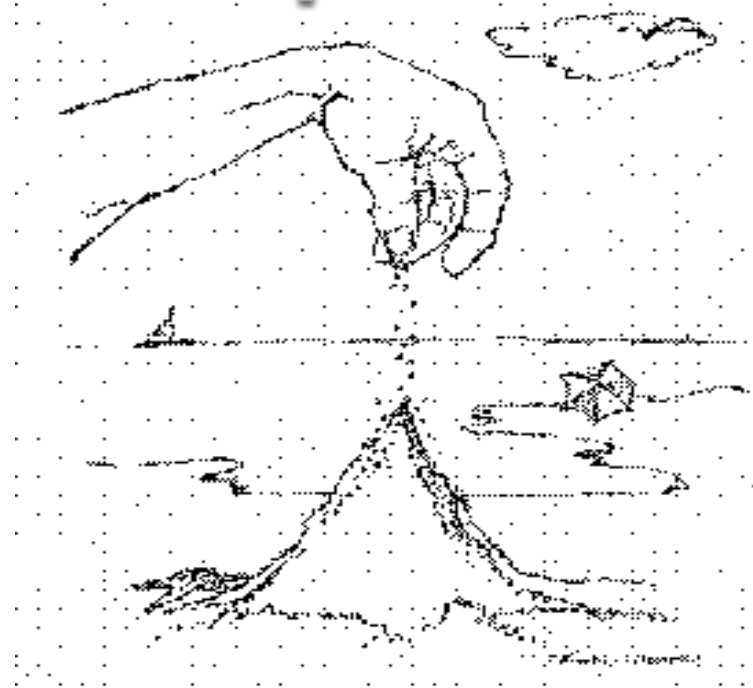


Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfeld**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della “**Criticità Auto-Organizzata**” (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa “**firma matematica**”....



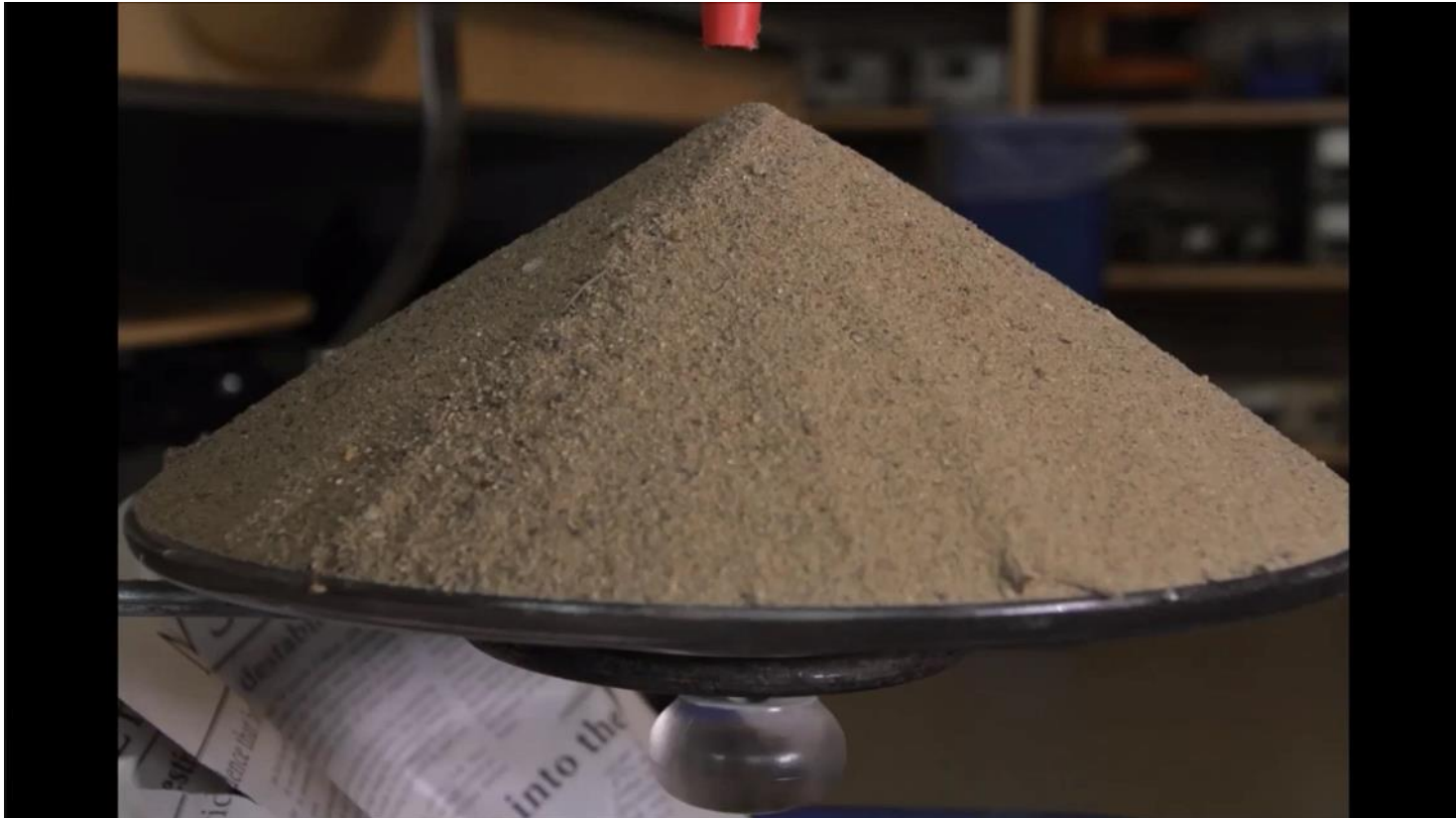
Sandpile Model



P.Bak, C.Tang and K.Weisenfeld, PRL 59 (1987)

Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Wiesenfeld**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della **“Criticità Auto-Organizzata”** (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa **“firma matematica”**....



Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della **“Criticità Auto-Organizzata”** (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa **“firma matematica”**....



Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della **“Criticità Auto-Organizzata”** (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa **“firma matematica”**....

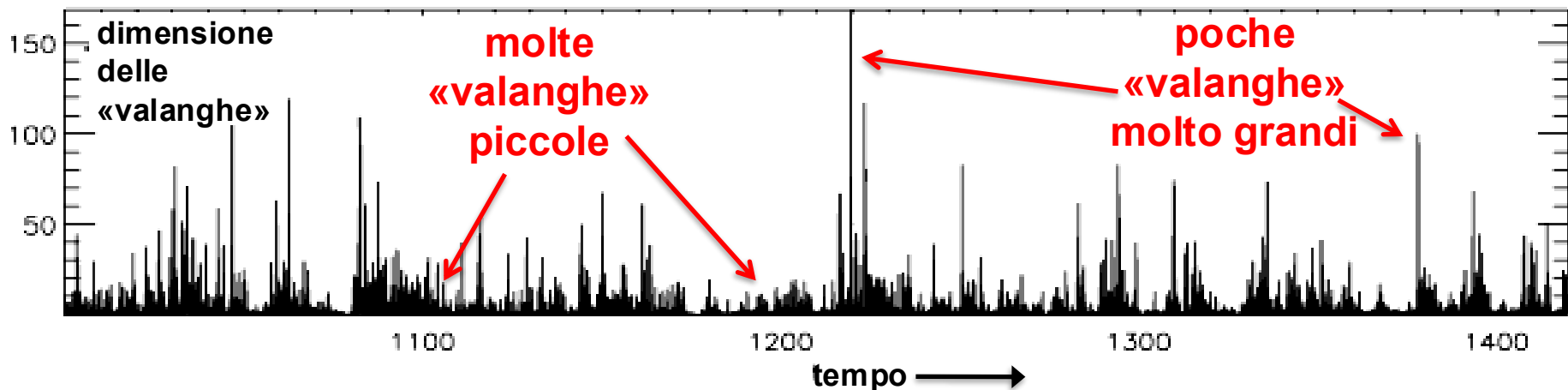


Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della “**Criticità Auto-Organizzata**” (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa “**firma matematica**”....



**EFFETTO
DOMINO!**

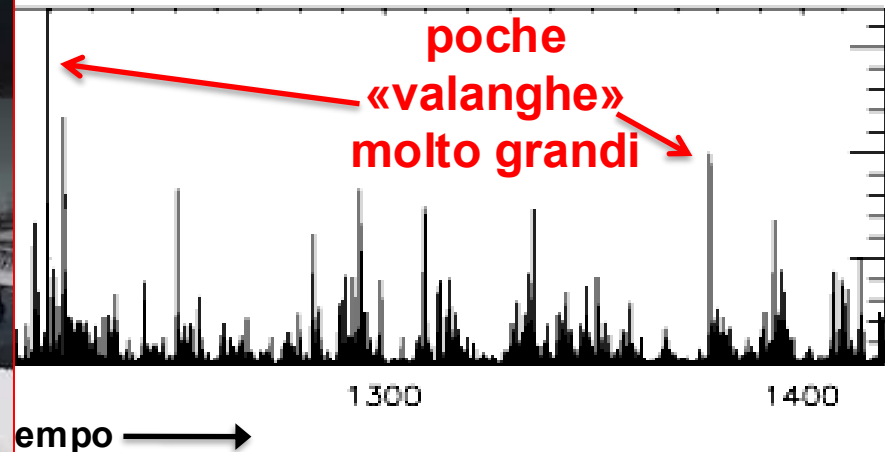
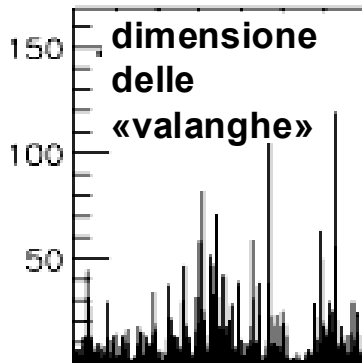


Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della “**Criticità Auto-Organizzata**” (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa “**firma matematica**”....



EFFETTO DOMINO!

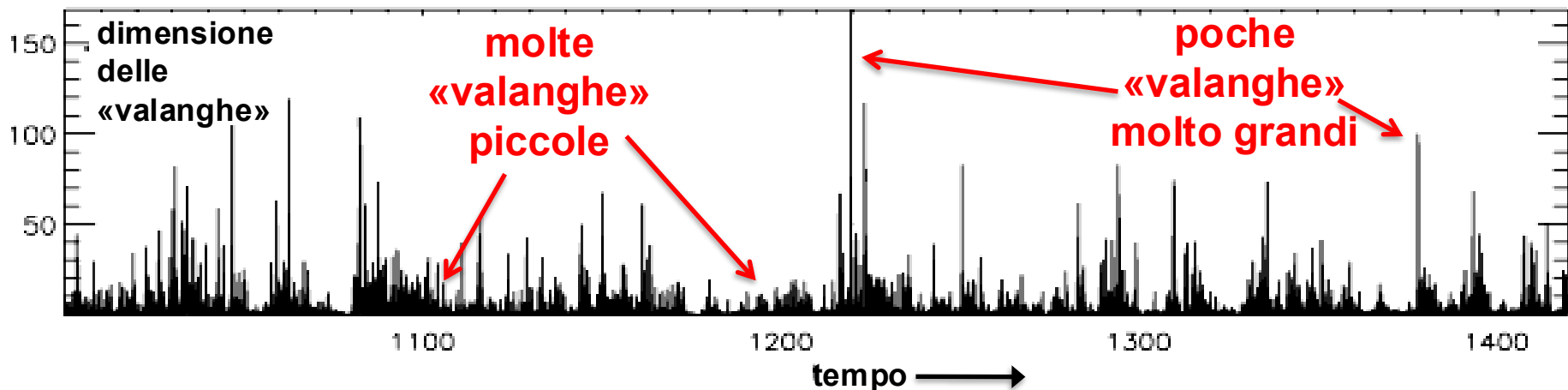


Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle «valanghe»** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della **«Criticità Auto-Organizzata»** (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa **«firma matematica»**....

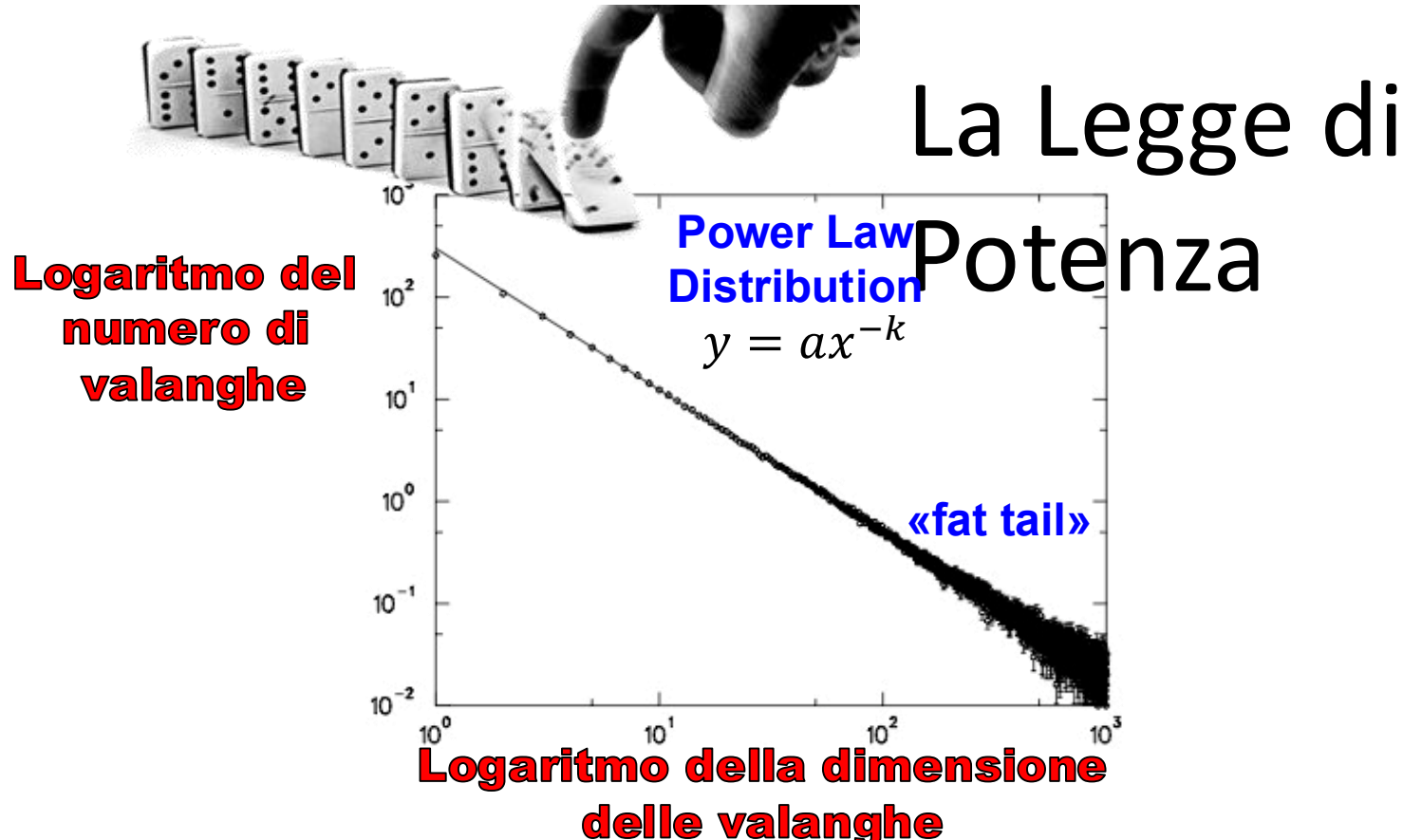


Ma che forma ha la distribuzione statistica di queste «valanghe»? Qual è la sua «firma matematica»?



Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Wiesenfeld**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della “**Criticità Auto-Organizzata**” (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa “**firma matematica**”....



Generare Complessità: La Criticità Auto-Organizzata

Negli anni Ottanta, studiando la **formazione delle “valanghe”** in un mucchietto di sabbia, tre ricercatori americani, **Per Bak, Chao Tang e Kurt Weisenfield**, scoprirono un importante meccanismo basato sull'effetto domino in grado di condurre spontaneamente molti sistemi complessi nello **Stato Critico**: si tratta della “**Criticità Auto-Organizzata**” (SOC), un processo dinamico caratterizzato statisticamente da una ben precisa “**firma matematica**”....



**Esempio:
gli incendi**



La Legge di
Potenza



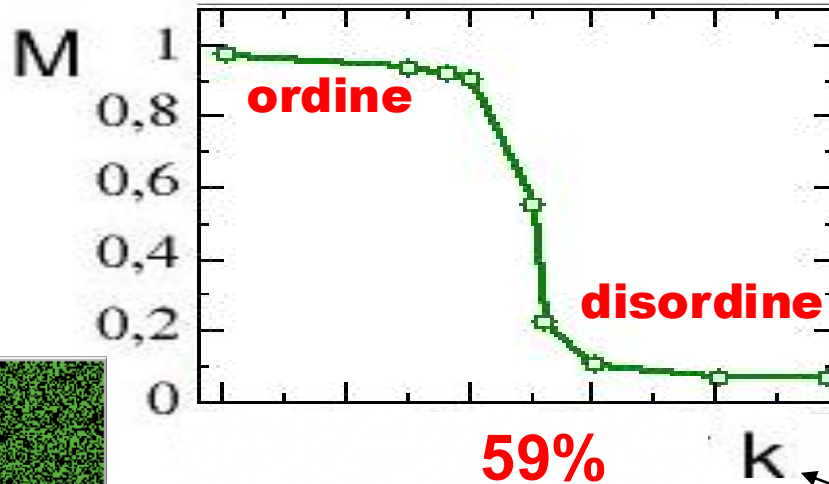
La Criticità Auto-organizzata e gli Incendi

Reminder...

Nella lezione scorsa abbiamo fatto vedere che esiste una densità critica di alberi nella foresta (intorno al 59%) sotto la quale non si propaga alcun incendio, ma sopra la quale qualsiasi incendio distrugge tutta la foresta

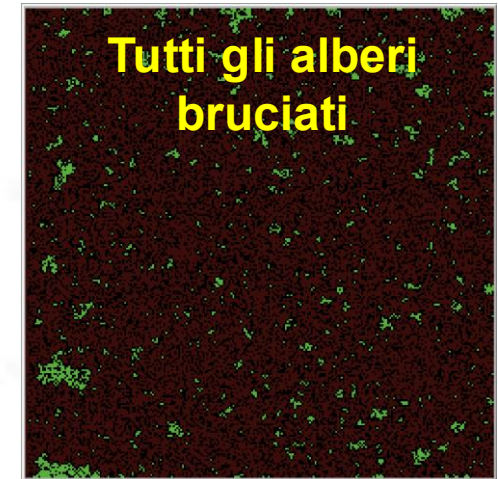
parametro d'ordine

% di alberi non bruciati



59%

Densità Critica



parametro di controllo

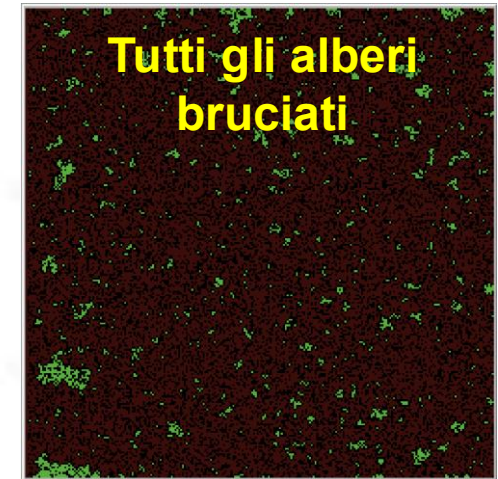
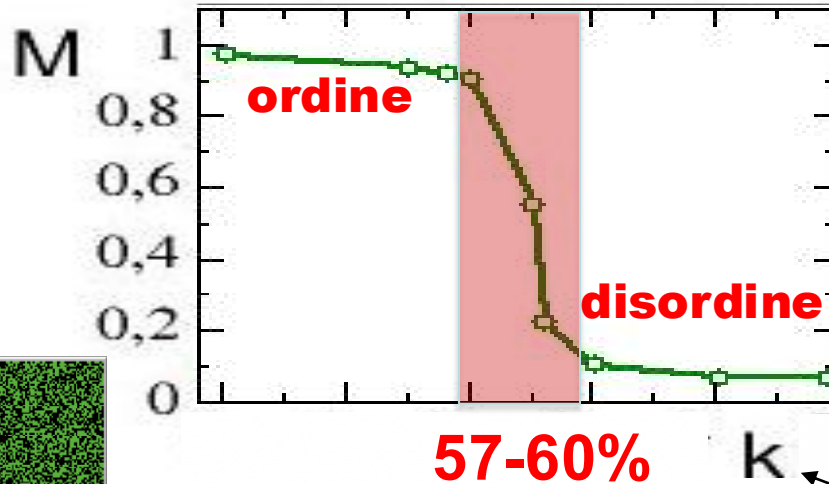
Densità degli alberi

La Criticità Auto-organizzata e gli Incendi

Negli incendi reali il sistema si porta SPONTANEMENTE in prossimità di questa soglia critica, e si stabilizza in uno stato critico, al confine tra ordine e disordine, dove non riesce a decidersi tra le due situazioni (nessun albero bruciato o tutti gli alberi bruciati): statisticamente ci saranno molti incendi piccoli, pochi grandi e pochissimi enormi, secondo una legge di potenza!

parametro d'ordine

% di alberi non bruciati

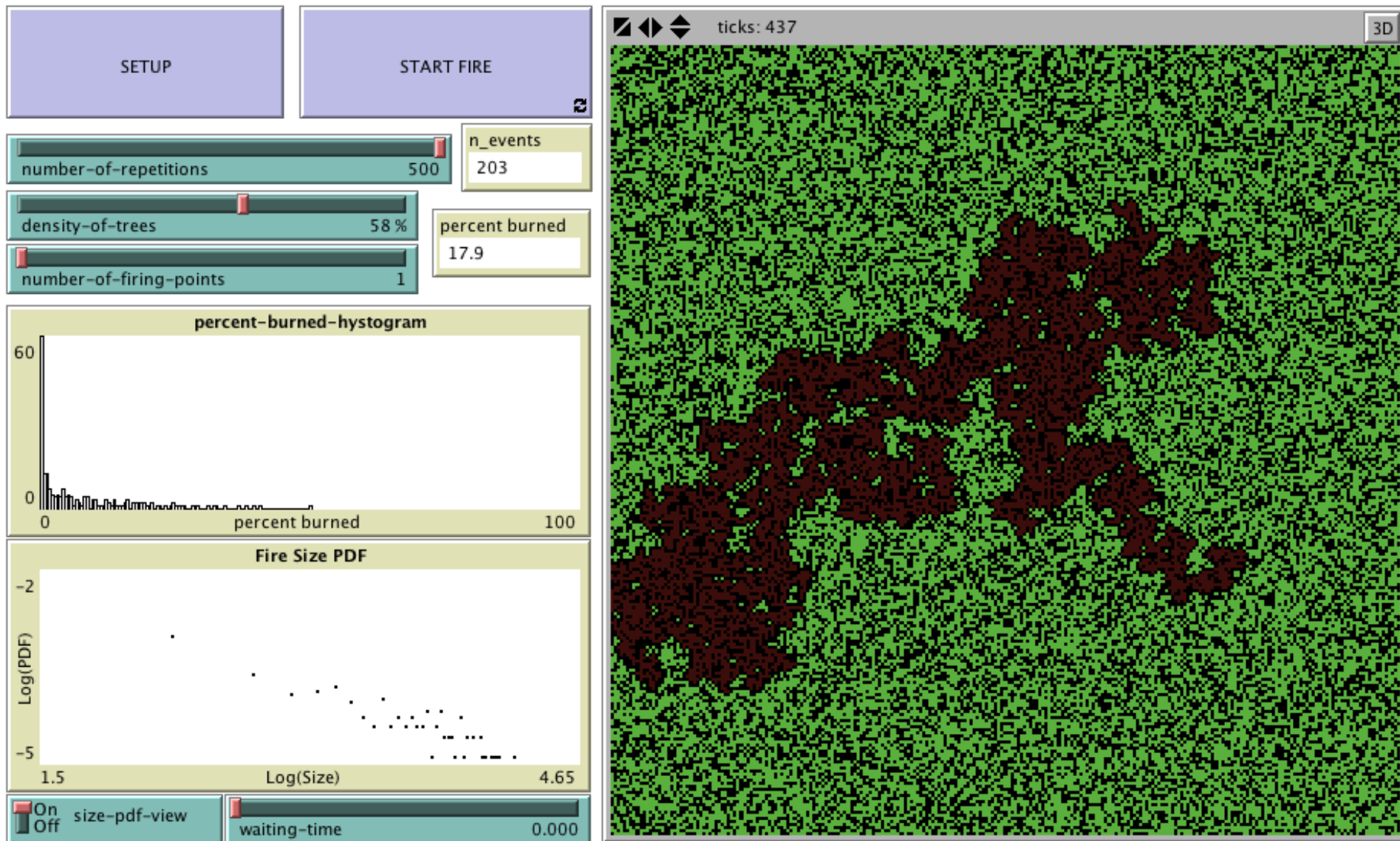


parametro di controllo

Densità degli alberi

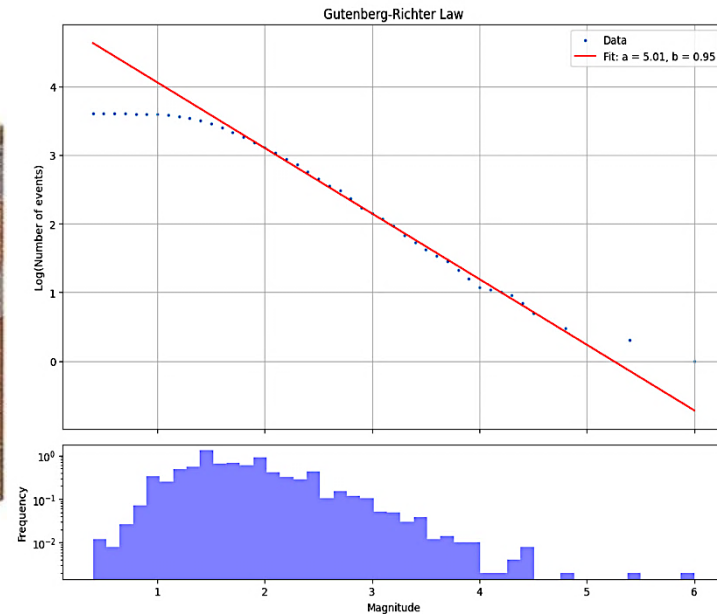
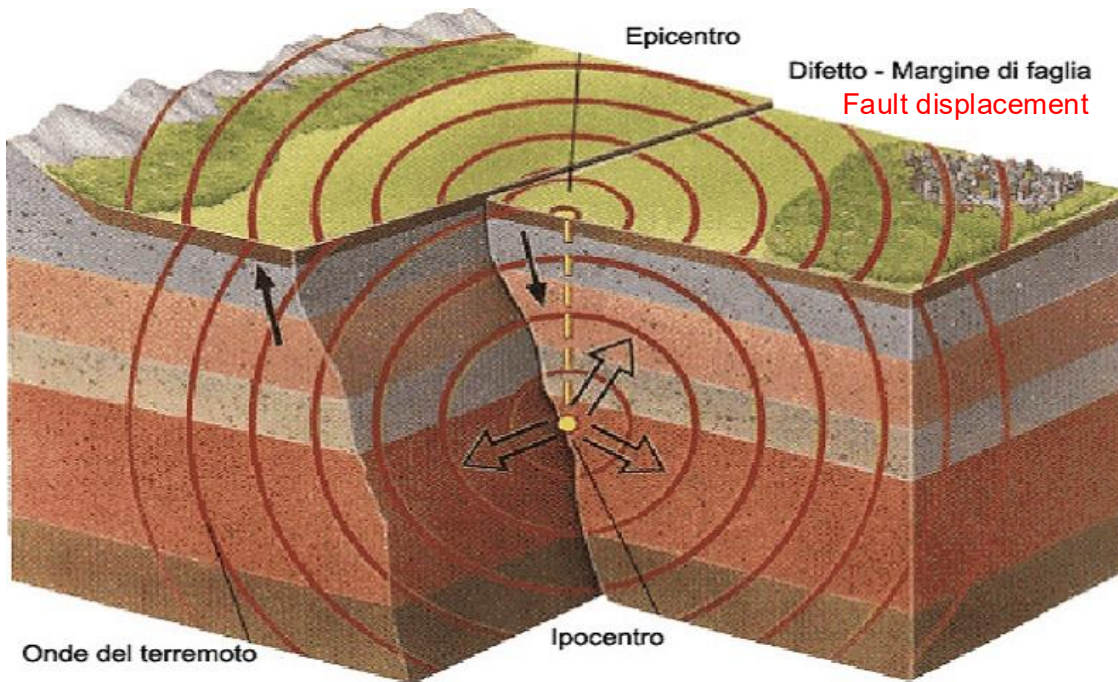
Stato Critico

La Criticità Auto-organizzata e gli Incendi



La Criticità Auto-organizzata e i Terremoti: il modello OFC

Nel 1992, Olami, Feder e Christensen provarono ad estendere il fenomeno della criticità auto-organizzata all'ambito sismico proponendo un modello semplificato di formazione dei terremoti che, sfruttando l'effetto domino, riusciva a riprodurre alcune leggi fondamentali già note – come la legge di Gutenberg-Richter (power-law) o la legge di Omori (aftershocks)



In [sismologia](#), la **legge di Gutenberg-Richter**^{[1][2]} esprime la relazione fra la **magnitudo nella scala Richter** e il numero del totale dei **terremoti almeno** di quella magnitudo in una data regione e periodo di tempo.

$$\log N = a - bM \quad \longrightarrow \quad N = 10^{a-bM}$$

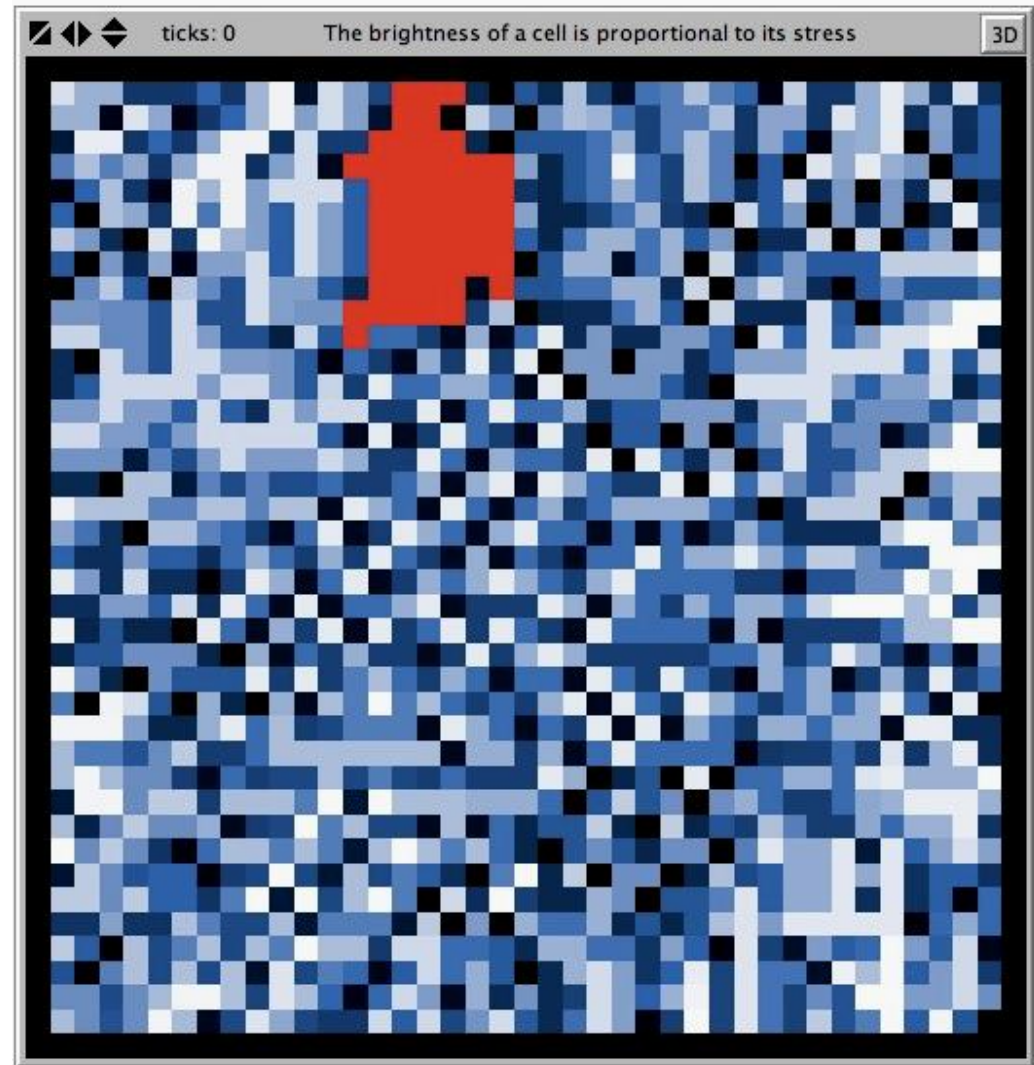


La Criticità Auto-organizzata e i Terremoti: il modello OFC

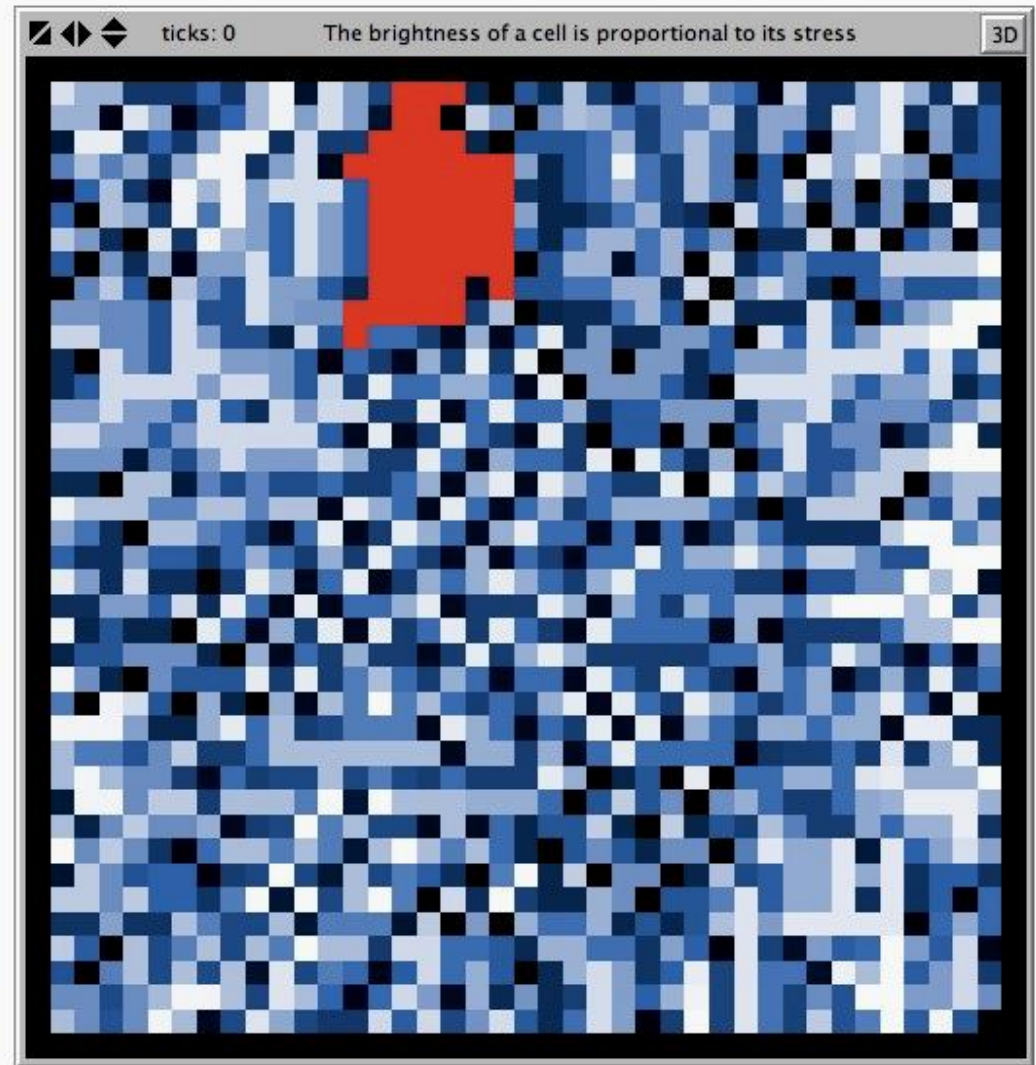
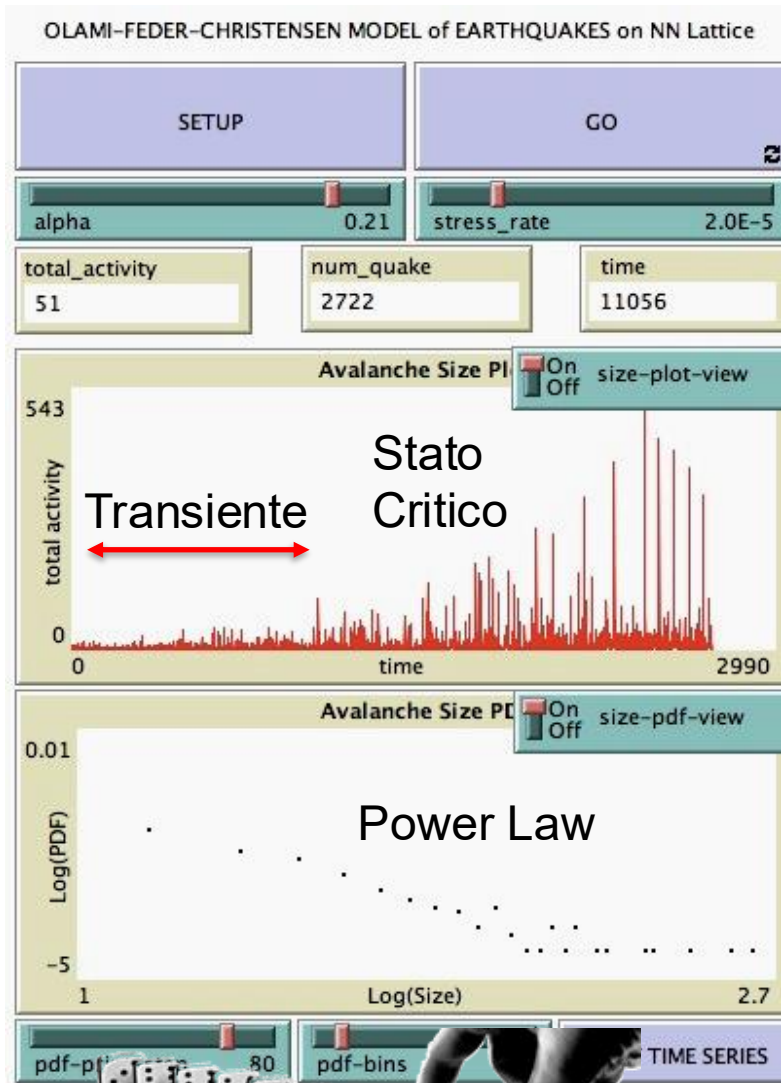
Nel **modello OFC** ogni celletta simula un blocco di crosta terrestre soggetto a uno **stress sismico** F_i (l'intensità del colore blu è proporzionale allo stress). Inizialmente lo stress su ogni celletta è distribuito casualmente, poi viene fatto **aumentare gradualmente in maniera uniforme** per simulare ad esempio uno spostamento di faglia. Appena lo stress su una certa celletta supera la **soglia critica** F_{th} (uguale per tutte le cellette) parte **l'effetto domino**: la celletta in questione (colorata in rosso) scarica tutto il suo stress sulle cellette vicine (secondo un certo fattore di **dissipazione** regolato dal parametro α), che a loro volta, grazie a questo surplus di stress, potrebbero superare la soglia (diventando rosse) e scaricare sulle vicine, e così via, finchè non ci sono più celle che superano la soglia.

$$F_i \geq F_{th} \Rightarrow \begin{cases} F_i \rightarrow 0, \\ F_{nn} \rightarrow F_{nn} + \alpha F_i \end{cases}$$

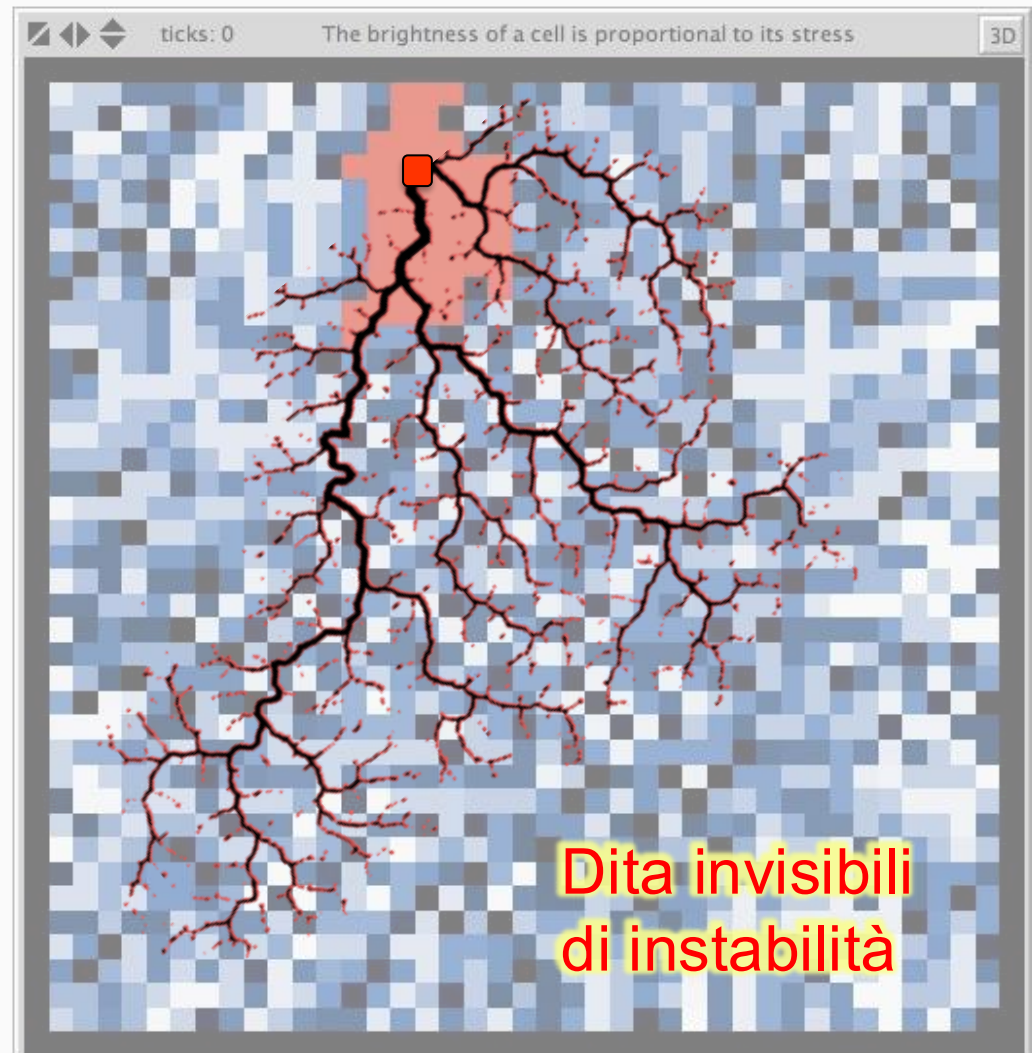
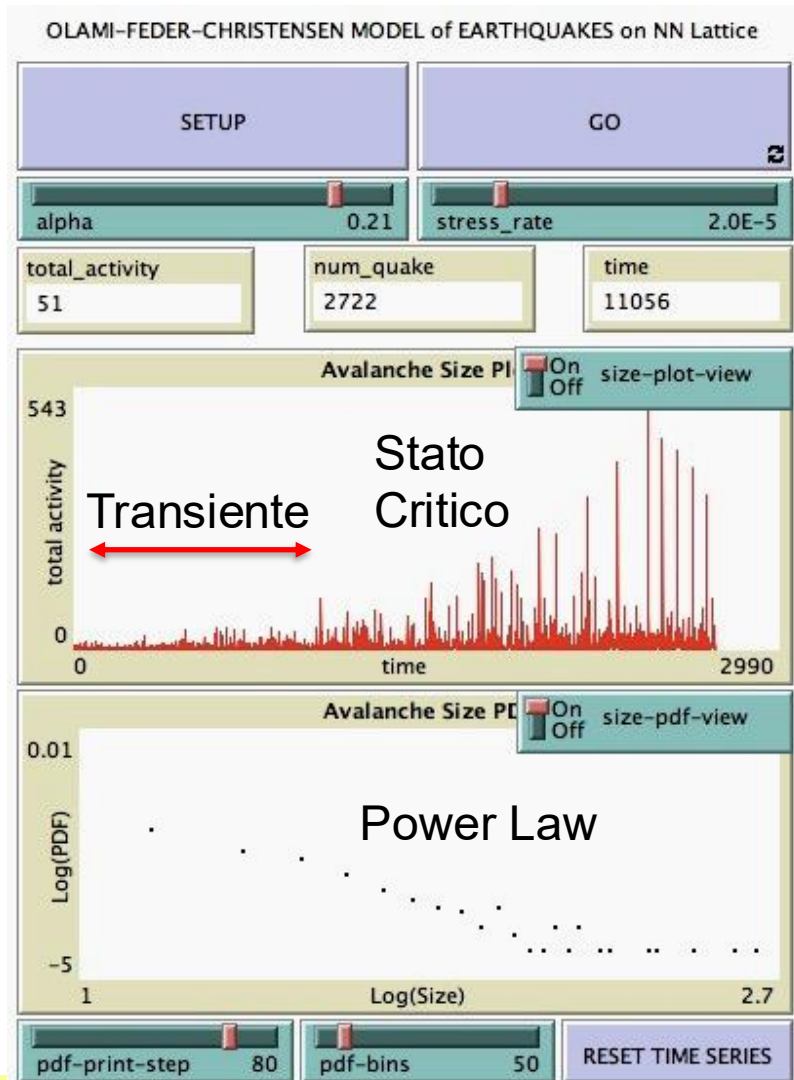
Il **numero totale di celle rosse** alla fine dell'evento sismico rappresenta la sua «**size**», o dimensione, legata (nella realtà) all'energia rilasciata.



La Criticità Auto-organizzata e i Terremoti: il modello OFC



La Criticità Auto-organizzata e i Terremoti: il modello OFC



La dinamica dello stato critico implica quindi che **tutti i terremoti (così come le valanghe o gli incendi) nascono «piccoli»**. Se e quanto diventeranno «grandi», dipende solo dalle **dita invisibili di instabilità** che percorrono il sistema. Per questo motivo, **prevedere** l'occorrenza di questi eventi estremi in sistemi nello stato critico è di fatto **impossibile**.



uragani

terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre

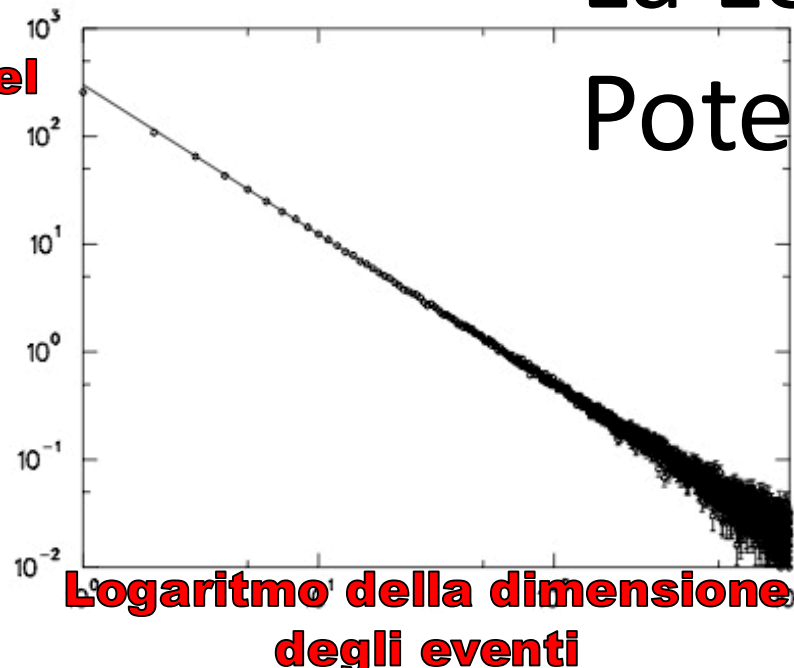


epidemie

I **sistemi complessi** che si auto-organizzano nello **stato critico** si trovano in una condizione di estrema **instabilità e intermittenza**, molto sensibile alle condizioni iniziali e fortemente dipendente dalla storia passata del sistema, nella quale **cause** anche molto **piccole** possono essere amplificate per «effetto domino», in maniera **imprevedibile**, da “dita invisibili” di instabilità, fino a produrre **effetti** (“eventi”: terremoti, uragani, incendi, etc...) di qualunque dimensione, distribuiti a legge di potenza!

La Legge di Potenza

**Logaritmo del
numero di
eventi**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre

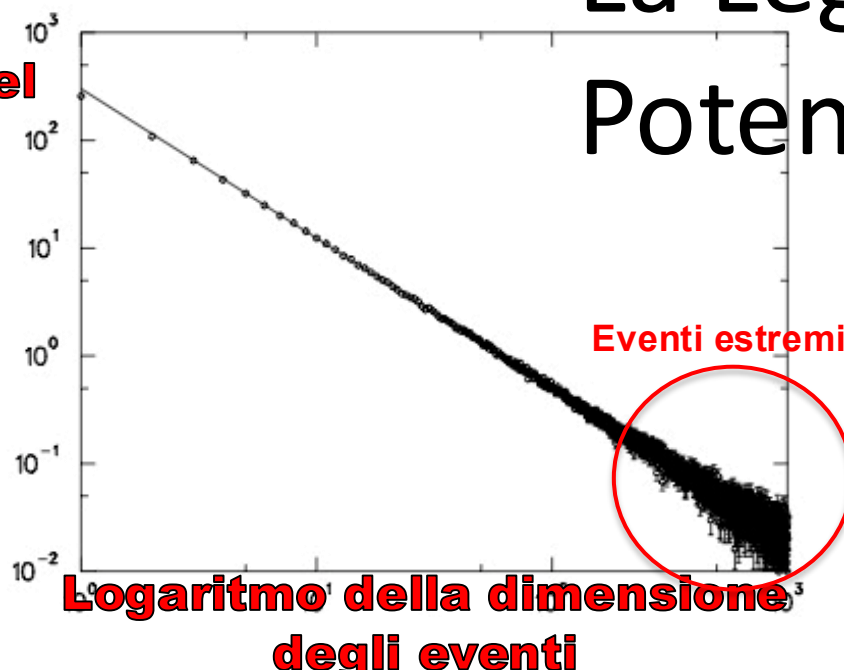


epidemie

I **sistemi complessi** che si auto-organizzano nello **stato critico** si trovano in una condizione di estrema **instabilità e intermittenza**, molto sensibile alle condizioni iniziali e fortemente dipendente dalla storia passata del sistema, nella quale **cause** anche molto **piccole** possono essere amplificate per «effetto domino», in maniera **imprevedibile**, da “dita invisibili” di instabilità, fino a produrre **effetti** (“eventi”: terremoti, uragani, incendi, etc...) di qualunque dimensione, distribuiti a legge di potenza!

La Legge di Potenza

**Logaritmo del
numero di
eventi**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



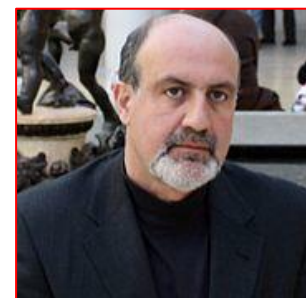
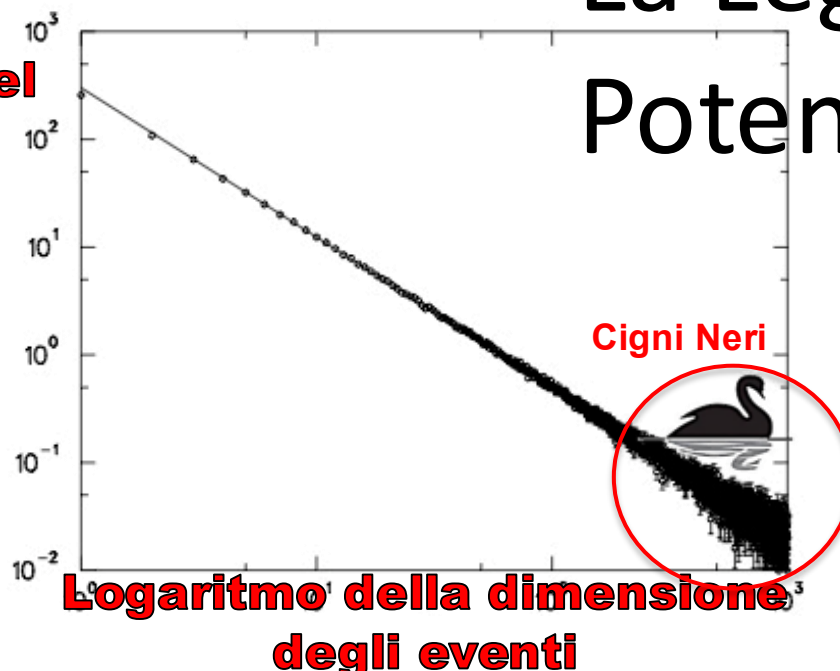
epidemie

I **sistemi complessi** che si auto-organizzano nello **stato critico** si trovano in una condizione di estrema **instabilità e intermittenza**, molto sensibile alle condizioni iniziali e fortemente dipendente dalla storia passata del sistema, nella quale **cause** anche molto **piccole** possono essere amplificate per «effetto domino», in maniera **imprevedibile**, da “dita invisibili” di instabilità, fino a produrre **effetti** (“eventi”: terremoti, uragani, incendi, etc...) di qualunque dimensione, distribuiti a legge di potenza!

La Legge di Potenza



**Logaritmo del
numero di
eventi**



**Nassim
Nicholas
Taleb**



uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**



crolli in Borsa



guerre



epidemie



La Legge di



**Esempi di
eventi estremi**





uragani



terremoti



incendi

estinzioni



cambiamenti di paradigma

crolli in Borsa



guerre

epidemie

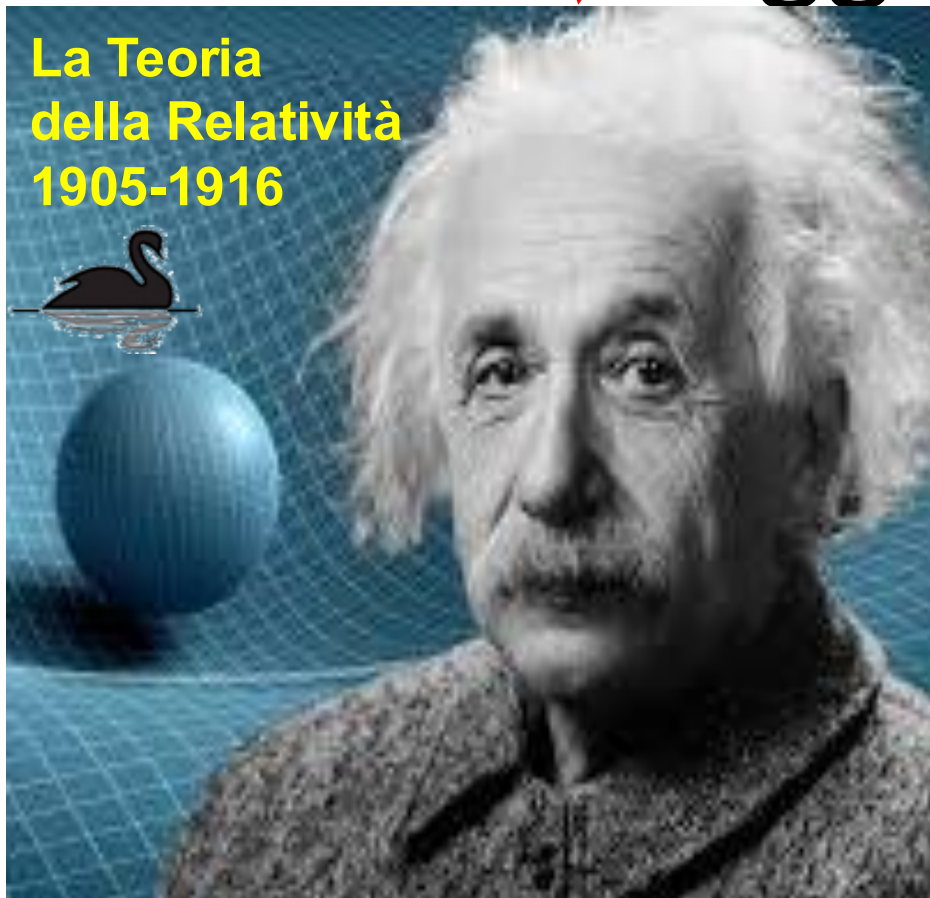


La Legge di



**Esempi di
eventi estremi**

**La Teoria
della Relatività
1905-1916**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**



crolli in Borsa



guerre



epidemie

La Legge di Potenza

**Esempi di
eventi estremi**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



epidemie



**Esempi di
eventi estremi**



**L'incendio di
Yellowstone
del 1988**



1988



Lo Yellowstone National Park brucia

La Legge di Potenza





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

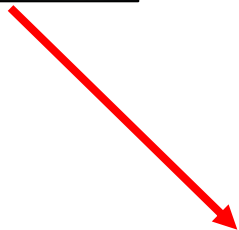
crolli in Borsa



guerre



epidemie



**Esempi di
eventi estremi**



**L'uragano Andrew
del 1992**

La Legge di

a





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**



crolli in Borsa



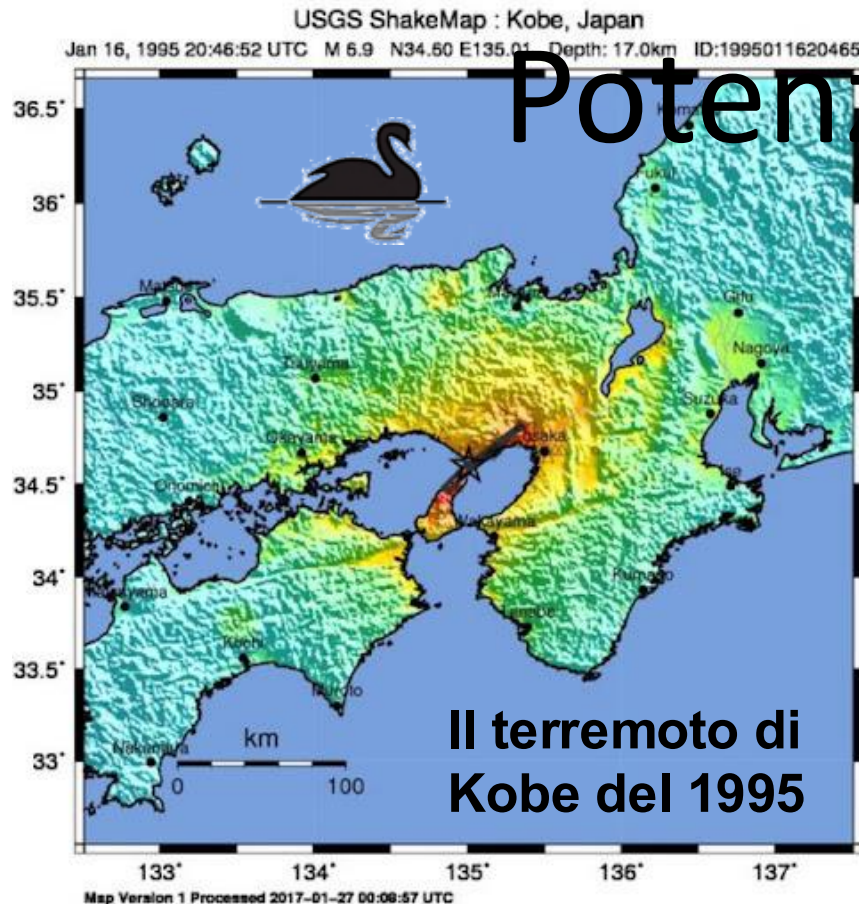
guerre



epidemie

**Esempi di
eventi estremi**

La Legge di Potenza





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



epidemie

La Legge di

**Esempi di
eventi estremi**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**



crolli in Borsa



guerre

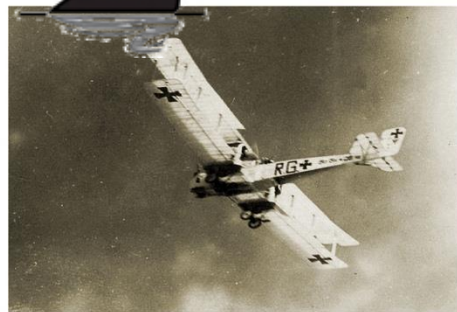


epidemie

**Esempi di
eventi estremi**



**La Prima Guerra
Mondiale (1914)**



**La Legge di
Potenza**





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



epidemie

La Legge di



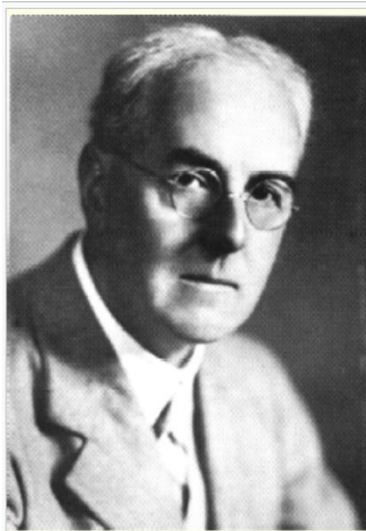
**Esempi di
eventi estremi**



**La Prima Guerra
Mondiale (1914)**



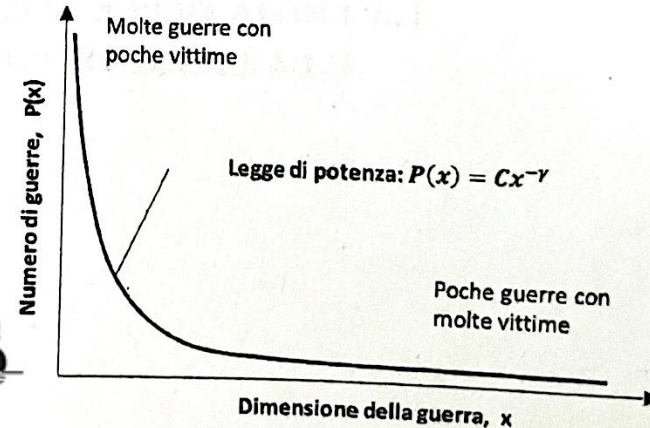
Potenza



**Lewis Fly Richardson
(1881-1953)**

Figura 4.1 – Legge di potenza per i conflitti tra il 1820 e il 1945

Dimensione della guerra (x)	Numero di guerre P(x)
Circa 1.000 vittime	188
Circa 10.000 vittime	63
Circa 100.000 vittime	24
Circa 1.000.000 vittime	5
Circa 10.000.000 vittime	2



Fonte: Axelrod e Cohen, 1999, p. 105



uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



epidemie

La Legge di





uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**



crolli in Borsa



guerre



epidemie

La Legge di Potenza



**Evidentemente dipenderà dalle
dita invisibili di instabilità nei
rapporti internazionali...**





uragani

terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



epidemie

SOCIETÀ

Iran, escalation militare e rischi per il Medio Oriente

di **Andrea Gaiardoni**

La Legge di Potenza

12 MARZO 2016

CONDIVIDI



Majid Asgaripour/WANA (West Asia News Agency) via REUTERS



uragani



terremoti



incendi



estinzioni



cambiamenti di paradigma

crolli in Borsa



guerre



epidemie



La Legge di

Ebbene, credo sia ormai chiaro perché il mondo umano è così interessante. Abbiamo visto che, a molti livelli, è realmente soggetto alle stesse fluttuazioni del mucchietto di sabbia o del magnete nel punto critico e, come quei due sistemi, è caratterizzato da un'accresciuta capacità di diffusione delle influenze. Se la struttura sociale e politica del mondo è davvero organizzata in tal modo, dovremo imparare a considerare naturale l'imprevisto. Oggi viviamo in un'epoca relativamente pacifica. Può darsi che la relativa calma duri un altro secolo, come può darsi che entro cinque anni scoppi un'altra guerra mondiale; chi può dirlo? Il nostro paese potrebbe sopravvivere ancora cinquecento anni o sgretolarsi fra trenta. Se il mondo è critico, si potranno analizzare le cause locali e si potrà cercare di capire in che modo le forze politiche e sociali determinino qui e là cambiamenti storici; ma se gli esiti finali di un evento dipendono dalla maniera in cui gli elementi in gioco si collegano per produrre dita di instabilità che percorrono il mondo intero, diventa praticamente impossibile prevedere il futuro. Insomma non si può presupporre che le tendenze persistano e l'unica cosa che si può prevedere è che il futuro continui a sfuggire alla nostra comprensione. Proprio per questo, forse, la storia è interessante: non è né statica né casualmente mutevole, ma si trova in equilibrio precario tra l'uno e l'altro polo, sicché, come il mucchio di sabbia, è sempre sull'orlo di sconvolgimenti drammatici.



**Mark Buchanan
2001**



uragani



terremoti



incendi



estinzioni



**cambiamenti
di paradigma**

crolli in Borsa



guerre



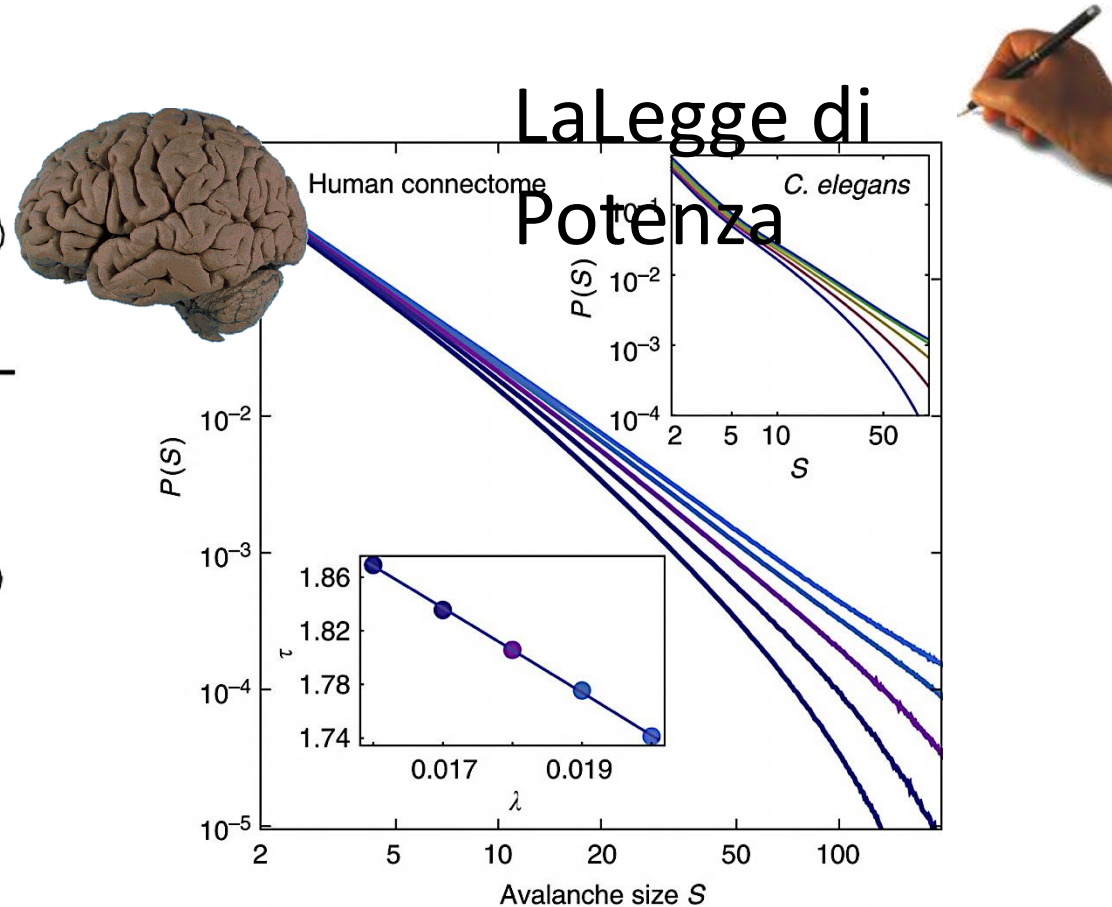
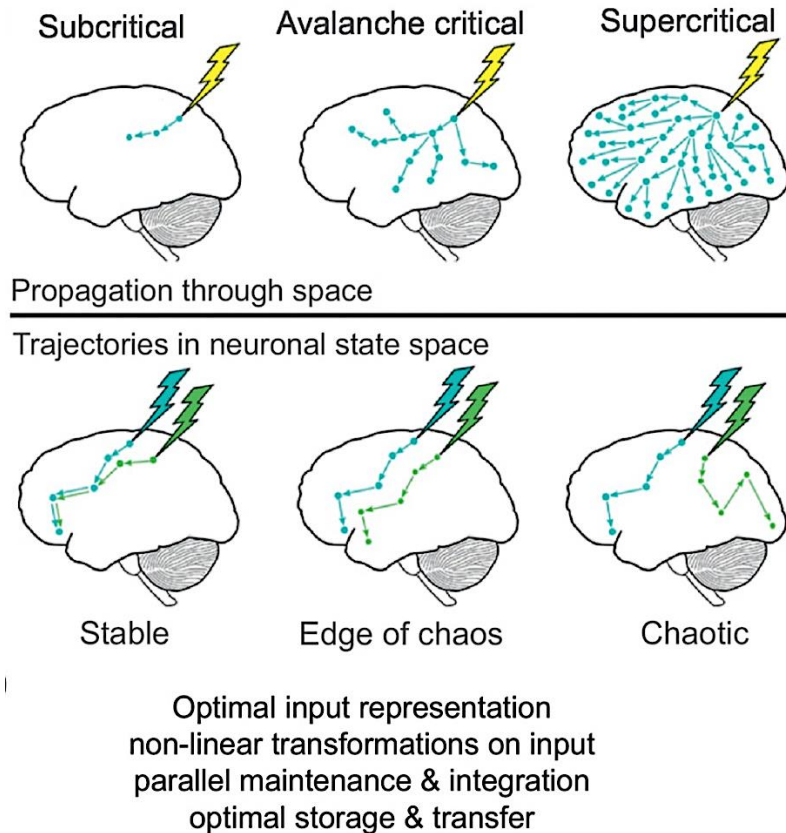
epidemie

Ebbene, credo sia ormai chiaro perché il mondo umano è così interessante. Abbiamo visto che, a molti livelli, è realmente soggetto alle stesse fluttuazioni del mucchietto di sabbia o del magnete nel punto critico e, come quei due sistemi, è caratterizzato da un'accresciuta capacità di diffusione delle influenze. Se la struttura sociale e politica del mondo è davvero organizzata in tal modo, dovremo imparare a considerare naturale l'imprevisto. Oggi viviamo in un'epoca relativamente pacifica. Può darsi che la relativa calma duri un altro secolo, come può darsi che entro cinque anni scoppi un'altra guerra mondiale; chi può dirlo? Il nostro paese potrebbe sopravvivere ancora cinquecento anni o sgretolarsi fra trenta. Se il mondo è critico, si potranno analizzare le cause locali e si potrà cercare di capire in che modo le forze politiche e sociali determinino qui e là cambiamenti storici; ma se gli esiti finali di un evento dipendono dalla maniera in cui gli elementi in gioco si collegano per produrre dita di instabilità che percorrono il mondo intero, diventa praticamente impossibile prevedere il futuro. Insomma non si può presupporre che le tendenze persistano e l'unica cosa che si può prevedere è che il futuro continui a sfuggire alla nostra comprensione. Proprio per questo, forse, la storia è interessante: non è né statica né casualmente mutevole, ma si trova in equilibrio precario tra l'uno e l'altro polo, sicché, come il mucchio di sabbia, è sempre sull'orlo di sconvolgimenti drammatici.

Well then, I believe it is now clear why the human world is so interesting. We have seen that, at many levels, it is truly subject to the same fluctuations as a pile of sand or a magnet at the critical point and, like those two systems, it is characterized by an increased capacity for the diffusion of influences. If the social and political structure of the world is really organized in this way, we must learn to consider the unexpected as natural. Today we live in a relatively peaceful era. It may be that this relative calm will last another century, or it may be that another world war will break out within five years—who can say? Our country might survive for another five hundred years or crumble within thirty. If the world is critical, one can analyze local causes and try to understand how political and social forces determine historical changes here and there; but if the final outcomes of an event depend on the way the elements involved connect to produce waves of instability that spread across the entire world, then predicting the future becomes practically impossible. In short, we cannot assume that trends will persist, and the only thing that can be predicted is that the future will continue to elude our understanding. Precisely for this reason, perhaps, history is interesting: it is neither static nor randomly mutable, but exists in a precarious balance between the two poles and, like a pile of sand, is always on the verge of dramatic upheavals.

Criticità Auto-organizzata nel Cervello Umano

RECENTEMENTE SI E' SCOPERTO CHE ANCHE IL NOSTRO CERVELLO SI TROVA NELLO "**STATO CRITICO**" E PRESENTA "VALANGHE" DI SCARICHE NEURONALI SINCRONIZZATE DI TUTTE LE DIMENSIONI...

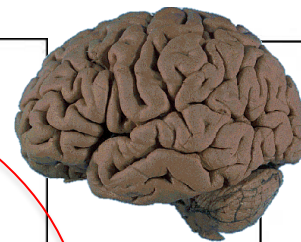
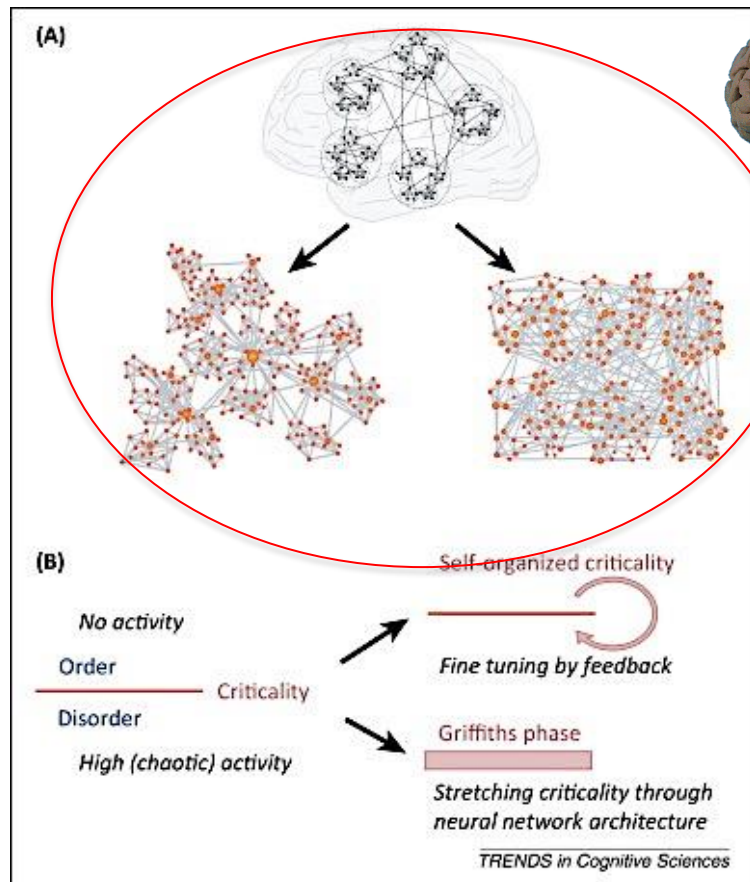


O'Byrne, Jordan et al. Trends in Neurosciences, Volume 45, Issue 11, 820 - 837

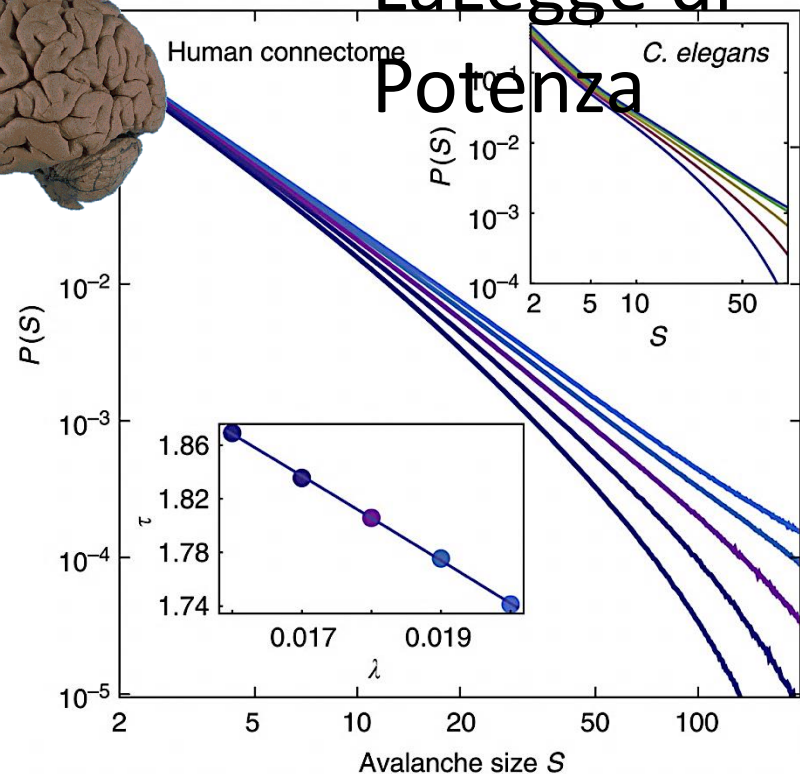
P.Moretti, M.A.Munoz, "Griffiths phases and the stretching of criticality in brain networks", Nature Communications 4, 2521 (2013)

Criticità Auto-organizzata nel Cervello Umano

RECENTEMENTE SI E' SCOPERTO CHE ANCHE IL NOSTRO CERVELLO SI TROVA NELLO “**STATO CRITICO**” E PRESENTA “VALANGHE” DI SCARICHE NEURONALI SINCRONIZZATE DI TUTTE LE DIMENSIONI... **MA IN QUESTO, COME VEDREMO, GIOCA UN RUOLO IMPORTANTE ANCHE LA SUA TOPOLOGIA...**



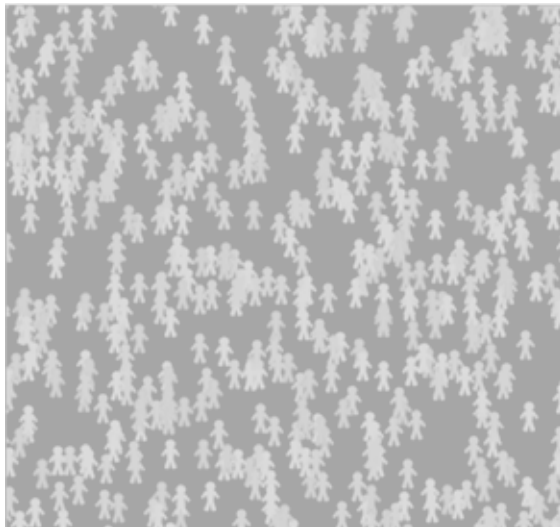
La Legge di
Potenza



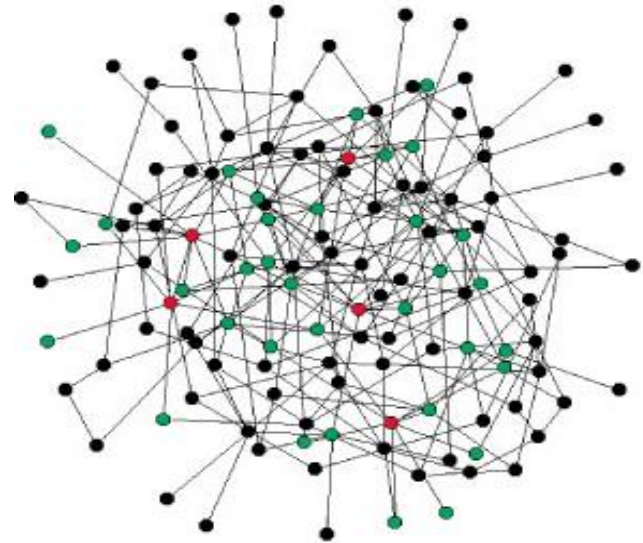
P.Moretti, M.A.Munoz, “Griffiths phases and the stretching of criticality in brain networks”, Nature Communications 4, 2521 (2013)

Due possibili descrizioni di un sistema complesso

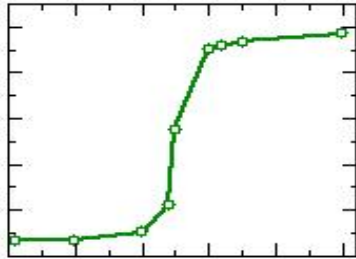
Da un punto di vista dinamico è possibile descrivere un sistema complesso come un insieme costituito da numerosi elementi, detti anche “agenti” (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...), che interagiscono tra loro di solito in maniera non lineare spostandosi all'interno di un certo spazio (reale o virtuale) e secondo certe regole:



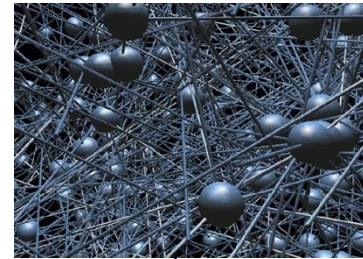
Da un **punto di vista topologico** (cioè se ci interessa invece sapere “chi interagisce con chi”) è anche possibile descrivere un sistema complesso come una **rete** (network) costituita da un certo numero di **nodi** (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...) collegati tra loro per mezzo di **links** che esprimono delle relazioni tra i nodi:



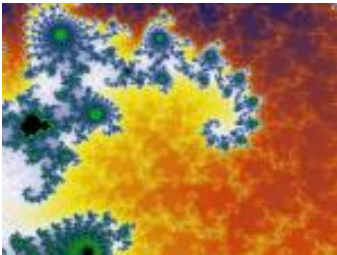
**Non linearità e
Soglie Critiche**



**Reti Complesse tra
Ordine e Disordine**



**Autosimilarità e
Invarianza di Scala**

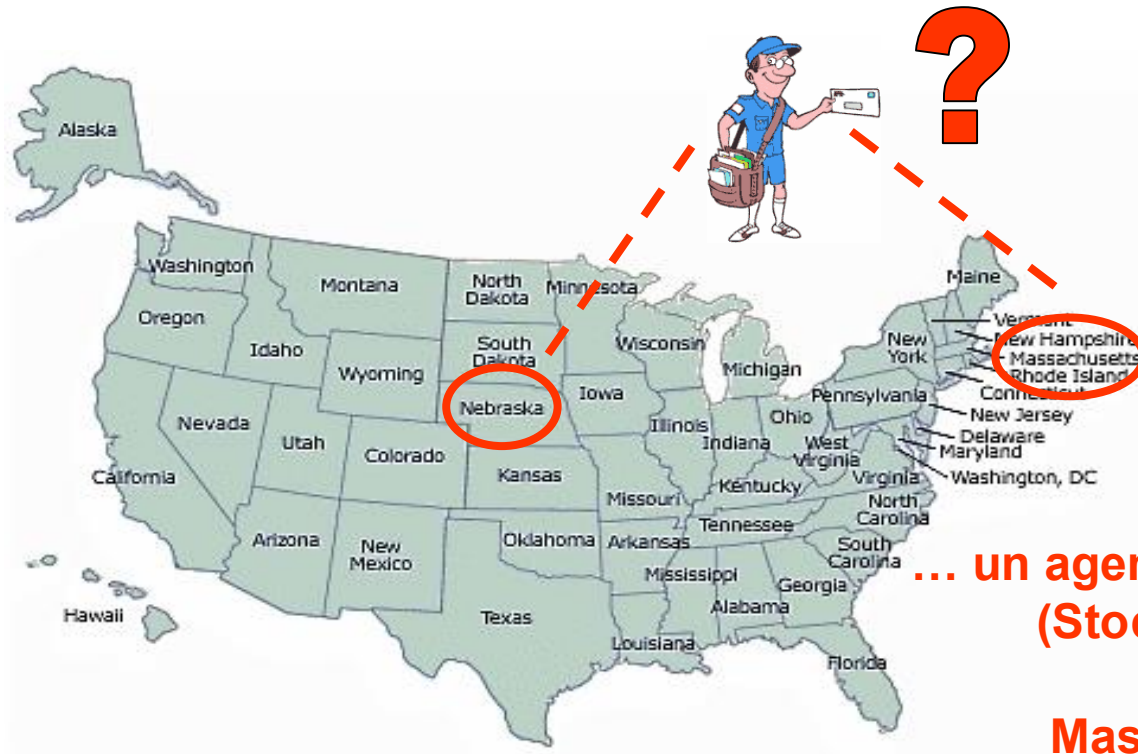


**Proprietà tipiche
dei sistemi complessi**



L'esperimento di Stanley Milgram (Harvard, anni '60)

160 persone
prese a caso ad
Omaha,
Nebraska...



... un agente di Borsa
(Stockbroker) di
Boston,
Massachusetts

Quanti passaggi li separano?

...la risposta è:

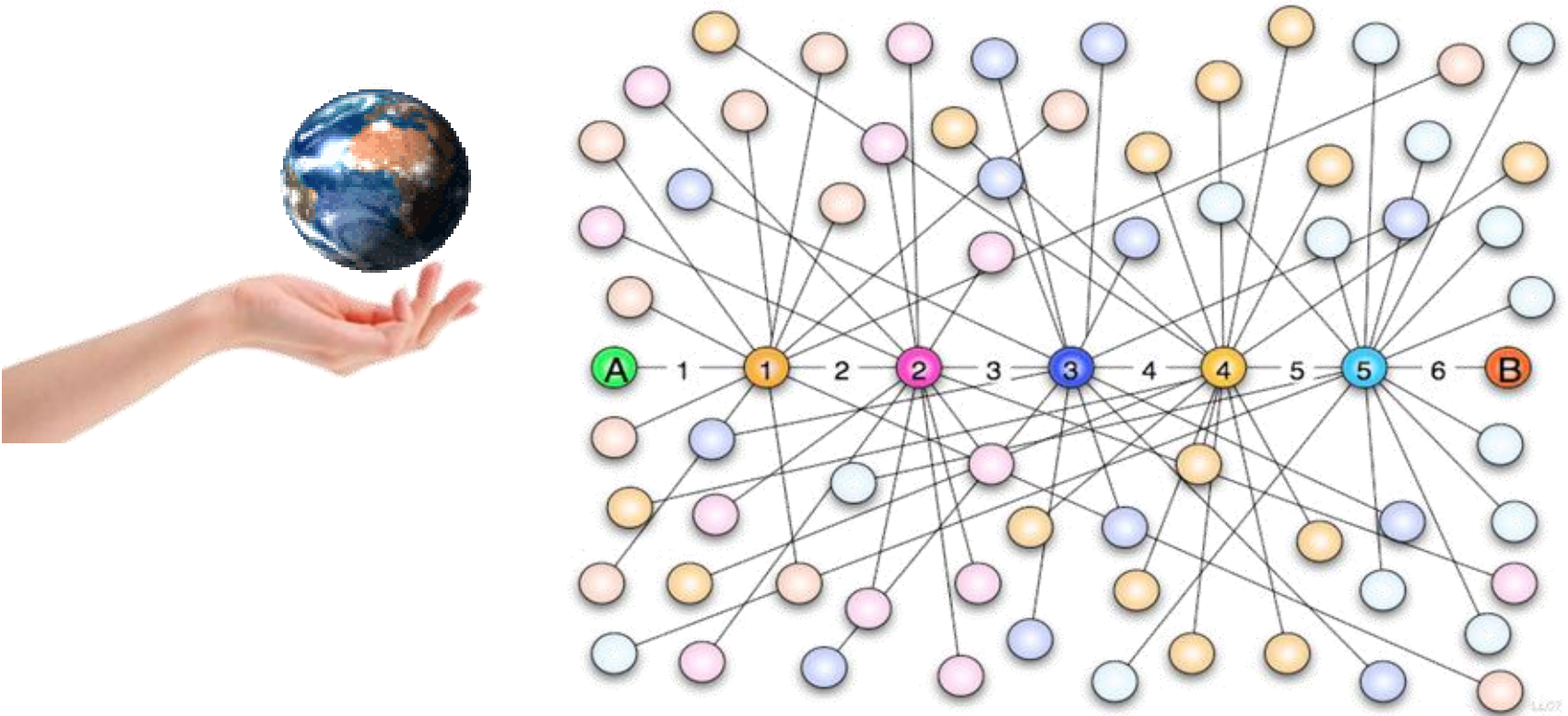
6 GRADI DI SEPARAZIONE!

**La rete sociale degli
Stati Uniti è un
“piccolo mondo”!**



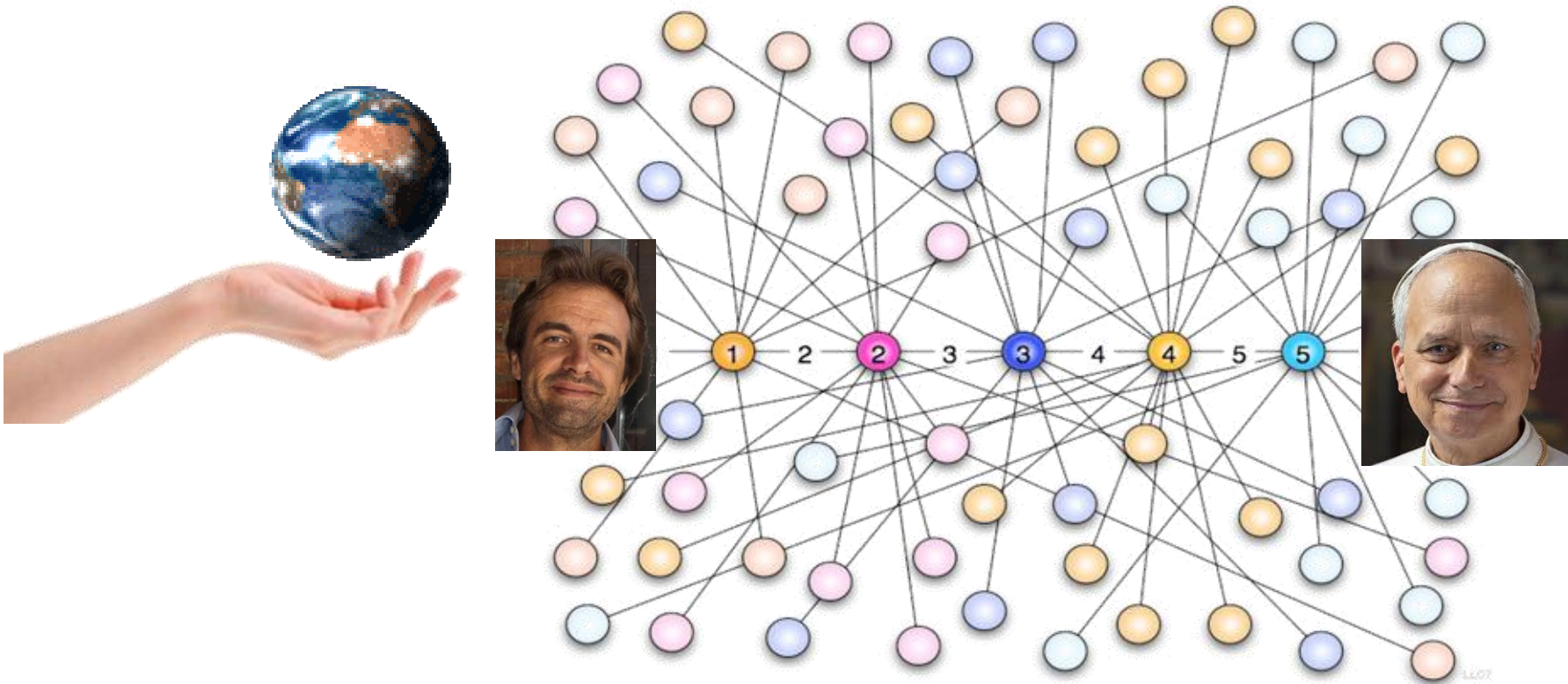
“SIX DEGREES OF SEPARATION”

Successive ricerche hanno dimostrato che anche la rete sociale mondiale è un “piccolo mondo”!



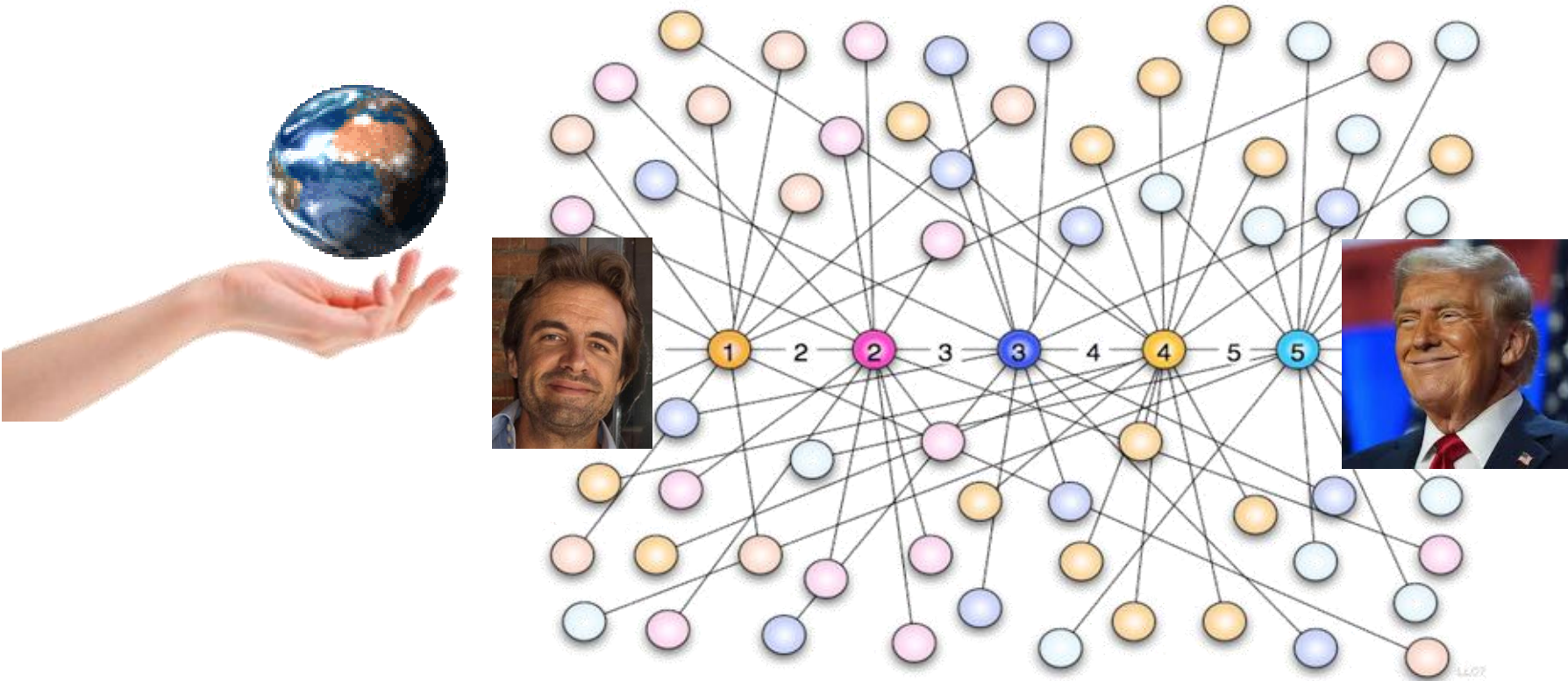
“SIX DEGREES OF SEPARATION”

Successive ricerche hanno dimostrato che anche la rete sociale mondiale è un “piccolo mondo”!



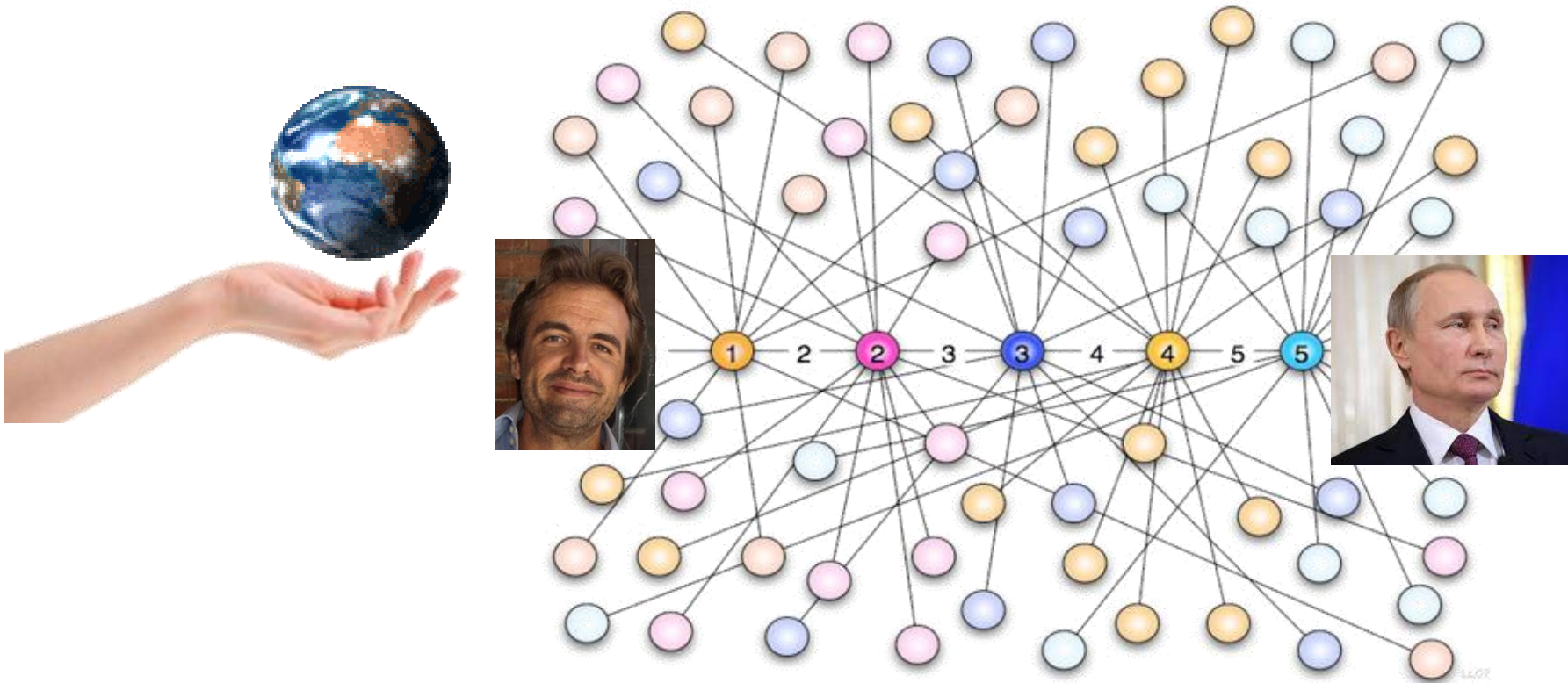
“SIX DEGREES OF SEPARATION”

Successive ricerche hanno dimostrato che anche la rete sociale mondiale è un “piccolo mondo”!



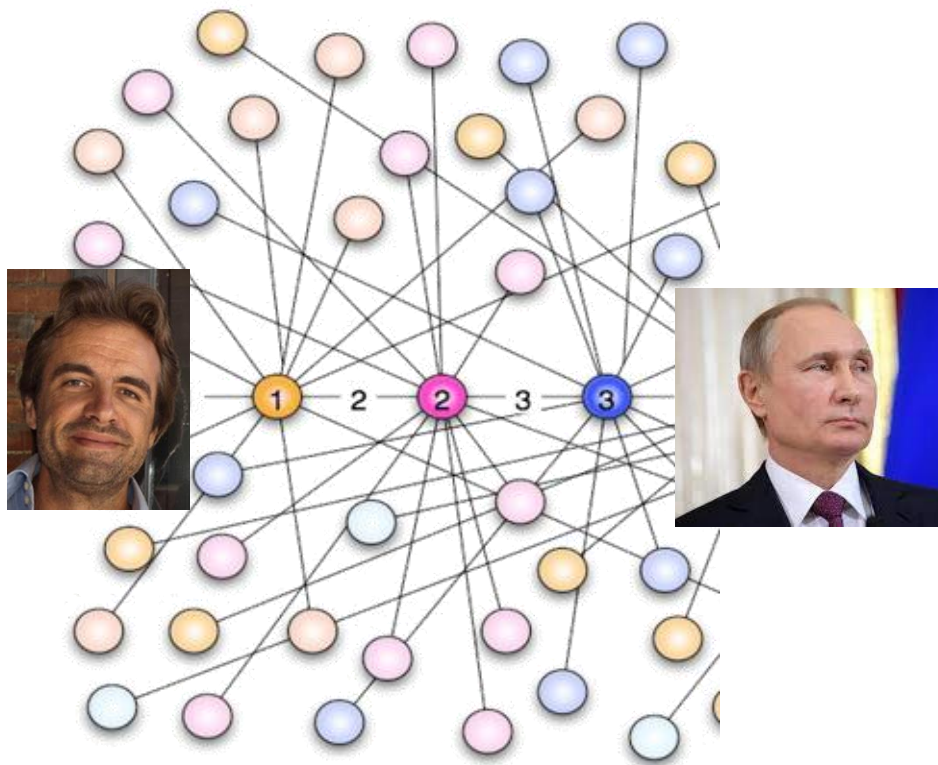
“SIX DEGREES OF SEPARATION”

Successive ricerche hanno dimostrato che anche la rete sociale mondiale è un “piccolo mondo”!





Oggi, grazie a Facebook,
i 6 gradi di separazione
si sono ridotti a soli
.....3,74!!!



**Il nostro "piccolo mondo" sembra
diventare sempre più piccolo...**

**Ma quanto è generale
il fenomeno del
“piccolo mondo”?**



Chi è questo attore?



THE ORACLE OF BACON



<https://oracleofbacon.org>

Kevin Bacon

to Brad Pitt

Find link



Brad Pitt has a Bacon number of 1.

Brad Pitt

was in

Sleepers

with

Kevin Bacon



THE ORACLE OF BACON



<https://oracleofbacon.org>

Kevin Bacon

to Natalie Portman

Find link



Natalie Portman has a Bacon number of 2.

Natalie Portman

was in

New York, I Love You

with

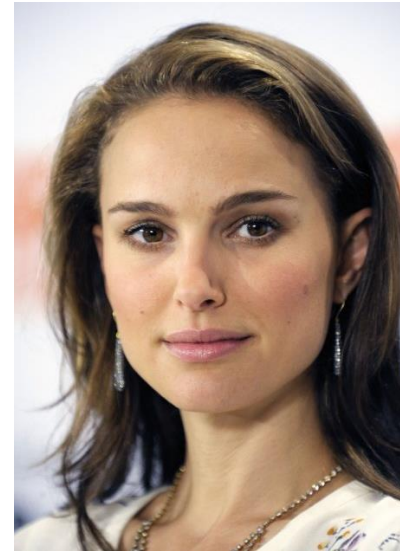
John Hurt

was in

Jayne Mansfield's Car

with

Kevin Bacon



THE ORACLE OF BACON



<https://oracleofbacon.org>

Kevin Bacon

to Charlie Chaplin

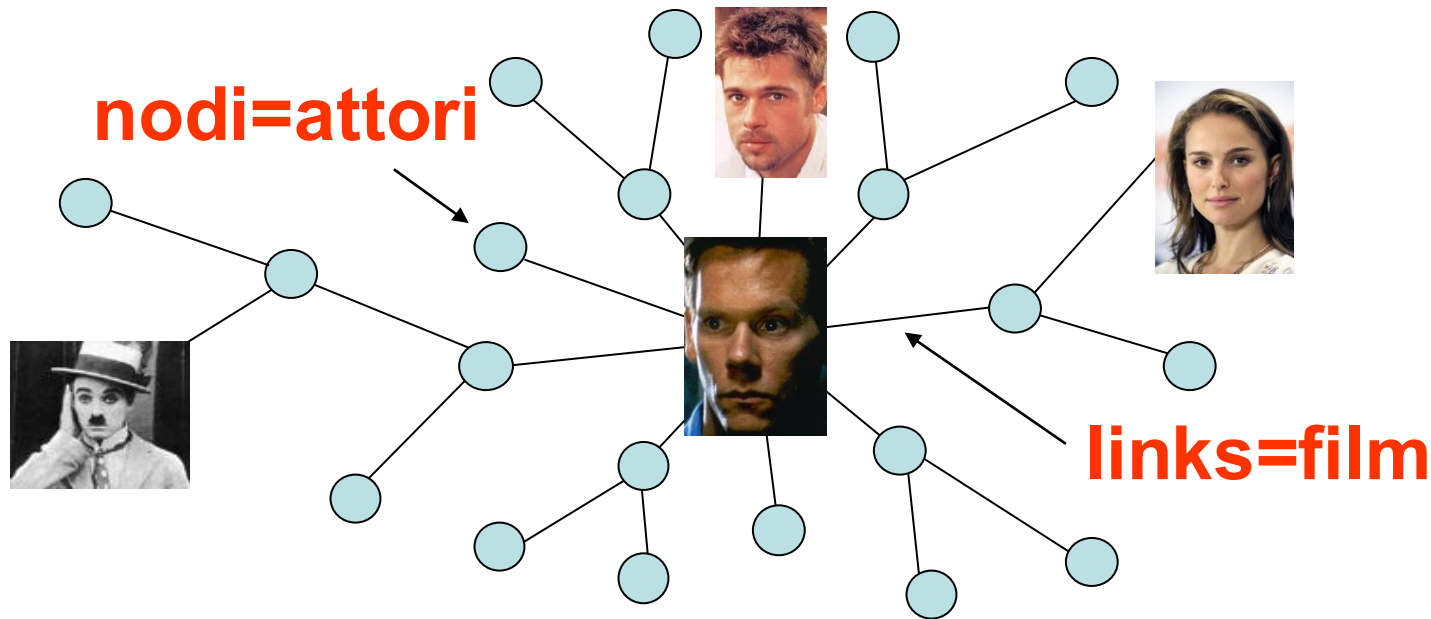
Find link



charlie chaplin has a Bacon number of 3.



Rete di collaborazioni cinematografiche



Kevin Bacon sembra essere al centro della rete delle collaborazioni tra gli attori... ma è veramente così?

Ci dispiace per lui ma in realtà Kevin Bacon non ha proprio nulla di speciale!!!

THE ORACLE OF BACON



<https://oracleofbacon.org>

Brad Pitt

to

Natalie Portman

Find link



Natalie portman has a Brad Pitt number of 2.

Natalie Portman

was in

Heat

with

Amy Brenneman

was in

America: A Tribute to Heroes

with

Brad Pitt



THE ORACLE OF BACON



<https://oracleofbacon.org>

Natalie Portman

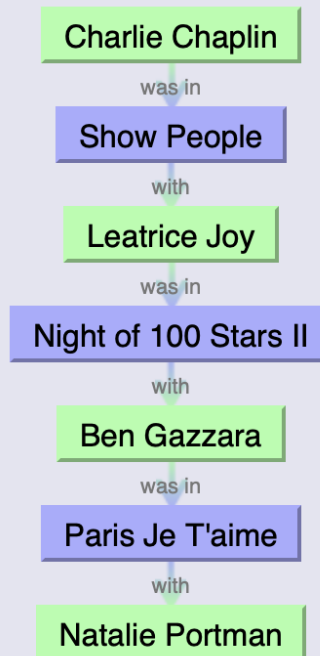
to

Charlie Chaplin

Find link



Charlie Chaplin has a Natalie Portman number of 3.



Lista di “centralità” nella rete di collaborazione degli attori (212250 actors)



Rank	Name	Average distance	# of movies	# of links
1	Rod Steiger	2.537527	112	2562
2	Donald Pleasence	2.542376	180	2874
3	Martin Sheen	2.551210	136	3501
4	Christopher Lee	2.552497	201	2993
5	Robert Mitchum	2.557181	136	2905
6	Charlton Heston	2.566284	104	2552
7	Eddie Albert	2.567036	112	3333
8	Robert Vaughn	2.570193	126	2761
9	Donald Sutherland	2.577880	107	2865
10	John Gielgud	2.578980	122	2942
11	Anthony Quinn	2.579750	146	2978
12	James Earl Jones	2.584440	112	3787
...				
876	Kevin Bacon	2.786981	46	1811
...				

**Anche la rete degli attori è un
“piccolo mondo”:**



Ma andiamo avanti....

Reti di collaborazioni scientifiche

il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

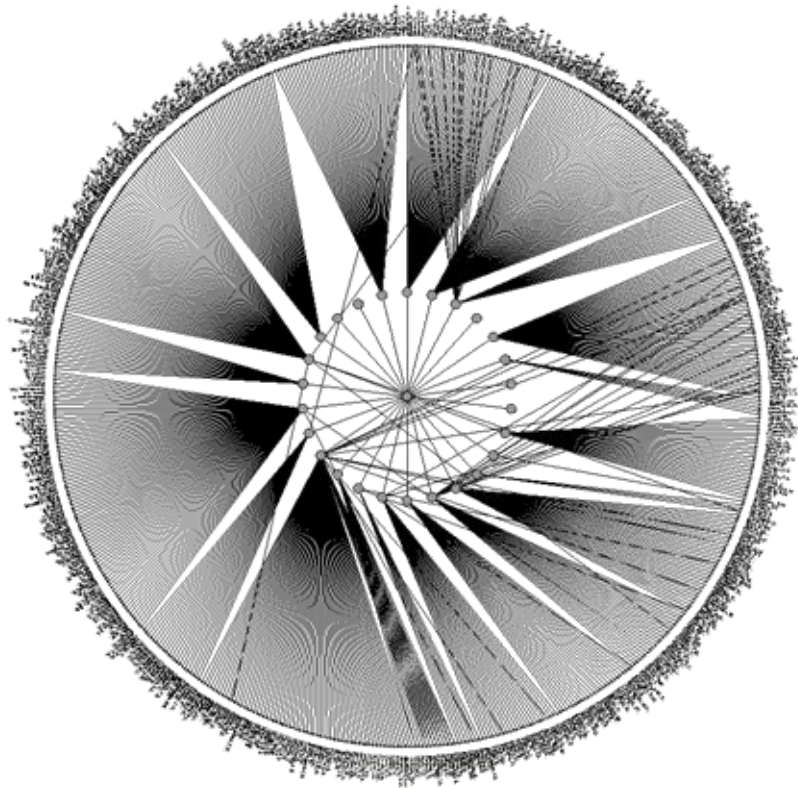
AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name

My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis **MR2441210 (2009h:82053)**



Reti di collaborazioni scientifiche

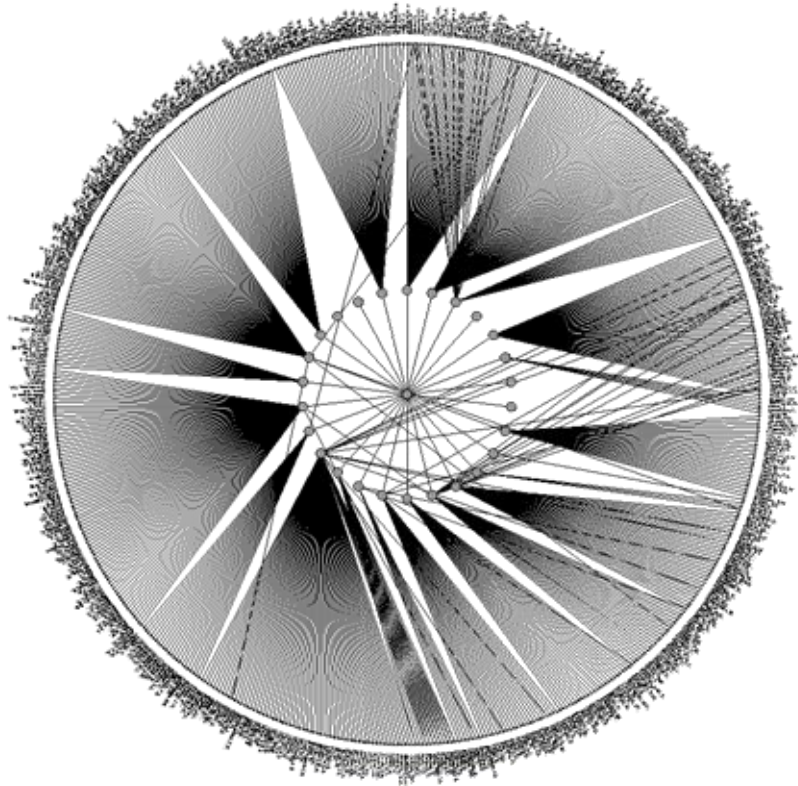
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



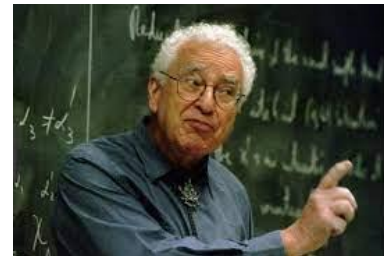
My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis **MR2441210 (2009h:82053)**

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis **MR2441210 (2009h:82053)**

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann **MR2188923 (2006f:82005)**



Reti di collaborazioni scientifiche

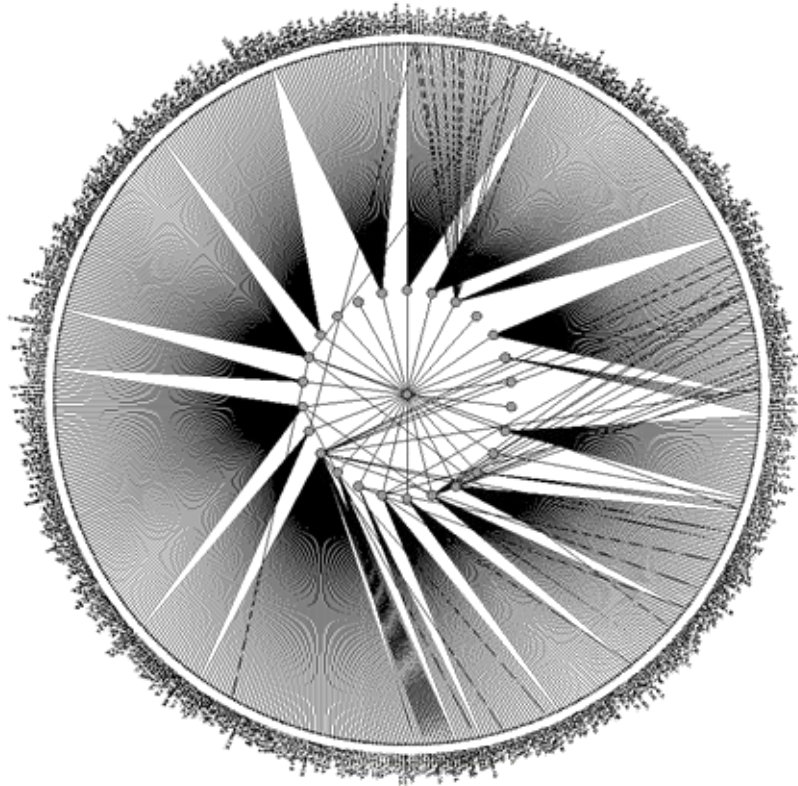
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

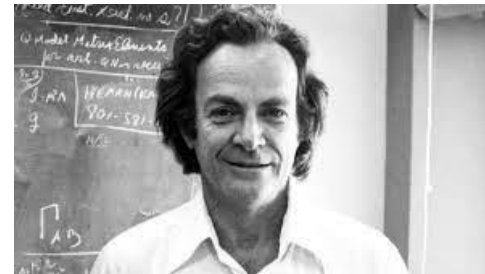
Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

My Collaboration Distance with Richard Feynman = 3

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with Richard Phillips Feynman MR0090430 (19,813e)



Reti di collaborazioni scientifiche

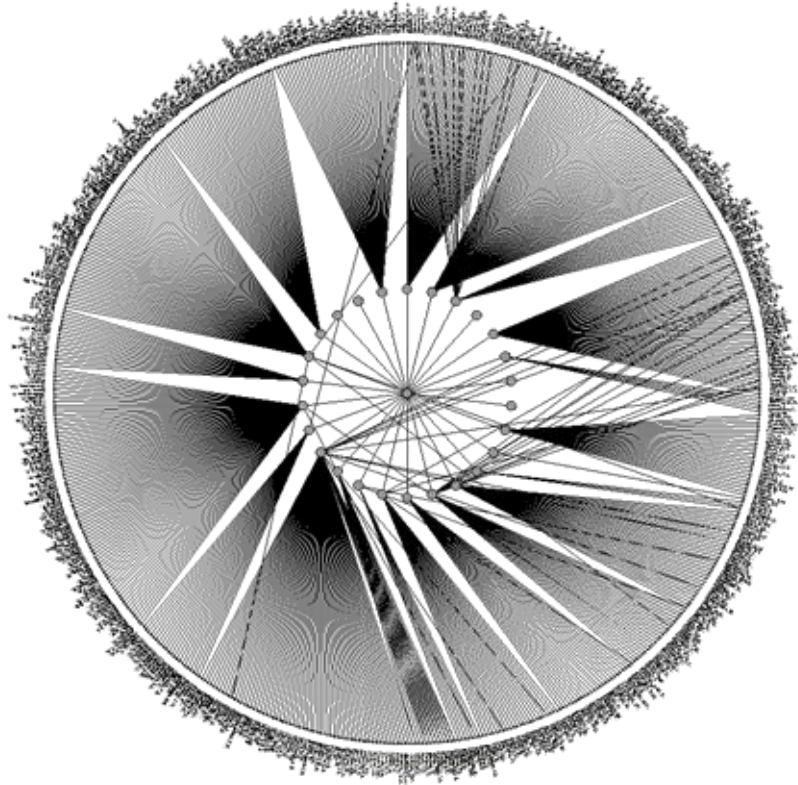
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

My Collaboration Distance with Richard Feynman = 3

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with Richard Phillips Feynman MR0090430 (19,813e)

My Collaboration Distance with Stephen Hawking = 4

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with James B. Hartle MR1105972

James B. Hartle coauthored with Stephen W. Hawking MR0726732 (85i:83022)



Reti di collaborazioni scientifiche

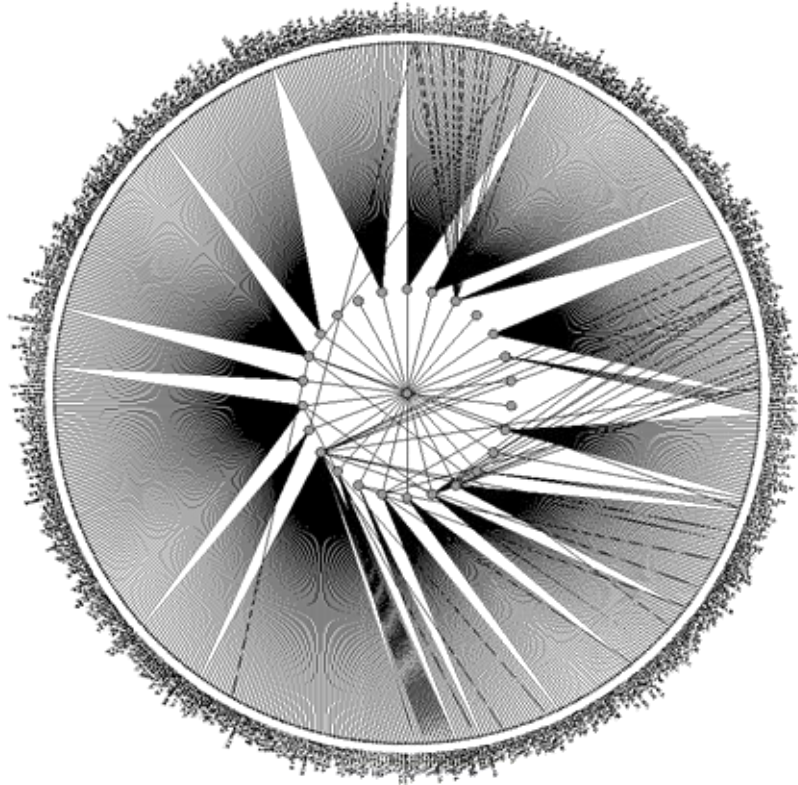
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

My Collaboration Distance with Richard Feynman = 3

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with Richard Phillips Feynman MR0090430 (19,813e)

My Collaboration Distance with Stephen Hawking = 4

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with James B. Hartle MR1105972

James B. Hartle coauthored with Stephen W. Hawking MR0726732 (85i:83022)

My Collaboration Distance with Werner Heisenberg = 5

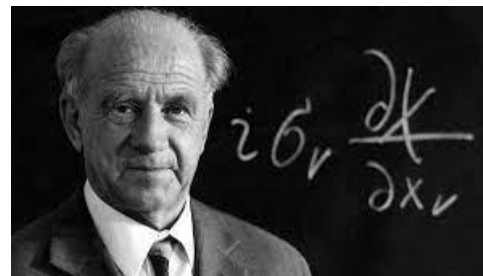
A. Pluchino coauthored with Andrea Rapisarda MR2070689

Andrea Rapisarda coauthored with Marko Robnik MR1618594

Marko Robnik coauthored with Wolfgang Kundt MR0598131 (82b:85003)

Wolfgang Kundt coauthored with Pascual Jordan MR0127937 (23 #B982)

Pascual Jordan coauthored with Werner Karl Heisenberg MR1069378 (91i:01142)



Reti di collaborazioni scientifiche

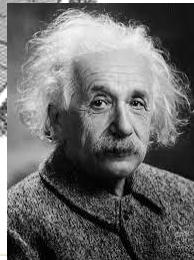
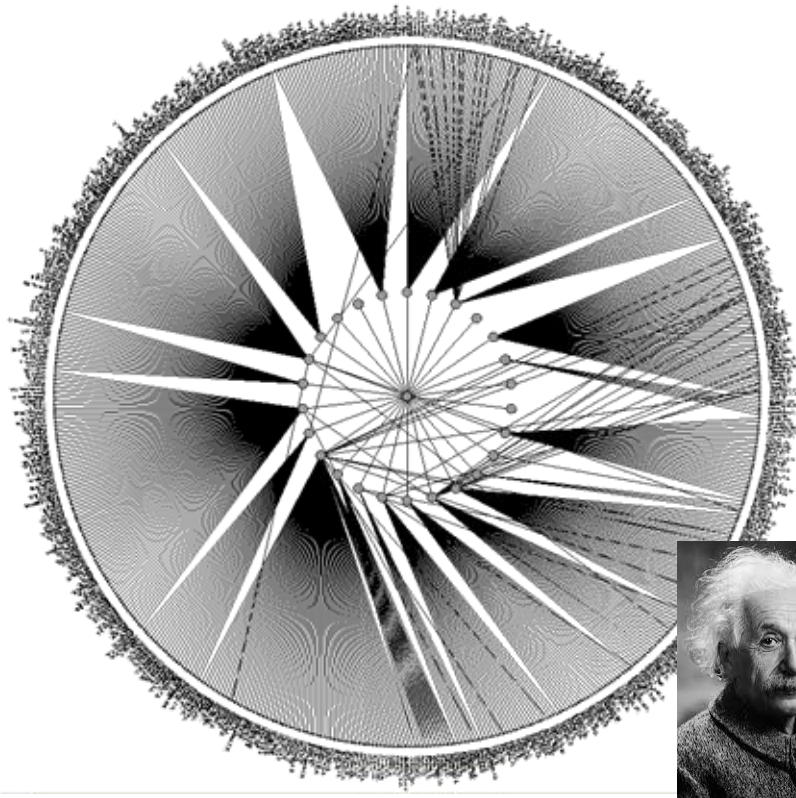
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

My Collaboration Distance with Richard Feynman = 3

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with Richard Phillips Feynman MR0090430 (19,813e)

My Collaboration Distance with Stephen Hawking = 4

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with James B. Hartle MR1105972

James B. Hartle coauthored with Stephen W. Hawking MR0726732 (85i:83022)

My Collaboration Distance with Werner Heisenberg = 5

A. Pluchino coauthored with Andrea Rapisarda MR2070689

Andrea Rapisarda coauthored with Marko Robnik MR1618594

Marko Robnik coauthored with Wolfgang Kundt MR0598131 (82b:85003)

Wolfgang Kundt coauthored with Pascual Jordan MR0127937 (23 #B982)

Pascual Jordan coauthored with Werner Karl Heisenberg MR1069378 (91i:01142)

My Collaboration Distance with Albert Einstein = 6

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with A. K. Rajagopal MR1698773 (2000d:81073)

A. K. Rajagopal coauthored with E. C. George Sudarshan MR0406252 (53 #10043)

E. C. George Sudarshan coauthored with Emil Wolf MR0180280 (31 #4515)

Emil Wolf coauthored with Max Born MR0108202 (21 #6918)

Max Born coauthored with Albert Einstein MR0718489 (85d:01024)

Reti di collaborazioni scientifiche

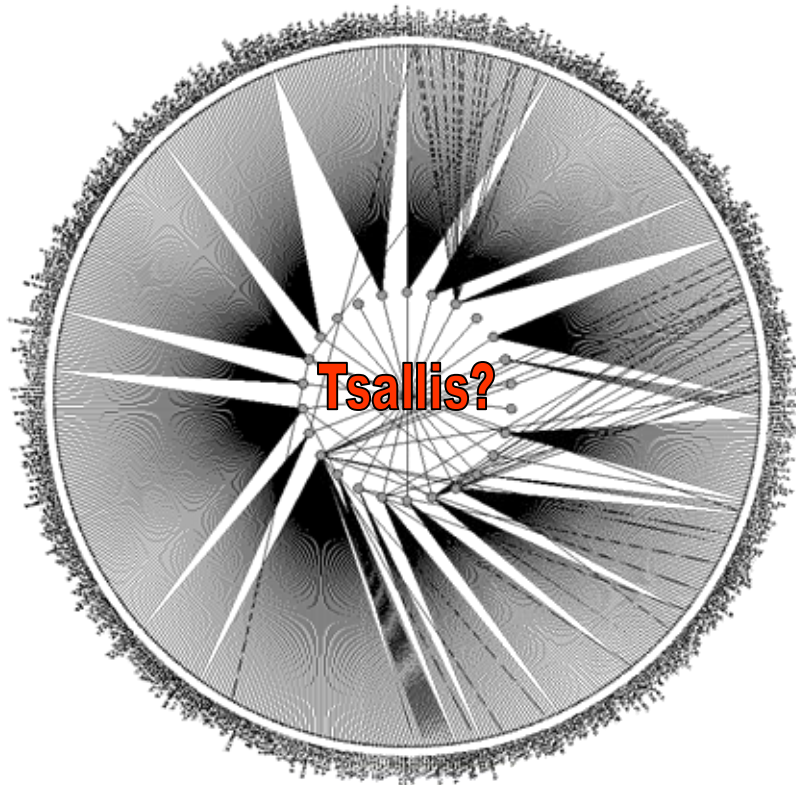
il mio “piccolo mondo”...

<http://www.ams.org/mathscinet/collaborationDistance.html>

AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

Search MSC Collaboration Distance Current Journals Current Publications

Author Name



My Collaboration Distance with Constantino Tsallis = 1

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

My Collaboration Distance with Murray Gell-Mann = 2

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

My Collaboration Distance with Richard Feynman = 3

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with Richard Phillips Feynman MR0090430 (19,813e)

My Collaboration Distance with Stephen Hawking = 4

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with Murray Gell-Mann MR2188923 (2006f:82005)

Murray Gell-Mann coauthored with James B. Hartle MR1105972

James B. Hartle coauthored with Stephen W. Hawking MR0726732 (85i:83022)

My Collaboration Distance with Werner Heisenberg = 5

A. Pluchino coauthored with Andrea Rapisarda MR2070689

Andrea Rapisarda coauthored with Marko Robnik MR1618594

Marko Robnik coauthored with Wolfgang Kundt MR0598131 (82b:85003)

Wolfgang Kundt coauthored with Pascual Jordan MR0127937 (23 #B982)

Pascual Jordan coauthored with Werner Karl Heisenberg MR1069378 (91i:01142)

My Collaboration Distance with Albert Einstein = 6

A. Pluchino coauthored with Constantino Tsallis MR2441210 (2009h:82053)

Constantino Tsallis coauthored with A. K. Rajagopal MR1698773 (2000d:81073)

A. K. Rajagopal coauthored with E. C. George Sudarshan MR0406252 (53 #10043)

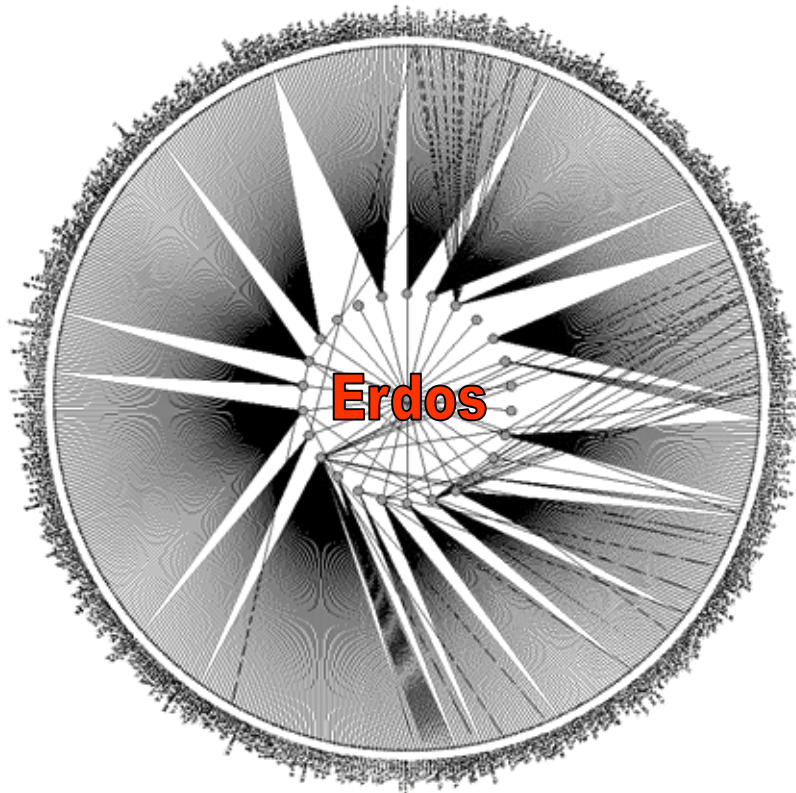
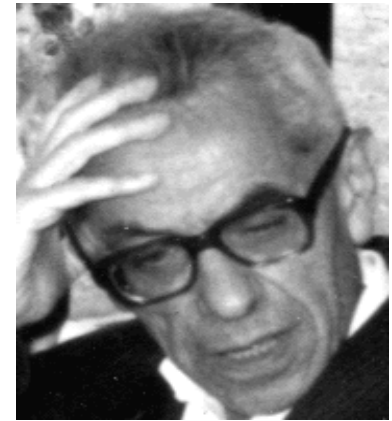
E. C. George Sudarshan coauthored with Emil Wolf MR0180280 (31 #4515)

Emil Wolf coauthored with Max Born MR0108202 (21 #6918)

Max Born coauthored with Albert Einstein MR0718489 (85d:01024)

Pál Erdős (Ungheria, 1913-1996)

La teoria dei grafi



AMERICAN MATHEMATICAL SOCIETY
MathSciNet Mathematical Reviews on the Web

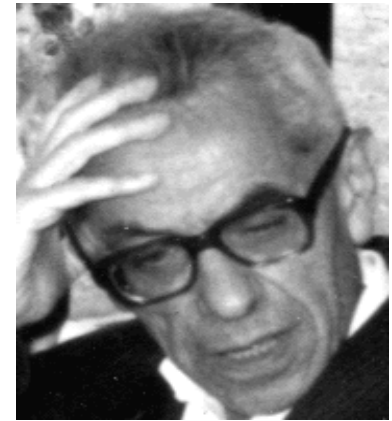
[Search MSC](#) [Collaboration Distance](#) [Current Journals](#) [Current Publications](#)

Author Name

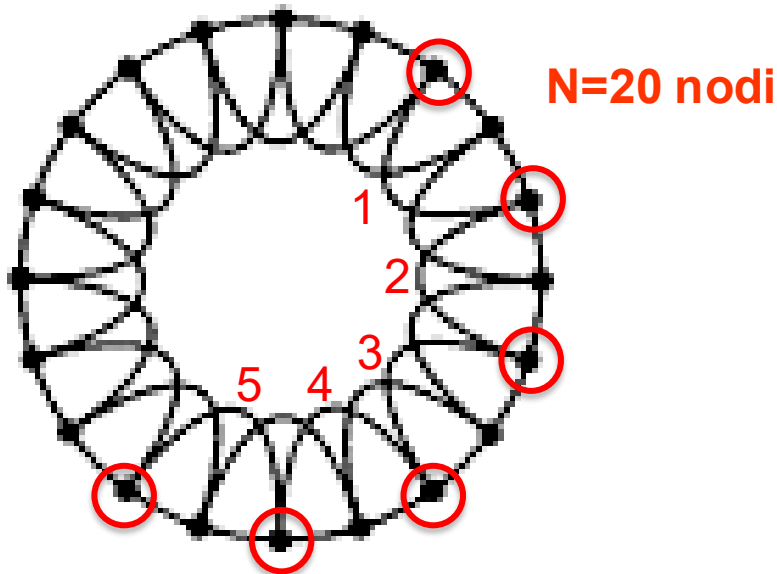
Enter another Author Name

Pál Erdős (Ungheria, 1913-1996)

La teoria dei grafi



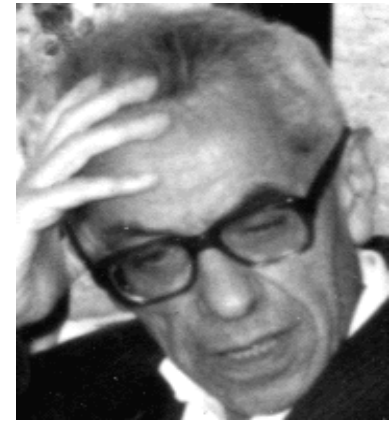
grafo regolare



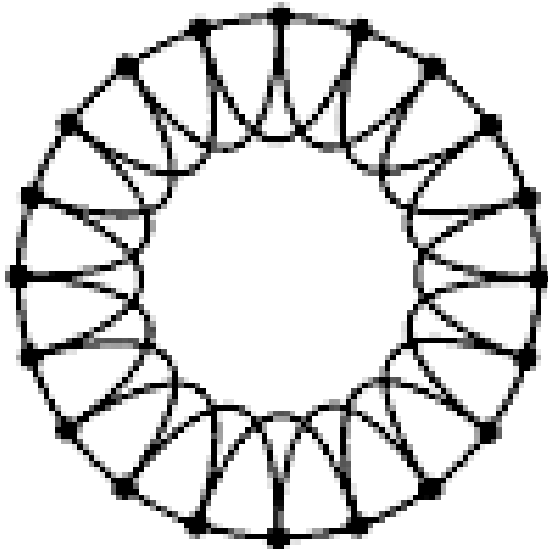
I grafi regolari
NON posseggono
la proprietà di
piccolo mondo!!!

Pál Erdős (Ungheria, 1913-1996)

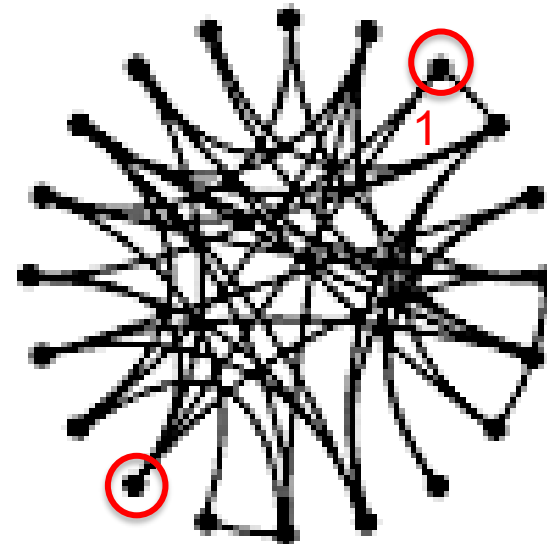
La teoria dei grafi



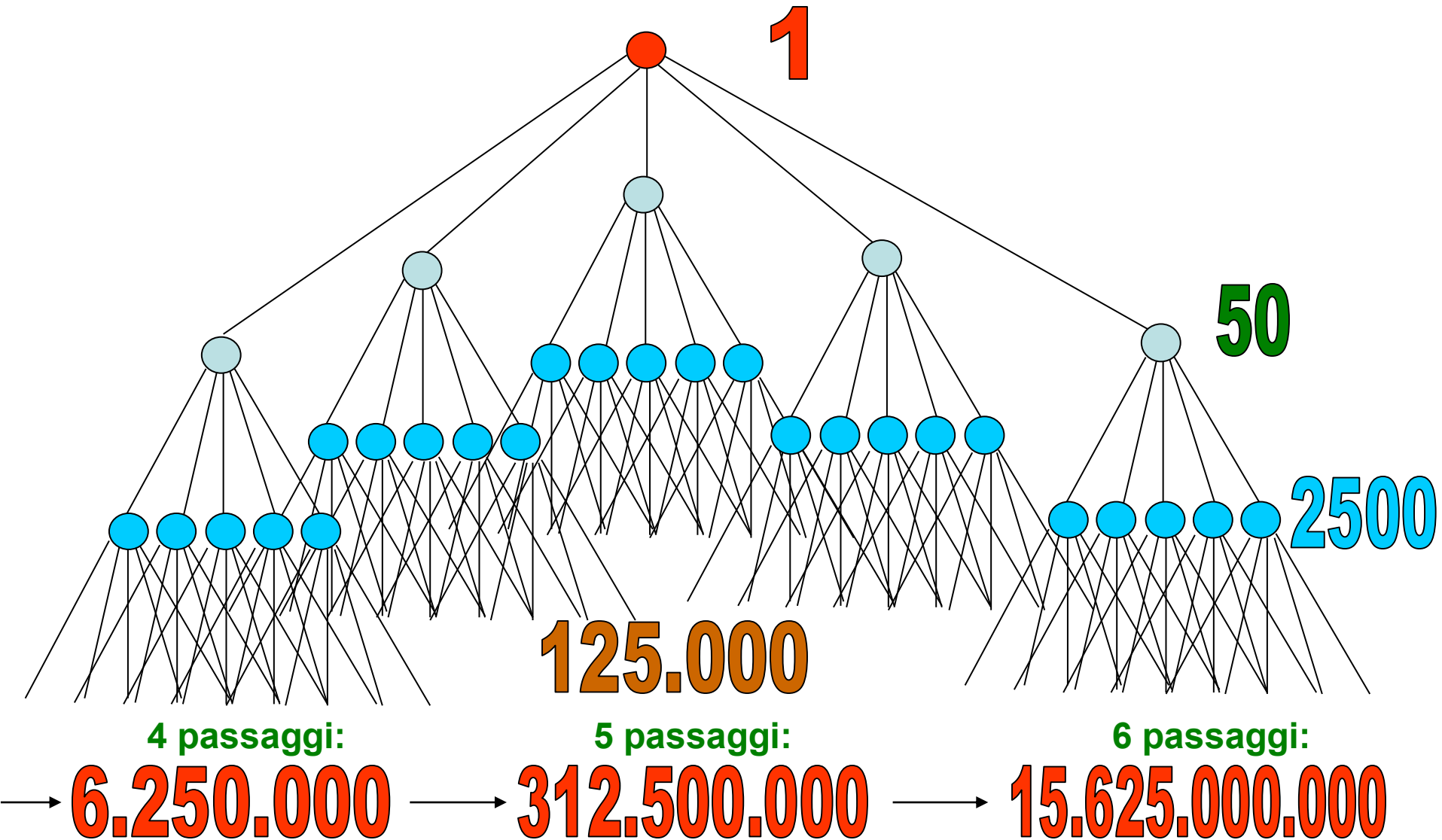
grafo regolare

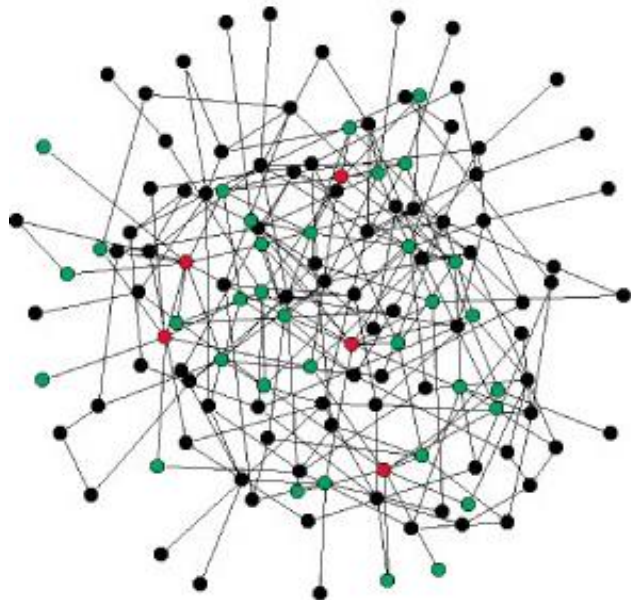


grafo casuale



Rete di amicizie casuali (random):





Dunque i grafi casuali
posseggono la proprietà di
piccolo mondo!!!

Però a ben guardare manca
loro un'altra essenziale
proprietà delle vere reti
sociali...

QUALE?

Social Networks: Facebook



Alessandro Pluchino

www.pluchino.it

[Modifica](#)

[Post](#)

[Informazioni](#)

[Amici 1617](#)

[Foto](#)

[Altro ▾](#)

[✎ Modifica il profilo](#)



In breve

 Zetanet



A cosa stai pensando?

Social Networks: Facebook

 Alessandro Pluchino

Alessandro

Home

Crea











Alessandro Pluchino

Aggiorna informazioni 1

Registro attività 20+ ...

Diario ▾

Informazioni

Amici 1442

Foto

Archivio

Altro ▾

 Amici

+ Trova amici

Tutti gli amici 1.442

Aggiunti di recente

Compleanni

Lavoro

Università

Altro

Cerca i tuoi amici



Andrea Rapisarda

607 amici

✓ Amici



Santo Fortunato

677 amici

✓ Amici



Peppino Scucces

331 amici

✓ Amici



Angelo Adamo

3411 amici

✓ Amici

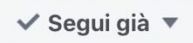
Chat (131)

Social Networks: Facebook

 Andrea Rapisarda 

Alessandro Home Crea    



Andrea Rapisarda    

Diario Informazioni **Amici** 238 in comune Foto Altro 

 In breve

My new official web site
<http://www.andrea-rapisarda.it>

 Professore associato presso Università di Catania

 Precedentemente ricercatore presso INFN - Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

 Ha studiato Borsa di studio presso Niels Bohr Institute, Copenhagen, Denmark

 Ha studiato presso Università di Francoforte

 Crea un post  Foto/video

 Scrivi qualcosa a Andrea...

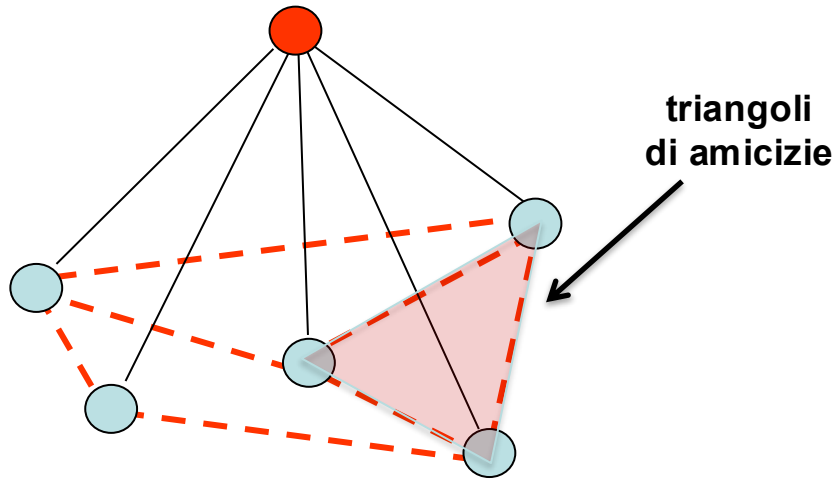
 Foto/video  Tagga amici  Stato d'anim... 

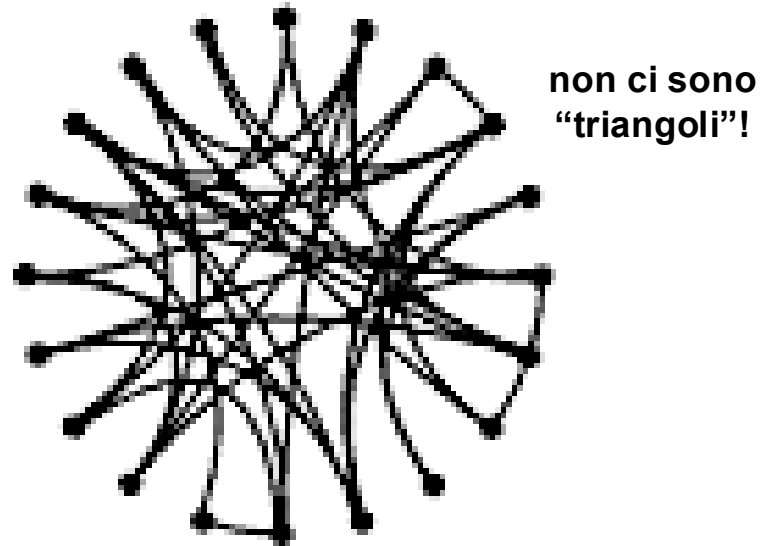
 **Giuliana Caruso** — con Andrea Rapisarda e altre 19 persone. 
7 h · 

Chat (124)  

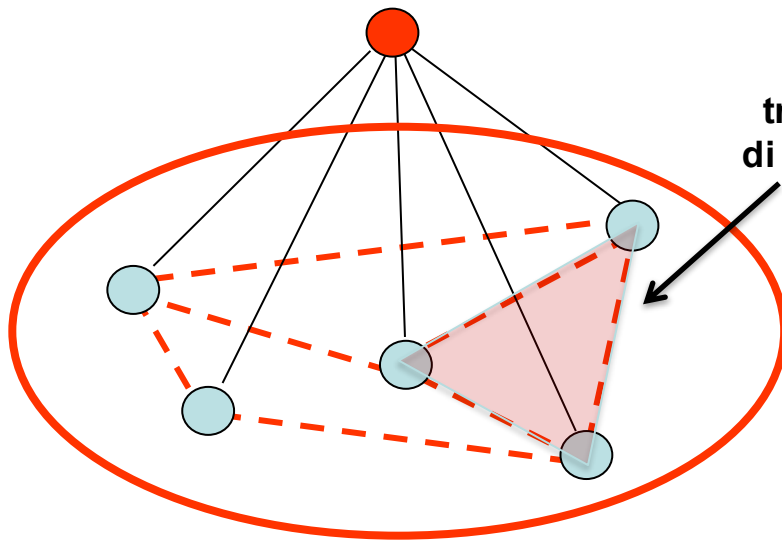
Su Facebook, come in tutte le vere reti sociali, i nostri amici sono spesso anche amici tra di loro!



grafo casuale

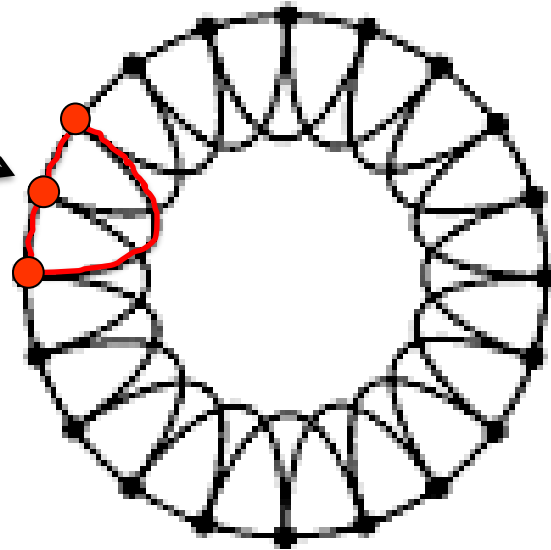


Su Facebook, come in tutte le vere reti sociali, i nostri amici sono spesso anche amici tra di loro!



triangoli
di amicizie

grafo regolare

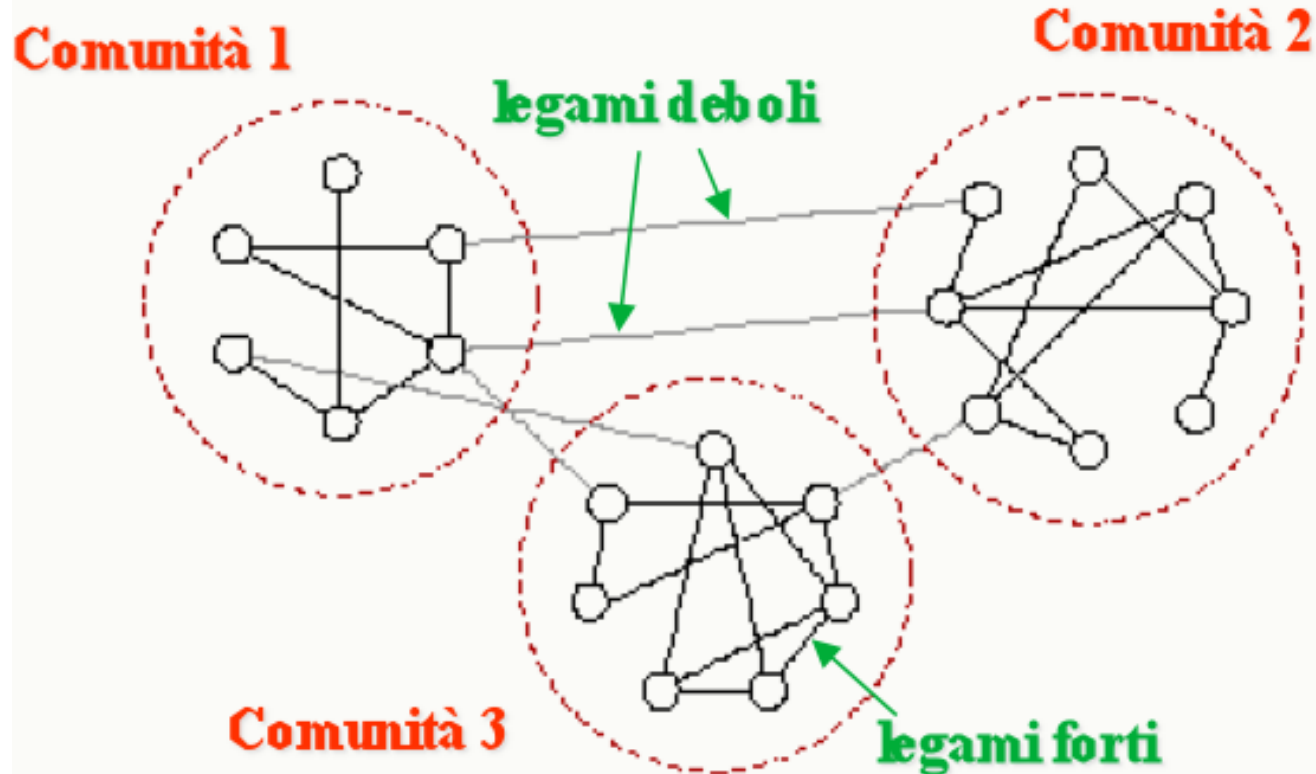


Quello che manca alle reti casuali è quindi:

l'aggregazione in comunità!

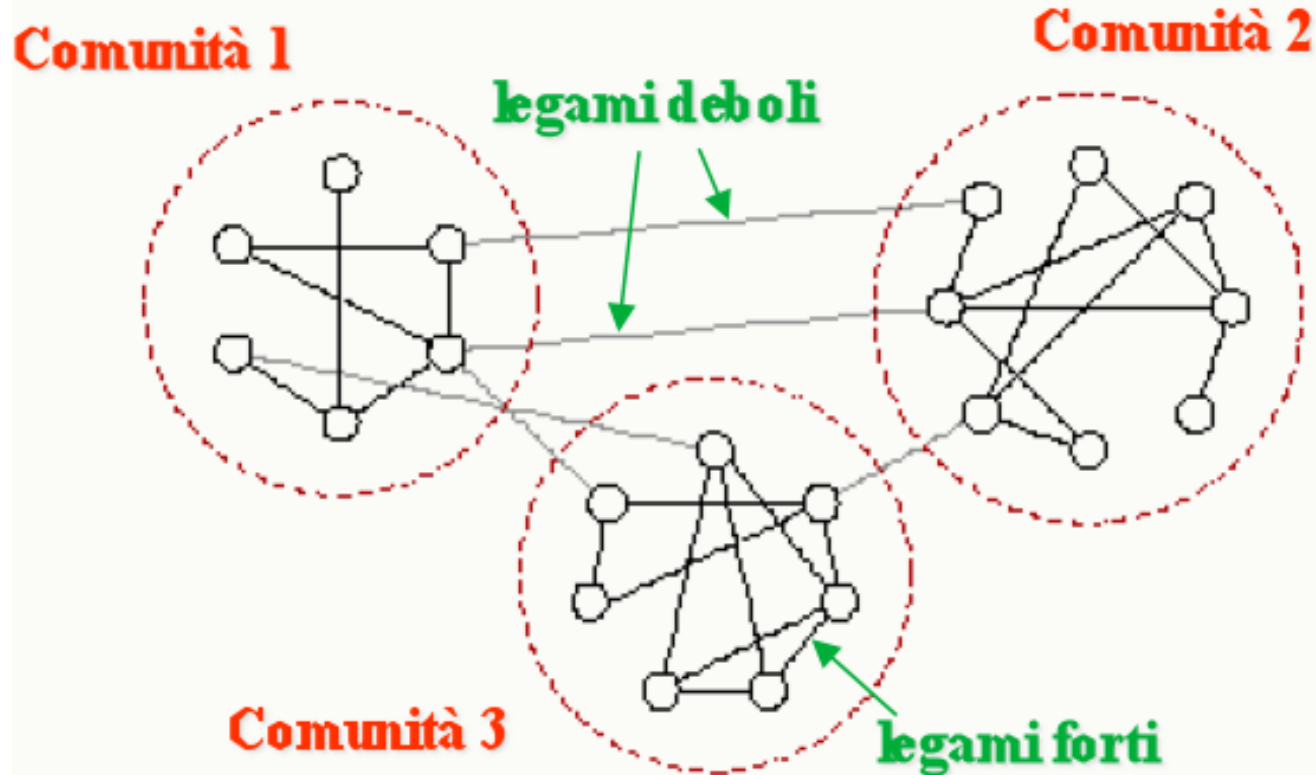
Struttura a “Comunità” nelle RETI SOCIALI

Le reti sociali, come molti altri tipi di reti in natura, sono solitamente costituite da **comunità**, le quali possono essere intuitivamente definite come **gruppi di nodi che risultano più densamente connessi** se confrontati con il resto della rete:



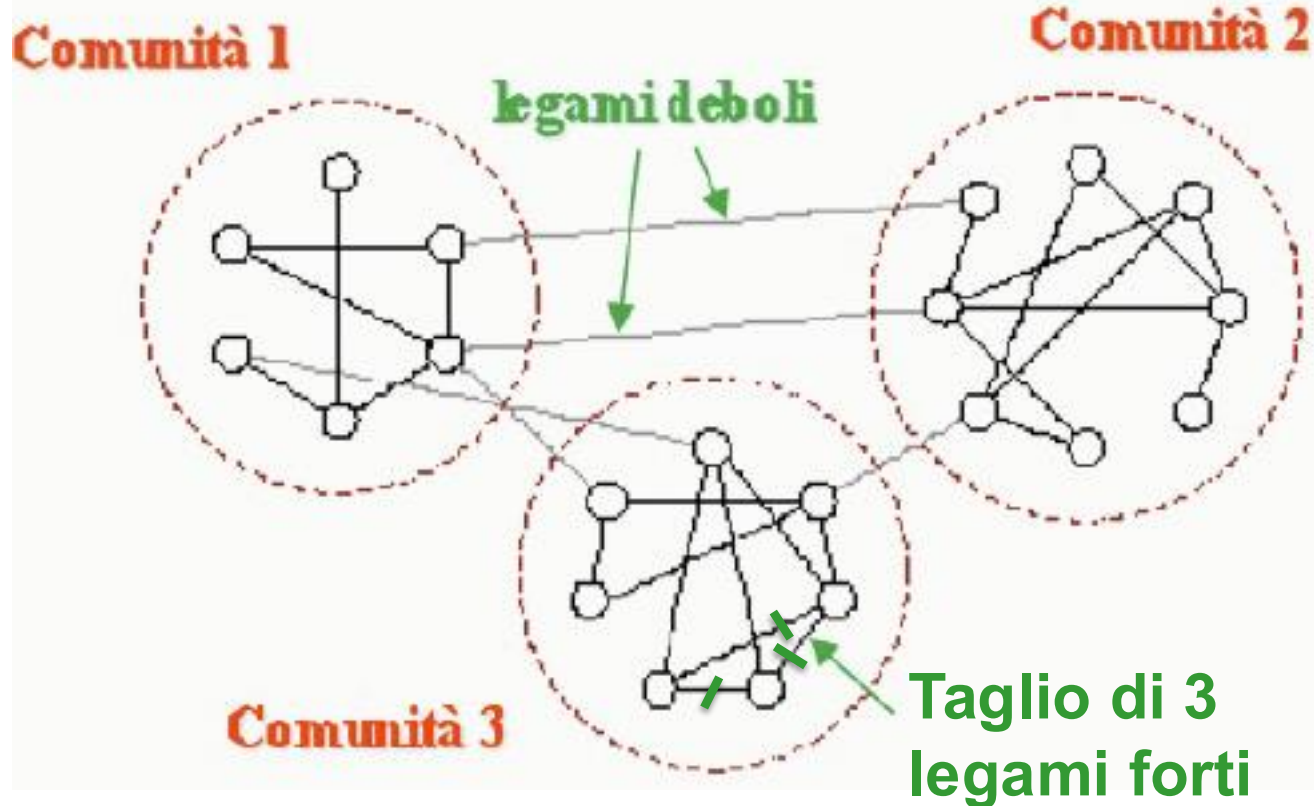
Mark Granovetter (Baltimora, 1973)

La forza dei legami deboli



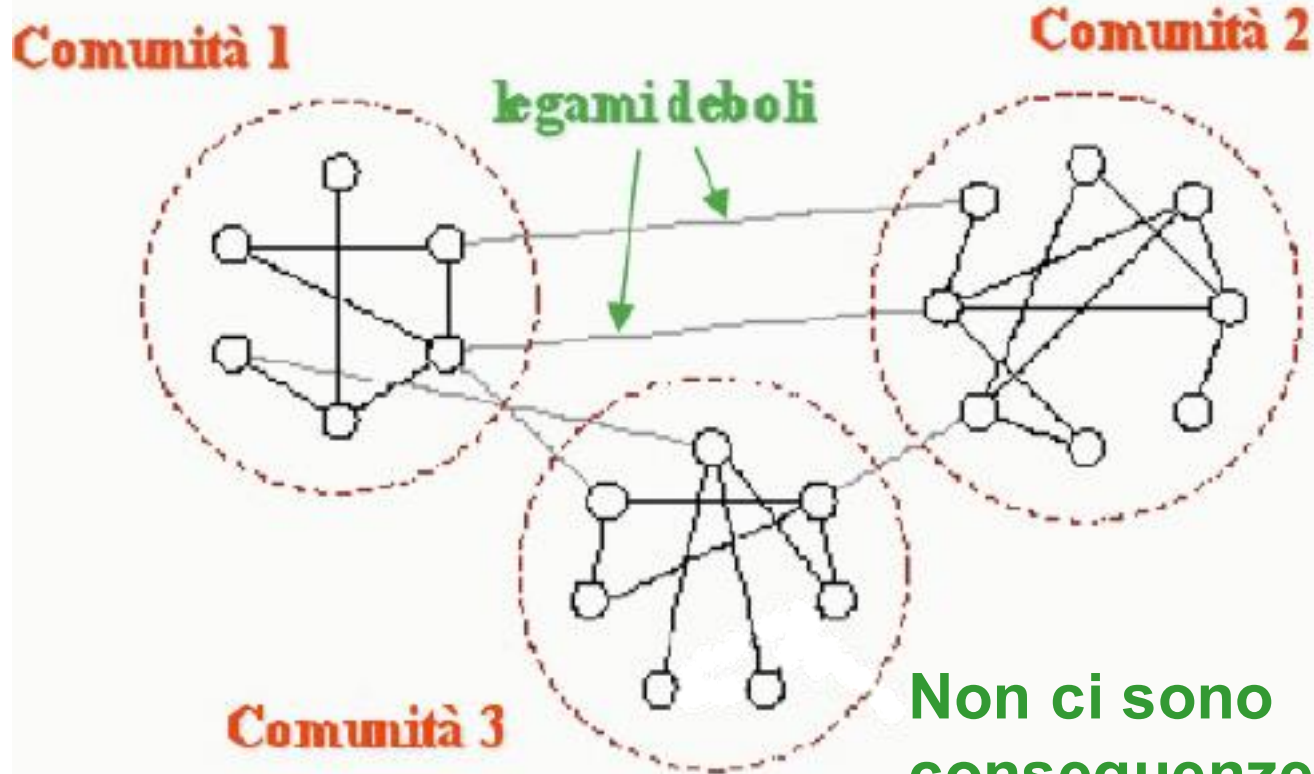
Mark Granovetter (Baltimora, 1973)

La forza dei legami deboli



Mark Granovetter (Baltimora, 1973)

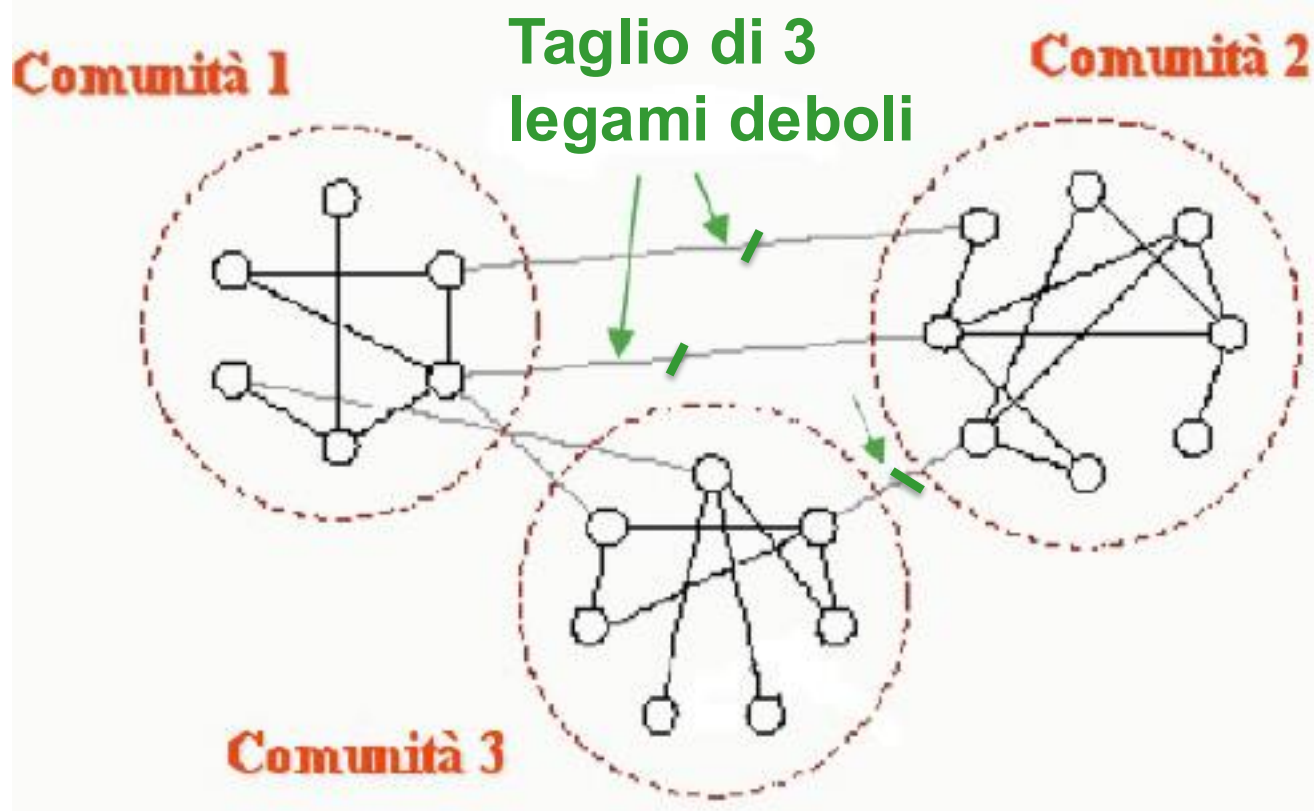
La forza dei legami deboli



Non ci sono
conseguenze sulla
connettività globale!

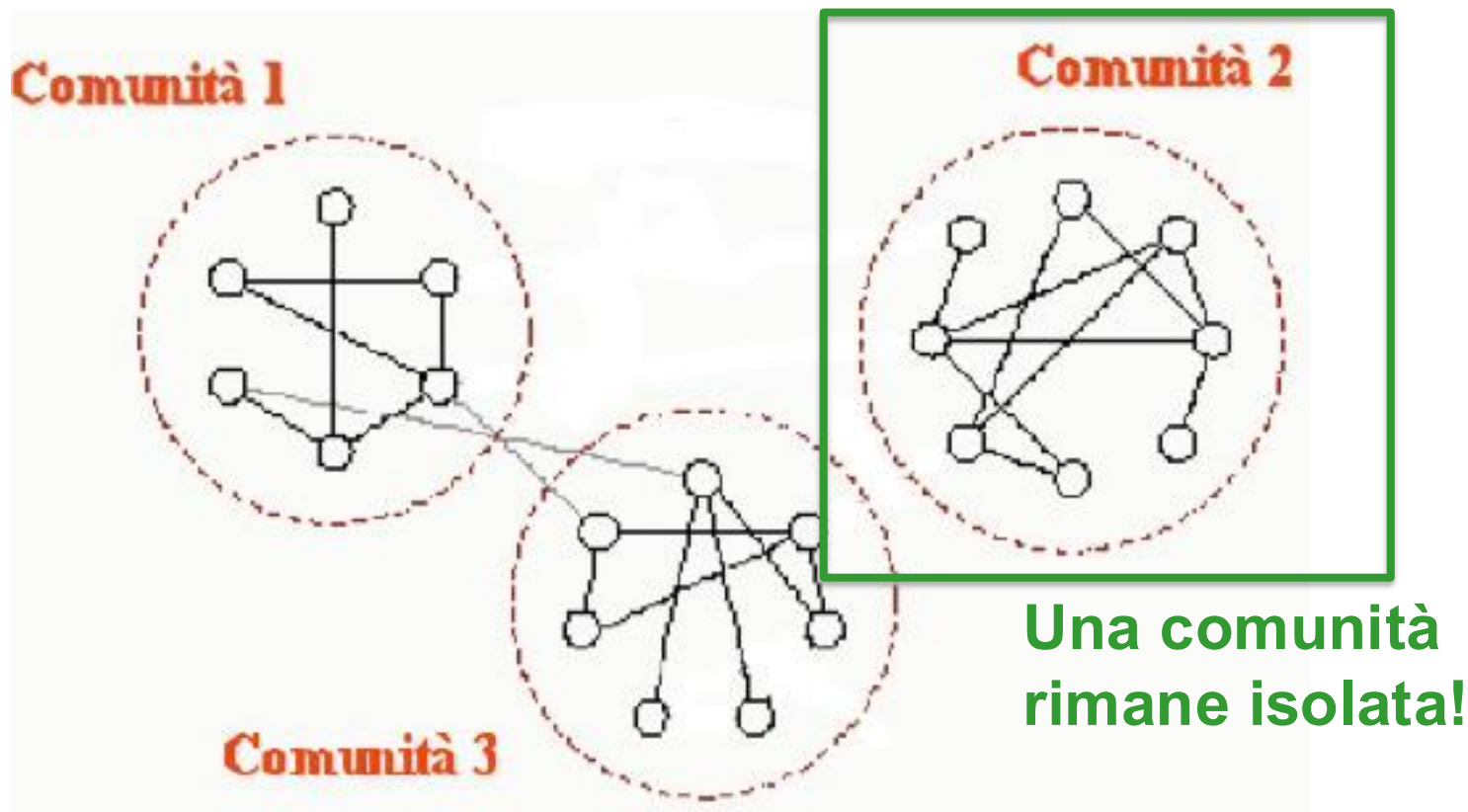
Mark Granovetter (Baltimora, 1973)

La forza dei legami deboli



Mark Granovetter (Baltimora, 1973)

La forza dei legami deboli



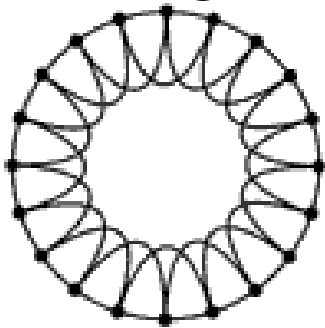
LA SCOPERTA delle RETI COMPLESSE



1998 - Watts e Strogatz (USA)
Scoprono che il segreto delle reti “piccolo mondo” si trova al confine tra ordine e disordine!

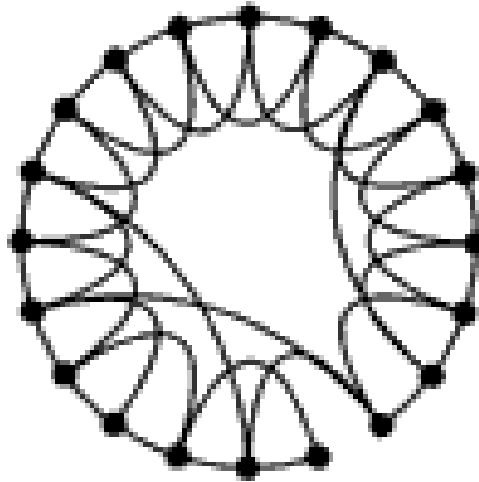


rete regolare



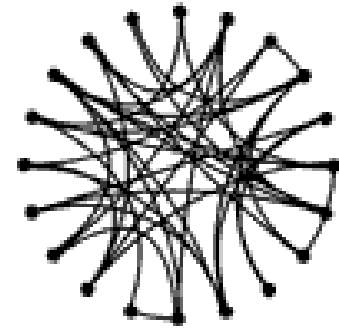
Ha una forte aggregazione,
ma non è un ‘piccolo mondo’

rete small world



*E' un ‘piccolo mondo’
ma ha anche una forte
aggregazione!*

rete casuale



E' un ‘piccolo mondo’.
ma non ha aggregazione