

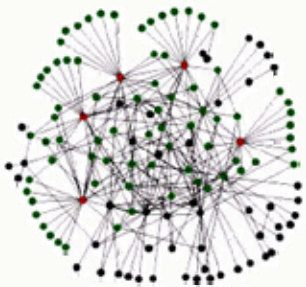
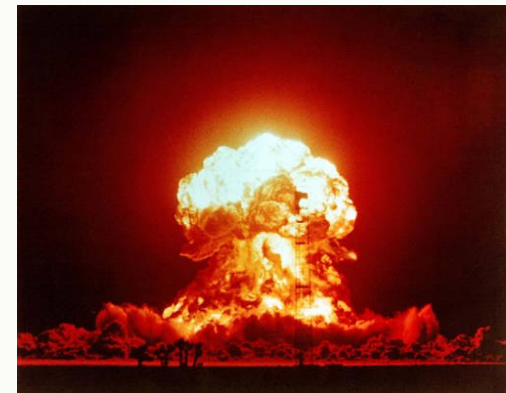
**Alessandro Pluchino**

# Il Punto Critico

Quando piccole cause...



possono produrre grandi effetti!



La nuova scienza della **COMPLESSITA'**

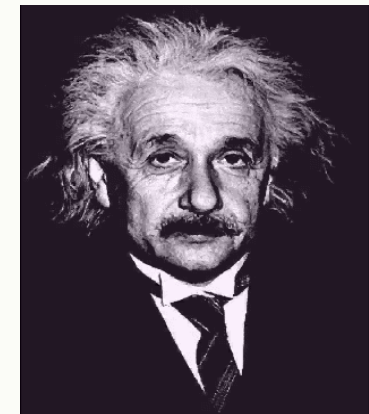
# Contenuti e Metodo



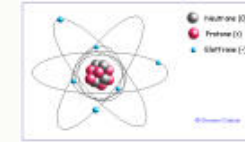
**“Lo scopo della Teoria della Complessità è individuare modelli in ogni tipo di rete complessa e usare ciò che si è scoperto per migliorare l’uomo e il suo mondo”.**  
**M.Buchanan**



**“Tutto dovrebbe essere reso il più semplice possibile, ma non ancora più semplice...”**  
**A.Einstein**



**Infinitamente  
Complesso**



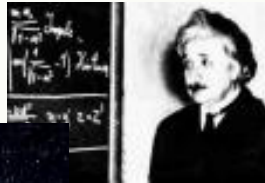
**Infinitamente  
Piccolo**

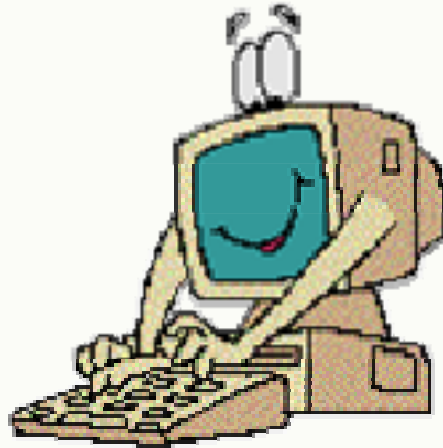


**Metà del  
XX secolo**

**Nascita delle  
Scienze Fisiche  
XVI secolo**

**Infinitamente  
Grande**





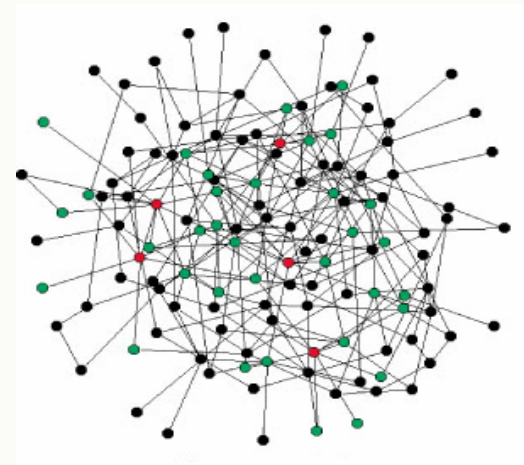
**il Computer!**

**...e la possibilità di  
simulare i sistemi complessi!**



# Ma cos'è un sistema complesso?

In molti casi è possibile descriverlo come una **RETE** costituita da un certo numero di unità o **NODI** (particelle, cellule, organi, individui, pianeti, galassie)...



...che interagiscono in vario modo tra di loro (**LINKS**) cooperando o – più spesso – entrando in competizione...

# Lo studio dei sistemi complessi e le teorie delle tre "C"

anni Settanta



## Teoria delle Catastrofi

Studia i "punti critici" che  
modificano bruscamente il  
comportamento di un  
sistema

anni Ottanta



## Teoria del Caos

Imprevedibilità,  
autosimilarità, sensibilità  
alle condizioni iniziali,  
"effetto farfalla"

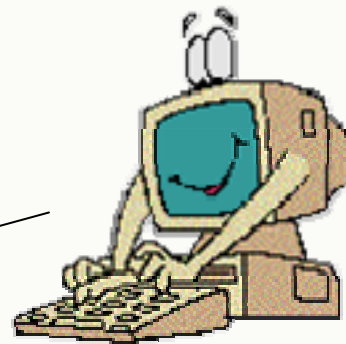
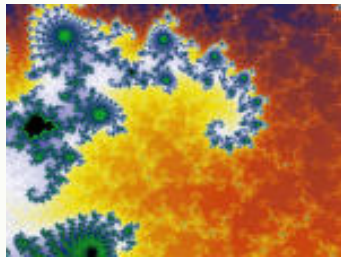
anni Novanta



## Teoria della Complessità

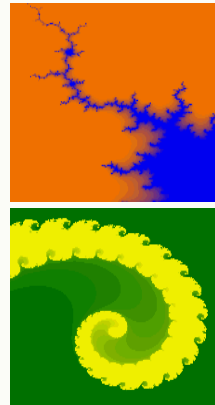
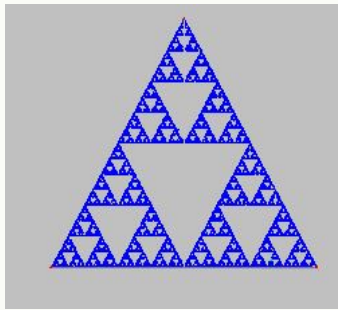
Sistemi dinamici lontani  
dall'equilibrio, evoluzione,  
criticità auto-organizzata,  
reti complesse

**autosimilarità**

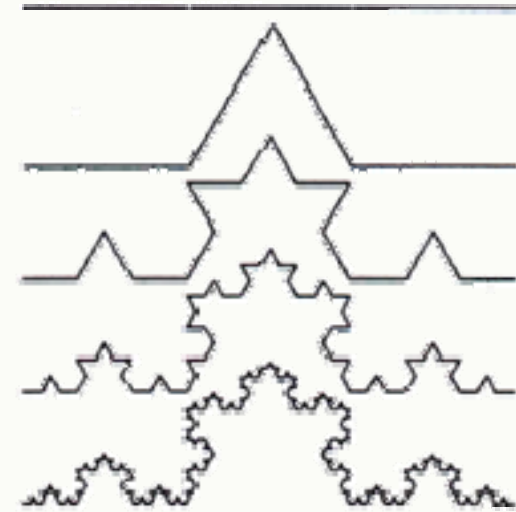


**Simuliamo  
i sistemi complessi...**

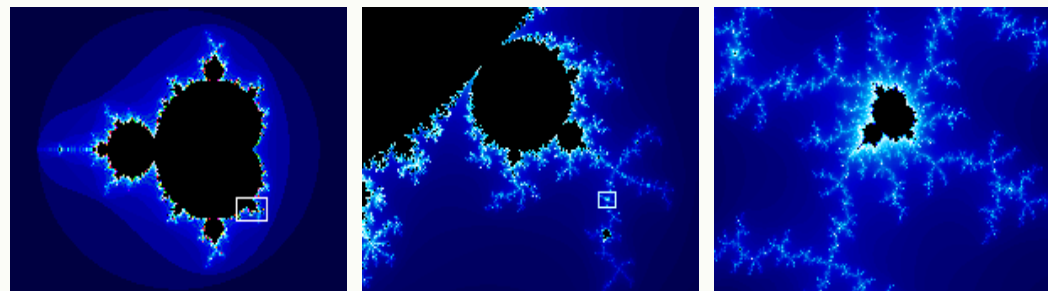
## Frattali



## La curva di Koch



## Insieme di Mandelbrot

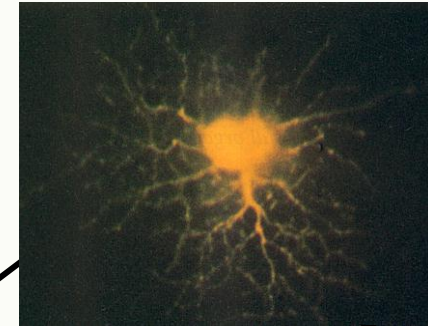


# autosimilarità in natura

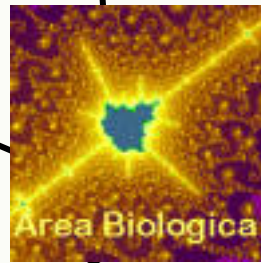
**cavolfiore**



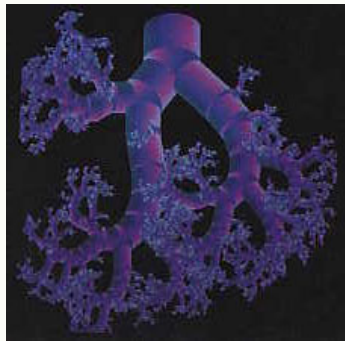
**foglie**



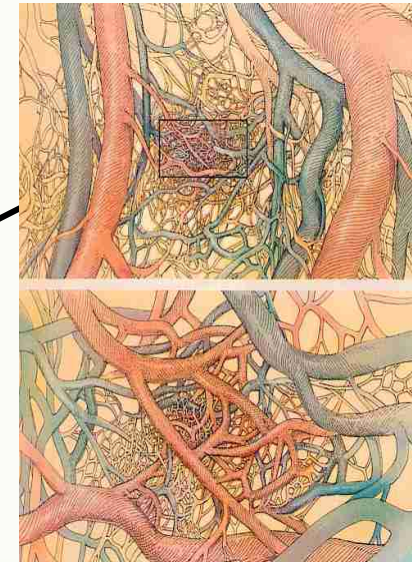
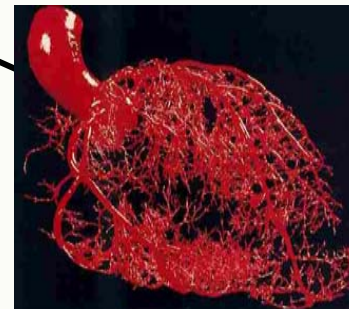
**neuroni**



**bronchi**

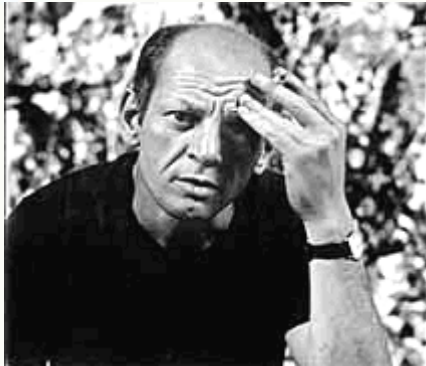


**cuore**



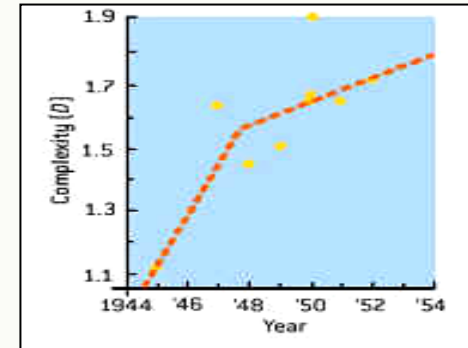


# autosimilarità nell'arte



**Jackson Pollock**  
(1912-1956)

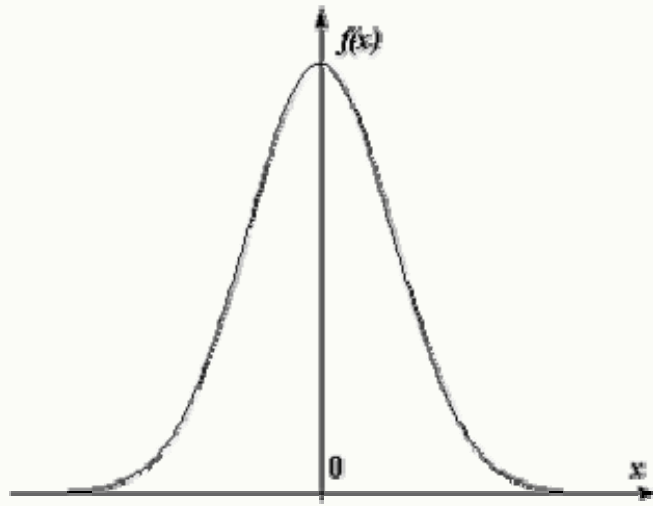
**Complessità nelle  
opere di Pollock**



**Blue Poles Number 11 (1952)**

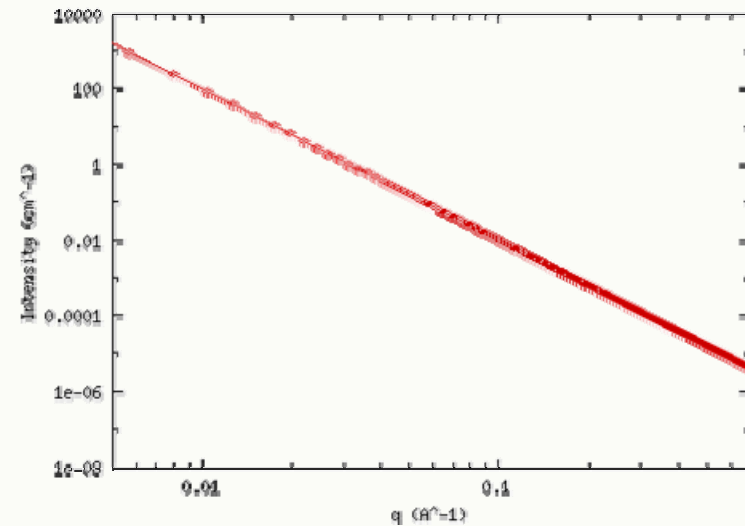


## La curva Gaussiana



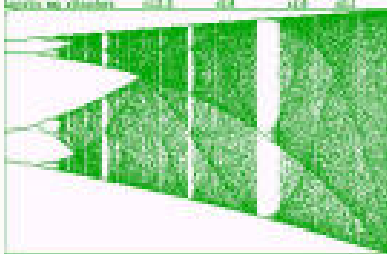
**esiste una dimensione tipica  
(la "media")**

## La legge di potenza

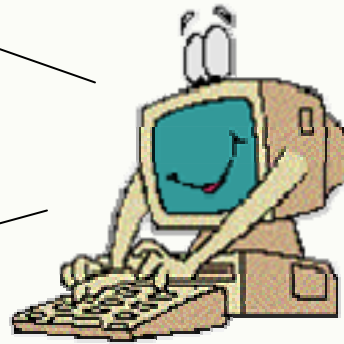
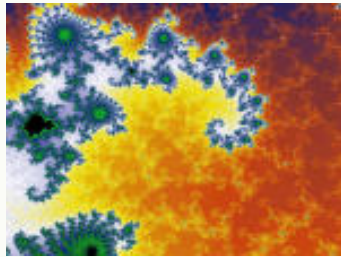


**NON esiste una dimensione tipica  
(invarianza di scala)**

**non linearità**

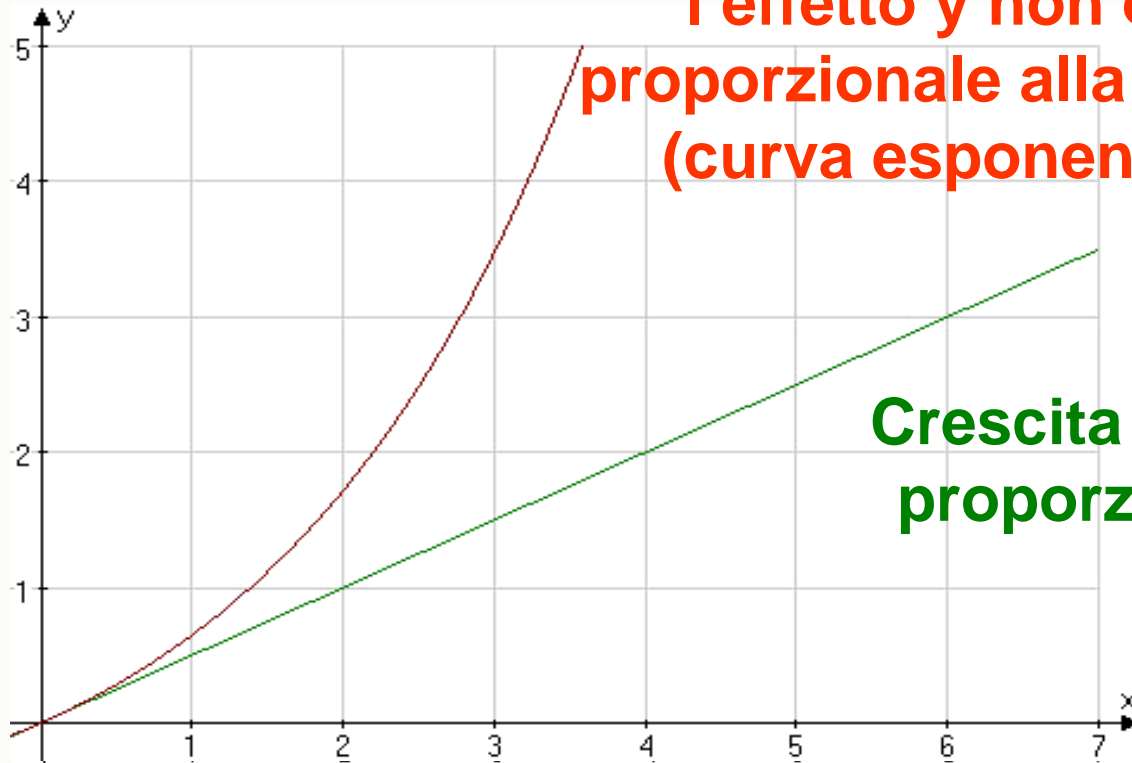


**autosimilarità**



# non linearità

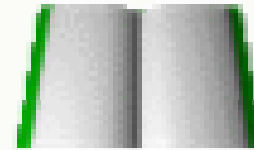
**Crescita non-lineare:  
l'effetto  $y$  non è più  
proporzionale alla causa  $x$   
(curva esponenziale)**



**Crescita lineare: l'effetto  $y$  è  
proporzionale alla causa  $x$**

# non linearità

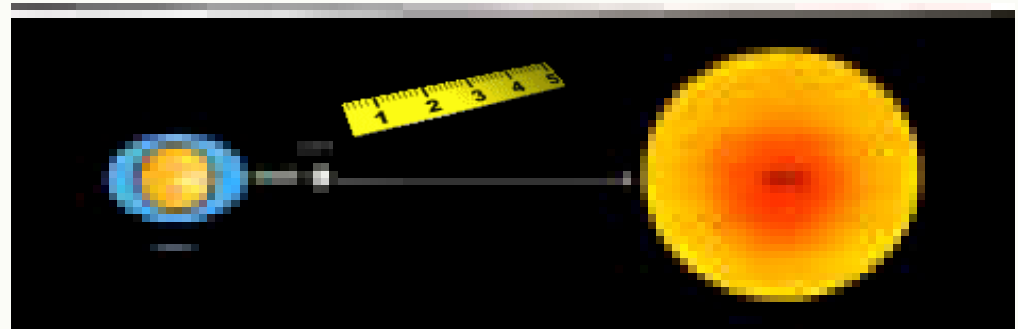
**Domanda1:** se si potesse piegare un normale foglio di carta (spesso circa 0.15mm) in due, poi di nuovo in due, e così via per **50 volte**, quale sarebbe lo spessore finale del foglio?



**Risposta lineare:** lo spessore di un elenco telefonico o al massimo l'altezza di un frigorifero

**Risposta non-lineare:** più della distanza tra la Terra e il Sole!!!

Infatti:  $(0.15\text{mm}) \times 2 \times 2 \times 2 \dots \times 2 (50 \text{ volte}) = 169.000.000 \text{ Km}$





# non linearità

**t = 0**



**t = 1 ora**



**Domanda2:** al tempo  $t=0$  in un barattolo ci sono solo due pulci che però raddoppiano di numero ogni secondo; se le pulci impiegano 1 ora esatta per riempire completamente il barattolo, quanto tempo impiegheranno a riempirlo per metà?



Risposta lineare:

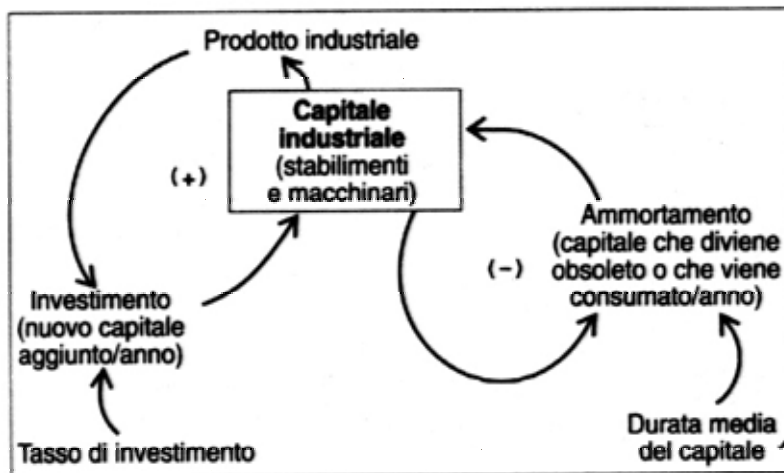
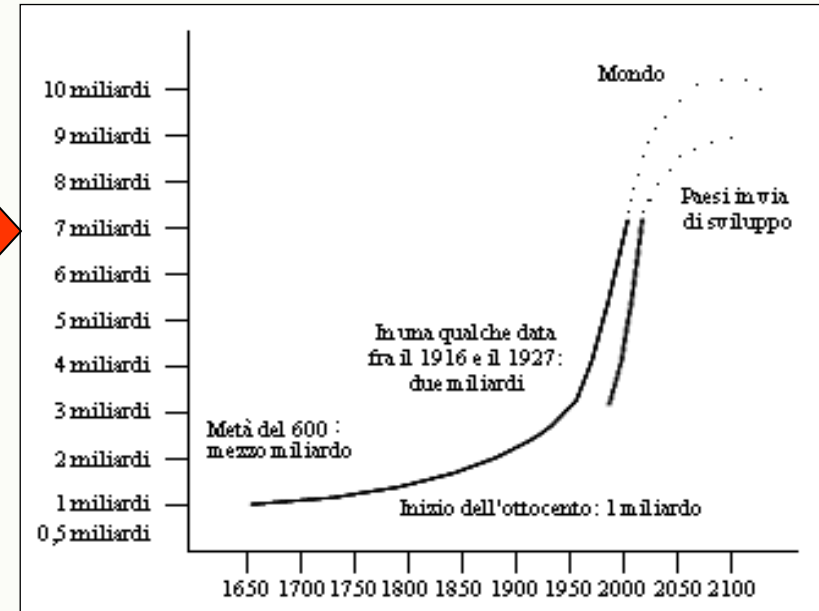
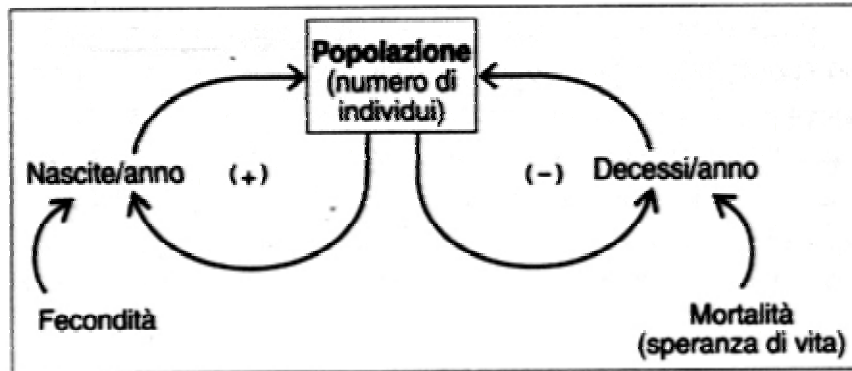
**mezz'ora**

Risposta non-lineare:

**59 minuti e 59 secondi!**

# non linearità

## Esempi di crescita non-lineare:



**Gli anelli di retroazione positivi sono il motore della crescita esponenziale!**

# soglie critiche

I sistemi non lineari di solito non cambiano gradualmente ma attraversano delle **SOGLIE CRITICHE** dopo le quali la loro **struttura** (nello spazio) e/o il loro **comportamento** (nel tempo) cambia drasticamente...



## Punti Critici nella Percezione



Rottura della  
simmetria!

indecisione...

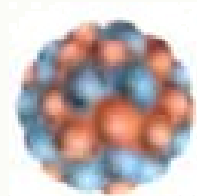
giovane o vecchia?



**Punto Critico**



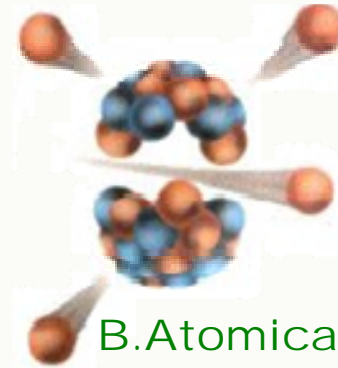
## Altri esempi di punti critici



Uranio



MASSA  
CRITICA



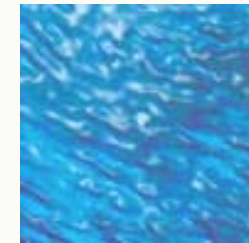
B. Atomica



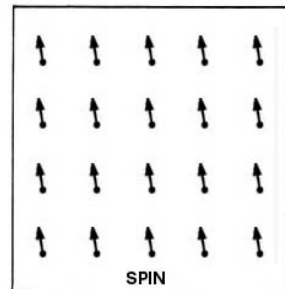
Ghiaccio



TEMPERATURA  
CRITICA

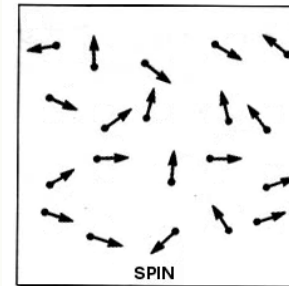


Acqua



SPIN

Magnete ordinato



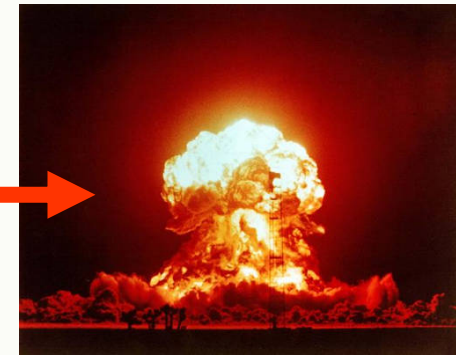
SPIN

Magnete disordinato



## In conclusione:

- 1 Quando si ha a che fare con sistemi **non lineari** diventa importante l'**EFFETTO SOGLIA** ...
- 2 Nello stato critico **piccole cause** possono produrre **effetti devastanti!**



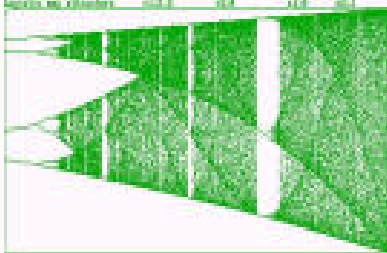
**...quindi:**

- 3 "Non stuzzicate il cane che dorme!" 😊

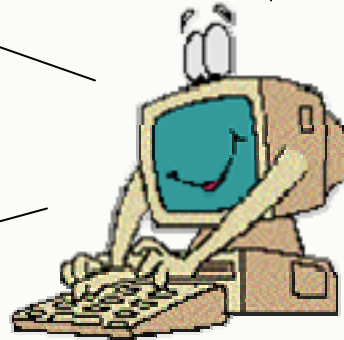
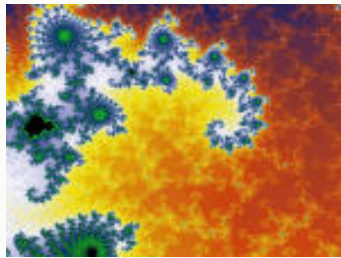


## tra ordine e caos

non linearità



autosimilarità



## "At the edge of chaos":

# Cosa si nasconde al confine tra l'ordine e il caos?

**M.C.ESCHER**



**ORDINE E CAOS**

1960, litografia, cm. 28x28

Nel mezzo è stato posto un dodecaedro stellare rinchiuso in una sfera trasparente come una bolla di sapone. In questo simbolo di ordine e di bellezza si rispecchia il caos : una raccolta di oggetti inutili di ogni tipo, rotti e accartocciati.





**i terremoti**

**le valanghe**



**gli incendi**

**l'estinzione delle specie**



## **Che cosa hanno in comune?**



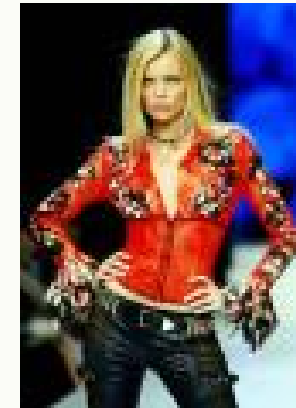
**i crolli in Borsa**

**lo scoppio delle guerre**



**gli ingorghi del traffico**

**le mode o  
le epidemie**

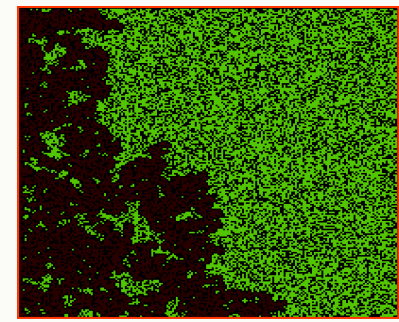
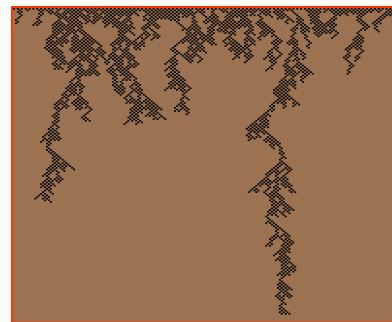
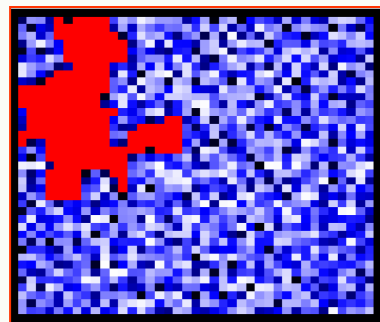
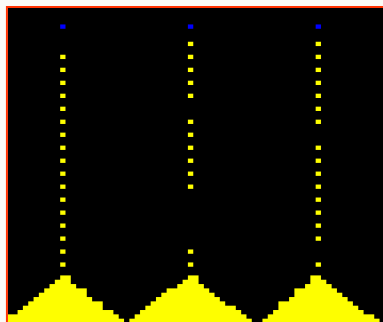


**Ebbene: tutti questi sistemi, e molti altri,  
per quanto diversi tra loro, si organizzano  
spontaneamente nel cosiddetto:**

## **"Stato Critico"**

Si tratta di una situazione di estrema instabilità situata al **confine**  
**tra ordine e caos**, molto sensibile alle condizioni iniziali e  
fortemente dipendente dalla **'storia passata'** del sistema.

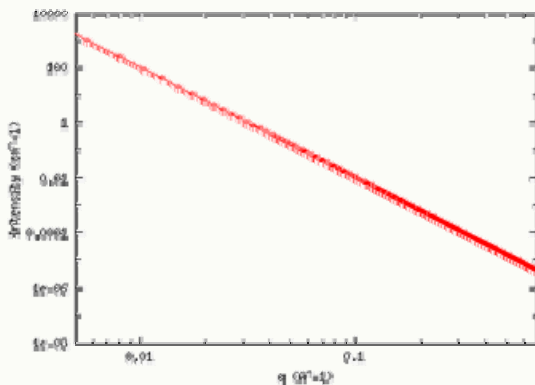
**IMPORTANTE:** quando un sistema si trova nello **'stato critico'**,  
piccole cause possono produrre effetti di qualsiasi dimensione...





Il concetto di “**criticità auto-organizzata**”  
permette di capire come migliaia di sistemi  
collettivi, apparentemente assai diversi tra loro,  
siano tutti riconducibili a **semplici modelli  
matematici** dotati della stessa logica di base e  
soprattutto della stessa firma:

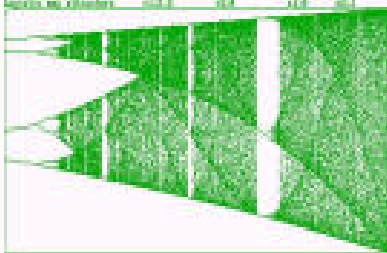
**la legge di potenza!**



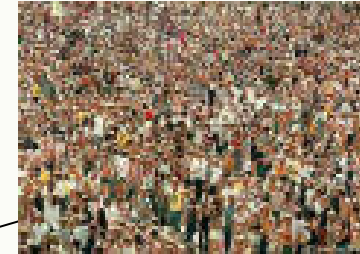
prossimità allo 'stato critico'  
possibilità di 'effetti valanga'  
invarianza di scala e autosimilarità  
dipendenza dalla storia passata  
**fenomeni emergenti...**

## tra ordine e caos

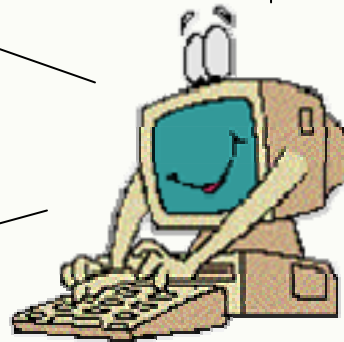
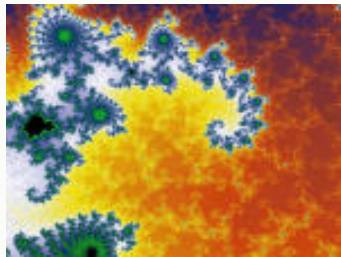
non linearità



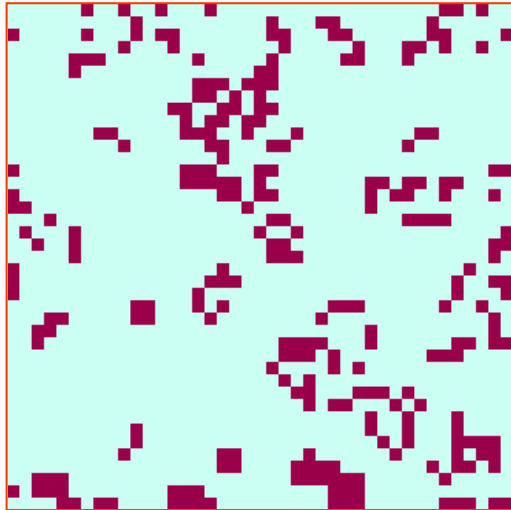
fenomeni emergenti



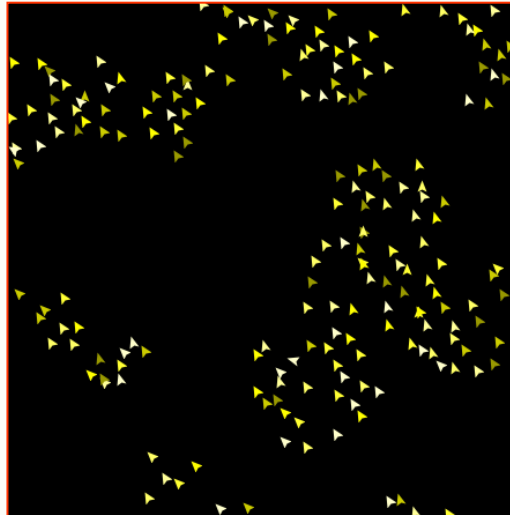
autosimilarità



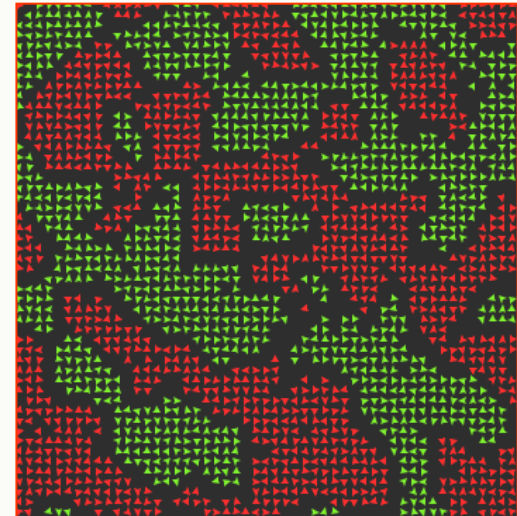
## IL GIOCO 'LIFE'



## STORMI



## SEGREGAZIONE



# fenomeni emergenti



## Tamas Vicsek (Ungheria)

Comportamenti collettivi di sistemi viventi  
composti da numerose unità simili ed interagenti

### società

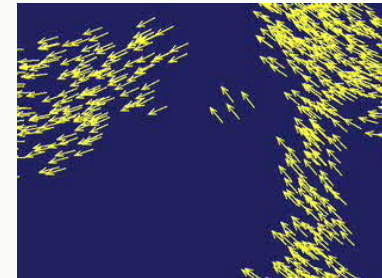


Sincronizzazione

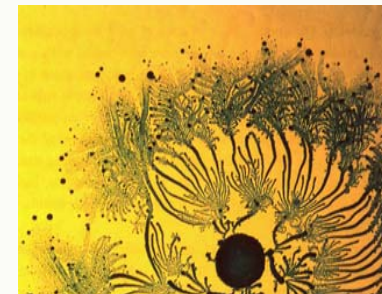


Moti collettivi

### biologia

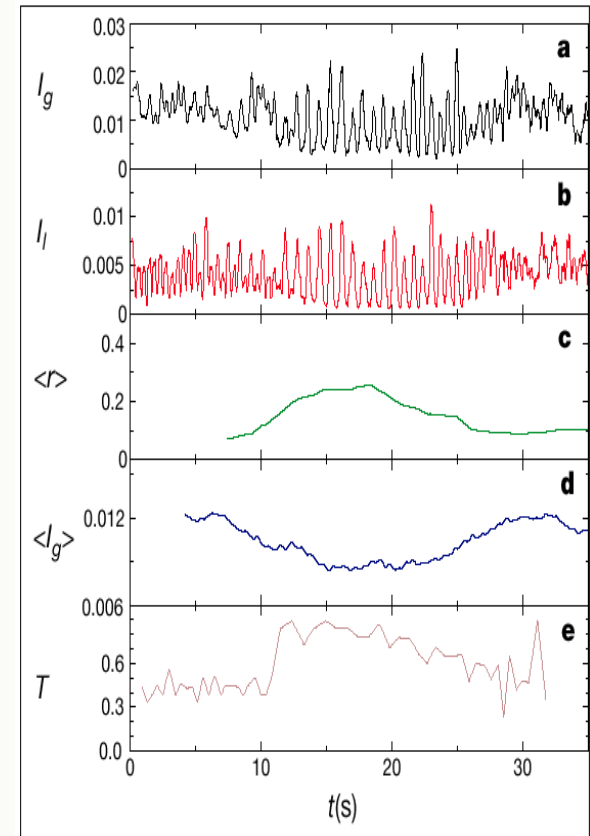


Stormi e Branchi



Patterns emergenti

# Applauso



Nature, 403 (2000) 849

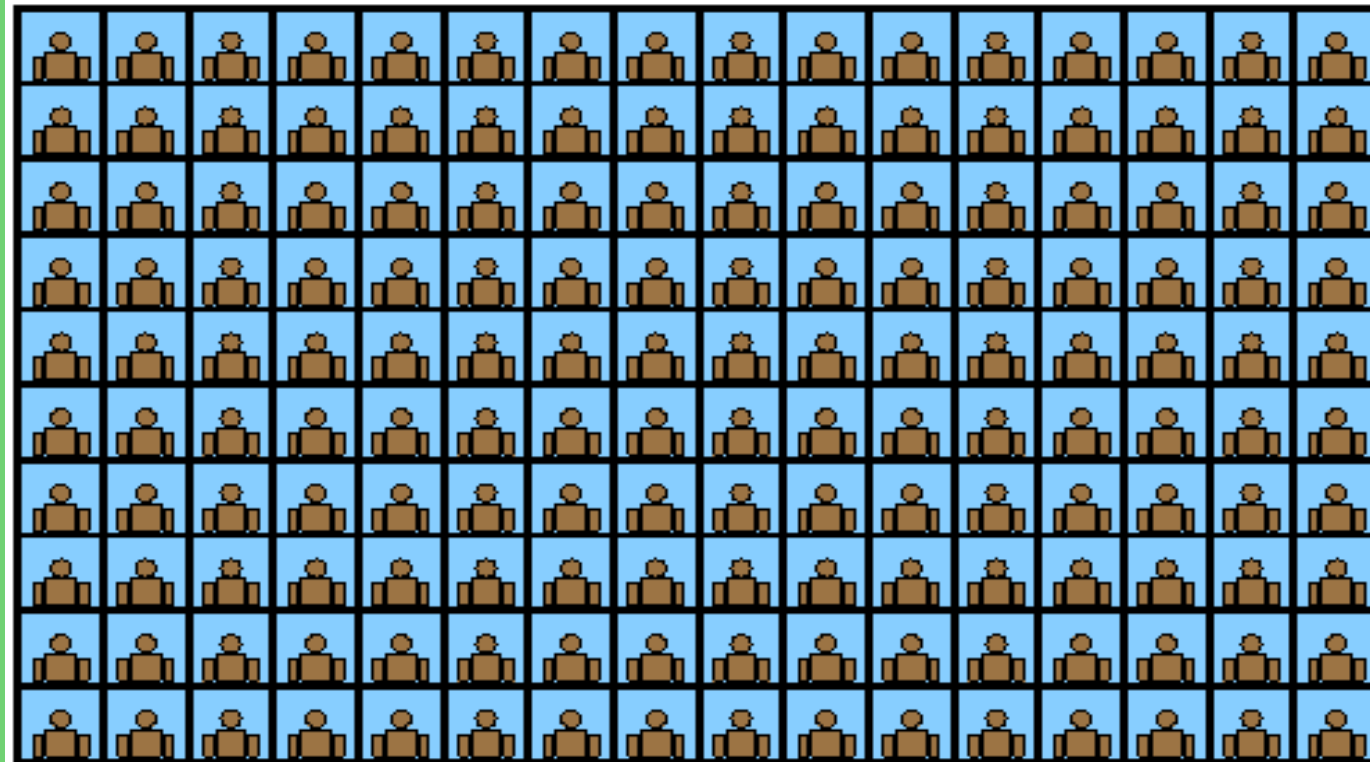


# Mexican Wave





# Mexican Wave



# Panico nello stadio



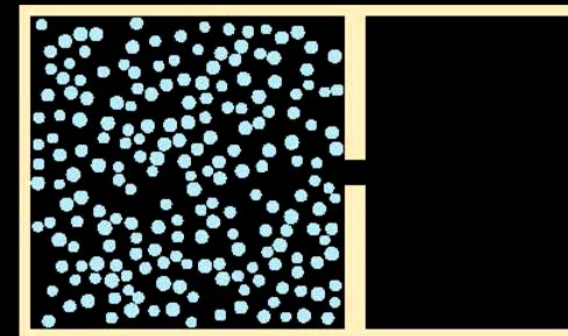
# Panico

494  
GUATEMALA: STADIUM  
DURATION: 3.12  
SHOT: OCTOBER 16-17,  
1996  
SOUND: NATURAL/SPANISH  
SEE SCRIPT FOR RESTRIX



- Fuga da un'area chiusa con una sola uscita.
- In prossimità dell'uscita le forze fisiche sono dominanti !

$t = 0$   
 $N = 200$   
 $V_0 = 5$

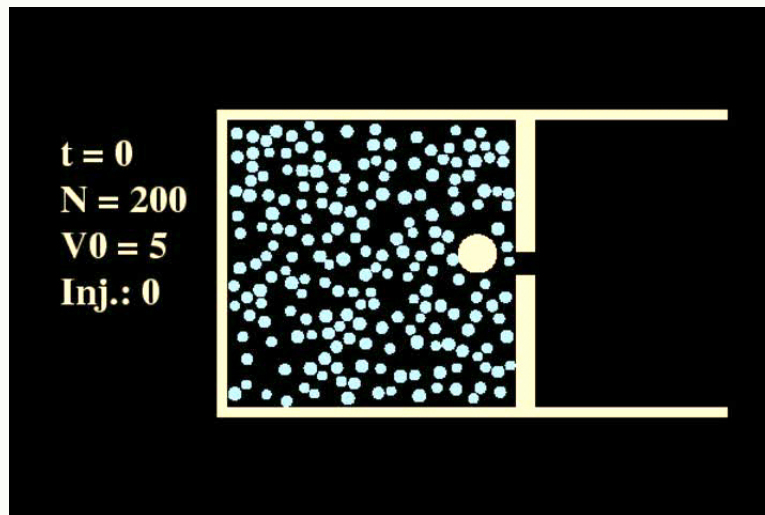


Nature, 407 (2000)  
487

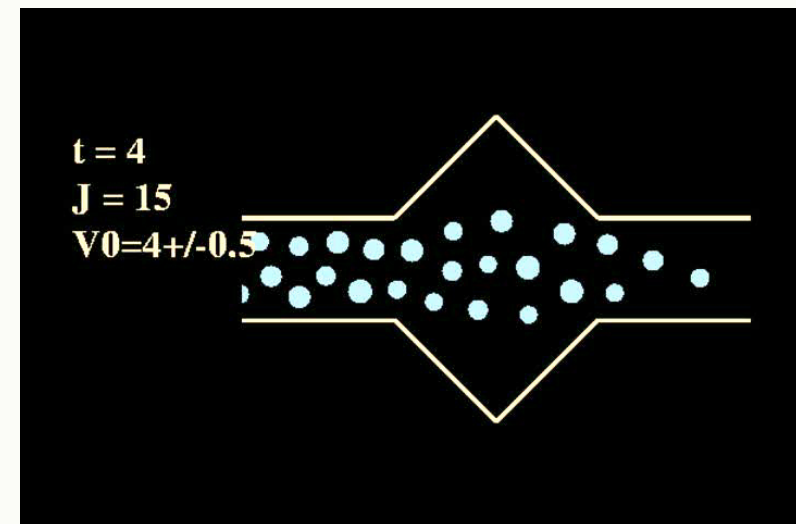


## Effetti paradossali...

Un ostacolo aiuta il deflusso

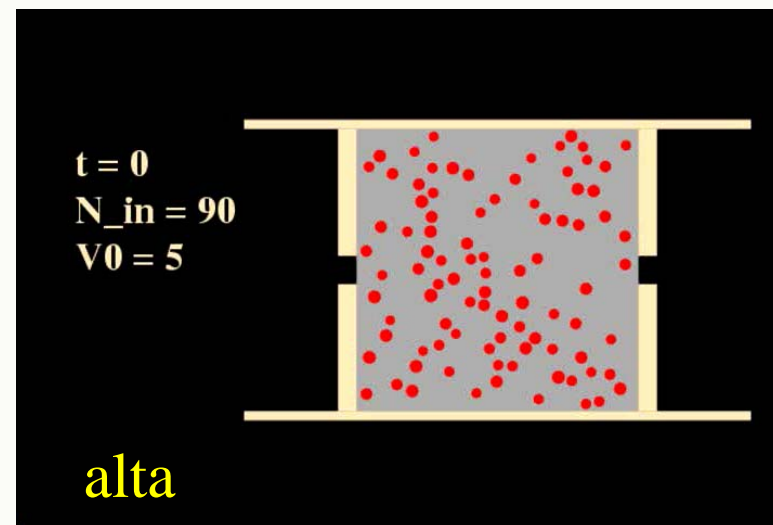
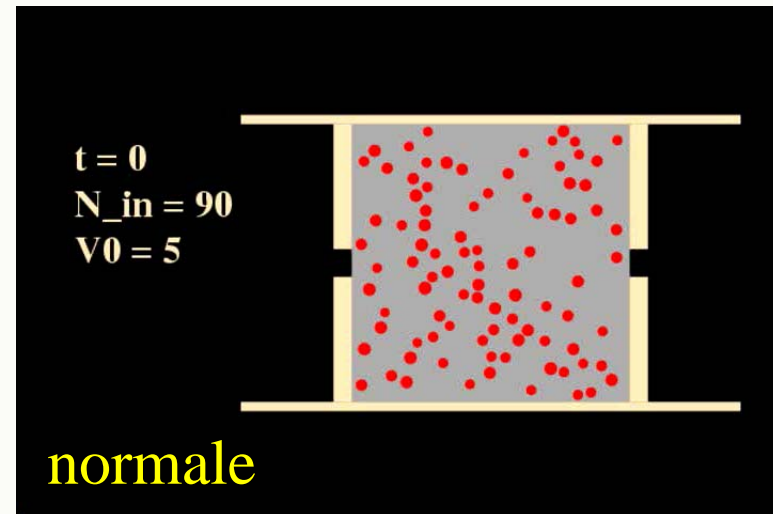
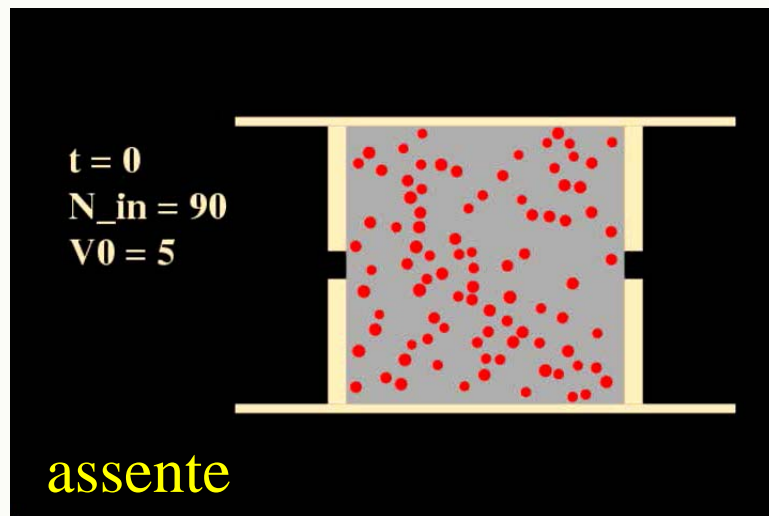


Uno slargo danneggia il deflusso



## Imitazione

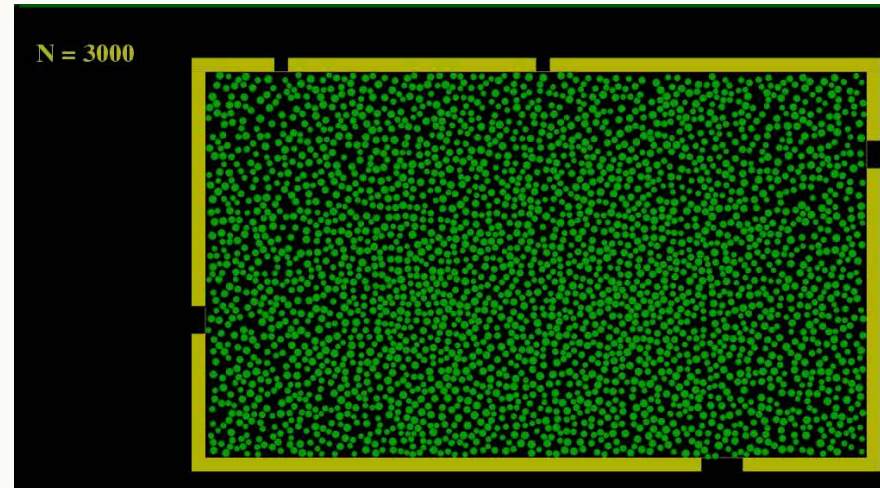
- Panico in una stanza al buio.
- Viene variata la tendenza ad imitare il comportamento altrui.



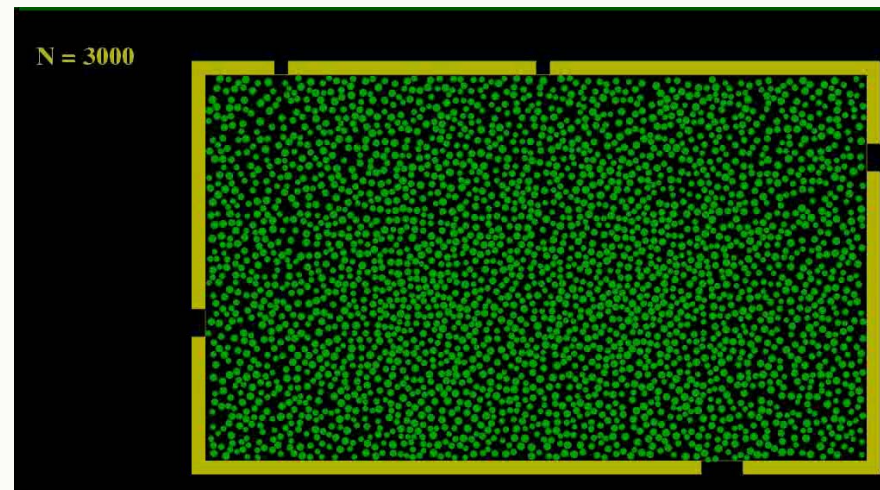
# Panico

“Impazienza e  
fattore di ansietà”

Qui si vede che l'ansietà  
aiuta il deflusso, perchè  
consente alla gente di  
effettuare accessi  
casuali alle varie uscite



Poca ansia

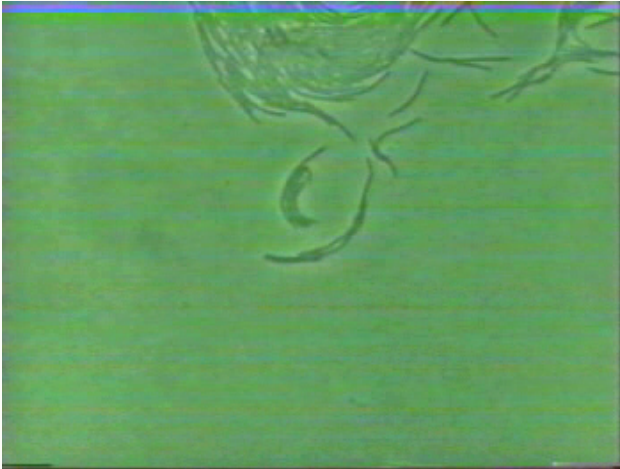


Molta ansia



# fenomeni emergenti

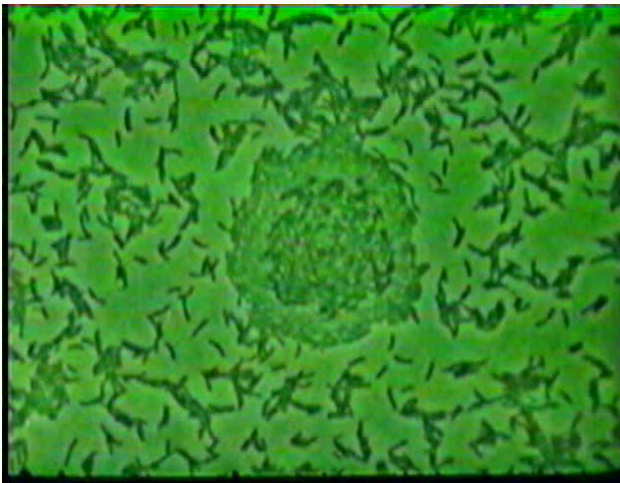
**cellule**



**stormi e branchi**



**batteri**



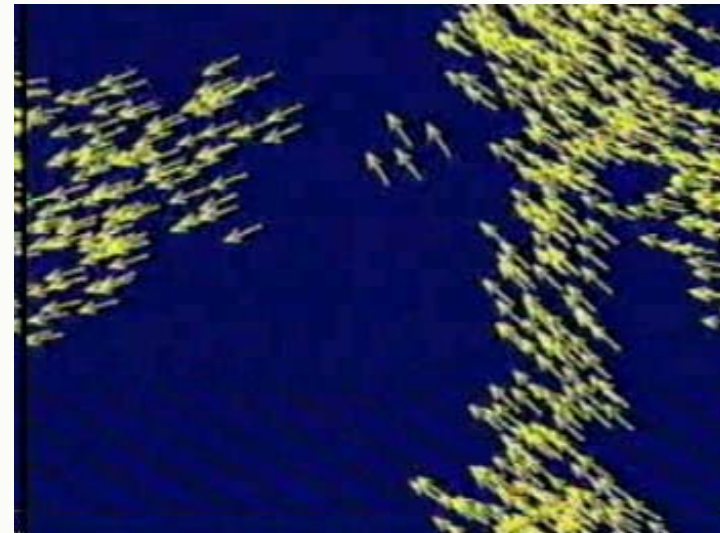
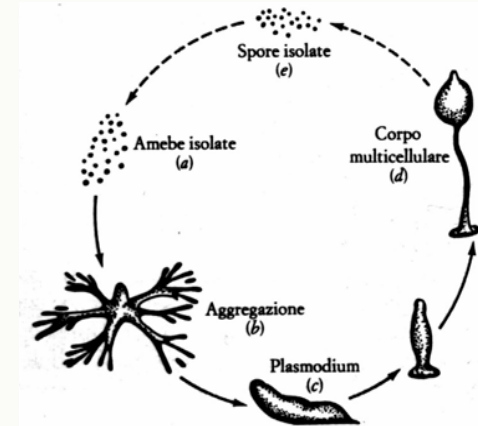
**robots**



# fenomeni emergenti



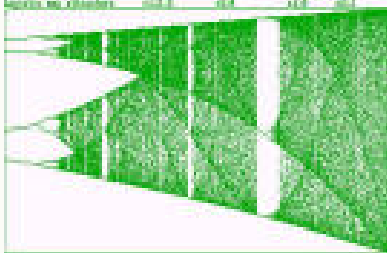
## Mixomicete Dictyostelium Discoideum



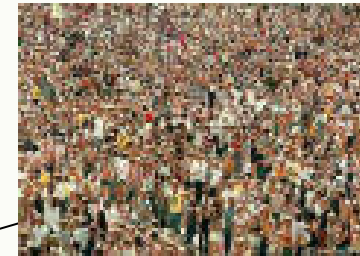


## tra ordine e caos

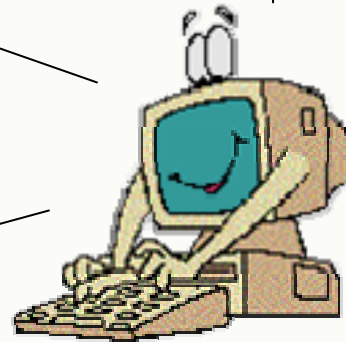
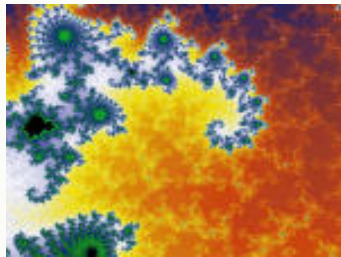
**non linearità**



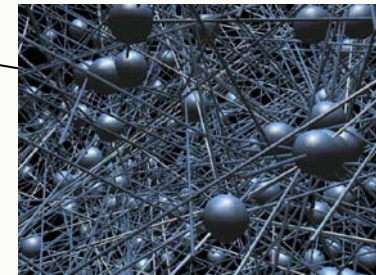
**fenomeni emergenti**



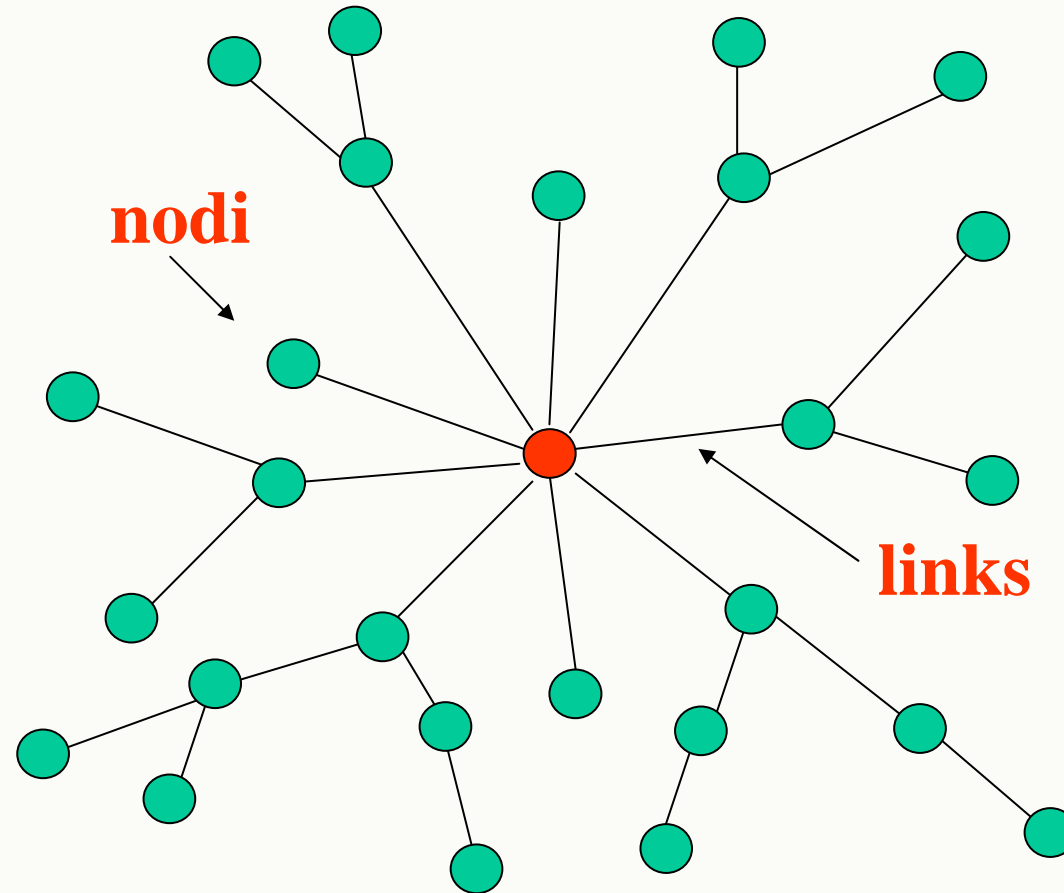
**autosimilarità**



**reti complesse**



# Rete o Grafo



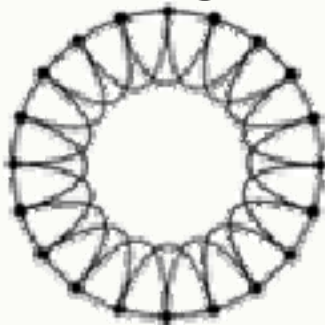
# reti complesse (networks)



**1998 - Watts e Strogatz (USA)**  
**Indagavano il comportamento delle reti complesse al confine tra ordine e caos...**

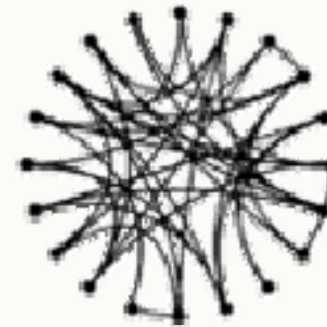


rete regolare



Ha una forte *aggregazione*,  
ma un grande *minimo cammino medio* (*minimum path length*)

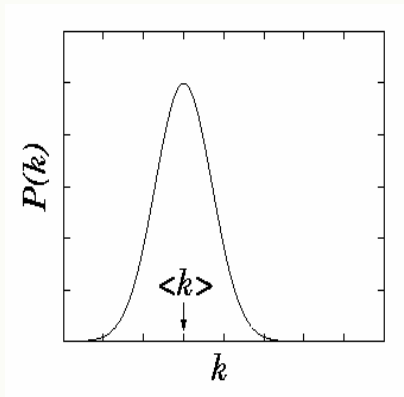
rete casuale



Ha un piccolo *min.cam.medio*  
ma non ha *aggregazione*

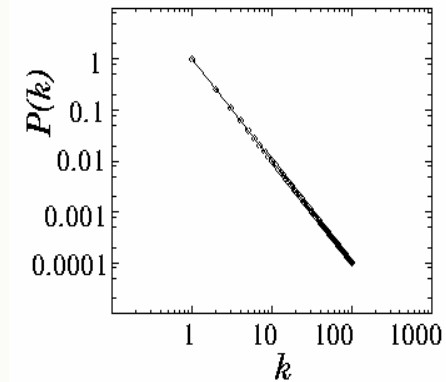
# Due tipi fondamentali di reti 'small world'

## Gaussiana

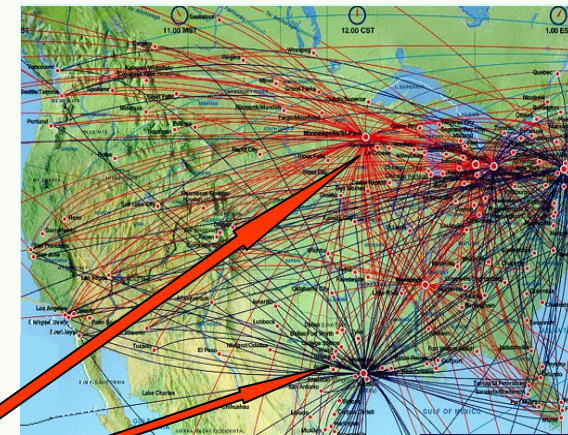


## Distribuzioni dei links

## Legge di Potenza



**L. Barabási  
(USA)**



**Reti Egalitarie:**  
 hanno una scala  
 caratteristica

**"hub", nodi  
 iperconnessi**

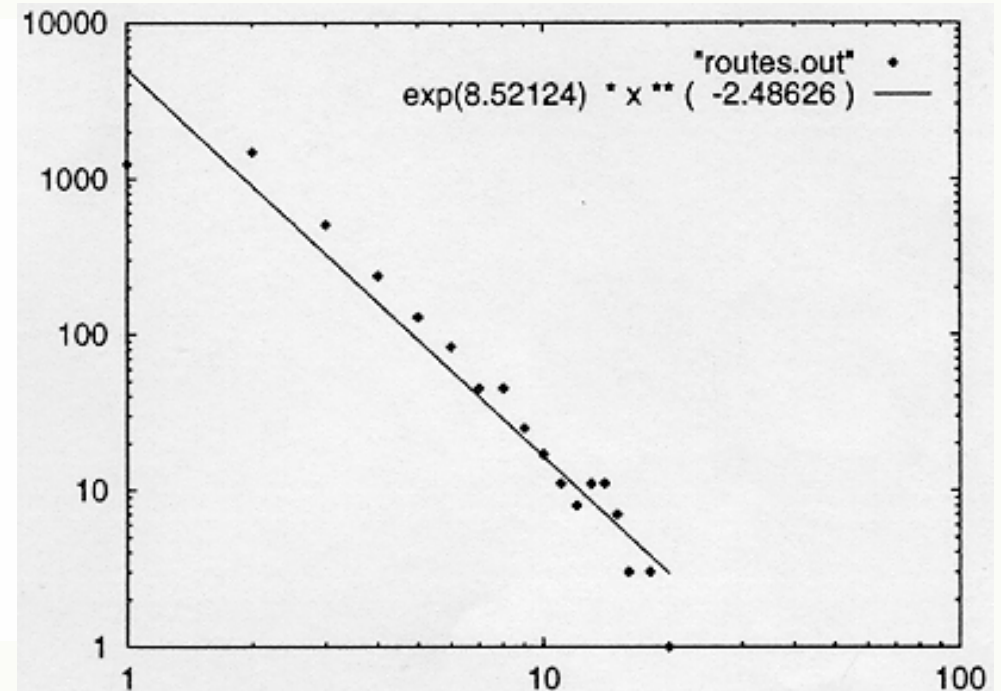
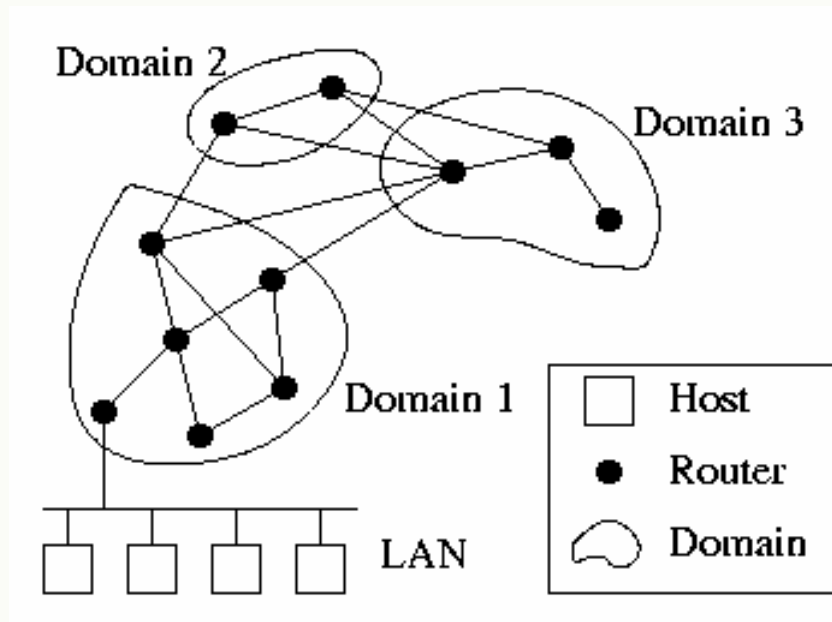
**Reti Aristocratiche:**  
 sono prive di scala  
 (scale free)



# INTERNET

Nodi: computers, routers

Links: linee di telecomunicazione



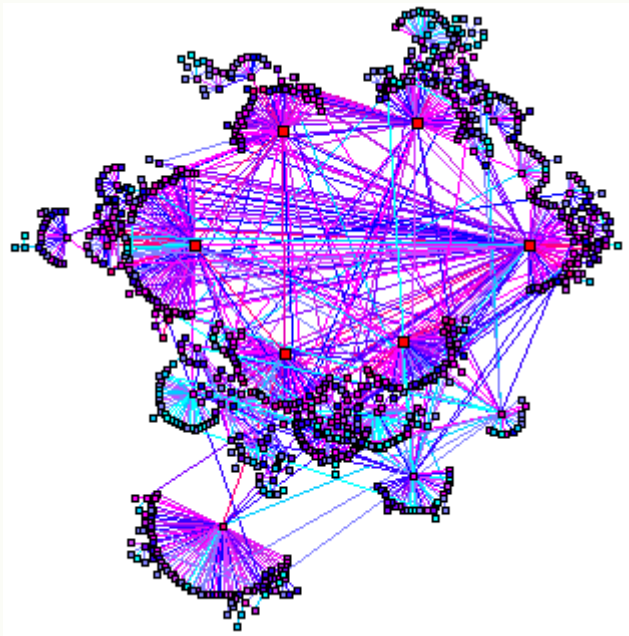
(Faloutsos, Faloutsos and Faloutsos, 1999)

# World Wide Web

**Nodes**: WWW documents

**Links**: URL links

800 milioni di documenti  
(S. Lawrence, 1999)



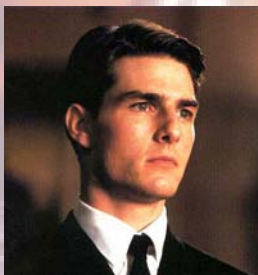
**ROBOT:** cerca tutti  
gli URL presenti in un  
documento e li esplora  
ricorsivamente

R. Albert, H. Jeong, A-L Barabasi, Nature, **401** 130 (1999)

# NETWORK DEGLI ATTORI

Nodi: attori

Links: film comuni



Days of Thunder (1990)  
Far and Away (1992)  
Eyes Wide Shut (1999)

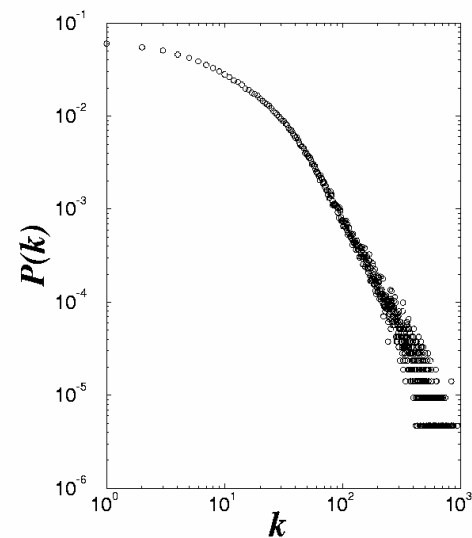


**$N = 212,250$  actors**

**$\langle k \rangle = 28.78$**

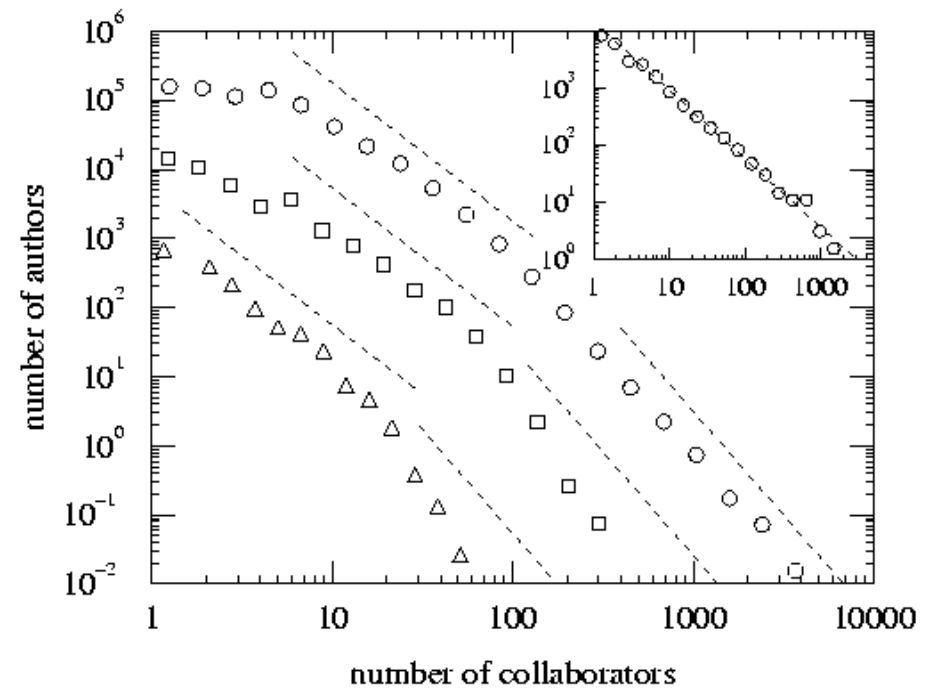
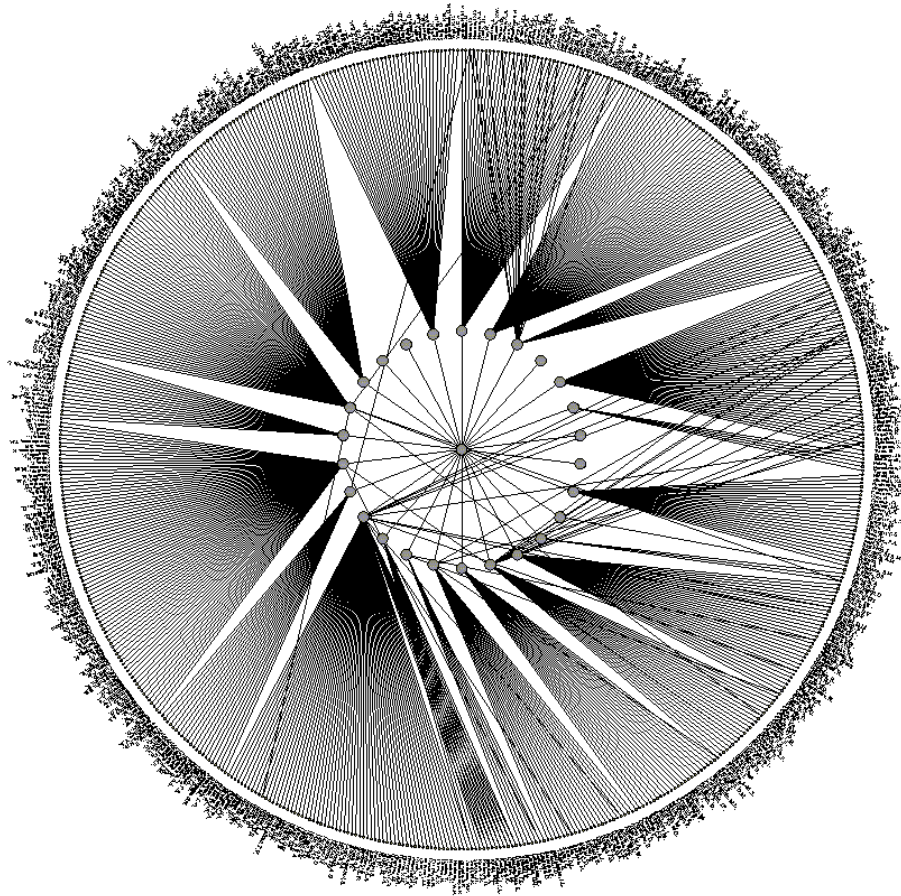
**$P(k) \sim k^{-\gamma}$**

**$\gamma = 2.3$**



Nodi: scienziati (autori)

Links: articoli in comune



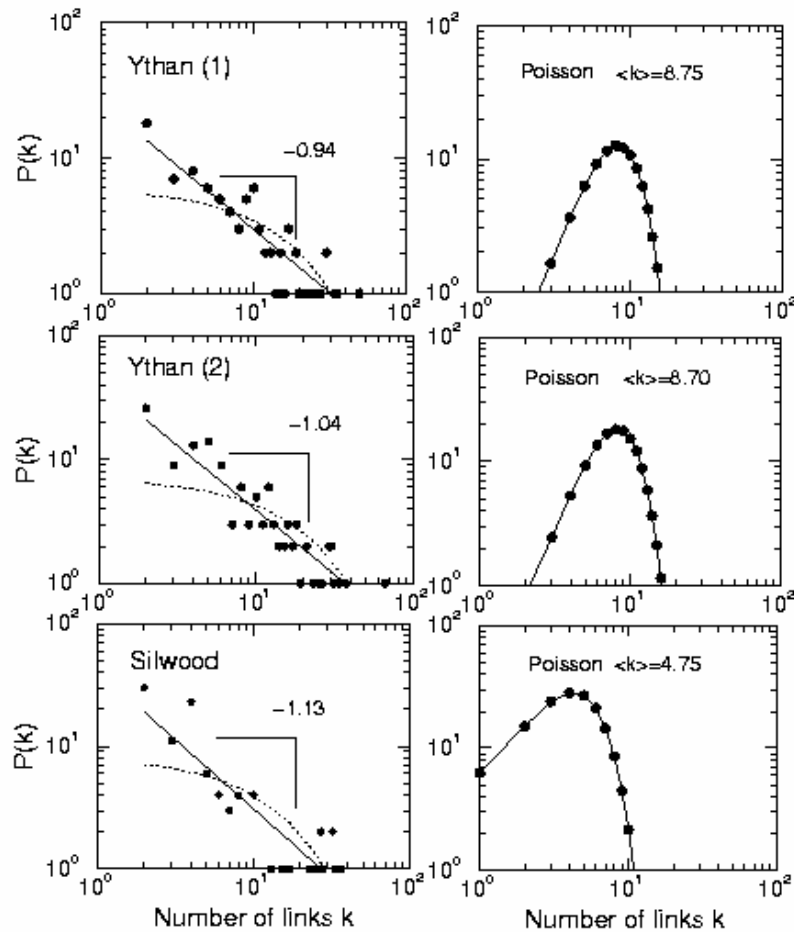
(Newman, 2000, H. Jeong et al 2001)



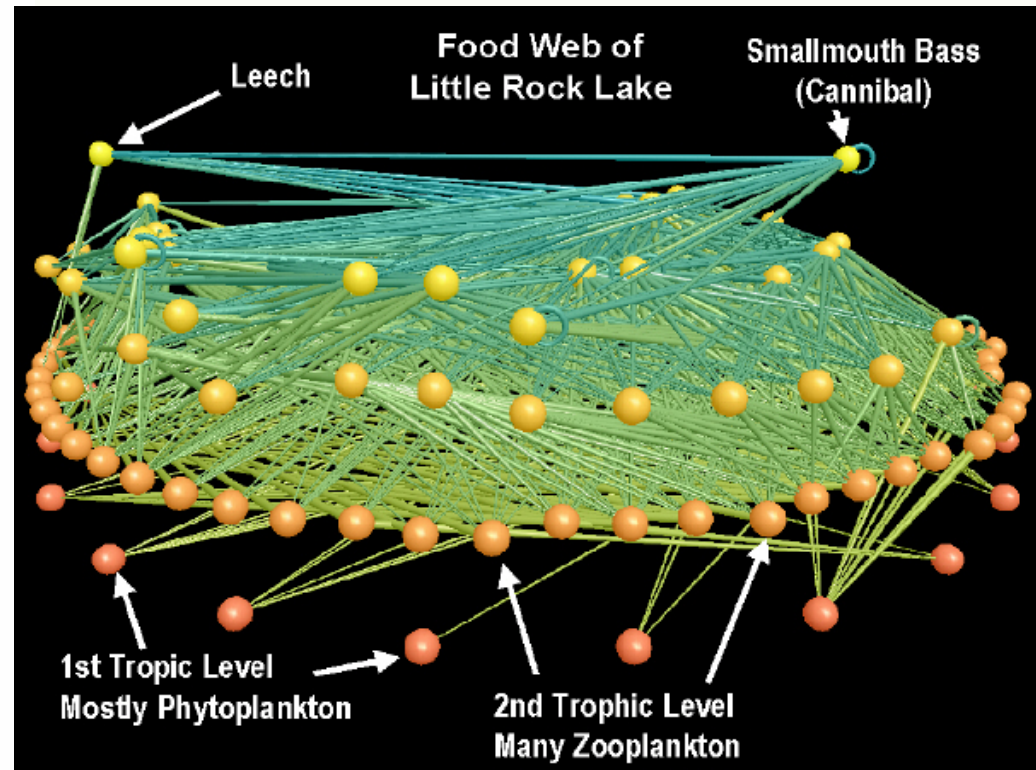
# RETI ALIMENTARI

Nodi: specie

Links: interazione preda-predatore



R. Sole (cond-mat/0011195)

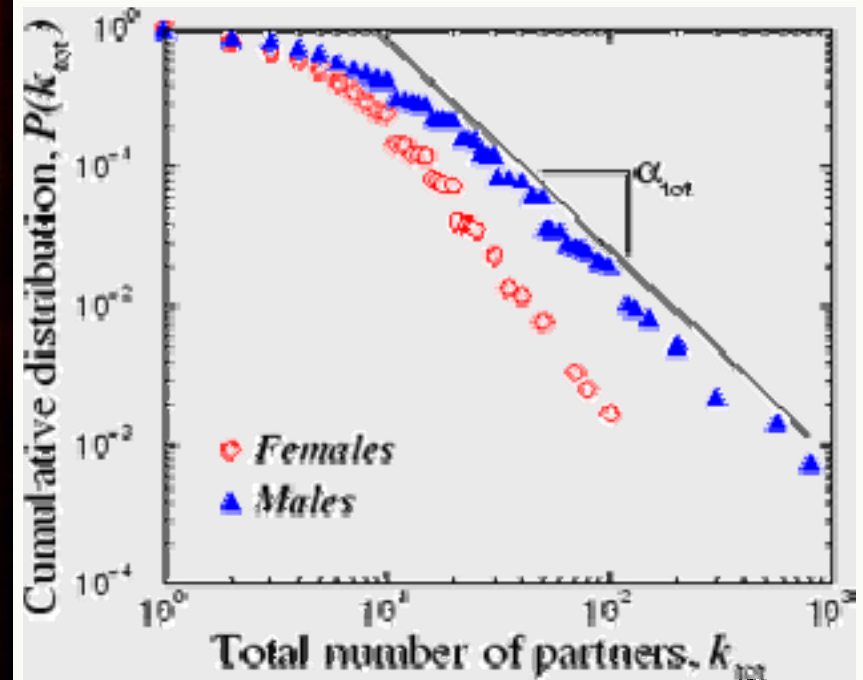


R.J. Williams, N.D. Martinez *Nature* (2000)

# RETE DEI CONTATTI SESSUALI

**Nodi:** persone (femmine;maschi)

**Links:** relazioni sessuali

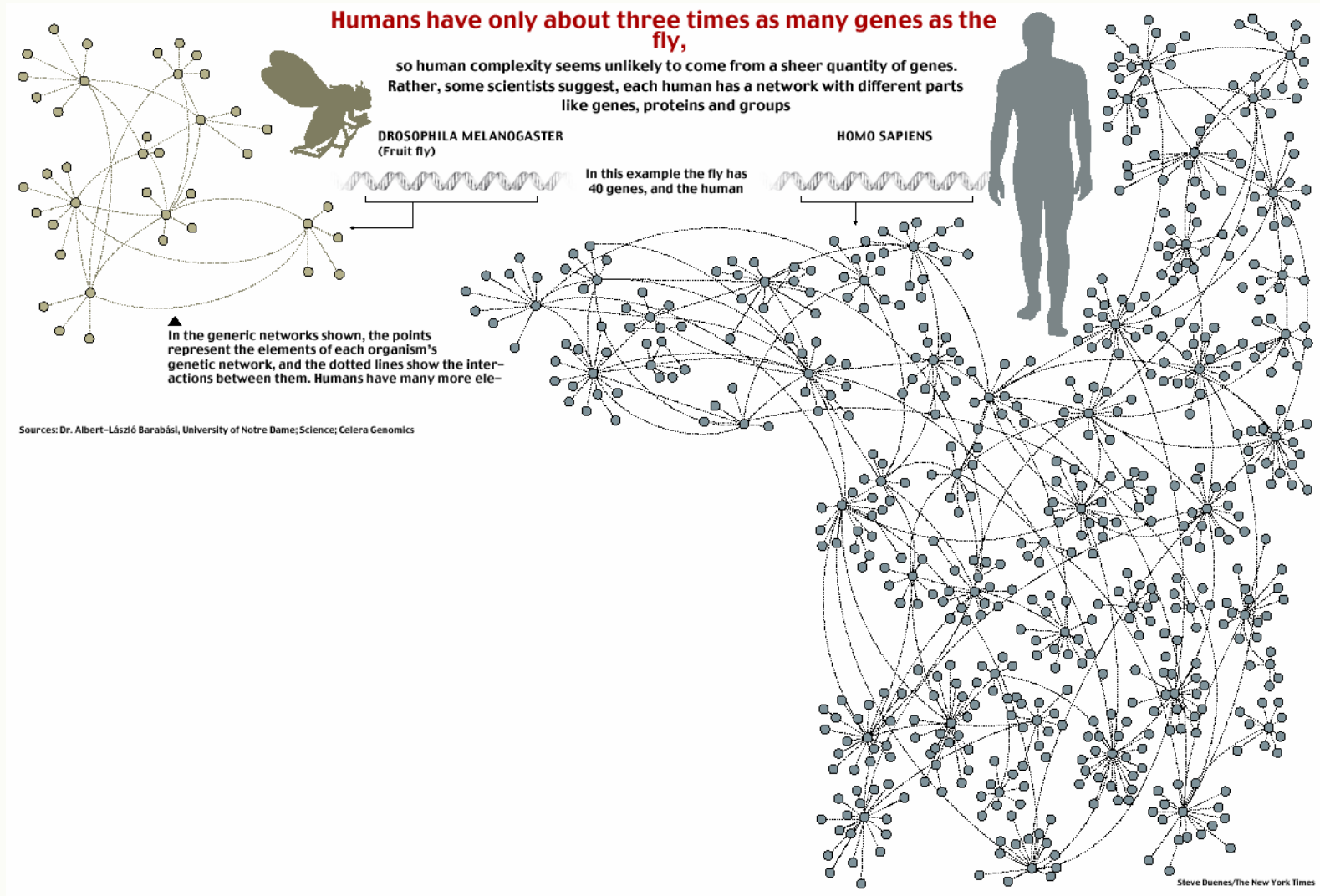


4781 Svedesi; 18-74;  
59% percentuale di risposta.

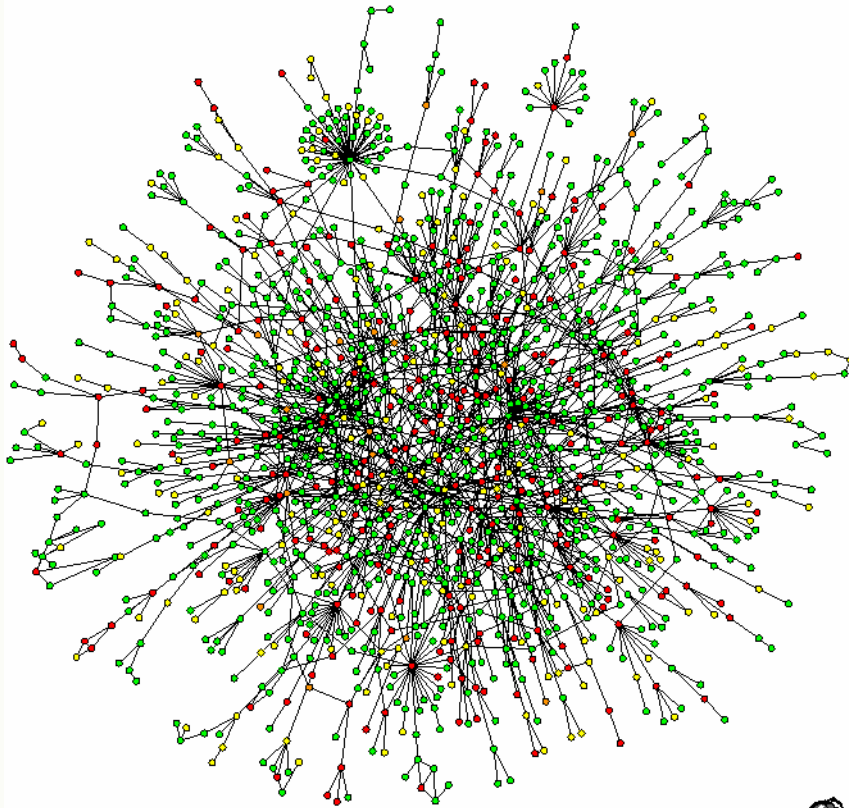
Liljeros et al. Nature 2001



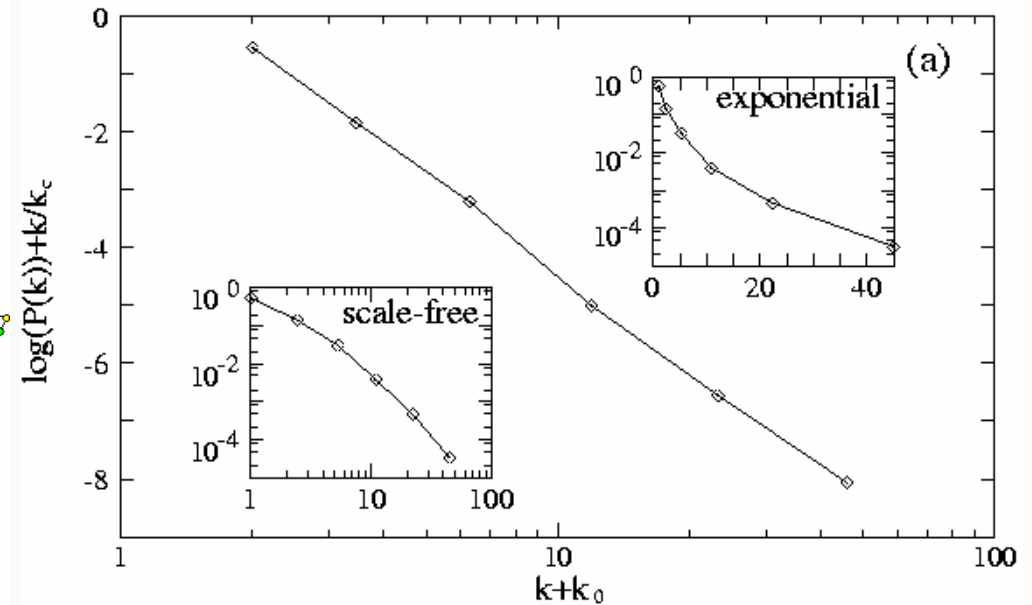
# Reti geniche



# Reti di proteine




 Paiek

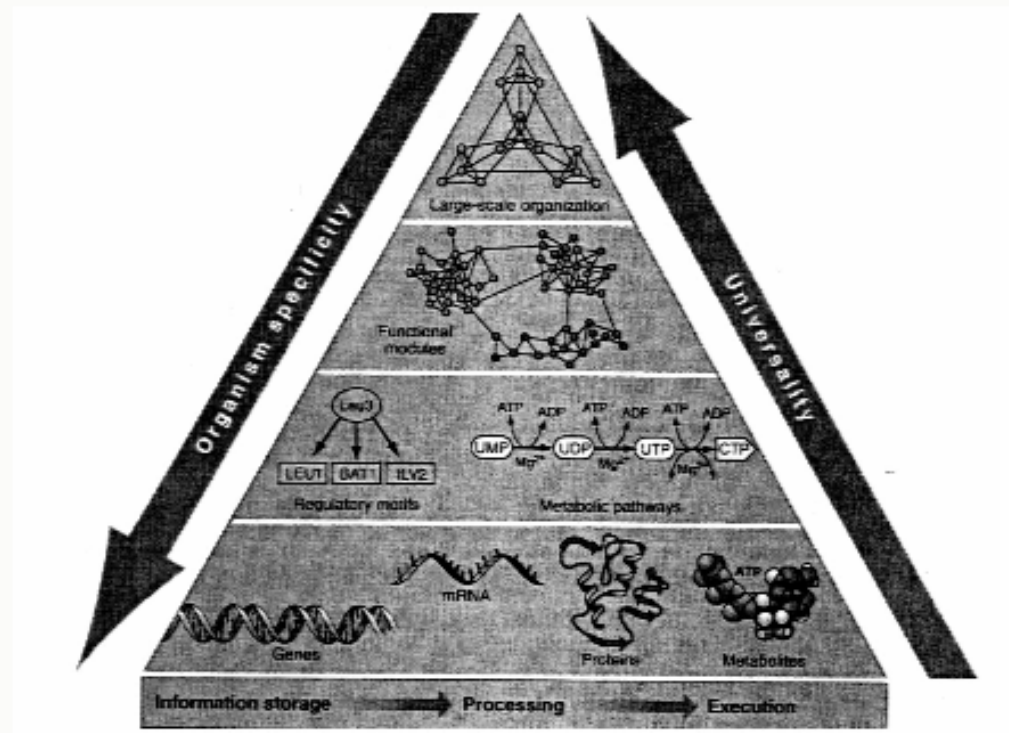


H. Jeong, S.P. Mason, A.-L. Barabasi, Z.N. Oltvai, Nature 411, 41-42 (2001)

## Riassumendo...

Moltissimi sistemi del mondo reale presentano la stessa struttura: sono reti prive di scala!

## Scale-free networks



Ma COME si formano queste reti?

In realtà il meccanismo è molto semplice ed è noto a tutti...

**I ricchi diventano sempre più ricchi!**

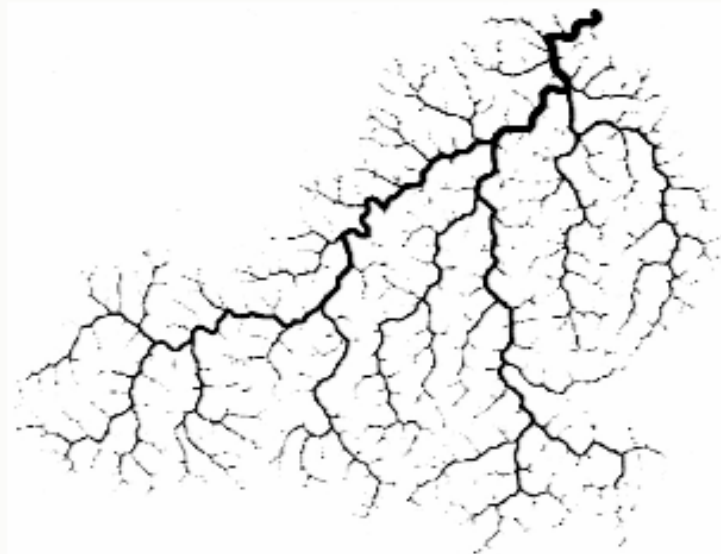


2



**Aggregazione di molecole  
limitata dalla diffusione**

2



**Rete fluviale generata da  
un processo di erosione**

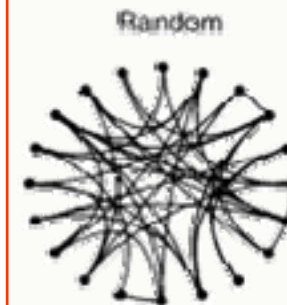
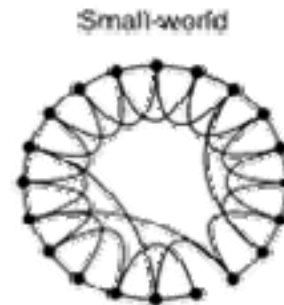
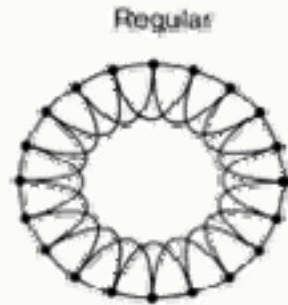


Ma **PERCHE'** la maggior parte dei sistemi complessi  
evolve *spontaneamente* in reti piccolo mondo?



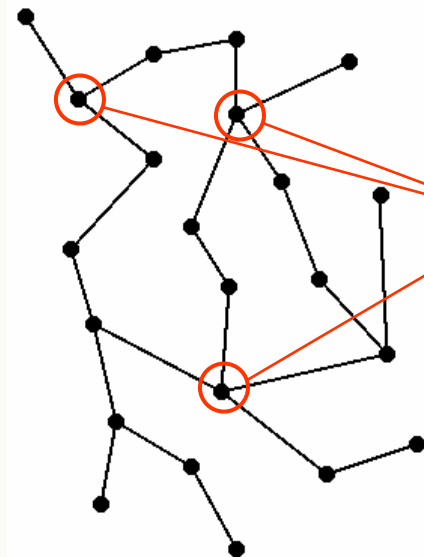
# Vantaggi delle reti piccolo mondo

**1. Maggiore efficienza nella circolazione della informazione**

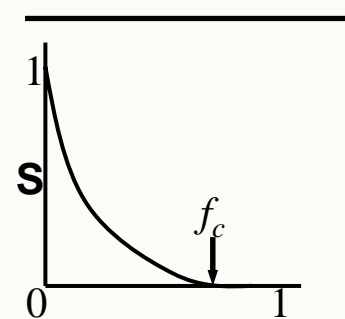


La forza dei legami deboli!

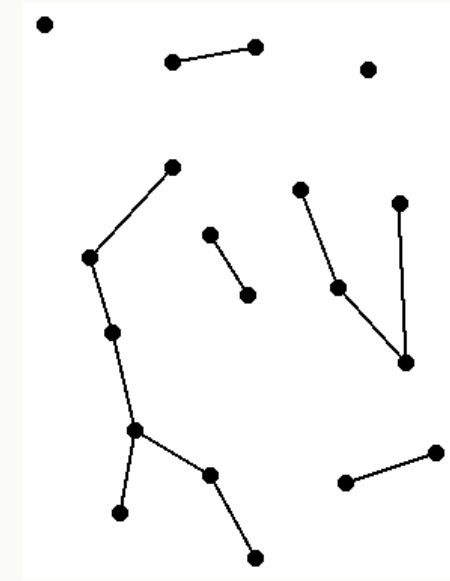
**2. Alta tolleranza agli errori, ai guasti casuali e agli attacchi non organizzati**



node failure

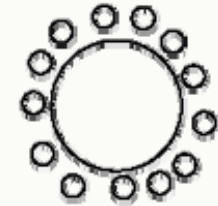
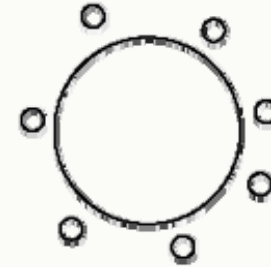
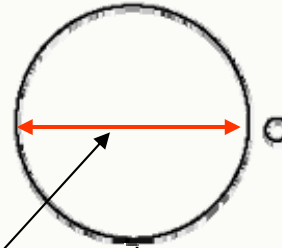


Frazione di nodi eliminati,  $f$



# Il tallone di Achille delle reti piccolo mondo

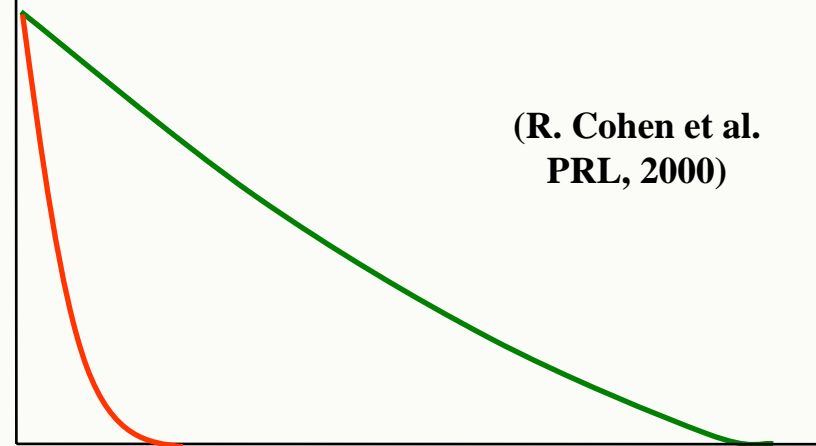
L'alta tolleranza agli errori o ai guasti casuali impedisce la frammentazione totale del sistema...



Diametro della Rete

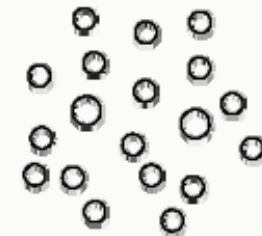
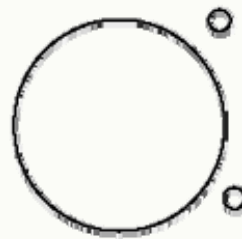
(R. Cohen et al.  
 PRL, 2000)

ma...



$f_c$  = soglia critica di hub distrutti

... non è così per gli **ATTACCHI MIRATI** agli hub, che producono rapidamente la totale disgregazione del sistema!

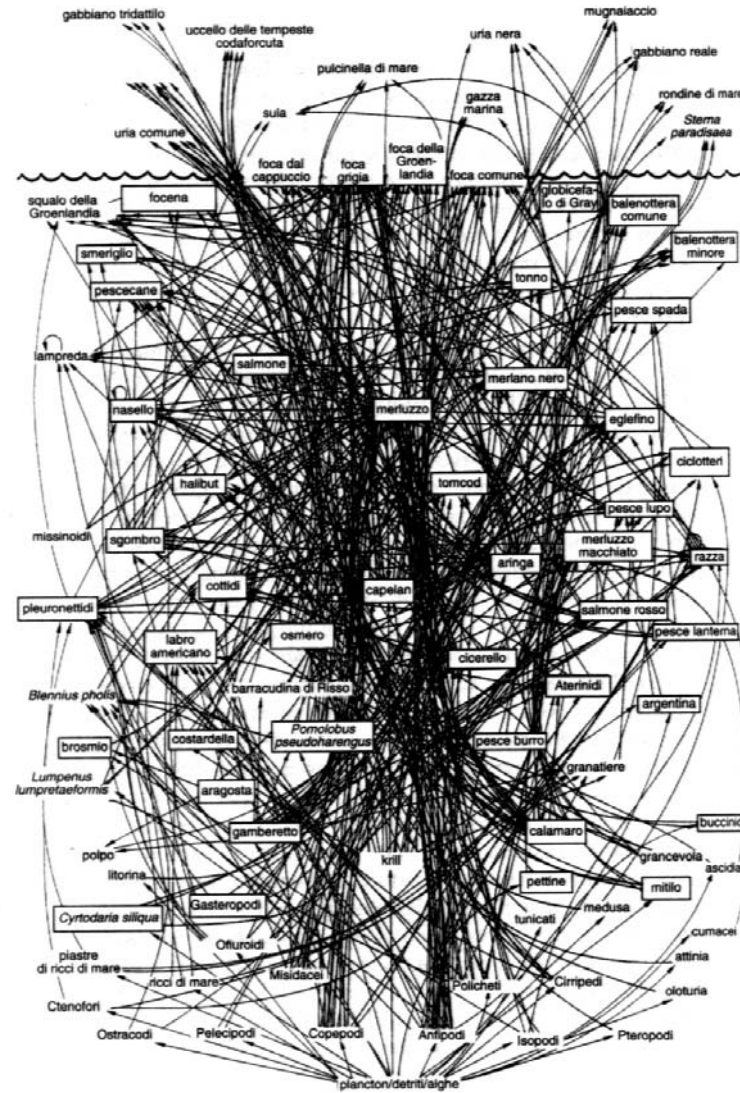


**Frammentazione totale!**

## Esempio 1: svantaggi per gli ecosistemi

**A metà degli anni '80 i merluzzi dell'Atlantico nordoccidentale cominciarono a scarseggiare...**

**...e siccome le foche della Groenlandia si nutrono di merluzzi, il governo Canadese pensò di risolvere il problema "linearmente" e sterminò per diversi anni milioni di foche!**



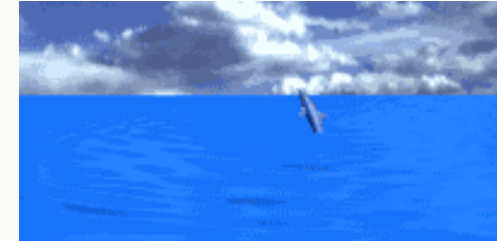
**Ma la rete alimentare nord atlantica è un sistema "scale free" formato da 150 specie diverse che interagiscono in modo complesso e non lineare!**

**Una alterazione del numero delle foche darebbe luogo a milioni di catene di retroazioni che rendono impossibile prevedere l'effetto sui merluzzi!**

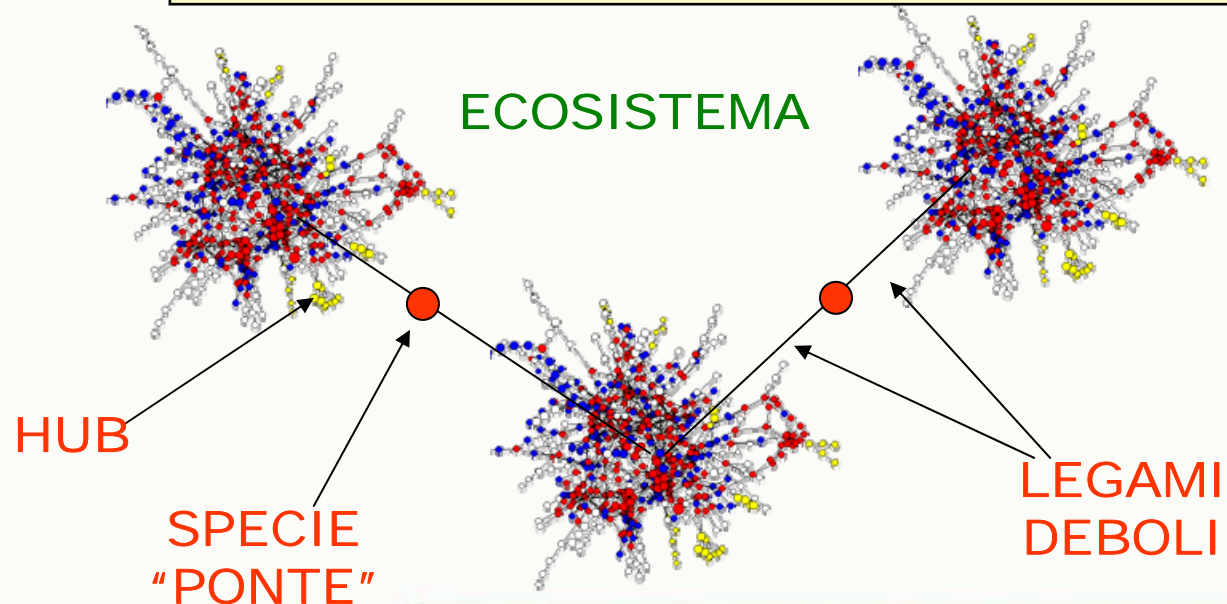
# Esempio 1: svantaggi per gli ecosistemi

## DISGREGAZIONE DEGLI ECOSISTEMI

Oggi il tasso di estinzione delle specie viventi nel globo è mille volte più alto di quanto non fosse prima della comparsa dell'uomo sulla terra...



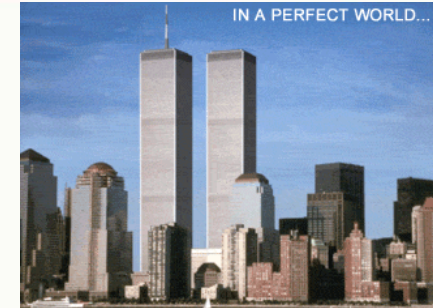
L'eliminazione di particolari *specie "perno"* (hub o specie "ponte") potrebbe distruggere un intero ecosistema (basta eliminare il 20% degli hub perché la rete si disgreghi quasi del tutto! *Solè e Montoya-2001*)



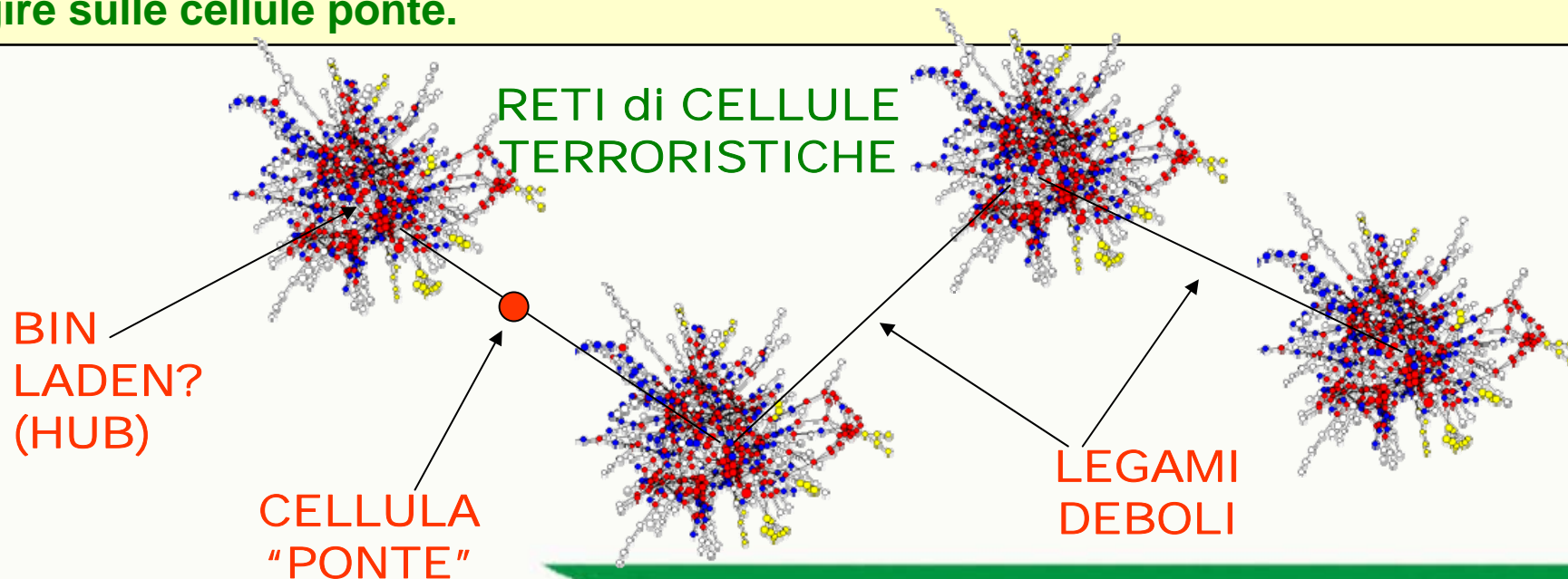


## Esempio 2: attacchi terroristici

COME PUTROPPO SAPPIAMO, ATTACCHI TERRORISTICI MIRATI AGLI HUB DELLE NOSTRE RETI SOCIALI, ECONOMICHE ED INFORMATICHE POSSONO PRODURRE GRAVISSIME CONSEGUENZE...



D'altra parte la conoscenza delle proprietà strutturali delle reti piccolo mondo potrebbe aiutarci nel tentativo di neutralizzare le reti di **cellule terroristiche decentrate** tipo Al Qaida. In questo senso eliminare Bin Laden potrebbe essere inutile, mentre per disgregare il sistema potrebbe essere più efficace agire sulle cellule ponte.

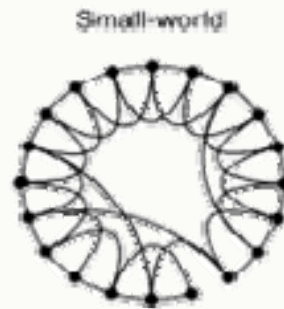
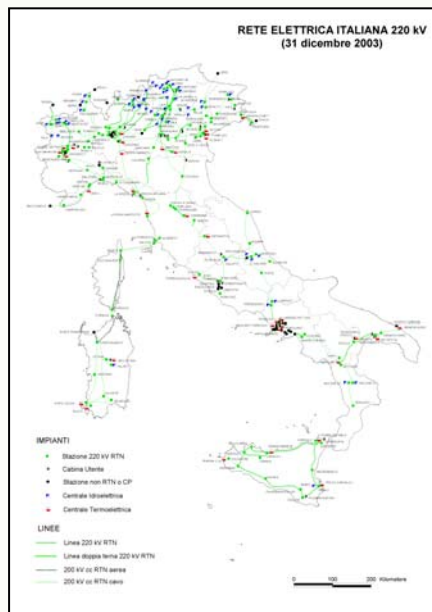


## Esempio 3: rischi di black-out

### LA STRUTTURA DI PICCOLO MONDO DELLE RETI ELETTRICHE CI ESPONE A RISCHI DI BLACK-OUT

Le reti elettriche, come sappiamo, sono egualitarie e non hanno HUB ma i loro legami deboli le espongono comunque a rischi di black-out totali (come è accaduto nel 2003 sia negli Stati Uniti – ad Agosto – che in Italia – a Settembre).

#### RETE ELETTRICA ITALIANA



#### RETE ELETTRICA DEGLI STATI UNITI



## Esempio 4: diffusione di epidemie

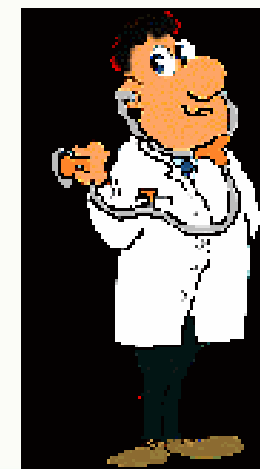
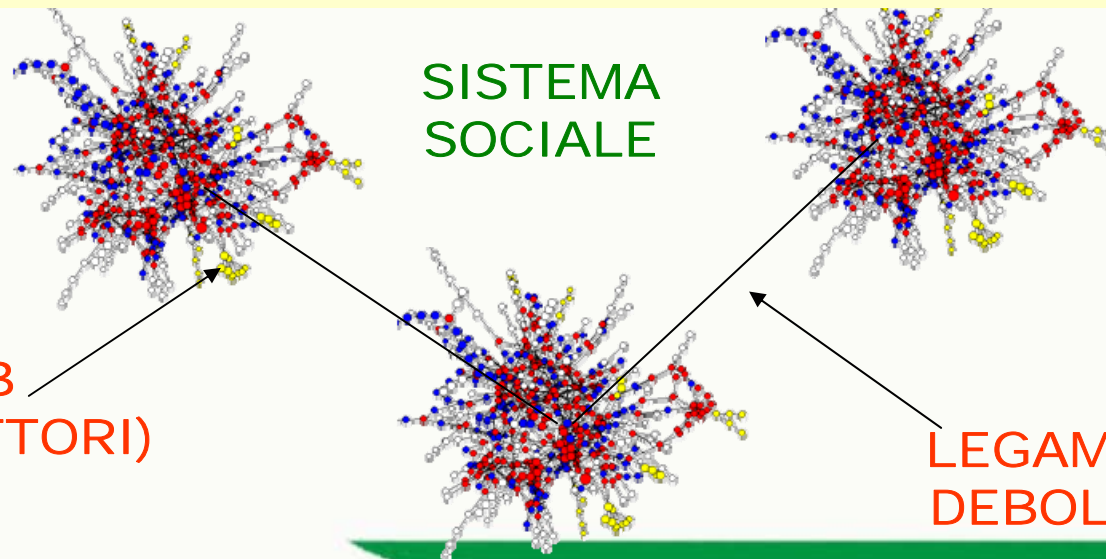
### SOGLIE CRITICHE NELLA ESPLOSIONE DELLE EPIDEMIE INFETTIVE E NELLA DIFFUSIONE DELLE MODE E DEI VIRUS INFORMATICI



**RETI REGOLARI:** L'epidemia rimane circoscritta a causa della mancanza di connettori e di legami deboli (“**gruppi chiave**”).

**RETI EGUALITARIE:** Esiste una soglia critica nella percentuale di legami deboli di lunga distanza, oltre la quale l'epidemia si espande senza controllo (*Zanette - 2001*)

**RETI ARISTOCRATICHE:** La presenza di connettori azzerava la soglia critica: quindi le malattie e i virus si diffondono *in ogni caso!* (*Vespignani-Pastor Satorras - 2001*)

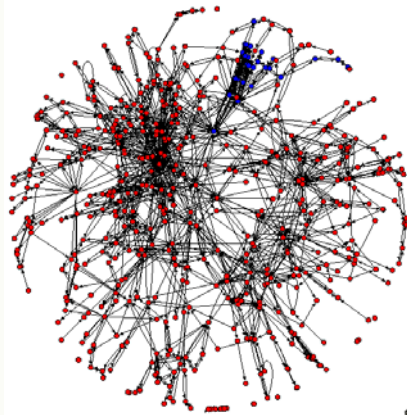


## Esempio 5: svantaggi per l'economia

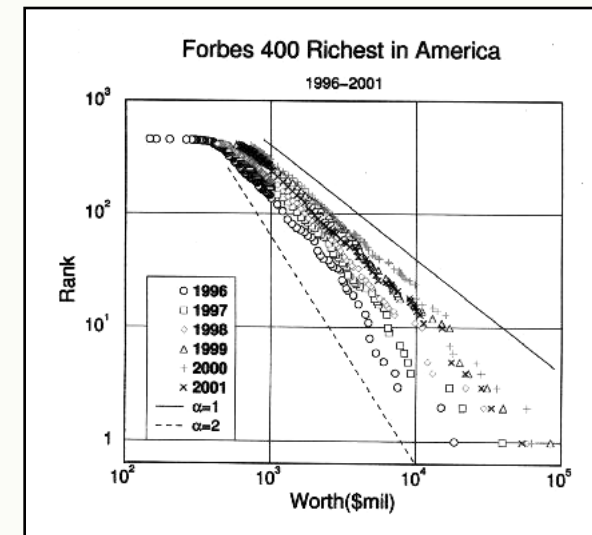
### L'INEVITABILITA' DELLA LEGGE DI PARETO E DELLA SPEREQUAZIONE DELLA RICCHEZZA

Il ricco diventa veramente sempre più ricco! La sperequazione non dipende dalle capacità o dal talento nel "far soldi" dei singoli individui ma solo dall'irregolarità dei "ritorni di investimento" ed emerge spontaneamente come caratteristica organizzativa della rete! (Bouchaud-Mezard-2001)

#### RETE DELLA RICCHEZZA



Vilfredo Pareto (1897)

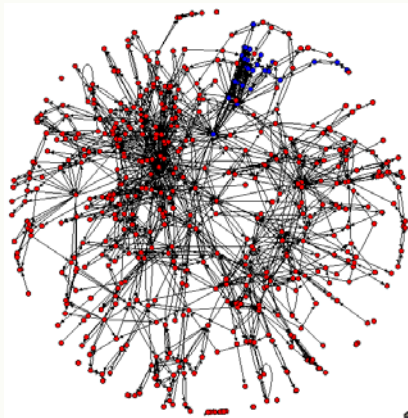




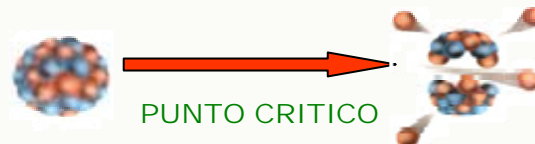
### SOGLIA CRITICA DI SUPERCONCENTRAZIONE DELLA RICCHEZZA

Se le irregolarità dei ritorni di investimento sono troppo forti la ricchezza rischia di “**superconcentrarsi**” nelle mani di pochissimi individui e un sistema sociale ed economico che attraversi questa soglia critica può subire una trasformazione drammatica...

Questo **punto critico** dipende anche dall'instabilità politica ed esiste in qualsiasi sistema economico. (Bouchaud-Mezard-2001)

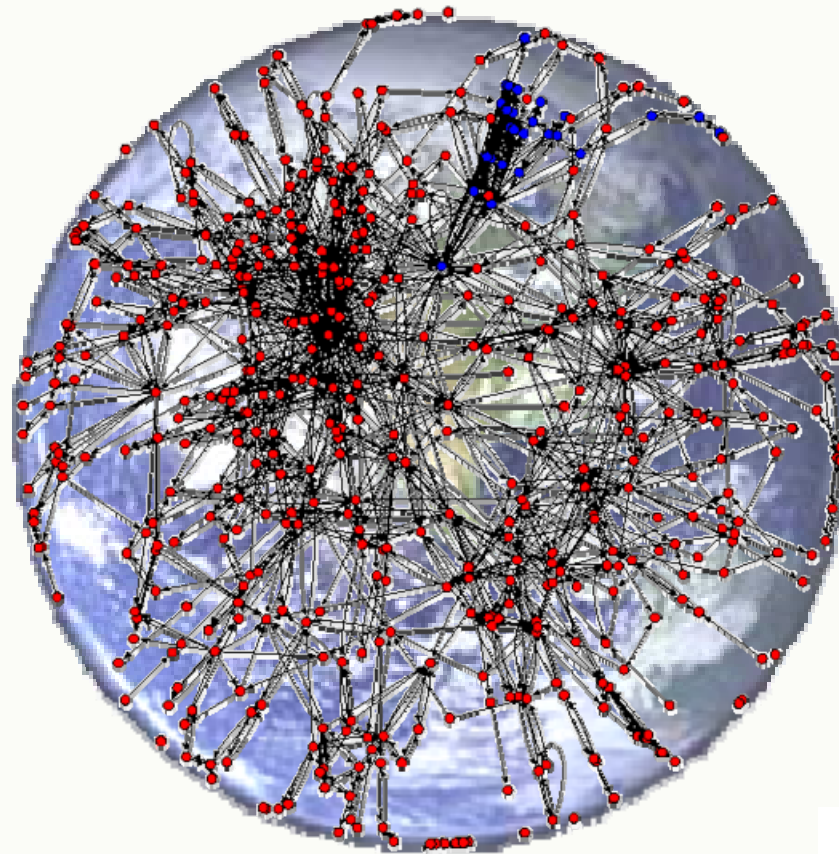


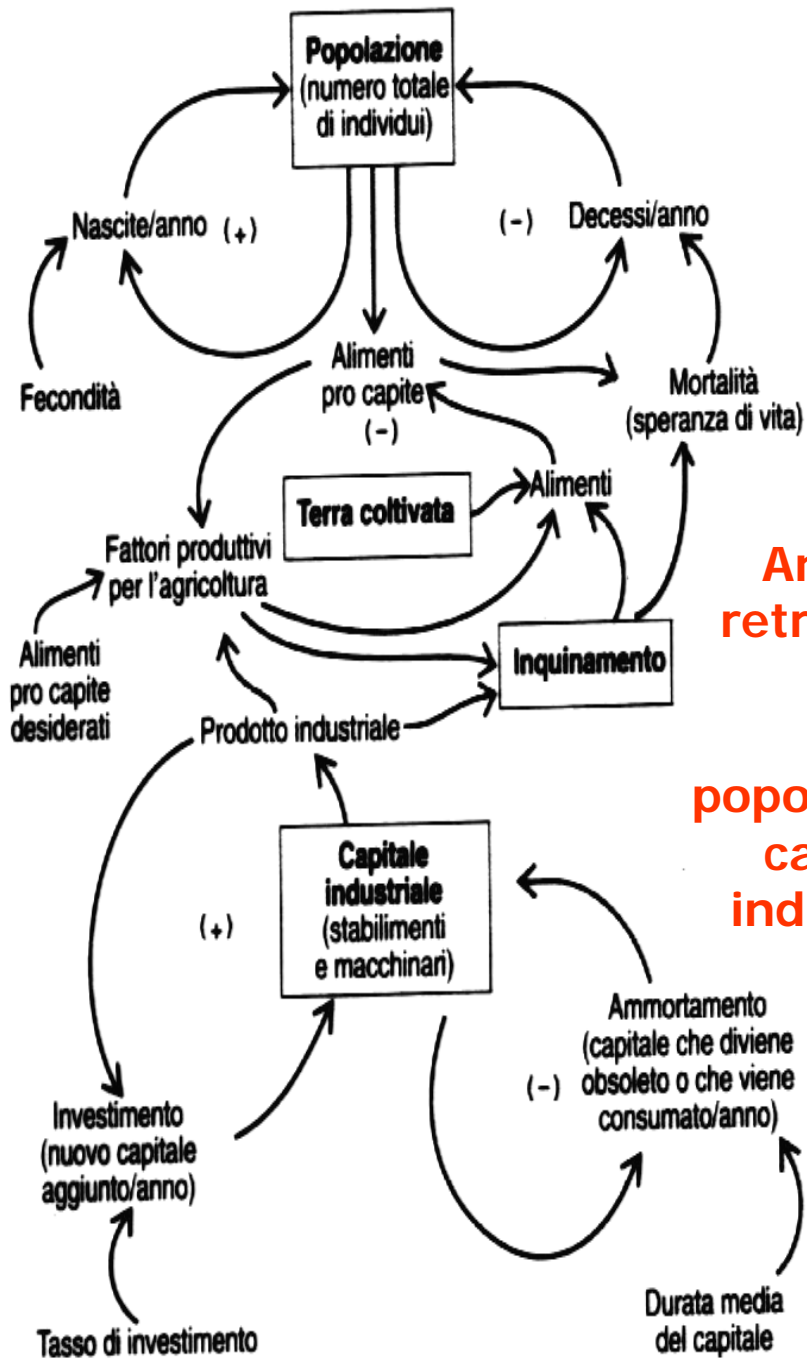
SISTEMA  
ECONOMICO



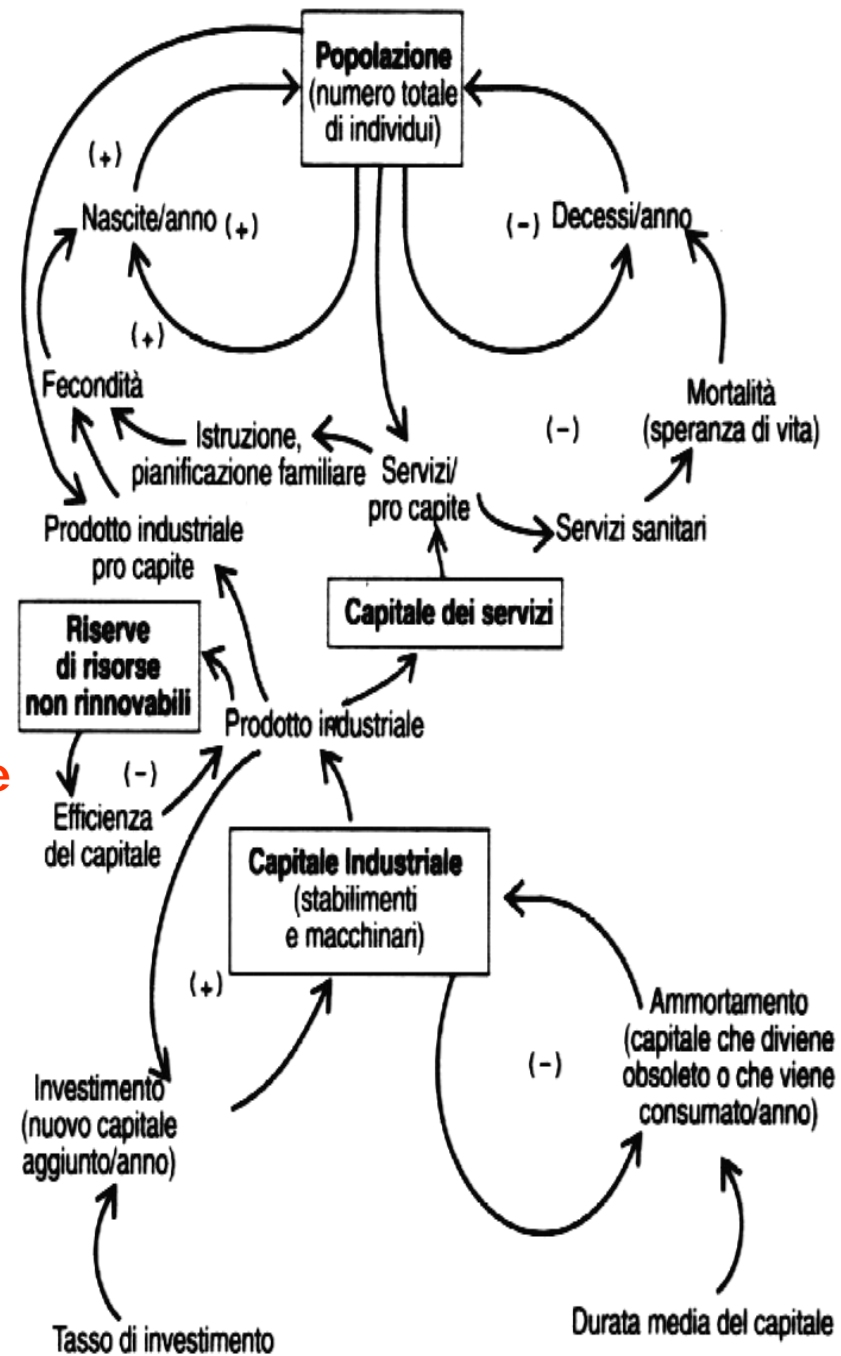
## Esempio 6: il sistema globale

**NEGLI ULTIMI DECENNI IL SISTEMA SOCIO-ECONOMICO GLOBALE DEL PIANETA HA RAGGIUNTO UNA COMPLESSITA' ENORME E SI E' TRASFORMATO IN UN'UNICA GRANDE RETE GLOBALE...**



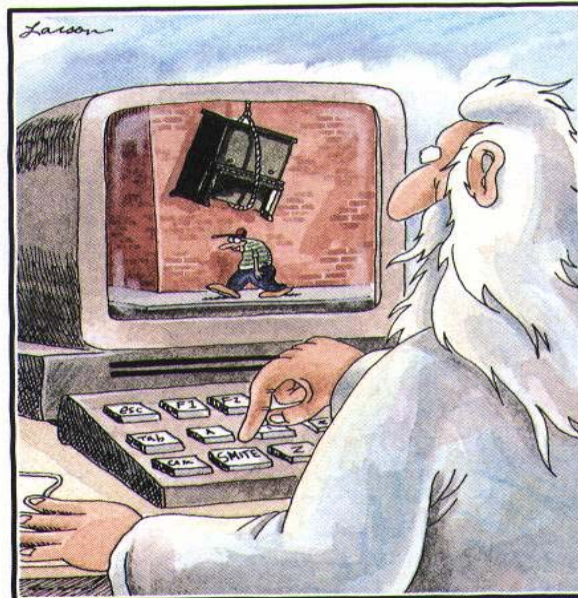


Anelli di retroazione di popolazione e capitale industriale



# Oltre i limiti dello sviluppo: ci avviciniamo ad un punto critico?

**QUALE E' IL DESTINO CHE CI  
ATTENDE?**



God at His computer



# Oltre i limiti dello sviluppo: ci avviciniamo ad un punto critico?

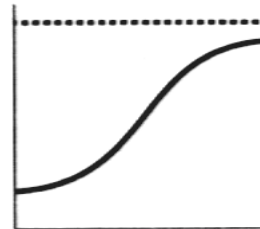
Quattro possibili modi  
di avvicinamento della  
popolazione mondiale  
alla capacità di carico  
del pianeta

(simulazioni "Mondo 3"  
- MIT e Club di Roma  
1972-1992)



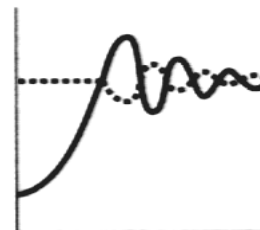
*Si ha crescita continua se*

- i limiti fisici sono molto lontani;
- oppure*
- i limiti fisici crescono anch'essi con andamento esponenziale.



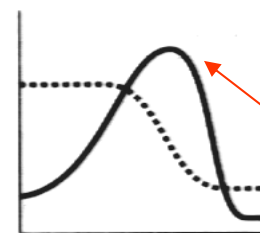
*Si ha crescita sigmoide se*

- i segnali provenienti dai limiti fisici sono precisi, istantanei e hanno risposte immediate;
- oppure*
- la popolazione o l'economia si limitano senza bisogno di segnali dall'esterno.



*Si ha superamento e oscillazioni se*

- i segnali o le risposte sono ritardati;
- oppure*
- i limiti non possono essere erosi o sono in grado di recuperare presto gli effetti dell'erosione.



*Si ha superamento e collasso se*

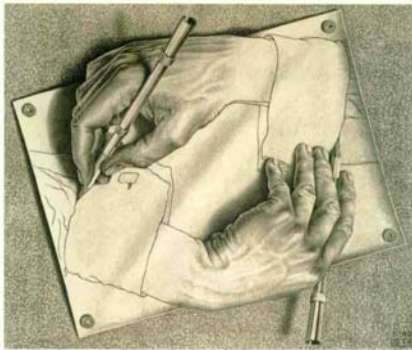
- i segnali o le risposte sono ritardati;
- oppure*
- i limiti possono essere erosi (subire una degradazione irreversibile quando vengono superati)

Mondo 3:

PUNTO CRITICO?

## Conclusione

Lo scopo della Scienza è sempre consistito nello *“scoprire una significativa semplicità in mezzo a una complessità disordinata”*  
(H.Simon)



### IL PARADOSSO DELLA COMPLESSITA'

Oggi la nuova Scienza della Complessità si basa sulla percezione che il mondo è per molti versi **più semplice** di quanto non appaia!

Per comprendere il mondo e soprattutto per cercare di migliorarlo colmando l'attuale 'gap di ingegnosità' bisogna però cambiare prospettiva e pensare in termini di reti complesse...



...ricordando che, in definitiva, il destino del nostro **“piccolo mondo”** è solo nelle nostre mani...

