

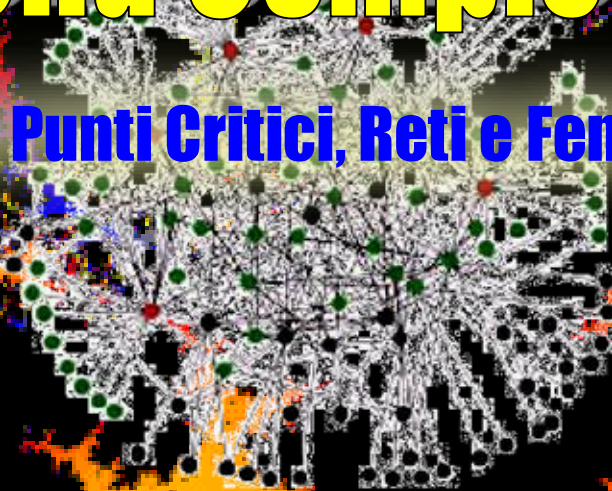
*Corso di Sistemi Dinamici, Caos e Complessità 2025-2026*

**Alessandro Pluchino**

**Dipartimento di Fisica e Astronomia  
dell'Università di Catania**

# **Introduzione alla Nuova Scienza della Complessità**

**Simulazioni, Punti Critici, Reti e Fenomeni Emergenti**

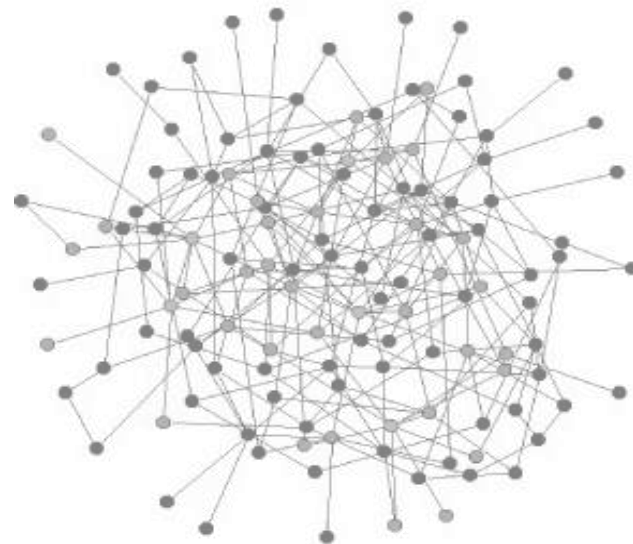


# Due possibili descrizioni di un sistema complesso

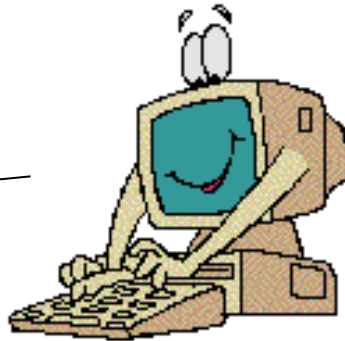
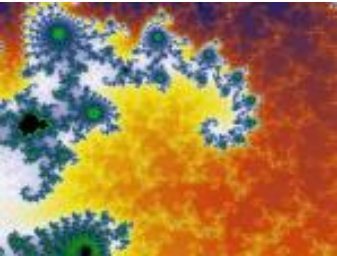
Da un punto di vista dinamico è possibile descrivere un sistema complesso come un insieme costituito da numerosi elementi, detti anche “**agenti**” (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...), che **interagiscono** tra loro di solito in maniera **non lineare** spostandosi 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:

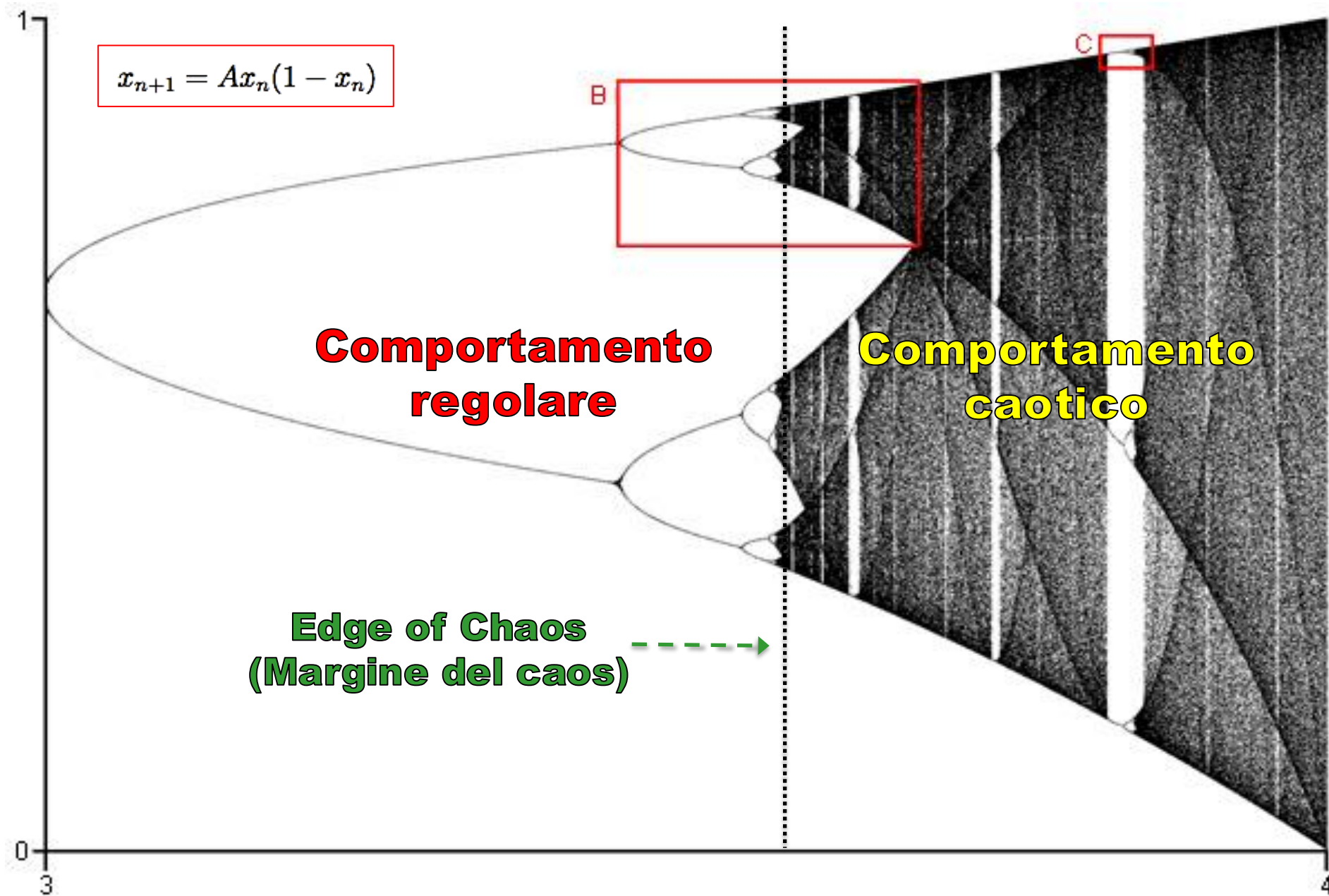


## **Autosimilarità e Invarianza di Scala**

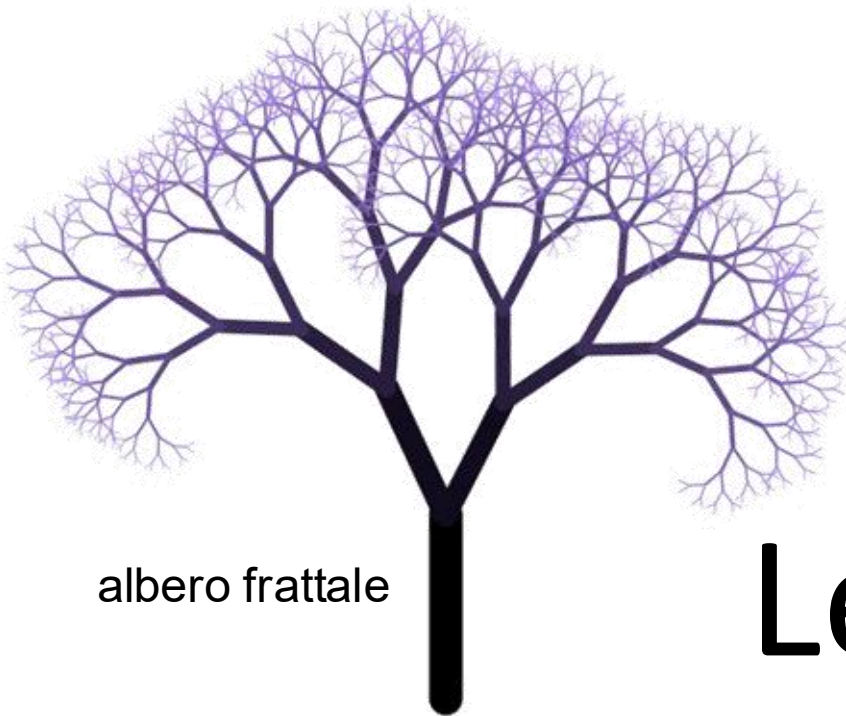
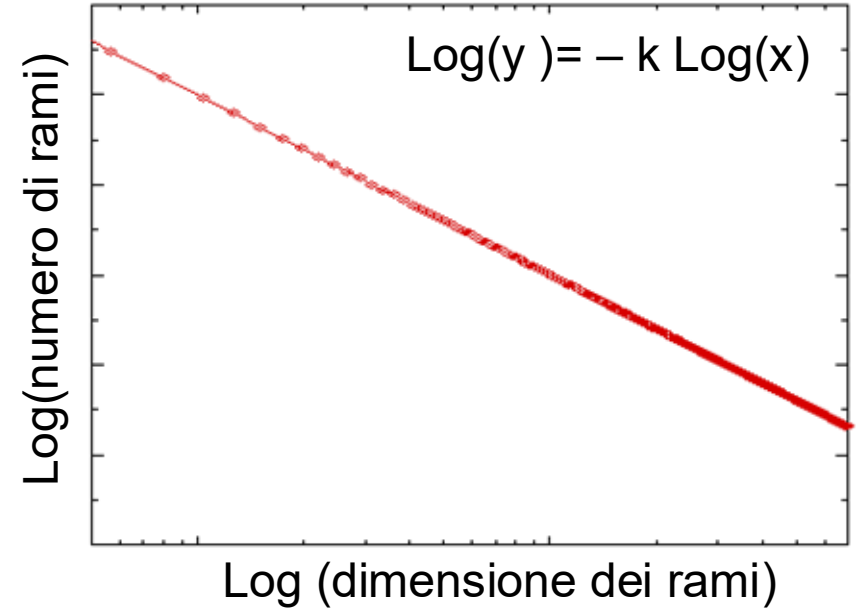


**Proprietà tipiche  
dei sistemi complessi**

# Autosimilarità e caos in una dimensione: la Mappa Logistica

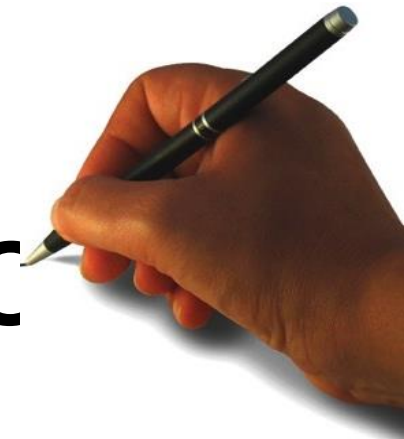


**La 'firma' matematica  
dell'autosimilarità e della  
invarianza di scala è la  
legge di potenza!  
(power law)**

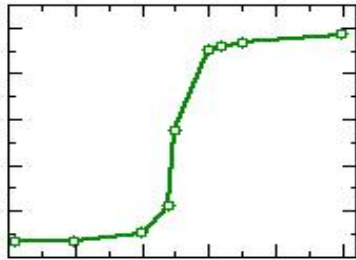


$$f(x) = ax^{-k}$$

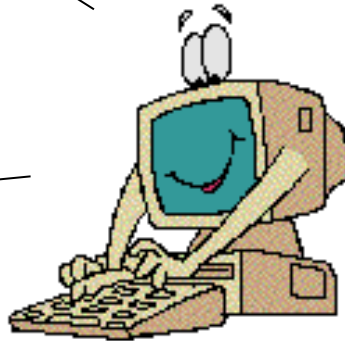
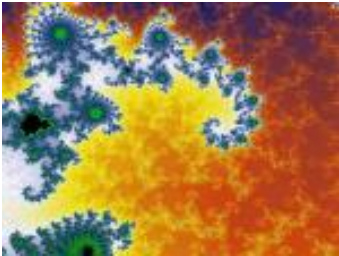
Legge di Pc



## Non linearità e Soglie Critiche



## Autosimilarità e Invarianza di Scala



**Proprietà tipiche  
dei sistemi complessi**



**uragani**



**terremoti**



**incendi**



**estinzioni**



**cambiamenti di paradigma**

**crolli in Borsa**



**guerre**

**epidemie**

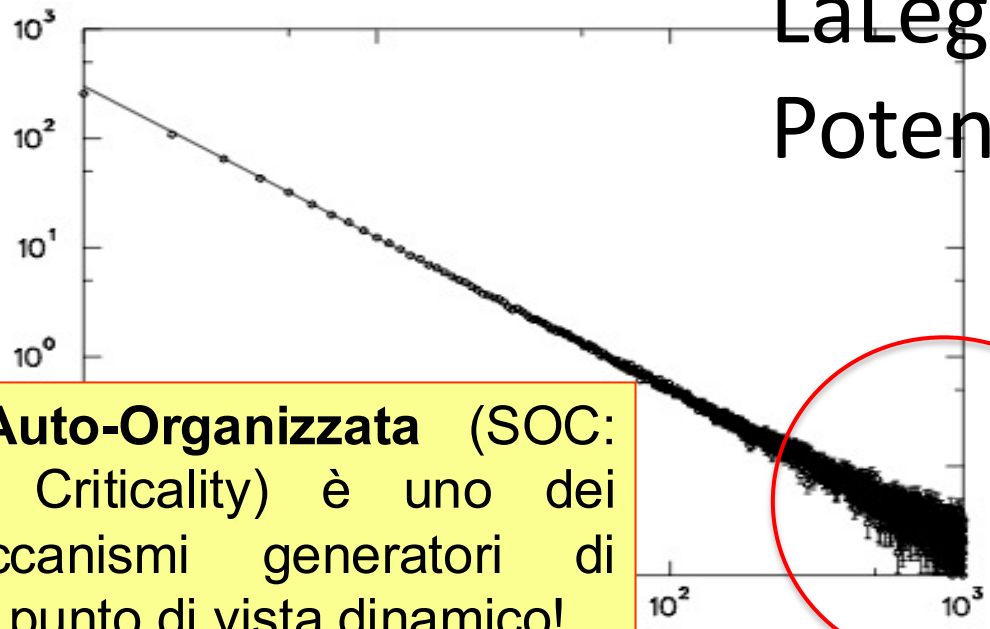


La presenza di **leggi di potenza e invarianza** di scala in molti sistemi fisici, biologici, economici o sociali, indica che tali sistemi, per quanto apparentemente diversi tra loro, si organizzano **spontaneamente** in uno stato dalle caratteristiche comuni, al **confine tra ordine e disordine**, detto:



# "Stato Critico"

La Legge di Potenza



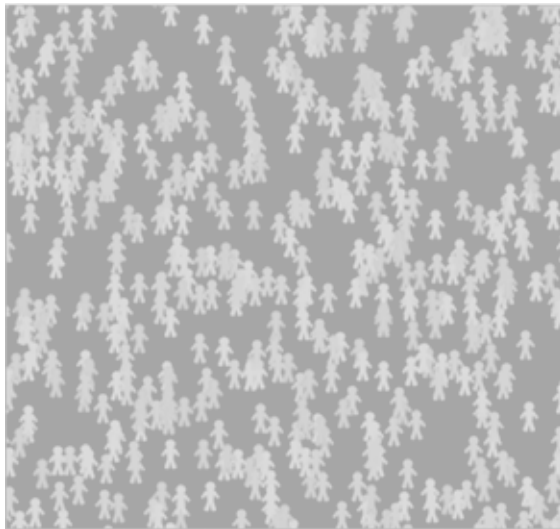
**Eventi Estremi**

La **Criticità Auto-Organizzata** (SOC: Self-Organized Criticality) è uno dei principali meccanismi generatori di complessità dal punto di vista dinamico!

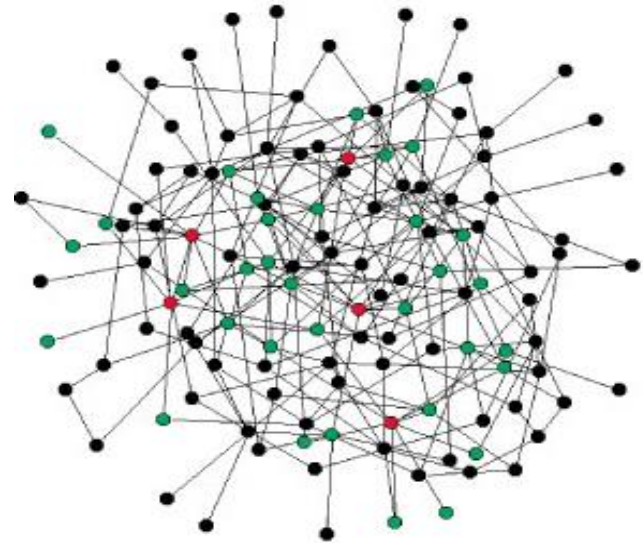


# Due possibili descrizioni di un sistema complesso

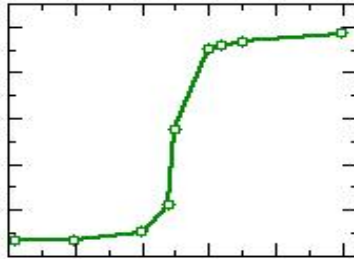
Da un punto di vista dinamico è possibile descrivere un sistema complesso come un insieme costituito da numerosi elementi, detti anche “agenti” (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...), che interagiscono tra loro di solito in maniera non lineare spostandosi all’interno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



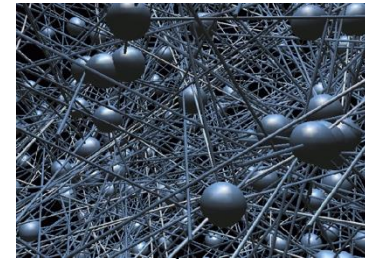
Da un **punto di vista topologico** (cioè se ci interessa invece sapere “chi interagisce con chi”) è anche possibile descrivere un sistema complesso come una **rete** (network) costituita da un certo numero di **nodi** (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...) collegati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



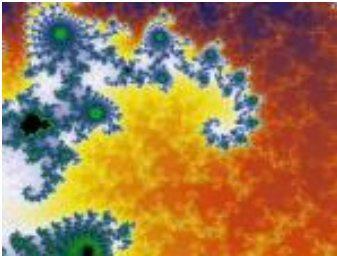
**Non linearità e  
Soglie Critiche**



**Reti Complesse tra  
Ordine e Disordine**



**Autosimilarità e  
Invarianza di Scala**



**Proprietà tipiche  
dei sistemi complessi**

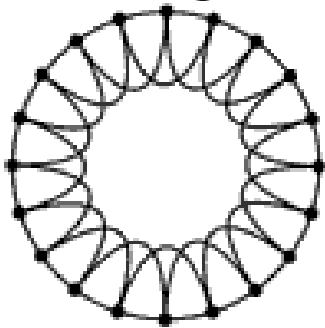
# LA SCOPERTA delle RETI COMPLESSE



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

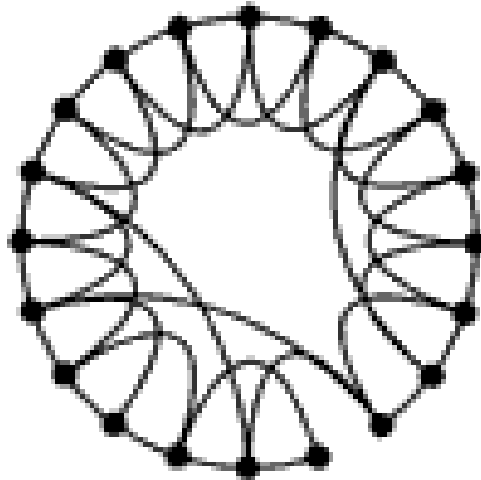


**rete regolare**



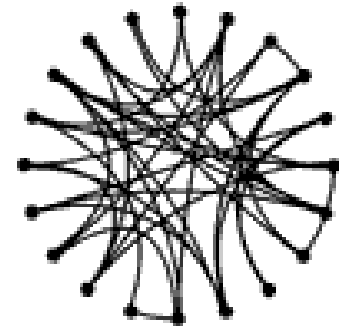
Ha una forte aggregazione,  
ma non è un 'piccolo mondo'

**rete small world**



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

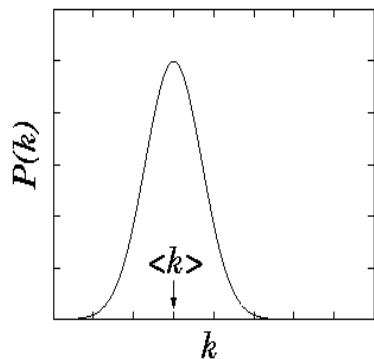
**rete casuale**



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

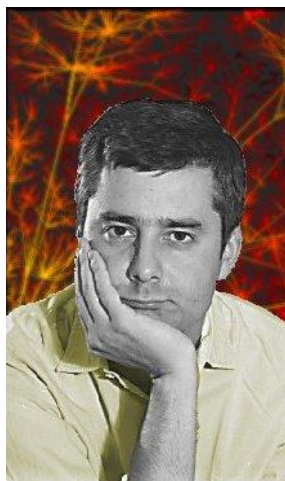
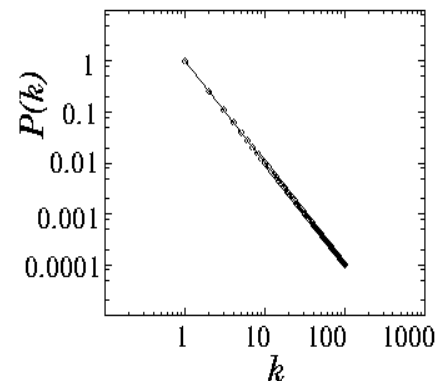
# Due tipi fondamentali di Reti Complesse

Gaussiana

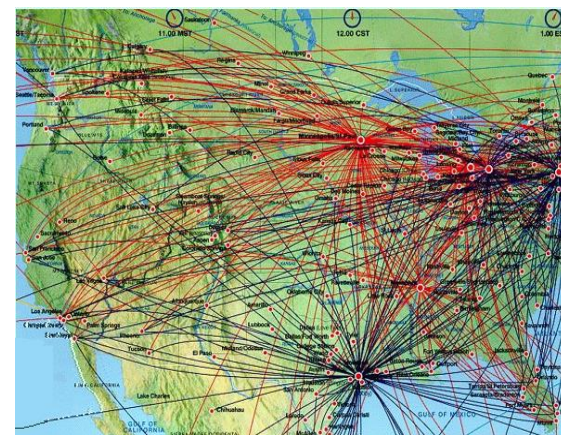


**Distribuzioni  
dei links**

Legge di Potenza




**A.L. Barabási  
(USA, 1999)**



**Reti Small World "Egualitarie":  
hanno una scala caratte-  
ristica e non hanno "hub"**


**Reti Small World "Aristocratiche":  
sono prive di scala (reti  
"scale free") ma dotate di "hub"**



**LE RETI "SCALE FREE" SONO DAPPERTUTTO  
ATTORNO A NOI!**

LaLegge di

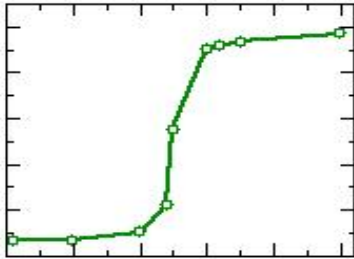




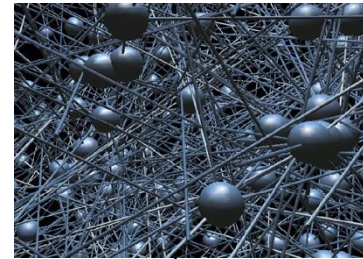
# EFFETTI COLLATERALI IN UN MONDO DI RETI E SISTEMI COMPLESSI



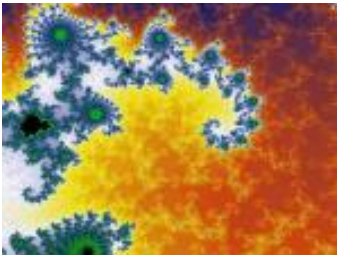
**Non linearità e  
Soglie Critiche**



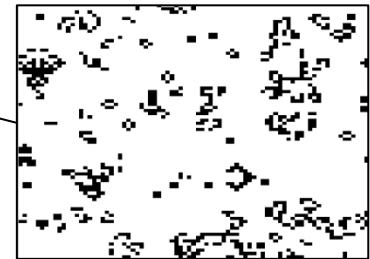
**Reti Complesse tra  
Ordine e Disordine**



**Autosimilarità e  
Frattali**



**Fenomeni Emergenti e  
Auto-Organizzazione  
at the Edge of Chaos**



**Proprietà tipiche  
dei sistemi complessi**



**Modelli discreti  
di**

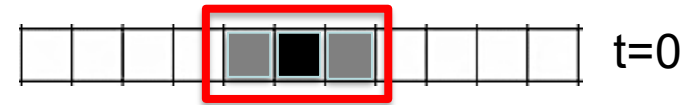
**Fenomeni emergenti**

# Gli Automi Cellulari

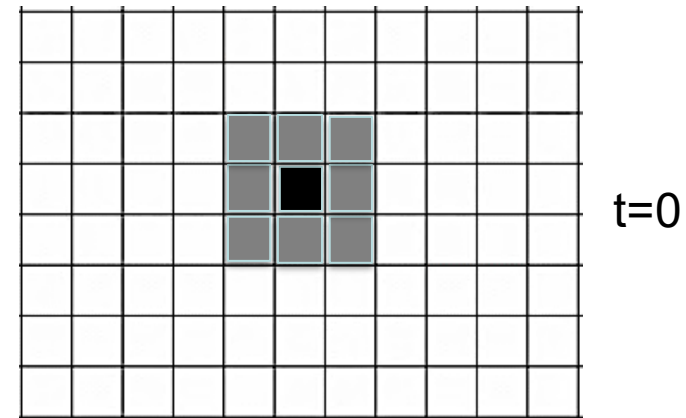
Un **automa cellulare** (dall'inglese *Cellular automaton* o *Cellular automata*, abbrev. **CA**) è un modello matematico discreto usato per descrivere l'evoluzione di **sistemi complessi**, studiati in teoria della computazione, matematica, fisica, biologia, etc.

Un automa cellulare consiste di una **griglia** (il "*mondo*"), di solito 1D o 2D, costituita da un numero finito o infinito di celle. Ciascuna di queste celle può assumere un **insieme finito di stati** (ad esempio, "vivo" o "morto", on-off, bianco-nero). Per ogni cella è necessario anche definire l'insieme delle celle che sono da considerare "**vicine**" alla cella data. Ad un certo **tempo  $t=0$**  si assegna ad ogni cella un determinato **stato**. L'insieme di questi stati costituisce lo *stato iniziale* dell'automa cellulare. Dopo un tempo prefissato ogni cella cambierà stato *contemporaneamente* a tutte le altre, secondo una **regola fissata** (che varia a seconda dell'automa cellulare preso in considerazione). Il modo in cui cambia stato una cella dipende solamente **dal proprio stato attuale e dagli stati delle celle "vicine"**.

**automa cellulare 1D**



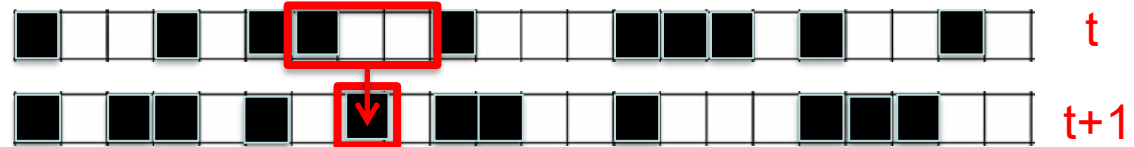
**automa cellulare 2D**



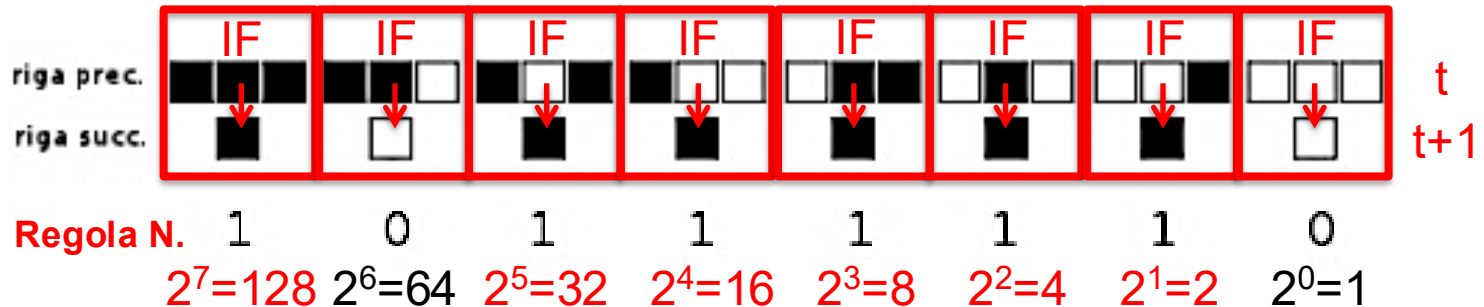
- celle "vive"
- celle "morte"
- "vicinato" della cella viva

# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

Gli **automati cellulari unidimensionali** sono rappresentati da una successione di righe ciascuna delle quali contiene una certa **configurazione di celle accese o spente** ad un certo tempo (iterazione). Dalla configurazione delle celle di una riga (**al tempo t**) è possibile ricavare la configurazione di ogni cella della riga successiva (**al tempo t+1**) per mezzo di certe **regole**:



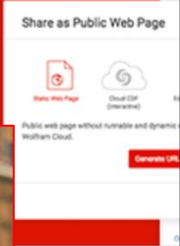
Poiché lo stato al tempo t+1 di ogni cella dipende, oltre che dal proprio stato al tempo t, anche dallo stato delle sue 2 vicine al tempo t, e poiché ogni cella può assumere 2 stati, esistono  $2^3=8$  **possibili configurazioni** delle 3 celle al tempo t. Ma per ciascuna di queste configurazioni, la nuova cella al tempo t+1 avrà anch'essa 2 possibili stati, quindi vi saranno in totale  $2^8 = 256$  **regole possibili, del tipo**:



Per descrivere sinteticamente queste regole il fisico **Stephen Wolfram** ha proposto di usare il numero binario che si viene a formare, in questo caso **10111110**. Questo numero equivale, in notazione decimale, a 190 ( $128+32+16+8+4+2$ ), da cui il nome della regola secondo la **notazione di Wolfram** sarà **“regola 190”**.

# WOLFRAM MATHEMATICA ONLINE

Bring Mathematica to life in the cloud




## WolframAlpha<sup>®</sup> computational intelligence.

Enter what you want to calculate or know about









[Browse Examples](#) [Surprise Me](#)

Compute expert-level answers using Wolfram's breakthrough algorithms, knowledgebase and AI technology

### Mathematics >

-  Step-by-Step Solutions
-  Elementary Math
- $x^2-1$  Algebra
-  Plotting & Graphics
- $\int f(x) dx$  Calculus & Analysis
- $\frac{x}{12}^9$  Geometry







### Science & Technology >

-  Units & Measures
-  Physics
-  Chemistry
-  Engineering
-  Computational Sciences
-  Earth Sciences

### Society & Culture >

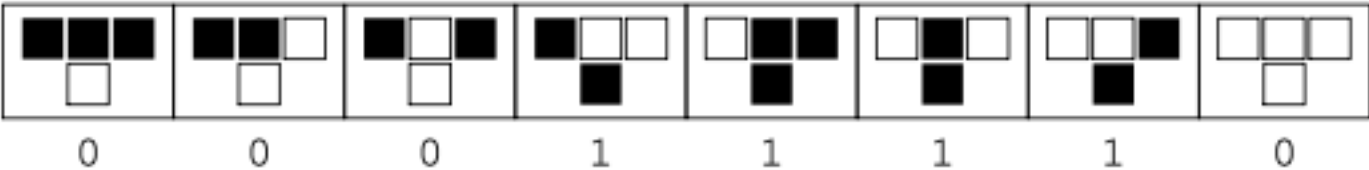
-  People
-  Arts & Media
-  Dates & Times
-  Words & Linguistics
-  Money & Finance
-  Food & Nutrition

### Everyday Life >

-  Personal Health
-  Personal Finance
-  Surprises
-  Entertainment
-  Household Science
-  Household Math

# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

Esempio: *rule 30*



spazio

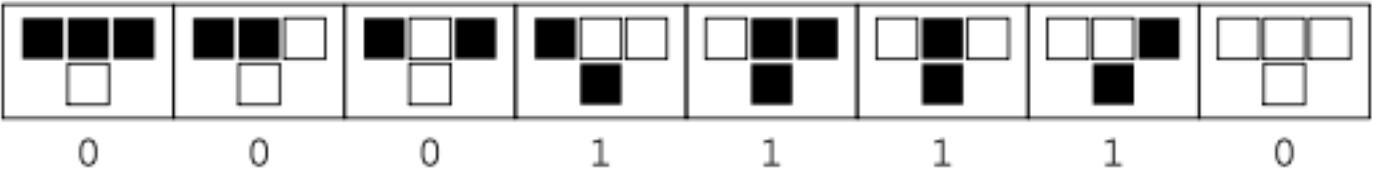


tempo

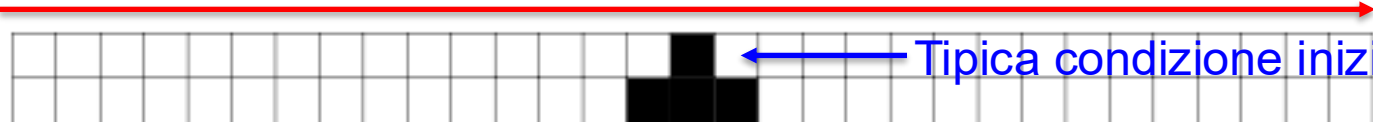


# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

Esempio: *rule 30*



spazio

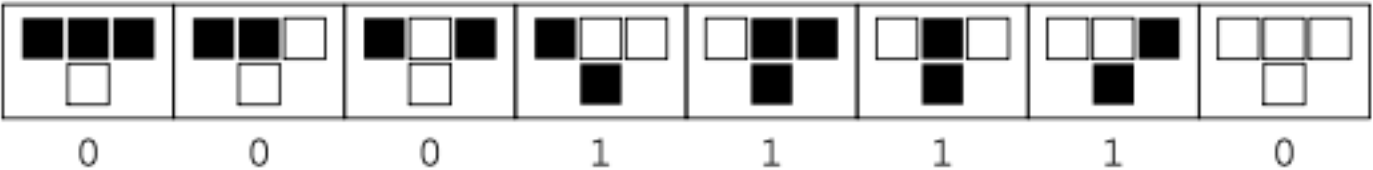


Tipica condizione iniziale

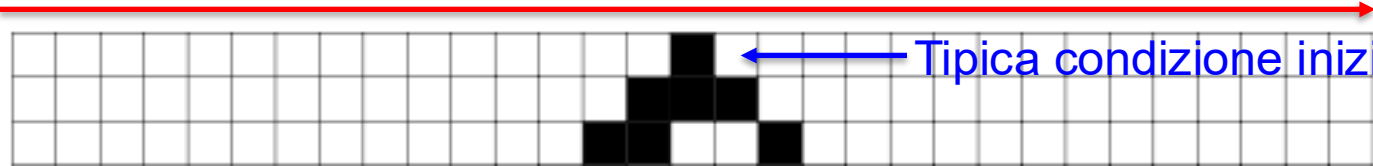
tempo

# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

Esempio: *rule 30*



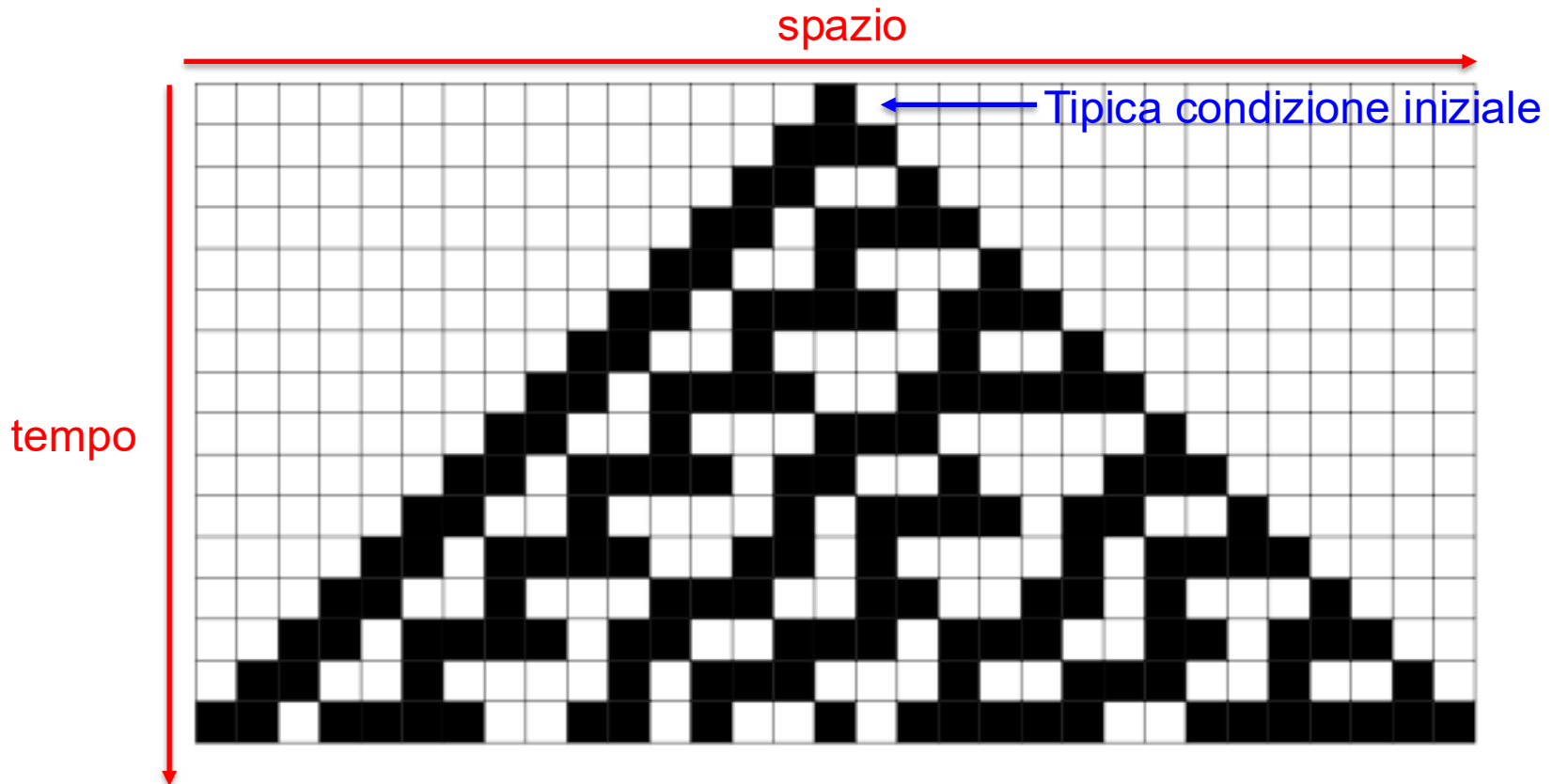
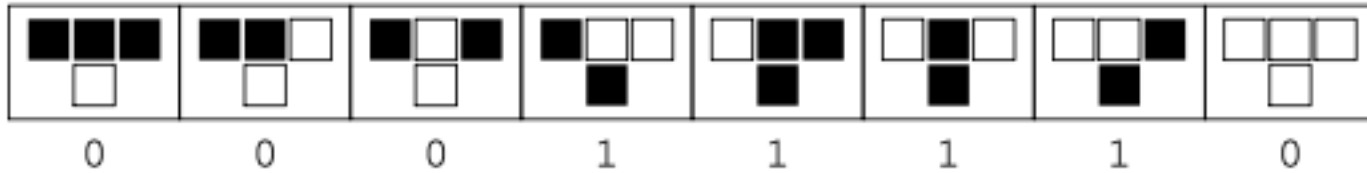
spazio



tempo

# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

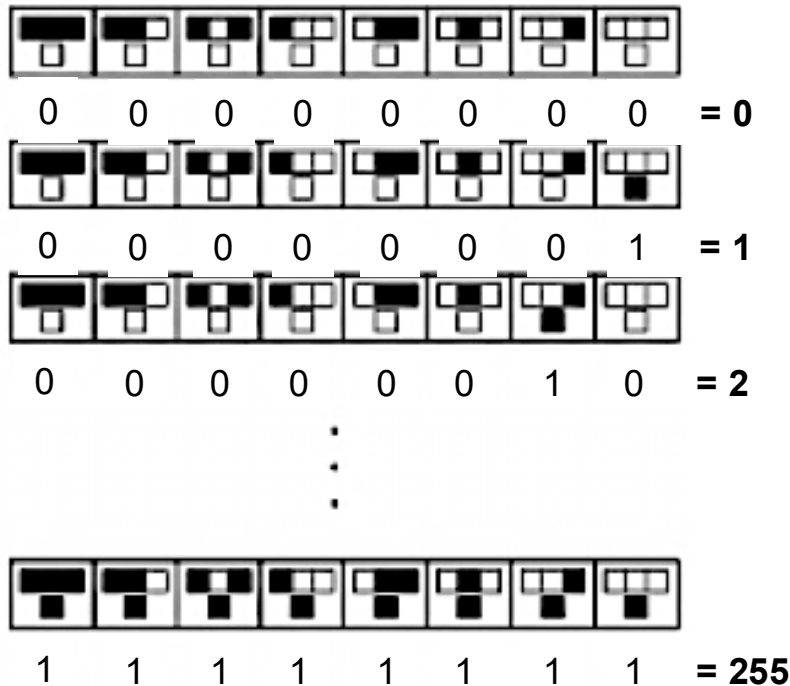
Esempio: *rule 30*



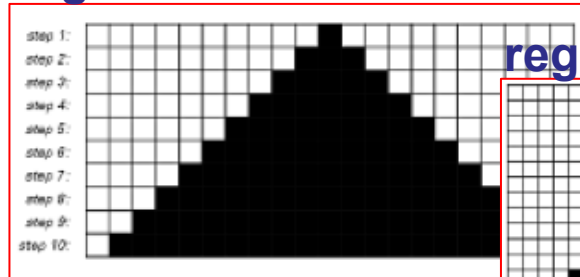
# Automi Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

E' incredibile osservare come, variando la regola di base, si ottengano comportamenti completamente differenti tra loro nel diagramma spazio-tempo dell'automa, da strutture ordinate e regolari a strutture più disordinate e apparentemente caotiche, passando per configurazioni frattali e autosimilari.

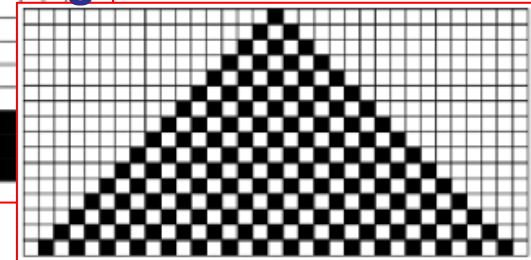
## Le 256 regole:



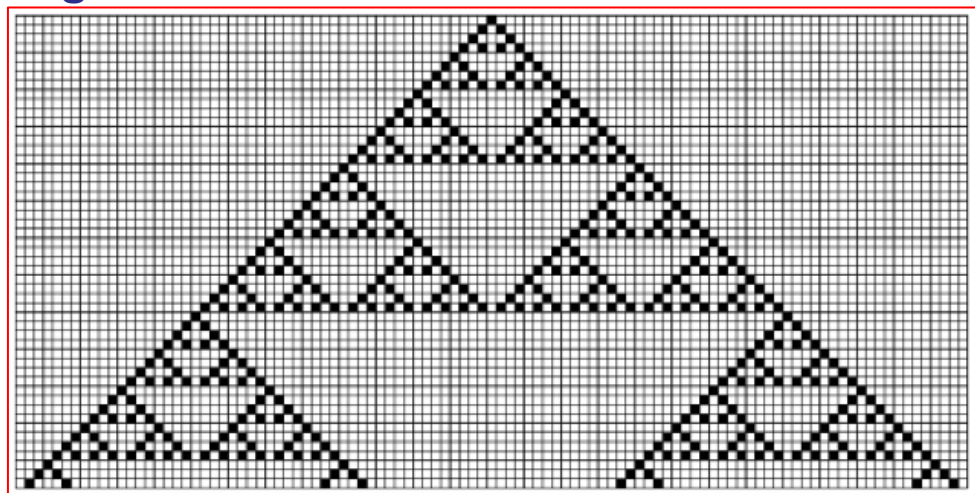
## regola 254



## regola 250



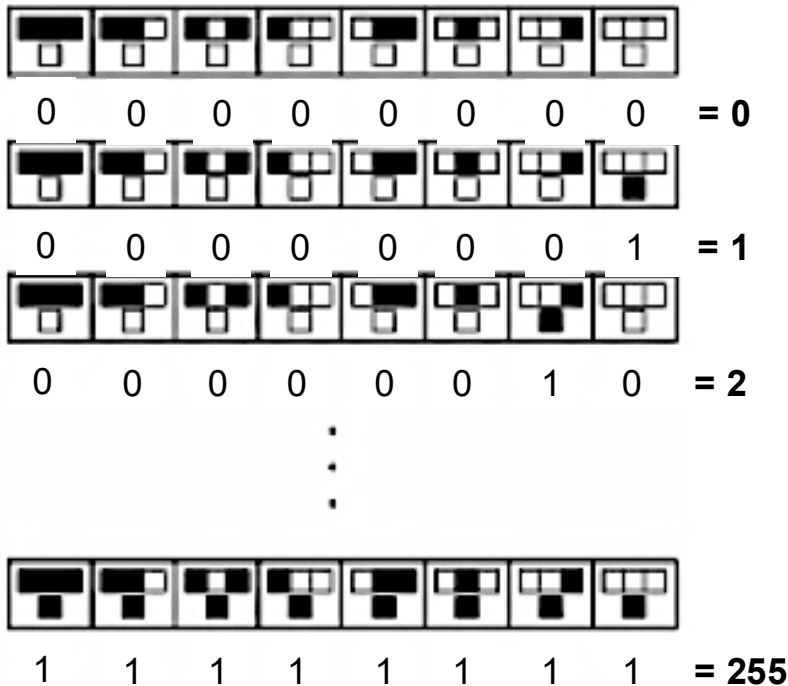
## regola 90



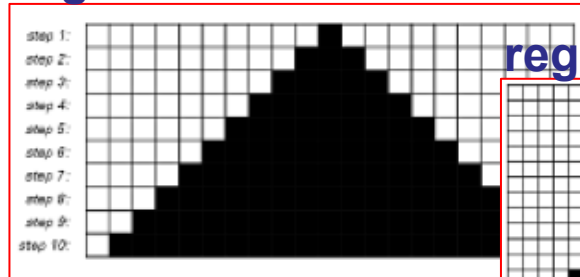
# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

E' incredibile osservare come, variando la regola di base, si ottengano comportamenti completamente differenti tra loro nel diagramma spazio-tempo dell'automa, da strutture ordinate e regolari a strutture più disordinate e apparentemente caotiche, passando per configurazioni frattali e autosimilari.

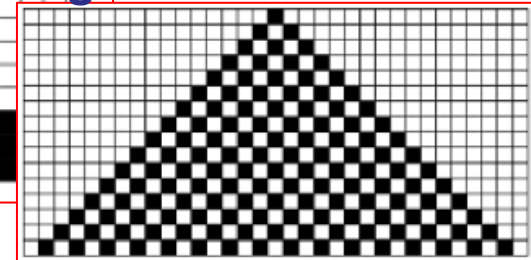
## Le 256 regole:



## regola 254



## regola 250



## regola 90



# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

On Off BIN

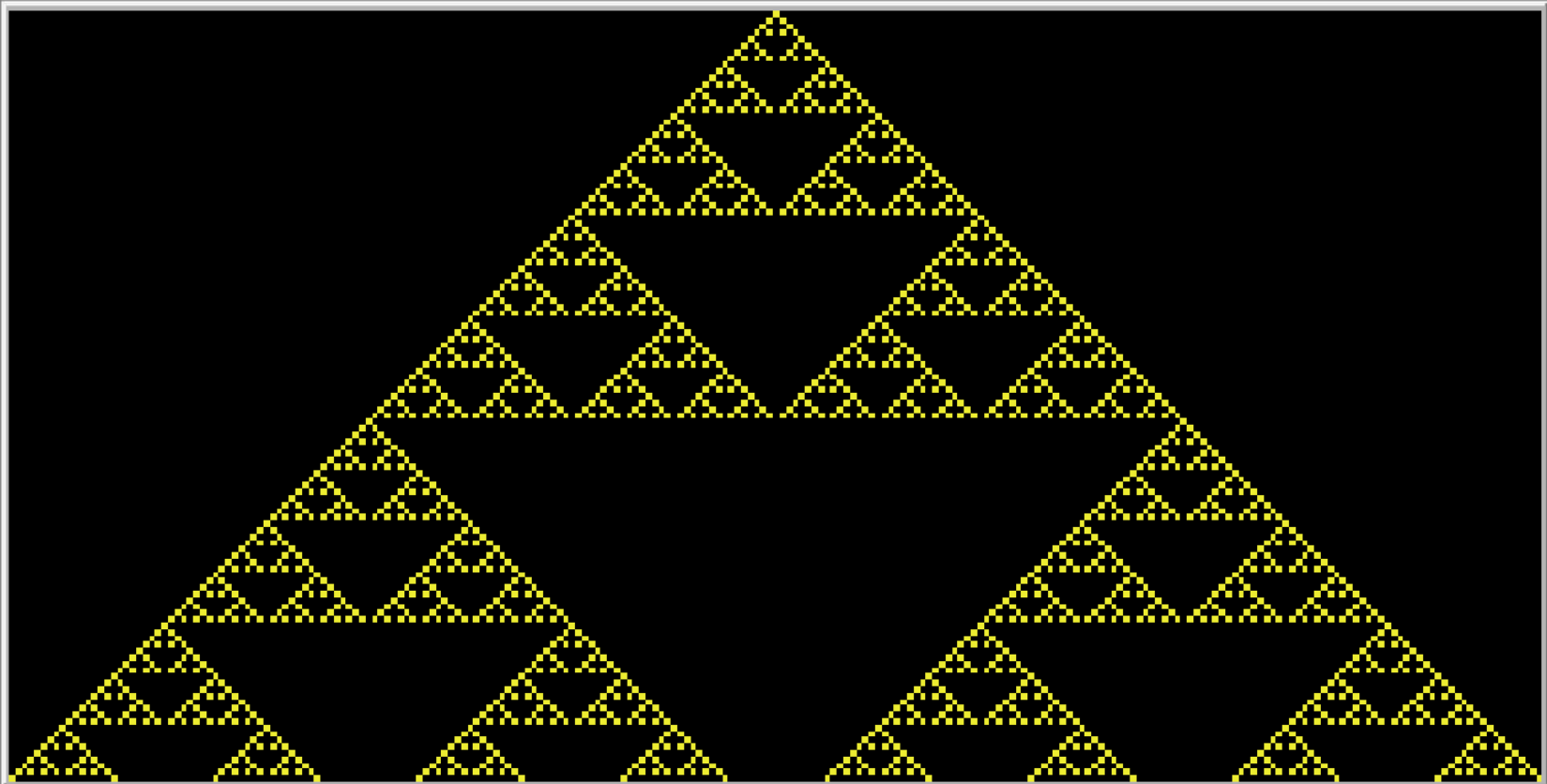
SETUP

GO

n128	n64	n32	n16	n8	n4	n2	n1	N_RULE_d...
0	1	0	1	1	0	1	0	90

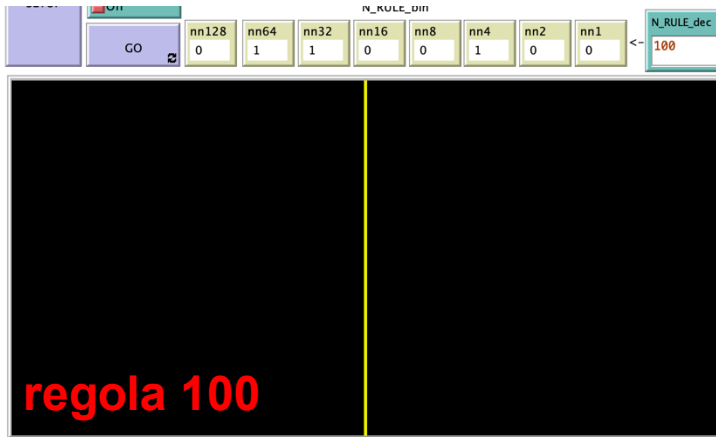
N\_RULE\_bin

nn128	nn64	nn32	nn16	nn8	nn4	nn2	nn1	N_RULE_dec
0	1	0	1	1	0	1	0	90

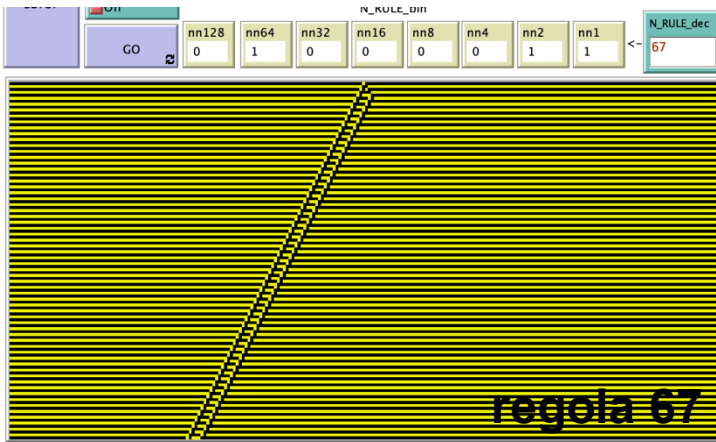
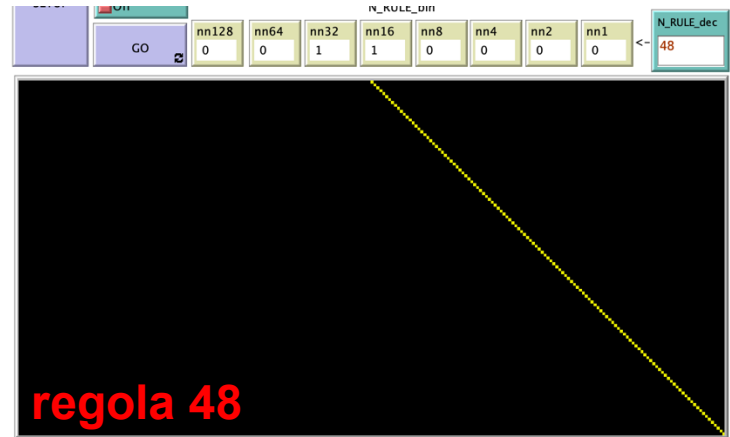


# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

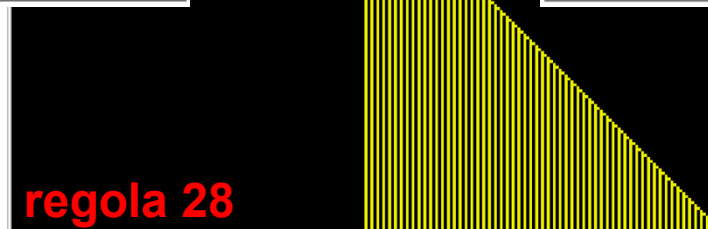
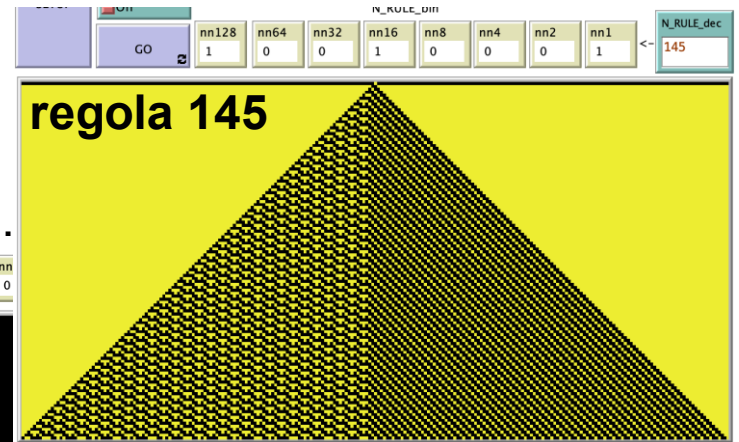
«oggetto» fermo nello spazio



«oggetto» in moto verso destra...



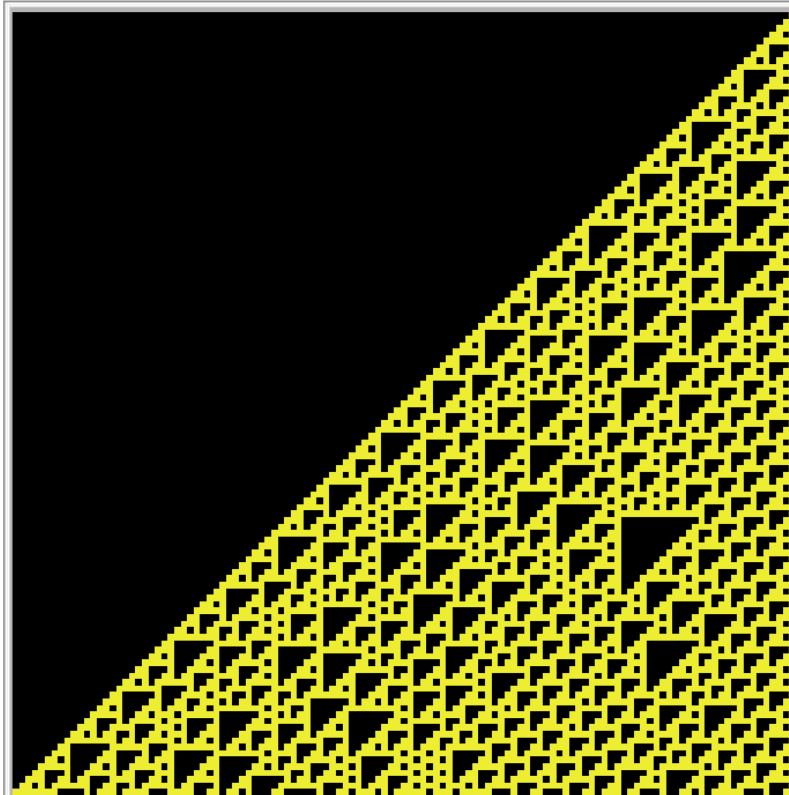
Configurazioni più complesse, simmetriche o asimmetriche...



# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

La **regola 110** genera addirittura un automa Turing-compatibile, cioè capace di eseguire un qualsiasi algoritmo per computer...

N_RULE_bin									N_RULE_dec
nn128	nn64	nn32	nn16	nn8	nn4	nn2	nn1	<-	110
0	1	1	0	1	1	1	0		



## Macchina di Turing

In [informatica](#), una **macchina di Turing** (o più brevemente **MdT**) è una [macchina](#) ideale che manipola i dati contenuti su un nastro di lunghezza potenzialmente infinita, secondo un insieme prefissato di regole ben definite<sup>[1]</sup>. In altre parole, si tratta di un modello astratto che definisce una macchina in grado di eseguire [algoritmi](#) e dotata di un nastro potenzialmente infinito su cui può leggere e/o scrivere dei simboli.

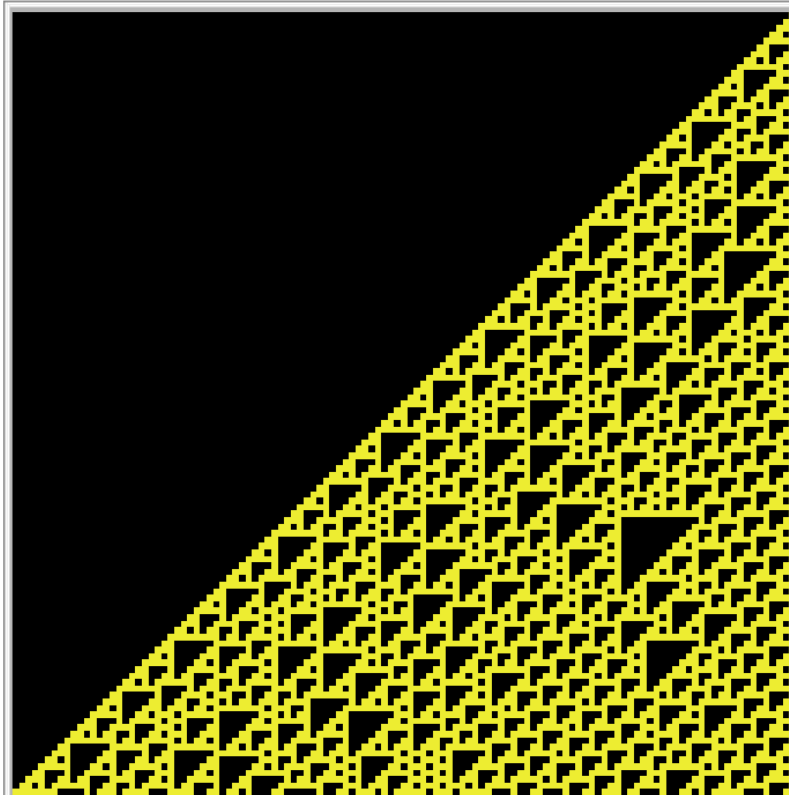
# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

La **regola 110** genera addirittura un automa Turing-compatibile, cioè capace di eseguire un qualsiasi algoritmo per computer...

IN\_RULE\_bin

nn128	nn64	nn32	nn16	nn8	nn4	nn2	nn1	N_RULE_dec
0	1	1	0	1	1	1	0	110

GO



## Auto-Somiglianza vs Auto-Referenzialità

Il **problema della fermata** (Turing) e i **teoremi di Gödel** dimostrano che esistono limiti intrinseci sia alla calcolabilità che alla dimostrabilità matematica. Entrambi stabiliscono che, in sistemi logici o computazionali complessi (come l'aritmetica o i computer), esistono verità non dimostrabili e problemi non risolvibili algebricamente.

# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

La **regola 110** genera addirittura un automa Turing-compatibile, cioè capace di eseguire un qualsiasi algoritmo per computer...



The image shows a software interface for a 1D cellular automaton. At the top, there is a control panel with a 'GO' button and a row of rule settings labeled 'N\_RULE\_bin'. The settings are: nn128 (0), nn64 (1), nn32 (1), nn16 (0), nn8 (1), nn4 (1), nn2 (1), and nn1 (0). To the right, a box labeled 'N\_RULE\_dec' contains the value '110'. Below the control panel is a large space-time diagram showing a complex, fractal-like pattern of black and white pixels on a black background, characteristic of rule 110. To the right of the diagram, there is a black box with red and yellow text.

**Auto-Somiglianza  
vs  
Auto-Referenzialità**

**Proposizione di Gödel  
«Questa proposizione  
non è dimostrabile»**

Se fosse dimostrabile  
sarebbe una  
contraddizione  
(il sistema non  
sarebbe coerente)

Se invece fosse non  
dimostrabile sarebbe  
un esempio di  
proposizione vera ma  
non dimostrabile!

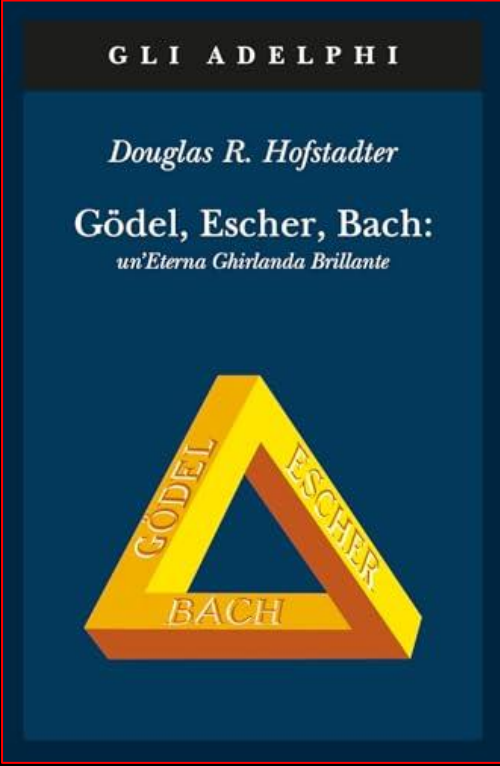
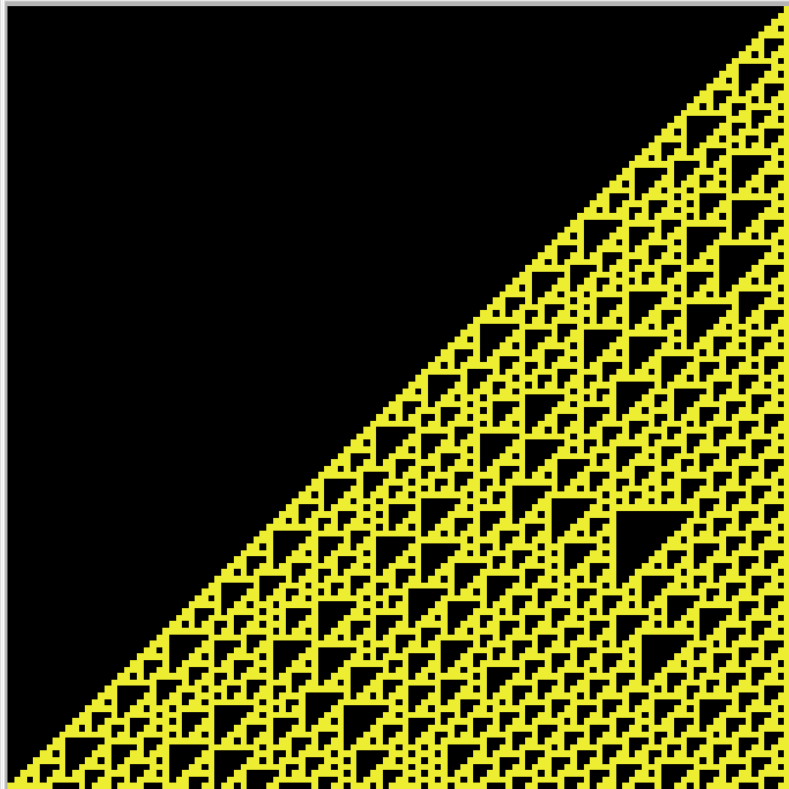
# Automati Cellulari 1D: la notazione di Wolfram

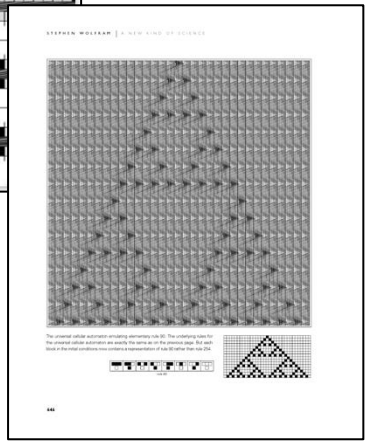
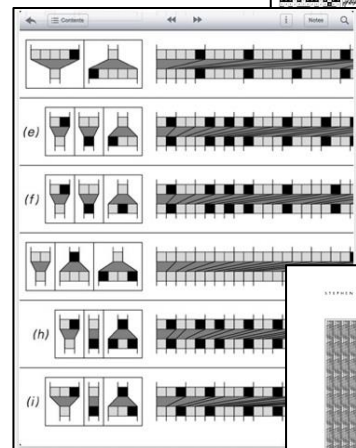
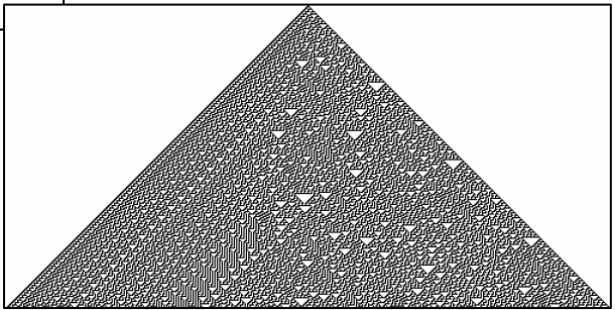
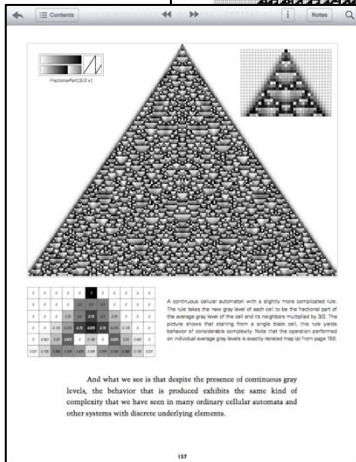
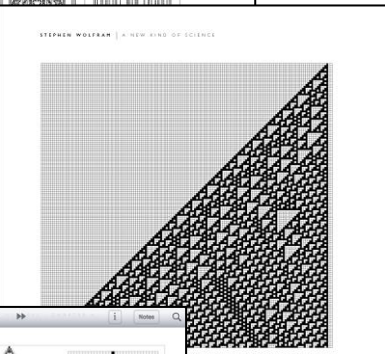
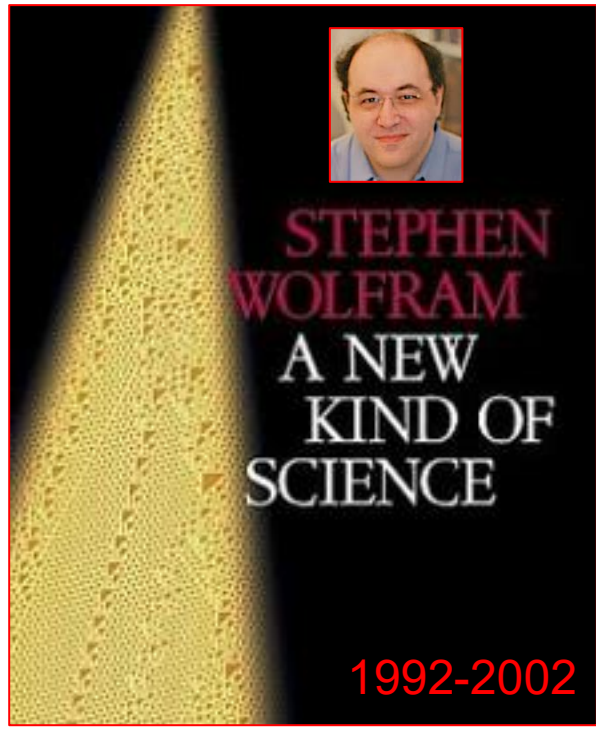
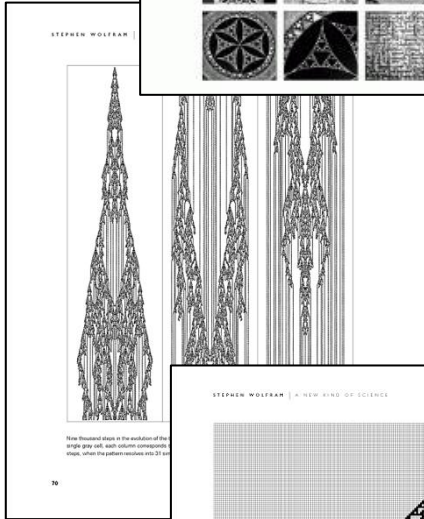
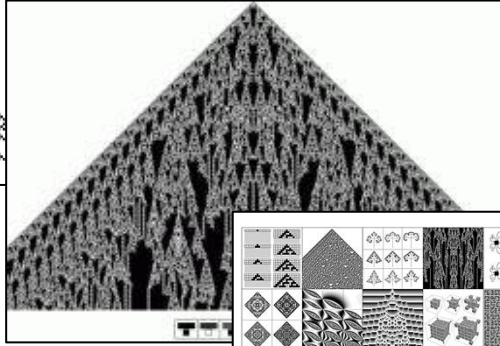
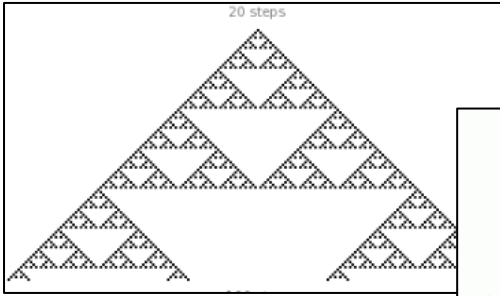
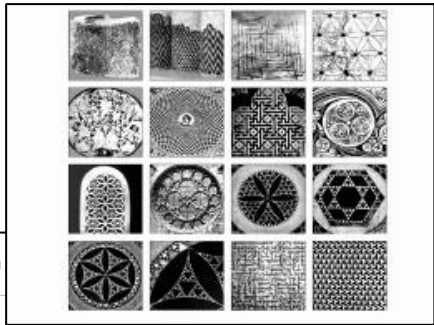
La **regola 110** genera addirittura un automa Turing-compatibile, cioè capace di eseguire un qualsiasi algoritmo per computer...

IN\_RULE\_bin

nn128	nn64	nn32	nn16	nn8	nn4	nn2	nn1	N_RULE_dec
0	1	1	0	1	1	1	0	110

GO

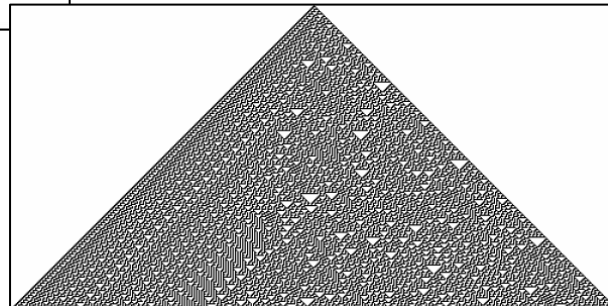
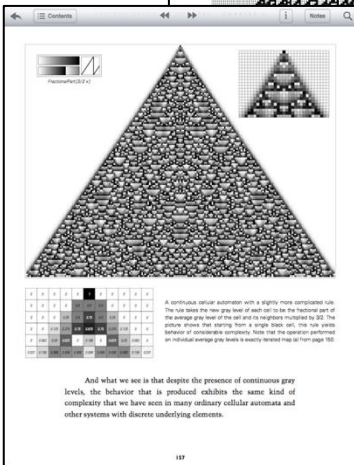
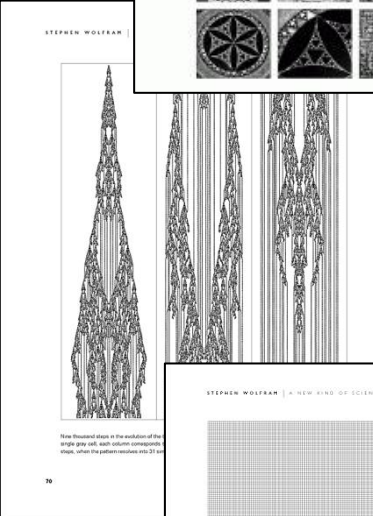
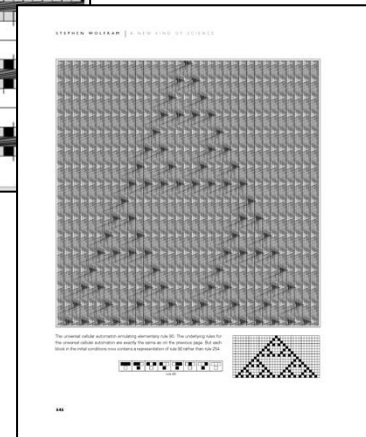
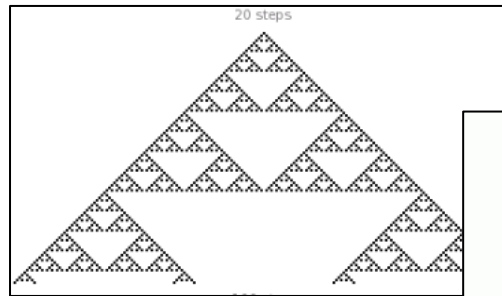






## IL PRINCIPIO DI EQUIVALENZA COMPUTAZIONALE DI WOLFRAM

"Nessun sistema può realizzare calcoli espliciti più sofisticati di quelli effettuati da automi cellulari. Esistono **automi cellulari universali** per i quali si possono scegliere condizioni iniziali tali che, partendo da esse, eseguano **calcoli di ogni possibile complessità**"

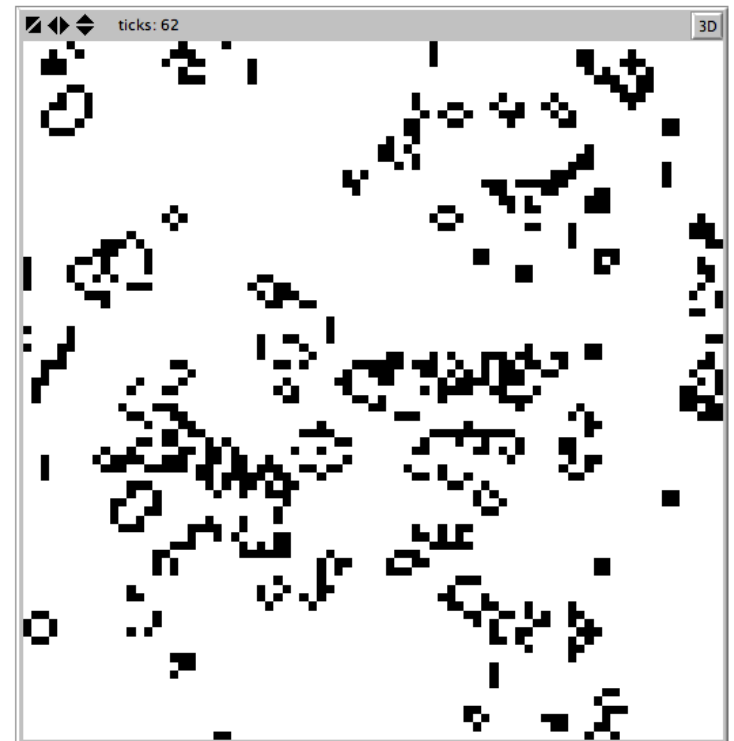


# Automi Cellulari 2D: il Gioco “Life”



Il **Gioco della Vita** (*Game of Life*) è un automa cellulare bidimensionale sviluppato dal matematico inglese **John Conway** sul finire degli anni sessanta ed è probabilmente **l'esempio più famoso di automa cellulare**: il suo scopo è quello di mostrare come *comportamenti estremamente complessi* (come sono quelli mostrati dai sistemi biologici) possano **emergere** da semplici regole e *interazioni locali deterministiche*.

Come vedremo tra poco, nel mondo bidimensionale del gioco “Life”, partendo da una distribuzione casuale di celle vive e morte, compaiono configurazioni emergenti di diverso tipo, tra cui **configurazioni statiche**, **configurazioni periodiche** (*oscillatori*), e **configurazioni dinamiche** di crescente complessità, alcune delle quali addirittura si spostano sulla griglia come se fossero delle entità indipendenti, dei veri e propri «organismi viventi»...



# Il Gioco "Life" e l'emergere della complessità...

nature

SEARCH JOURNAL

Go

Journal Home  
Current Issue  
AOP  
Archive

letters to nature

Nature 342, 780 - 782 (14 December 1989); doi:10.1038/342780a0

THIS ARTICLE

Download PDF  
References

Export citation  
Export references

Send to a friend

More articles like this

Table of Contents  
< Previous | Next >

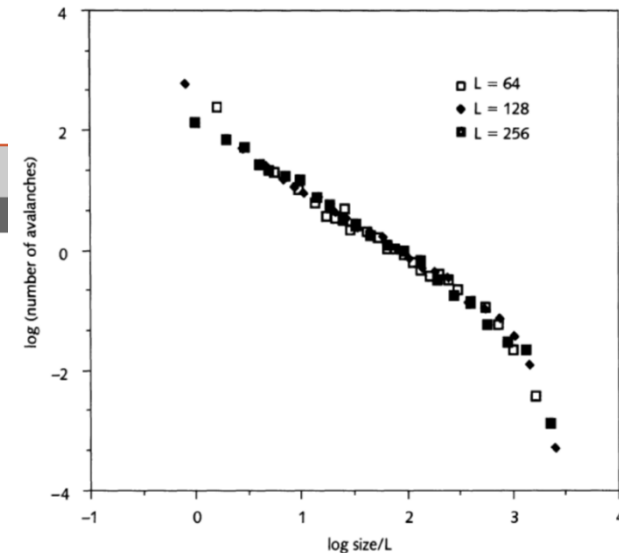


## Self-organized criticality in the 'Game of Life'

PER BAK, KAN CHEN & MICHAEL CREUTZ

Department of Physics, Brookhaven National Laboratory, Upton, New York 11973, USA

**THE 'Game of Life'<sup>1,2</sup> is a cellular automaton, that is, a lattice system in which the state of each lattice point is determined by local rules. It simulates, by means of a simple algorithm, the dynamical evolution of a society of living organisms. Despite its simplicity, the complex dynamics of the game are poorly understood. Previous interest in 'Life' has focused on the generation of complexity in local configurations; indeed, the system has been suggested to mimic aspects of the emergence of complexity in nature<sup>1,2</sup>. Here we adopt a different approach, by using concepts of statistical mechanics to study the system's long-time and large-scale behaviour. We show that local configurations in the "Game of Life" self-organize into a critical state. Such self-organized criticality provides a general mechanism for the emergence of scale-free structures<sup>3-5</sup>, with possible applications to earth-quakes<sup>6,7</sup>, cosmology<sup>8</sup>, turbulence<sup>9</sup>, biology and economics<sup>10</sup>. By contrast to these previous studies, where a local quantity was conserved, 'Life' has no local conservation laws and therefore represents a new type of universality class for self-organized criticality. This refutes speculations that self-organized criticality is a consequence of local conservation<sup>11</sup>, and supports its relevance to the natural phenomena above, as these do not involve any locally conserved quantities. The scaling is universal in the sense that the exponents that characterize correlation functions do not depend on details of the local rules.**



1989



# Revisiting the Edge of Chaos: Evolving Cellular Automata to Perform Computations

Melanie Mitchell<sup>1</sup>, Peter T. Hraber<sup>1</sup>, and James P. Crutchfield<sup>2</sup>

Santa Fe Institute Working Paper 93-03-014

1993

(Submitted to *Complex Systems*)

## Abstract

We present results from an experiment similar to one performed by Packard [23], in which a genetic algorithm is used to evolve cellular automata (CA) to perform a particular computational task. Packard examined the frequency of evolved CA rules as a function of Langton's  $\lambda$  parameter [16], and interpreted the results of his experiment as giving evidence for the following two hypotheses: (1) CA rules able to perform complex computations are most likely to be found near "critical"  $\lambda$  values, which have been claimed to correlate with a phase transition between ordered and chaotic behavioral regimes for CA; (2) When CA rules are evolved to perform a complex computation, evolution will tend to select rules with  $\lambda$  values close to the critical values. Our experiment produced very different results, and we suggest that the interpretation of the original results is not correct. We also review and discuss issues related to  $\lambda$ , dynamical-behavior classes, and computation in CA.



## **Chris Langton (Santa Fè Institute)**

**“The secret of life is not in what it is but in what it does.”**

**“Il segreto della Vita non è in ciò che essa è ma in ciò che essa fa”**

# **Il Gioco “Life” come laboratorio per l'emergere della Complessità in un Universo Giocattolo**



**Gli ingredienti per costruire il nostro universo giocattolo sono 4:**

**1. Lo Spazio Fisico**

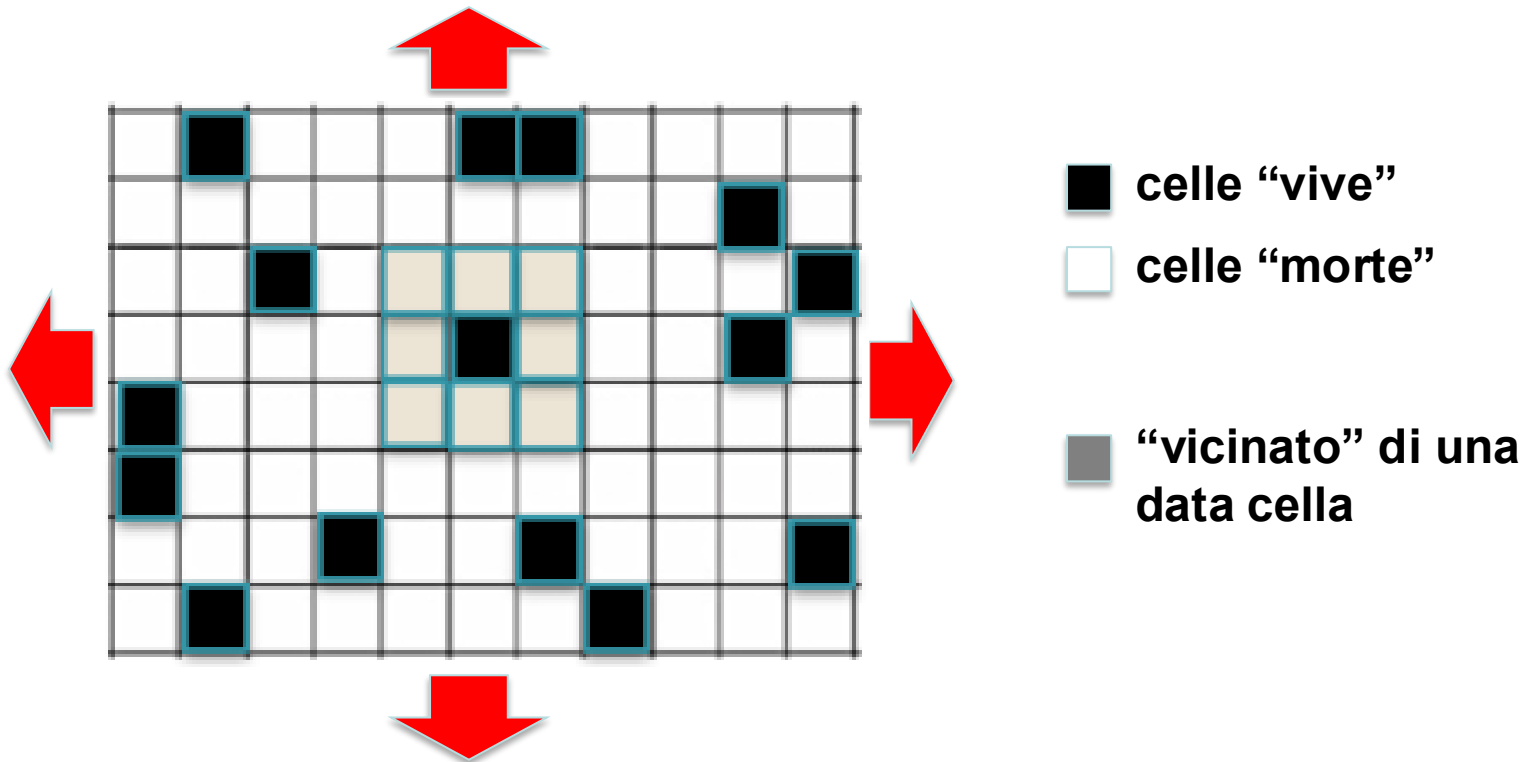
**2. Le Condizioni Iniziali**

**3. Le Leggi Fisiche**

**4. Le Costanti di Natura**

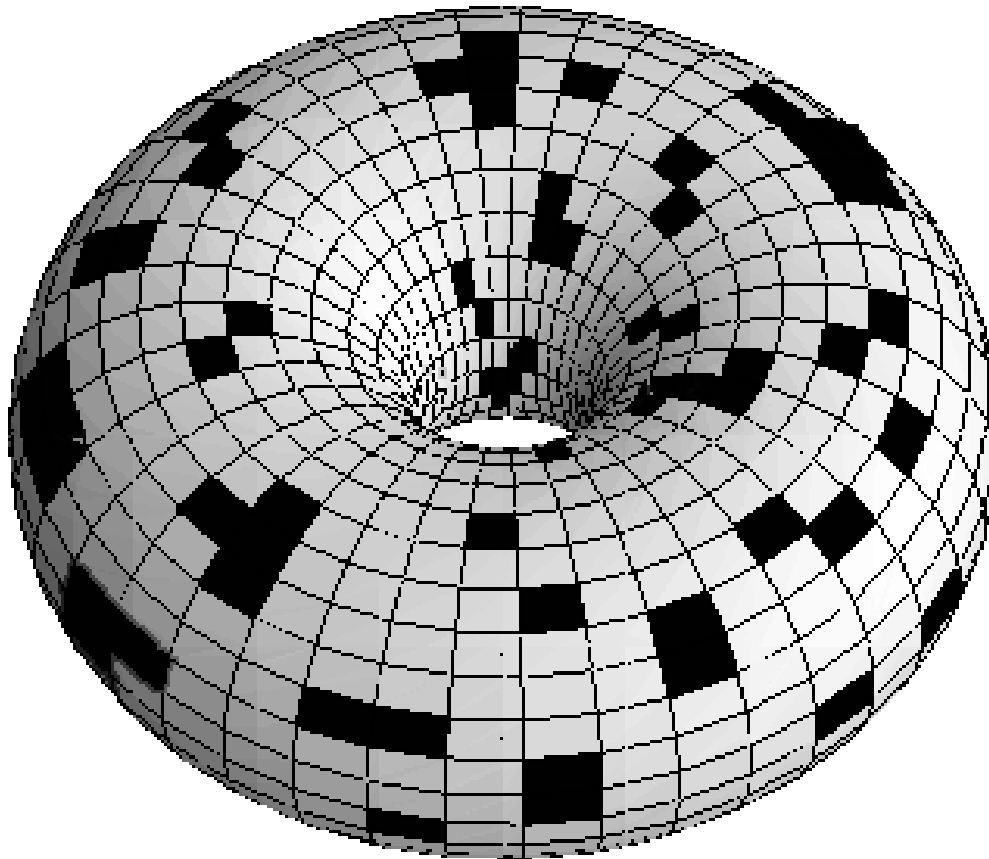
# Lo Spazio Fisico

Lo **spazio fisico (universo)** del “gioco della vita” è una **griglia bidimensionale** costituita da “**cellette**” che possono assumere solo due stati: **vive** (nere, piene) o **morte** (bianche, vuote). Le **8 celle** immediatamente adiacenti ad una data cella costituiscono il suo “**vicinato**”.



# Lo Spazio Fisico

La topologia della griglia-universo è quella di una **superficie toroidale** (una “ciambella”):  
un esempio di Universo 2D finito ma illimitato...



# Le Condizioni Iniziali

## Condizioni iniziali casuali a densità variabile

Le **condizioni iniziali** dell'universo giocattolo del “gioco della vita” sono di solito rappresentate da una griglia con una **configurazione casuale di cellette vive o morte** (cioè nere o bianche). Un parametro **D** regola la **densità iniziale** delle celle vive (cioè la percentuale di celle vive rispetto al totale). Ponendo **D=35(%)**, al **tempo t=0** il nostro universo bidimensionale si presenta ad esempio così:

**t=0**



# Le Condizioni Iniziali

Condizioni iniziali... particolari;-)

Ovviamente è possibile scegliere delle condizioni iniziali particolari, che magari sembrano casuali ma non lo sono...

**t=0**



# Le Condizioni Iniziali

Condizioni iniziali... particolari;-)

Ovviamente è possibile scegliere delle condizioni iniziali particolari, che magari sembrano casuali ma non lo sono... questo ad esempio era il QR-code del mio **green-pass** post vaccinazione 2021, con densità **D=49(%)**....

**t=0**



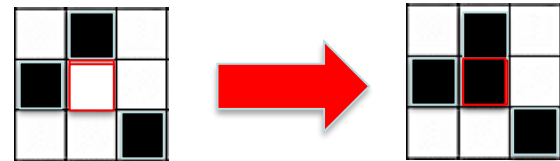
# Le Leggi Fisiche

Le **leggi fisiche** (regole del gioco) che determinano l'**evoluzione dinamica** dello stato delle cellette nel tempo, a partire da un certo **stato iniziale a  $t=0$**  (che come abbiamo detto è di solito rappresentato da una **configurazione casuale** di celle vive e morte), sono solo **due**:

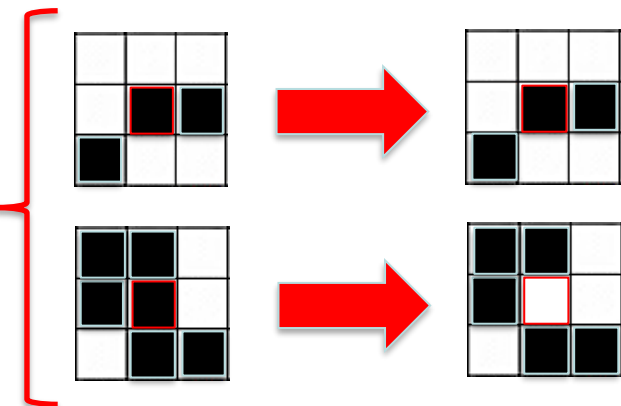
**1) Legge della Nascita:** una cella morta (bianca, al centro) con esattamente **N** vicini vivi *nasce*, diventando *viva* (nera)

**2) Legge della Morte:** una cella viva (nera, al centro) con esattamente **M** vicini vivi *sopravvive*; altrimenti *muore* (per *isolamento* o *sovraffollamento*)

Ad es.  
se  $N=3$ :



Ad es.  
se  $M=2$



# Le Costanti di Natura

Le **costanti di natura** sono i cosiddetti “**parametri liberi**” (parametri di controllo) che determinano le condizioni iniziali dell’universo o che compaiono nelle leggi fisiche. In questo caso, come si è già visto, una volta fissata la dimensione della griglia, abbiamo solo **tre** parametri liberi:

**D:** definisce la densità iniziale di celle vive nel nostro universo giocattolo.

**N:** rappresenta il numero di celle vicine vive necessarie a far nascere una cella morta (parametro di nascita).

**M:** rappresenta il numero di celle vicine vive necessarie a far sopravvivere una cella viva (parametro di sopravvivenza).



**DIVERTIAMOCI DUNQUE AD INTERPRETARE  
RUOLO DI UNA SORTA DI “PROGETTISTA COSMICO”  
CHE GIOCHI CON I VALORI DEI PARAMETRI  
LIBERI DELL’UNIVERSO DEL «GAME OF LIFE»...**

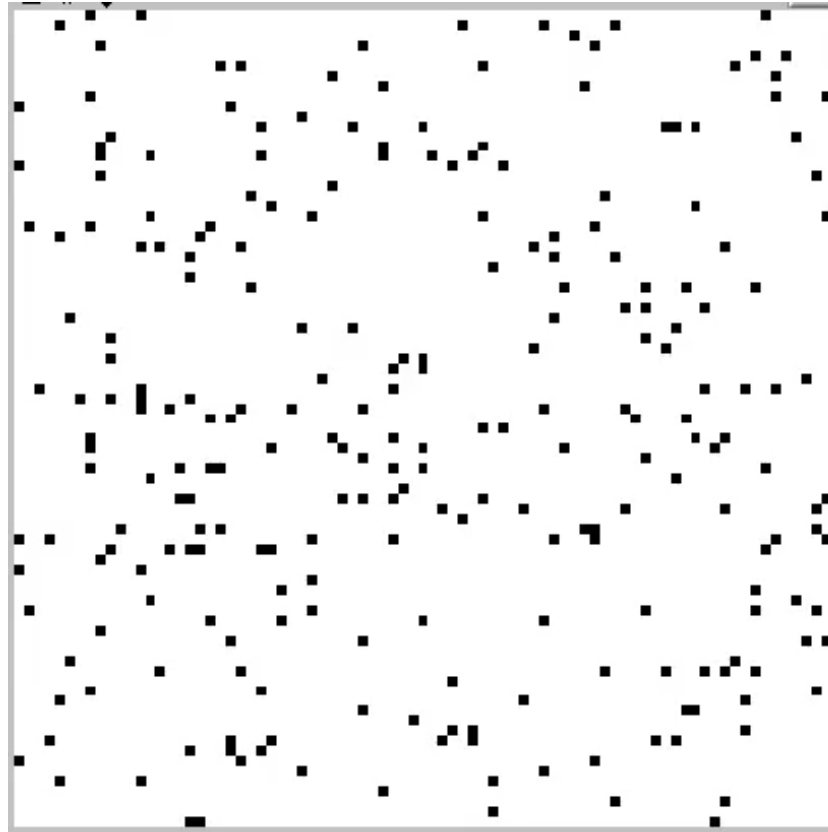
# Universi “troppo vuoti”

La **densità iniziale D** non è molto importante, purché non sia **troppo bassa** (sotto il 5%) o **troppo alta** (sopra l'80%), nel qual caso conduce quasi sempre, rapidamente, a **universi troppo vuoti**, con al massimo pochissime strutture regolari:



**N=3**

**M=2 o 3**



strutture  
statiche



Blocco  
(Block)

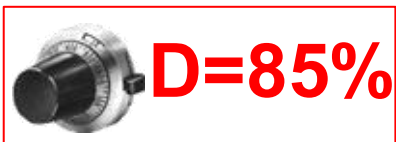
strutture  
oscillanti



Lampeggiatore  
(Blinker)

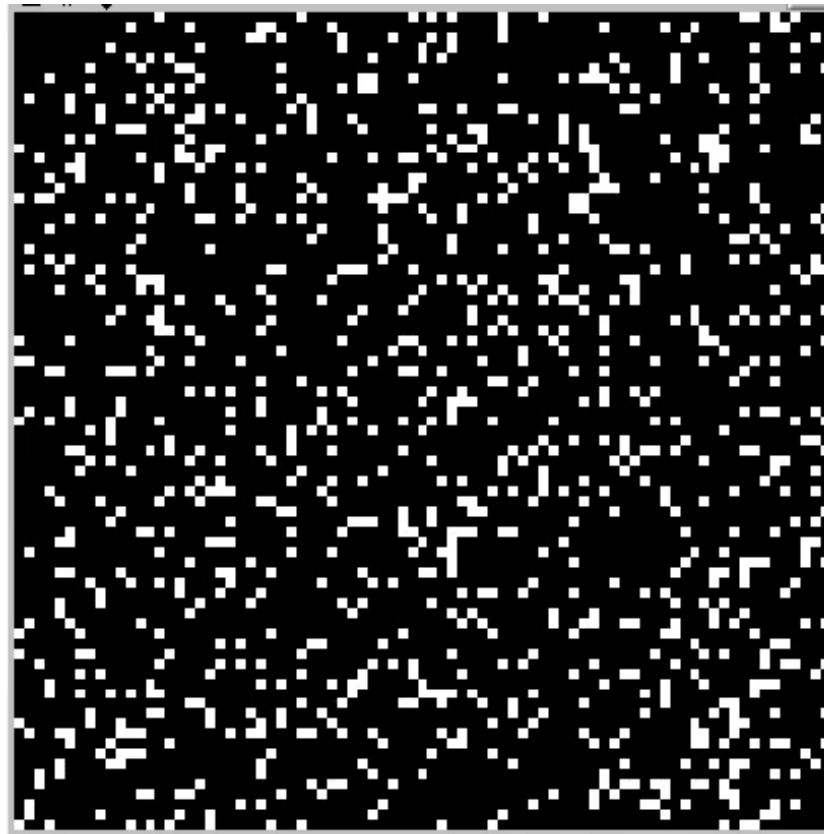
# Universi “troppo vuoti”

La **densità iniziale  $D$**  non è molto importante, purché non sia **troppo bassa** (sotto il 5%) o **troppo alta** (sopra l'80%), nel qual caso conduce quasi sempre, rapidamente, a **universi troppo vuoti**, con al massimo pochissime strutture regolari:



**$N=3$**

**$M=2$  o  $3$**



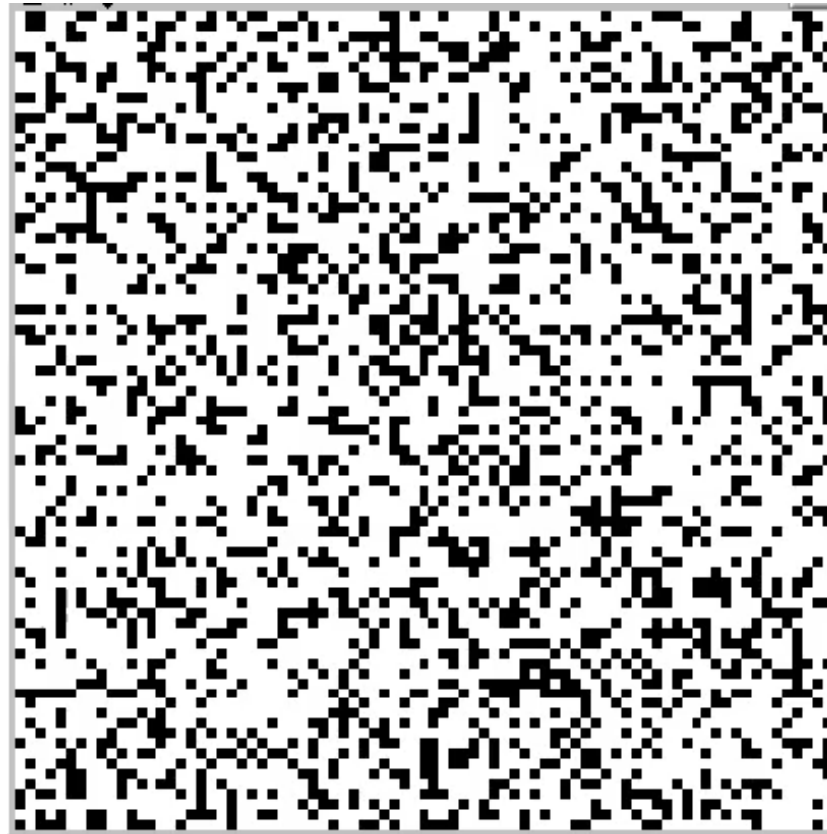
# Universi “troppo ordinati”

Fissiamo dunque la **densità iniziale D** tra il 5% e l'80%, ad esempio al **30%** e vediamo cosa succede, invece, **facendo variare il parametro di nascita N** e tenendo  $M = 2$  o  $3$  (simultaneamente). Si vede subito che **valori di  $N=1$  o  $N>3$**  conducono rapidamente ad universi **troppo ordinati**, contenenti solo **strutture statiche o oscillanti**.

**D=30%**



**M=2 o 3**



# Universi “troppo disordinati”

Per  $N=2$ , invece, si cade nella situazione opposta e si ottengono **universi troppo disordinati**, dove non riesce a formarsi alcun tipo di struttura stabile.

Sembra quindi che il valore del parametro di nascita  $N=3$  sia alquanto **speciale** per ottenere universi interessanti...

$D=30\%$



$M=2$  o  $3$

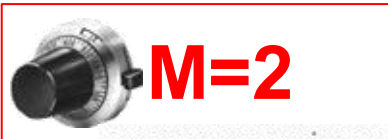


# Universi “troppo vuoti o ordinati”

Vediamo infine cosa succede se facciamo variare il parametro di sopravvivenza  $M$  tenendo  $D=30\%$  ed  $N=3$ . Se diamo ad  $M$  un unico valore, otteniamo nuovamente universi **troppo ordinati** ( $M \leq 3$ ) o **troppo vuoti** ( $M \geq 4$ ).

$D=30\%$

$N=3$




# Universi “troppo disordinati”

Se invece diamo ad  $M$  più di due valori simultaneamente possibili, otteniamo sempre universi **troppo disordinati**.

$D=30\%$

$N=3$

  $M=2, 3 \text{ o } 4$



# Universi “at the edge of chaos”

Sembra quindi che  $M$  debba avere **due valori possibili simultaneamente** per avere universi interessanti. Non solo, ma si può verificare che se questi valori sono **diversi da 2 e 3** si ottengono nuovamente universi troppo vuoti e ordinati. Pare quindi che l'**unica combinazione** di parametri che conduce ad universi “**al margine del caos**”, ovvero adatti all'emergere della **complessità**, siano quelli (non a caso!) scelti originariamente da John Conway, ovvero:  **$N=3$  ed  $M=2$  o  $3$** :

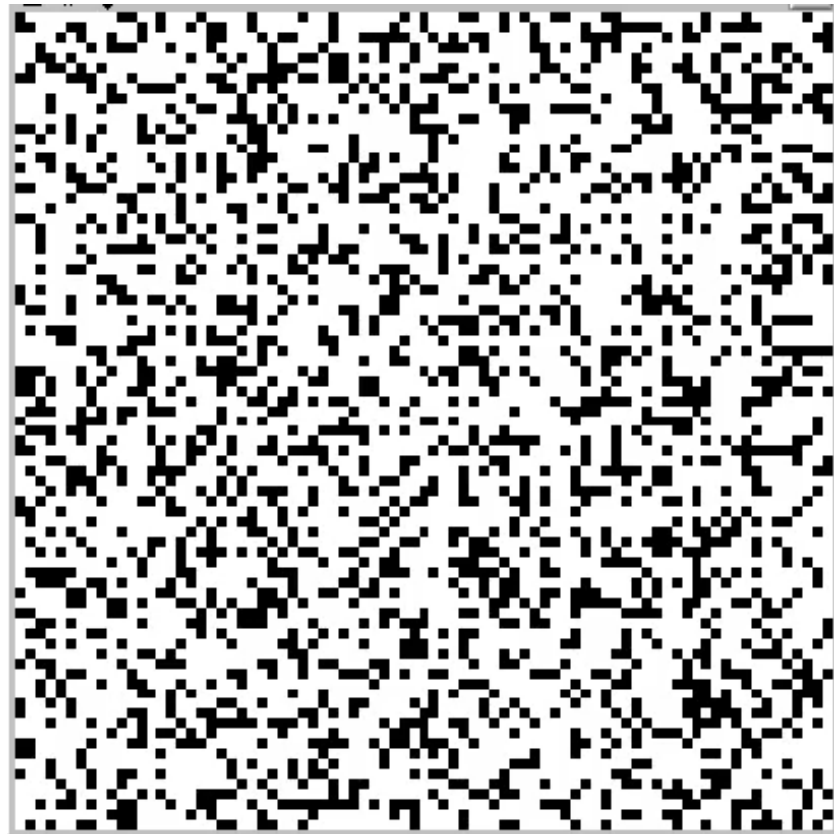
**$D=30\%$**

**$N=3$**

**$M=2$  o  $3$**



Qui è  
J.Conway  
il  
Progettista  
Cosmico



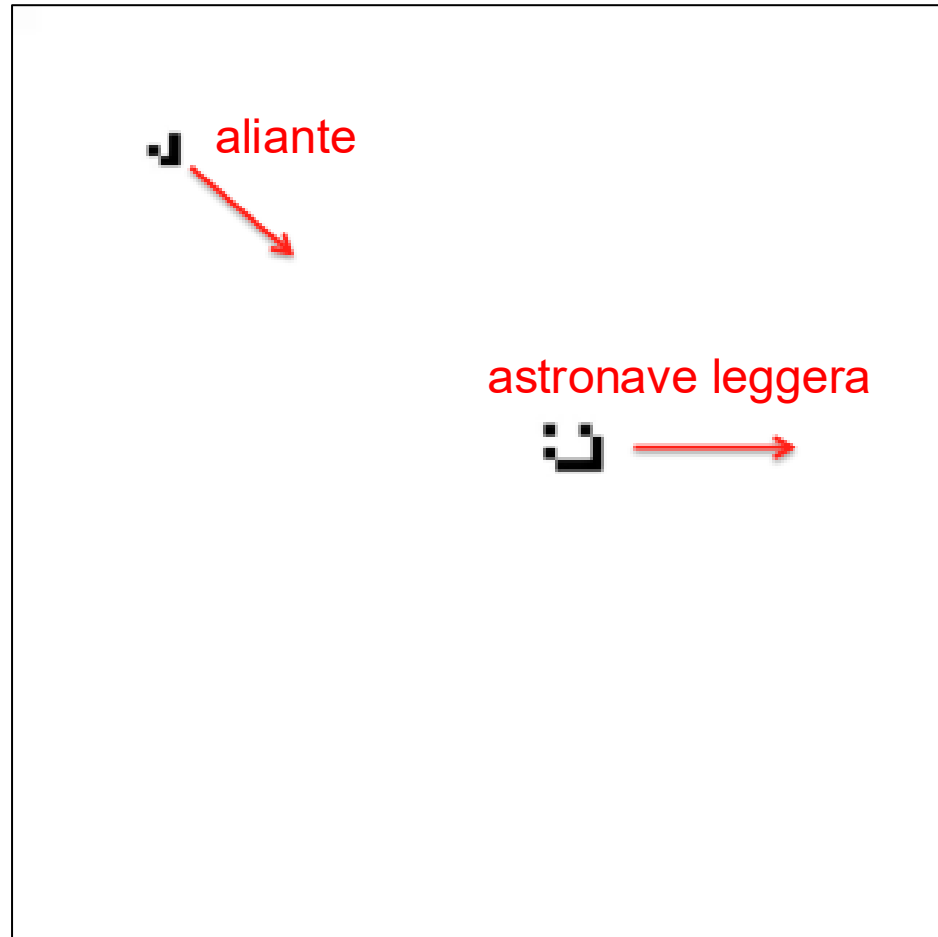
# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Strutture in movimento...

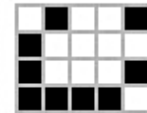
**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



Aliante (Glider)



Astronave leggera (LWSS)



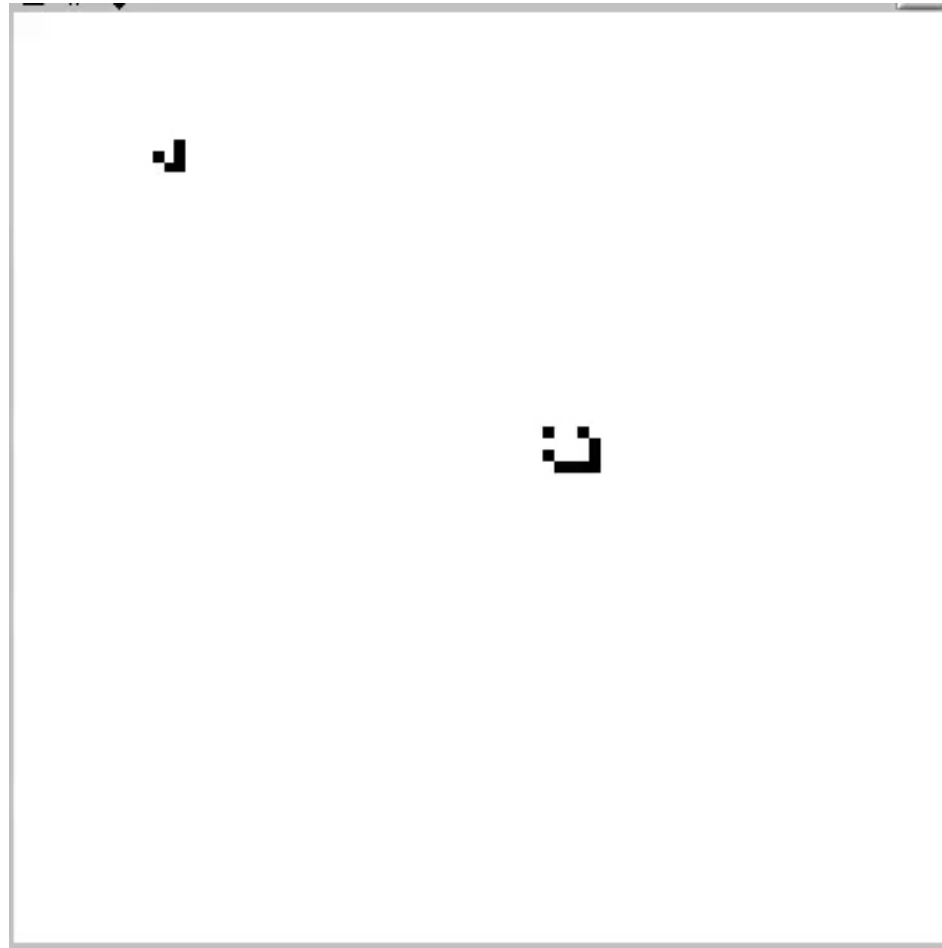
# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Strutture in movimento...

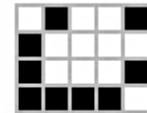
**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



Aliante (Glider)



Astronave leggera (LWSS)



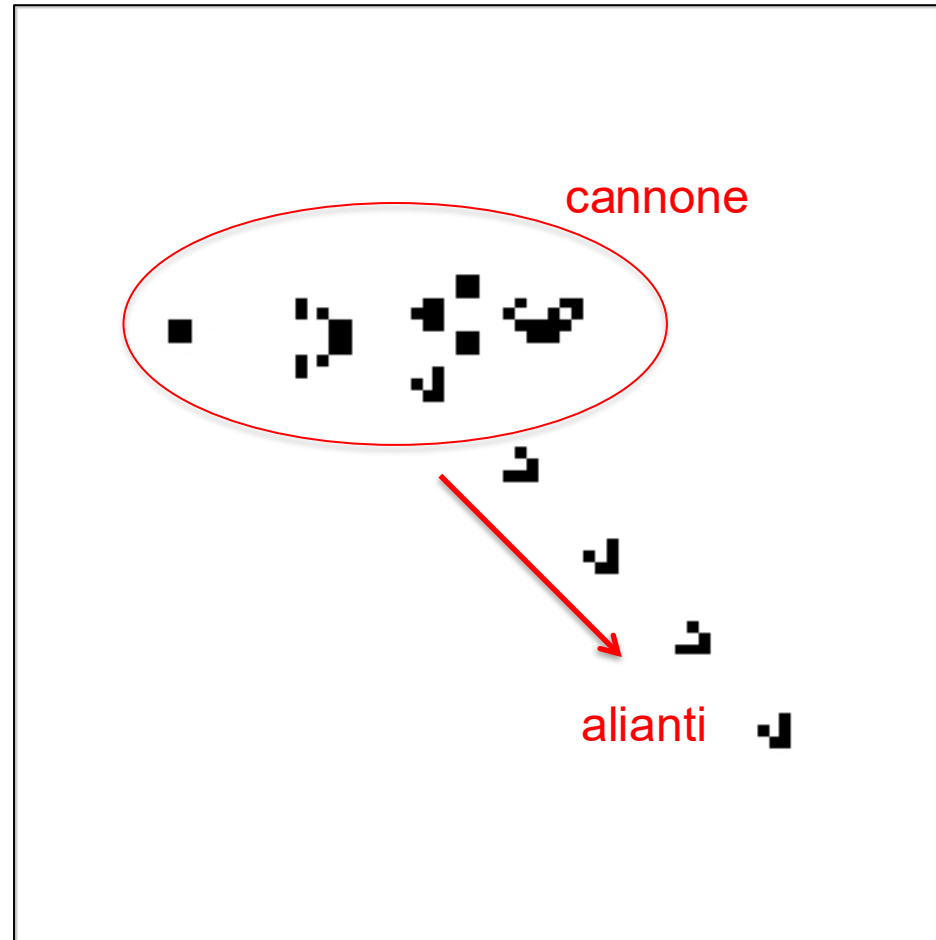
# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Il “cannone” di Gosper: genera un aliante ogni 30 iterazioni (crescita infinita)

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



Aliante (Glider)

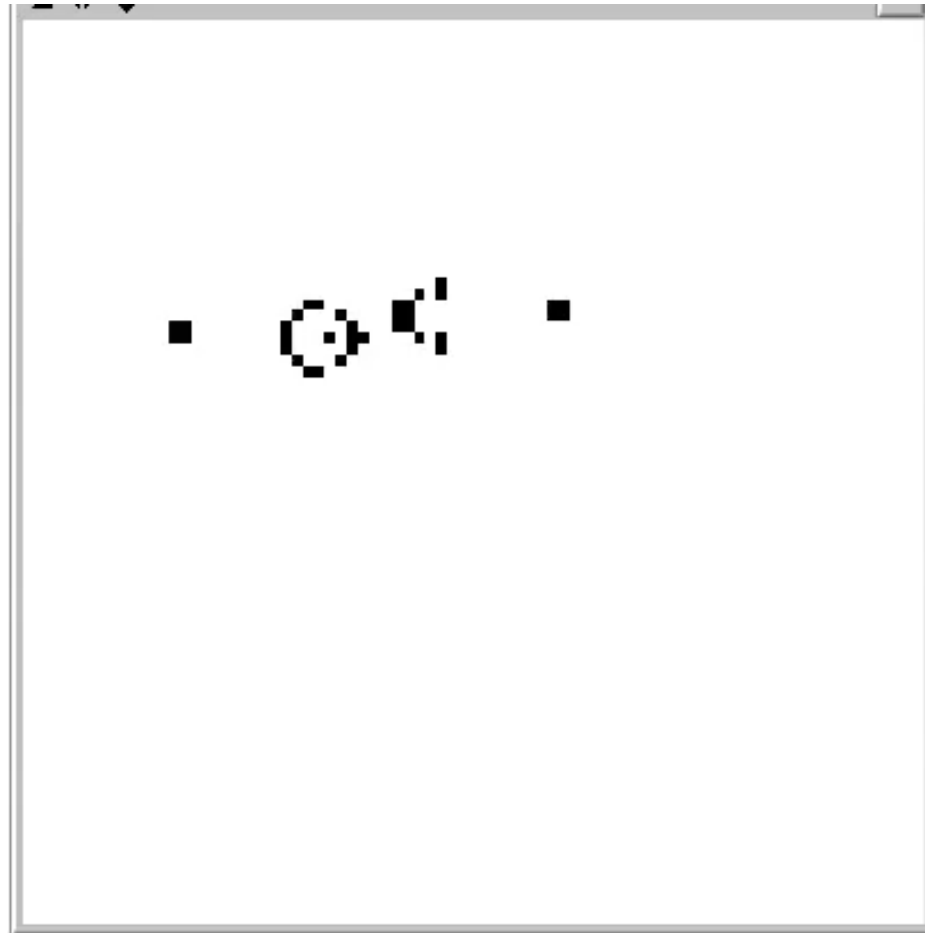
# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Il “cannone” di Gosper: genera un aliante ogni  
30 iterazioni (crescita infinita)

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



Aliante (Glider)

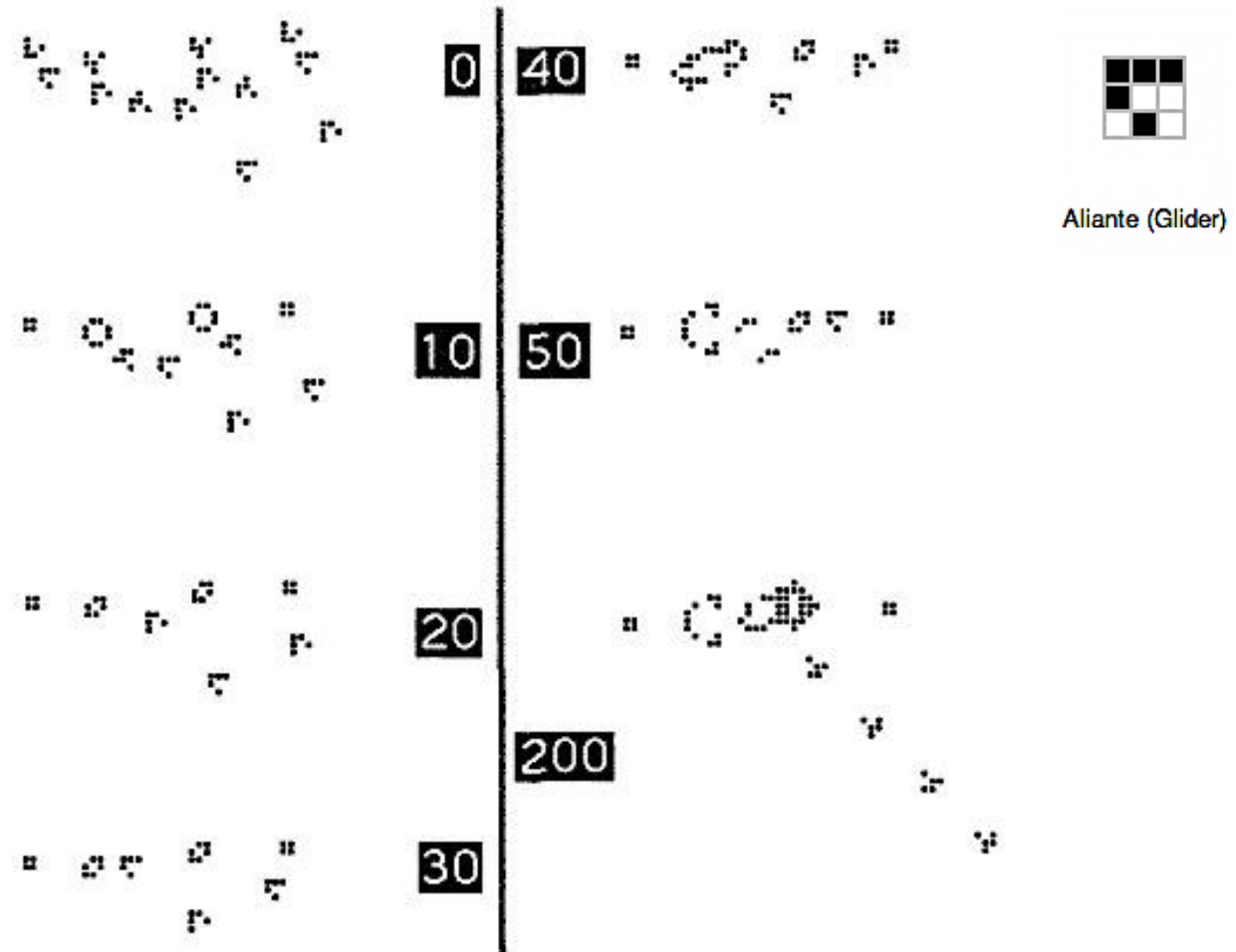
# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Il generatore di alianti può emergere dalla collisione di 13 alianti accuratamente disposti a  $t=0$  (condizioni iniziali «speciali»):

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Vediamo infine cosa viene fuori se facciamo partire il sistema dalle condizioni iniziali speciali di tipo **green-pass**...;-)

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



# Emergere di strutture complesse negli Universi “at the edge of chaos”

Vediamo infine cosa viene fuori se facciamo partire il sistema dalle condizioni iniziali speciali di tipo **green-pass...**;:-)

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**

24 Luglio 2021 - 7:14 . Cronaca

“Green pass provvedimento nazista”: alcuni vigili annunciano il boicottaggio. Cgil, Cisl e Uil: “Impensabile”



POLIZIA LOCALE

# Per chi volesse giocare a fare il Progettista Cosmico...



The screenshot shows the 'Interface' window of a simulation software. The window has a menu bar with 'Interface', 'Info', and 'Code'. Below the menu bar are several controls: 'Edit', 'Delete', 'Add', a dropdown menu showing 'abc Button', a slider set to 'normal speed', a checkbox for 'view updates' which is checked, a dropdown for 'on ticks', and a 'Settings...' button.

The main area of the window is divided into several sections:

- SETUP-BLANK** and **SETUP-RANDOM** buttons.
- initial-density** slider set to 35.0 %.
- draw-cells** button and **current density** display showing 0.12.
- BIRTH-RULE:** a cell becomes alive if has a number of living neighbors equal to **n-of-living-neighbors** slider set to 3.
- DEATH-RULE:** a cell dies if has a number of living neighbors different from a table of values:

n1	n2	n3	n4	n5
2	3	10	10	10

- GO-ONCE** and **GO-FOREVER** buttons.
- noise-level** slider set to 0.0000 and **waiting-time** slider set to 0.20.
- ESEMPI:** buttons for **ROSPO**, **ASTRONAVE**, **ALIANTE**, and **CANNONE di GOSPER**.

The right side of the window shows a 3D view of the simulation, with a 'ticks: 47' counter and a '3D' button. The simulation area displays a complex, fractal-like pattern of black cells on a white background.

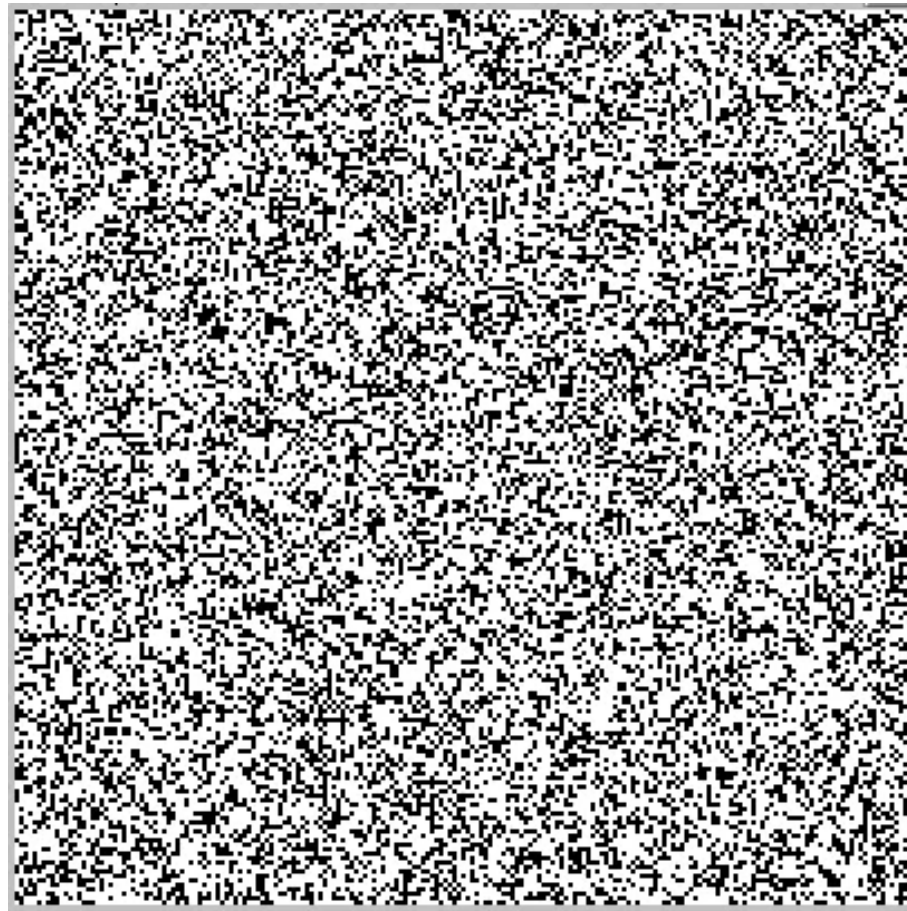
# Età e dimensione dell'Universo

Va sottolineato che le **strutture complesse** hanno bisogno di **tempo** per emergere dalla dinamica del gioco Life a partire da condizioni casuali, ma anche di **spazio** per assicurare una certa varietà nelle strutture stesse. Se infatti passiamo da una griglia **40x40** (come le precedenti) ad una **100x100**, aumentano le probabilità che strutture complesse interessanti nascano e non si estinguano dopo breve tempo.

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



# Età e dimensione dell'Universo

Inoltre John Conway ha anche mostrato che:

1) il gioco Life ha le potenzialità di una **macchina di Turing universale**: in altre parole, con un tempo sufficiente a disposizione, ogni cosa che può essere elaborata alitmicamente può essere elaborata nel contesto del Game of Life;

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



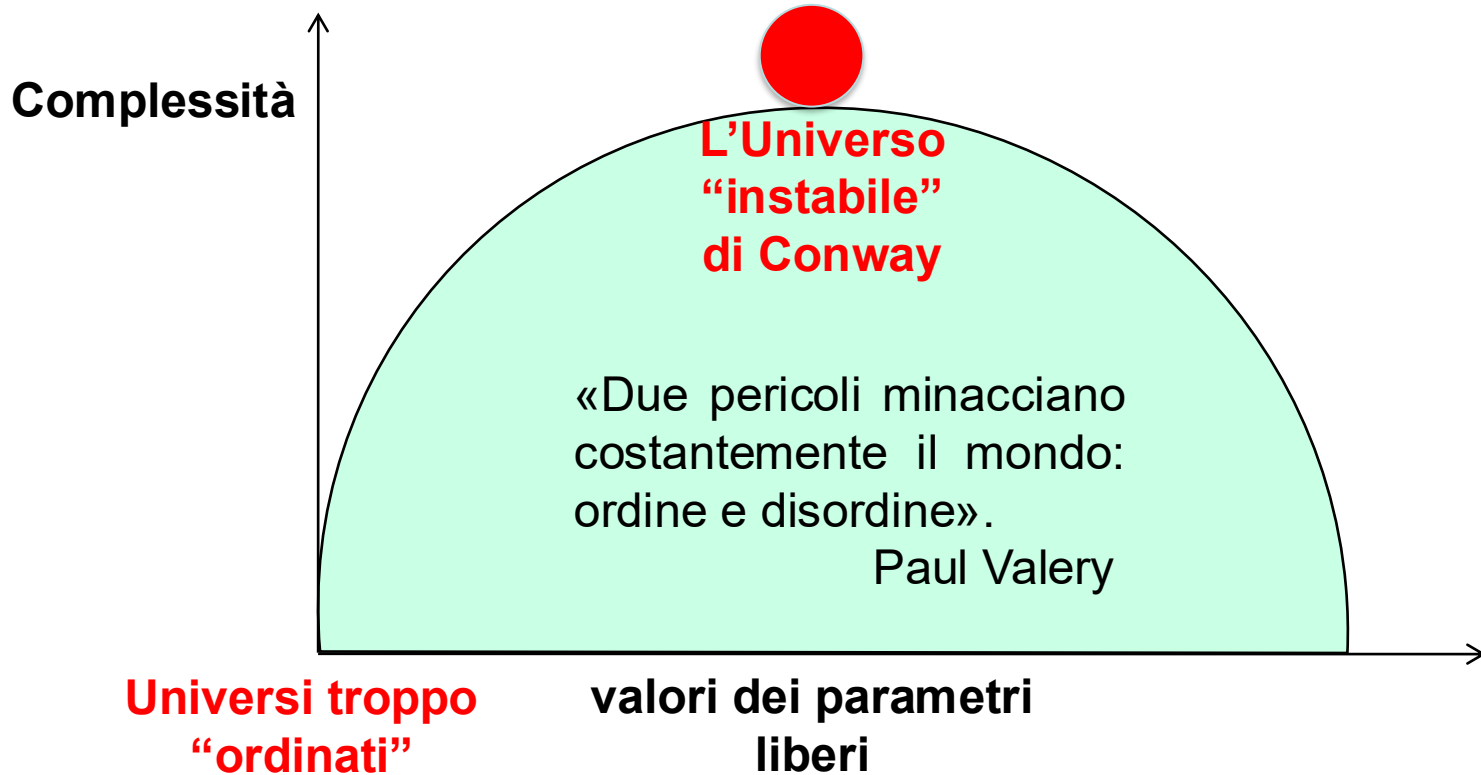
2) attraverso le sue semplici regole **deterministiche** si possono realizzare strutture particolarmente complesse, come un **costruttore universale** o un **auto-replicatore** (cioè la base di qualunque tipo di processo evolutivo per selezione naturale).

*“E’ probabile che, riempiendo una parte sufficientemente grande del piano infinito del Gioco della Vita per mezzo di una configurazione aleatoria, dopo un lungo periodo di tempo emergeranno degli esseri autoriproduttori intelligenti che popoleranno lo spazio...”*

John Conway

# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

La complessità sembra emergere solo al margine del caos



**D=30%**

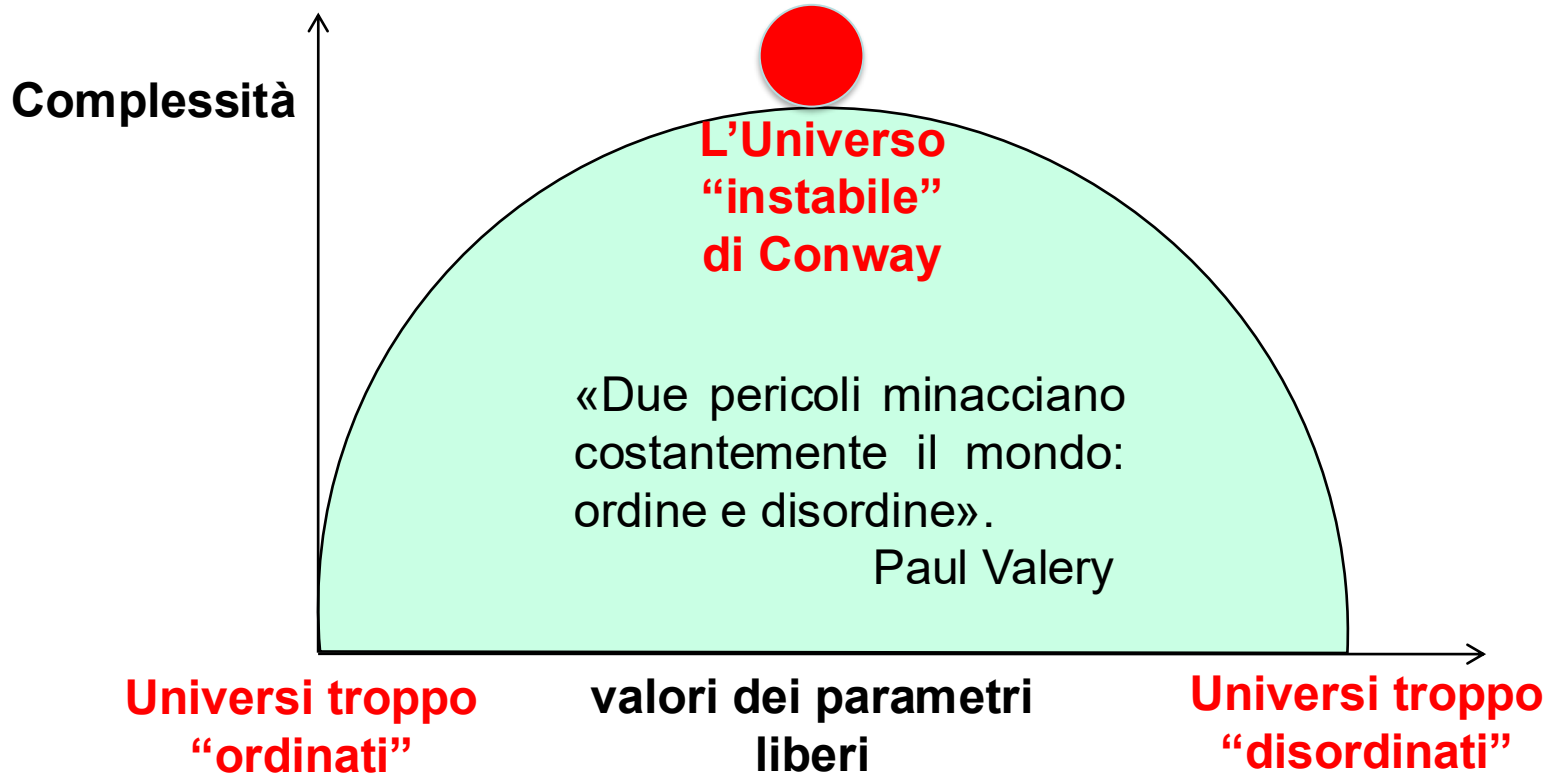
**N=3**

**M=2 o 3**



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

La complessità sembra emergere solo al margine del caos



**D=30%**

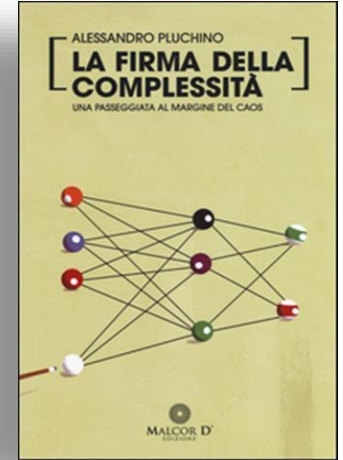
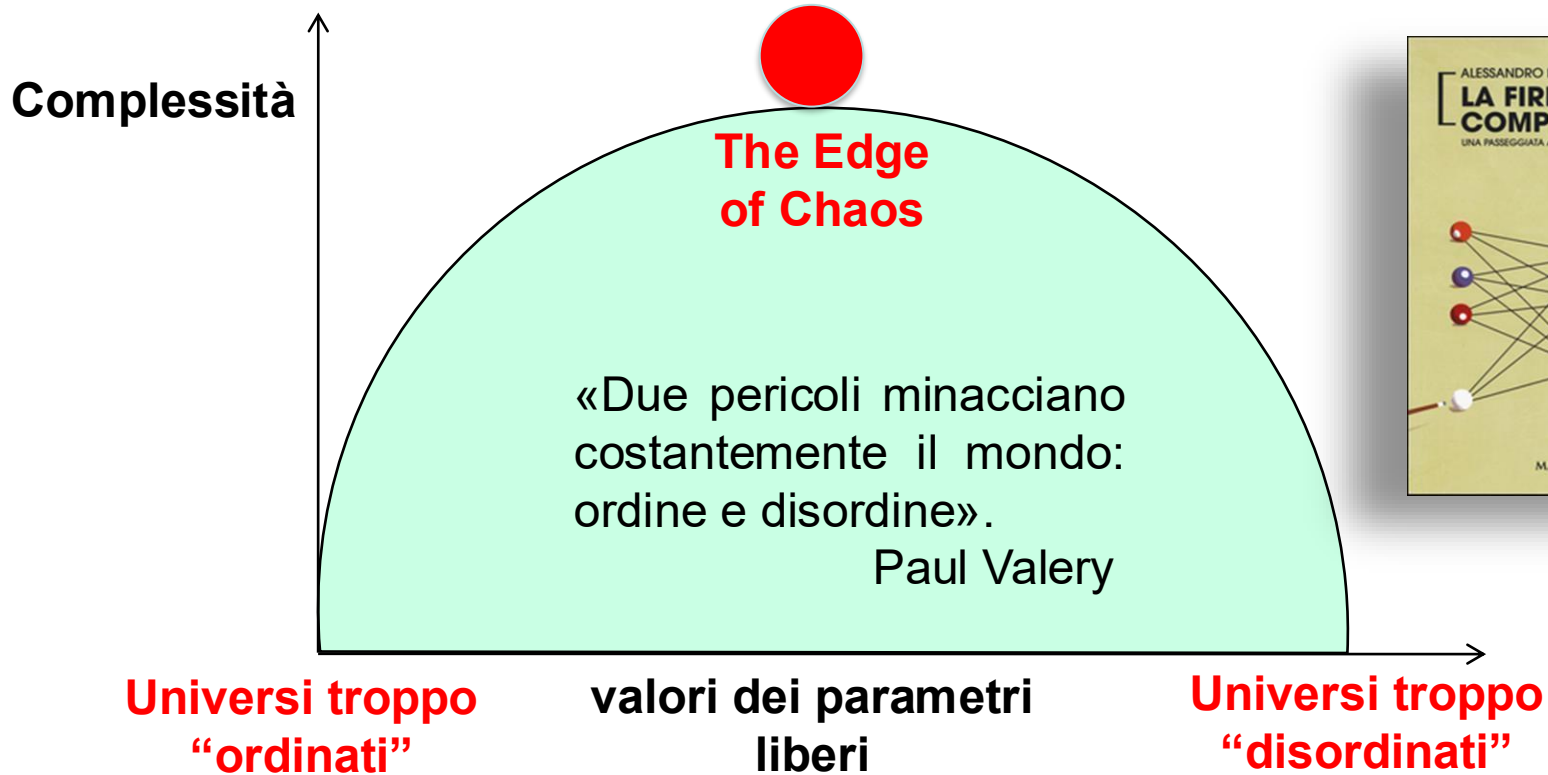
**N=3**

**M=2 o 3**



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

La complessità sembra emergere solo al margine del caos



**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

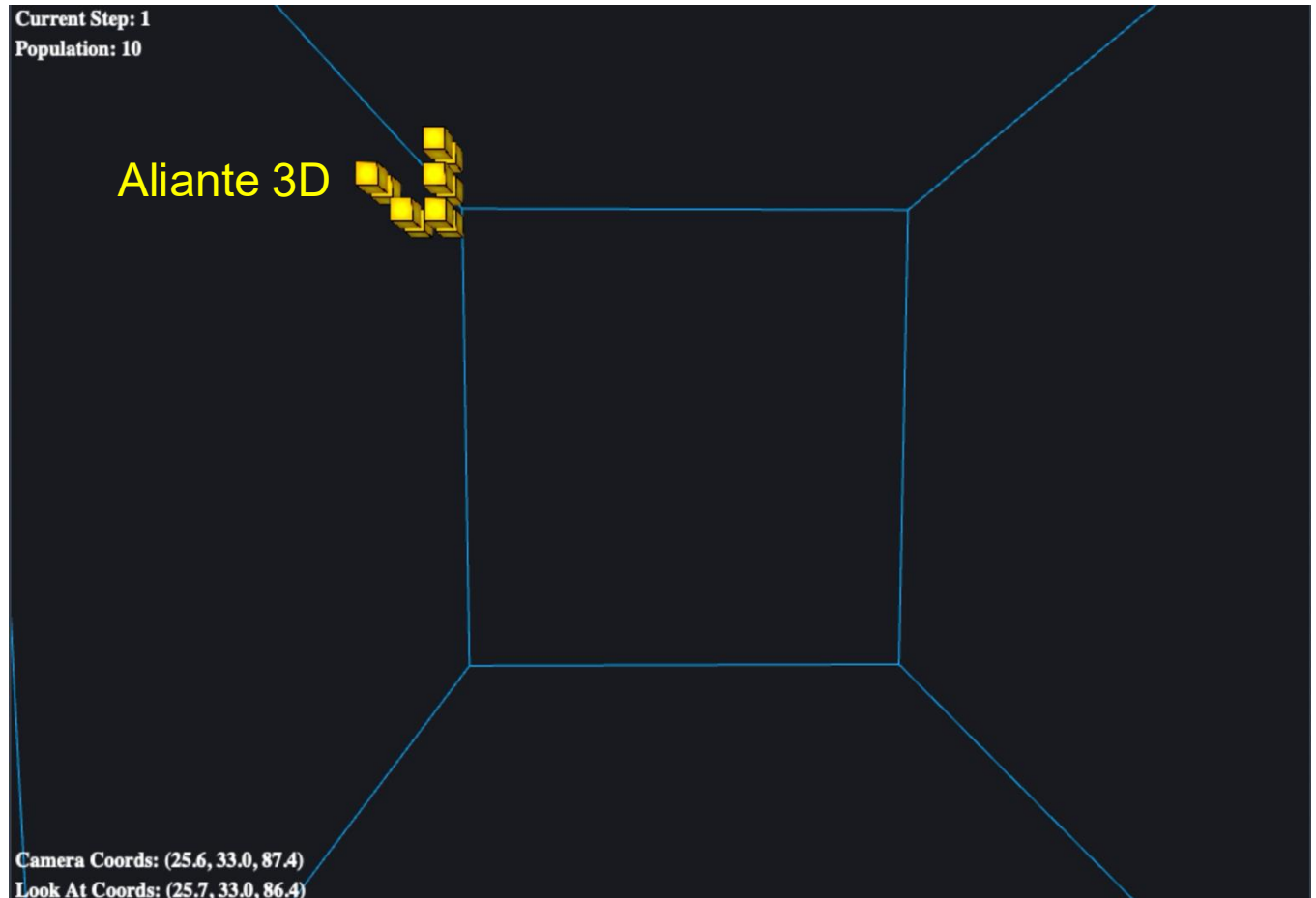
La complessità sembra emergere solo al margine del caos

Affinchè nel Gioco Life all'Edge of Chaos emergano **strutture altamente complesse** (come esseri autoriproduttori intelligenti) potrebbe però essere importante anche la **dimensionalità** dello spazio... magari invece di un piano 2D infinito occorrerebbe uno **spazio 3D** infinito:

**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



<http://rbeaulieu.github.io/3DGameOfLife/>

# Game of Life 3D (John Conway)

Creetah Ltd • [Formazione](#) > [Insegnamento](#)

♡ Elenco preferenze

Choose the rules of life and let the simulation commence! This app lets you experience the real power of Conway's game of life simulation. The simulation comes alive as cells live and die according to the rules you set them!

[Altro](#)



**PEGI 3**  
In-App Purchases

0,99 €+

Acquista

...

+ Offre acquisti in-app

⚠ [Vedi i requisiti di sistema.](#)

<https://www.microsoft.com/it-it/p/game-of-life-3d-john-conway/9n8vngngknj2#activetab=pivot:overviewtab>

<https://www.youtube.com/watch?v=qtvBxJnJIRo>



3d game of life (Cellular Automata)

11.220 visualizzazioni • 18 mar 2012

👍 26    💬 4    ➦ CONDIVIDI    ≡ SALVA    ...

## 3D Game of Life

Created By...

Raphael Beaulieu  
Elliot Coy

Play Game

<http://rbeaulieu.github.io/3DGameOfLife/>

# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

La complessità sembra emergere solo al margine del caos

Oppure potrebbero essere importanti le **interazioni a lungo raggio**, che nel Gioco Life di Conway non esistono, ma che potrebbero essere introdotte trasformando la griglia toroidale 2D in un **reticolo toroidale** regolare in cui, con una certa **probabilità  $p$  di rewiring**, si sostituiscono alcuni legami a corto raggio con legami a lunga distanza, così da ottenere un reticolo **small-world**:

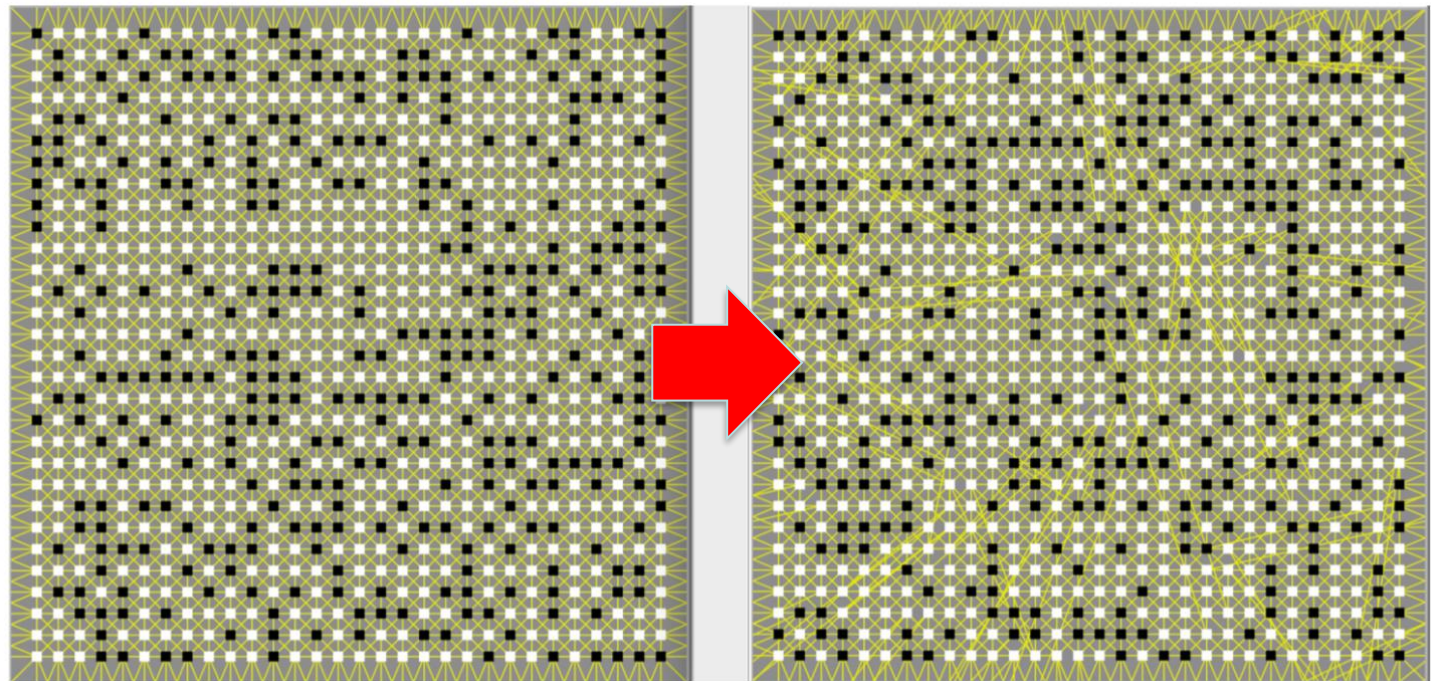
Reticolo regolare toroidale a primi vicini

Reticolo Small-World con rewiring  $p > 0$

$D=30\%$

$N=3$

$M=2$  o  $3$



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

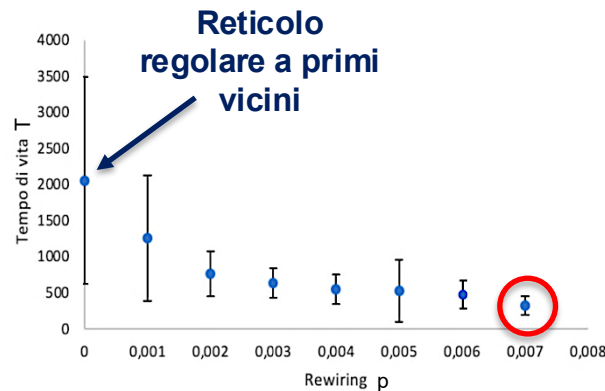
La complessità sembra emergere solo al margine del caos

Quello che si osserva, però, è che una maggiore connessione tra nodi distanti della rete (**rewiring crescente**) porta ad un congelamento precoce (eccesso di ordine) e **riduce il tempo di vita medio  $\langle T \rangle$**  del sistema...

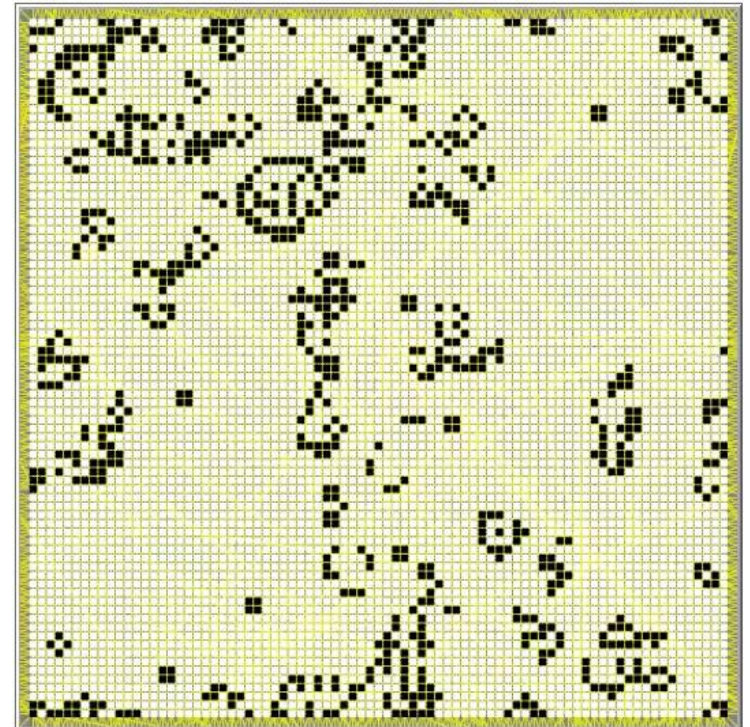
**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



Reticolo Small-World con rewiring  $p = 0.007$



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

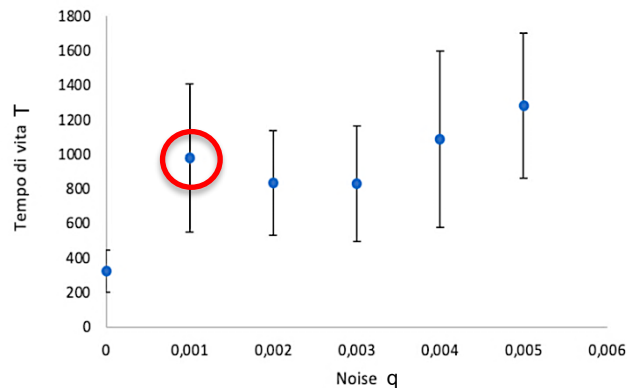
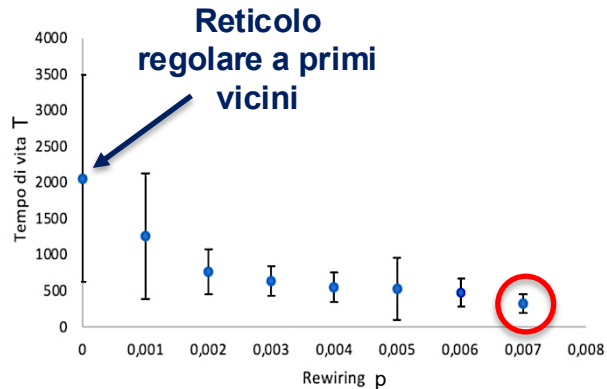
## La complessità sembra emergere solo al margine del caos

Quello che si osserva, però, è che una maggiore connessione tra nodi distanti della rete (**rewiring crescente**) porta ad un congelamento precoce (eccesso di ordine) e **riduce il tempo di vita medio  $\langle T \rangle$**  del sistema... Per riportare il sistema al **margine del caos** (dove  $\langle T \rangle$  è abbastanza alto) bisogna aggiungere un altro ingrediente che risulta essere un **rumore di fondo (noise)** in grado di far cambiare stato alle celle in maniera casuale con una certa **probabilità  $q$** ...

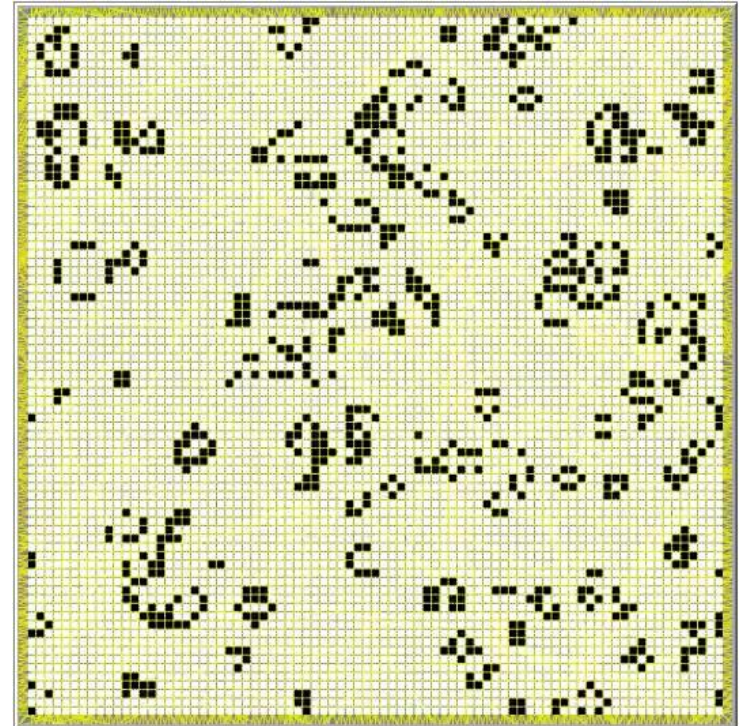
**D=30%**

**N=3**

**M=2 o 3**



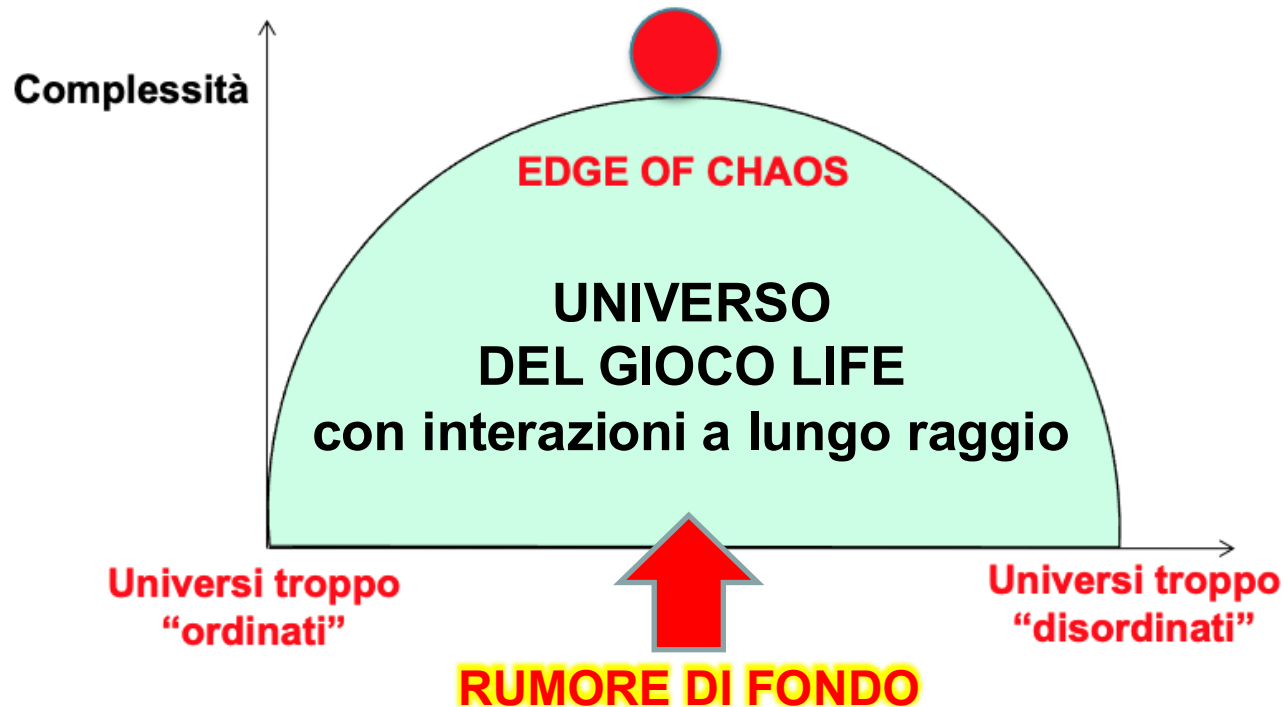
Reticolo Small-World con  $p = 0.007$  e  $q = 0.001$



# Complessità nel Gioco Life: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

La complessità sembra emergere solo al margine del caos

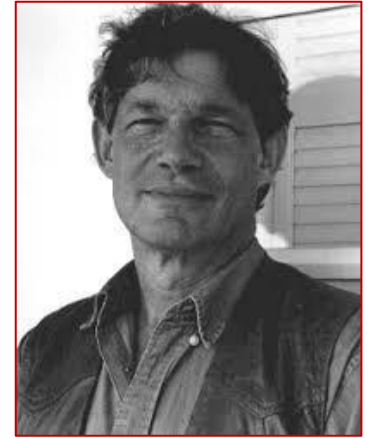
Quello che si osserva, però, è che una maggiore connessione tra nodi distanti della rete (**rewiring crescente**) porta ad un congelamento precoce (eccesso di ordine) e **riduce il tempo di vita medio  $\langle T \rangle$**  del sistema... Per riportare il sistema al **margine del caos** (dove  $\langle T \rangle$  è abbastanza alto) bisogna aggiungere un altro ingrediente che risulta essere un **rumore di fondo (noise)** in grado di far cambiare stato alle celle in maniera casuale con una certa **probabilità  $q$** ...



# Auto-Organizzazione al Margine del Caos

## Le Reti Binarie (o Booleane) di Kauffman

I **sistemi viventi** sono costituiti da una serie sterminata di relazioni, interconnesse fra loro, per cui si comportano in un certo senso come calcolatori che lavorano in parallelo: i **geni**, ad esempio, regolano a vicenda la propria attività direttamente attraverso altri geni o indirettamente per mezzo di proteine da loro stessi prodotte. Negli anni '90 Il biologo teorico **Stuart Kauffman** ha pensato di poterne studiare le connessioni utilizzando **reti binarie NK**, cioè reti costituite da **N elementi** binari (nodi ON-OFF) connessi con (in media) **K links** per nodo.



S.A.Kauffman

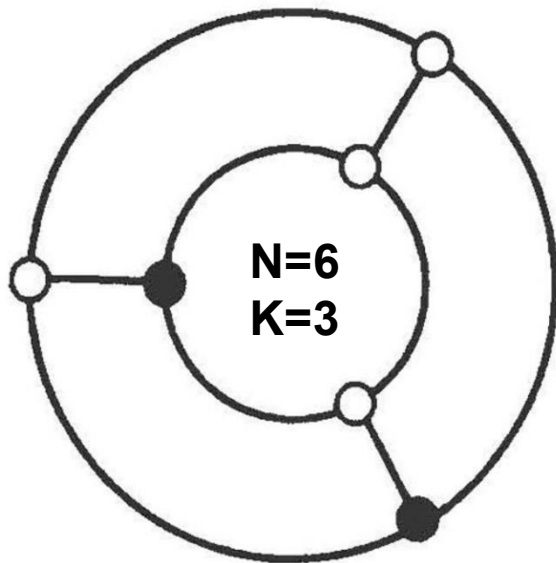


Figura 9-2  
Una semplice rete binaria.

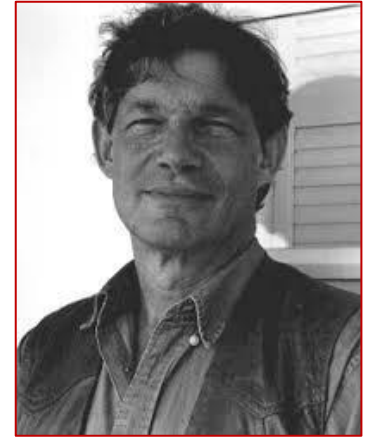
Come in un automa cellulare, lo schema di nodi ON-OFF di una rete binaria cambia per passi discreti. I nodi sono accoppiati fra loro in modo tale che il valore di ciascuno è determinato dai valori precedenti dei nodi adiacenti, in base a una «regola di commutazione». Per esempio, per la rete della [figura 9-2](#) possiamo scegliere la regola di commutazione seguente: un nodo sarà acceso al prossimo passo se almeno due dei nodi adiacenti a esso sono accesi in questo passo, mentre sarà spento in tutti gli altri casi.

**Sequenze di stati (cicli) → attrattori**

# Auto-Organizzazione al Margine del Caos

## Le Reti Binarie (o Booleane) di Kauffman

I **sistemi viventi** sono costituiti da una serie sterminata di relazioni, interconnesse fra loro, per cui si comportano in un certo senso come calcolatori che lavorano in parallelo: i **geni**, ad esempio, regolano a vicenda la propria attività direttamente attraverso altri geni o indirettamente per mezzo di proteine da loro stessi prodotte. Negli anni '90 Il biologo teorico **Stuart Kauffman** ha pensato di poterne studiare le connessioni utilizzando **reti binarie NK**, cioè reti costituite da **N elementi** binari (nodi ON-OFF) connessi con (in media) **K links** per nodo.



S.A.Kauffman

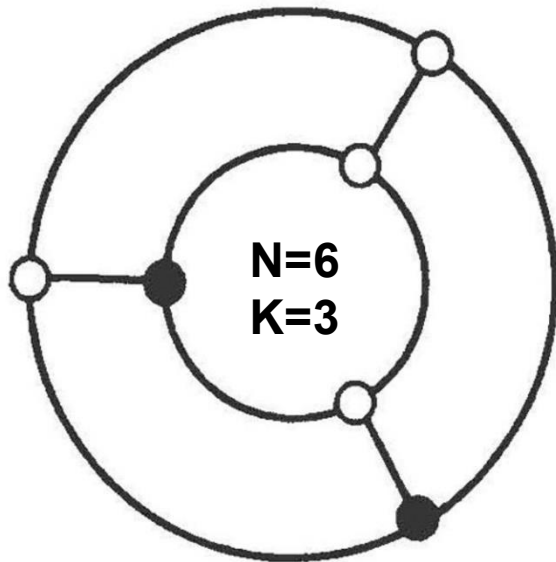


Figura 9-2  
Una semplice rete binaria.

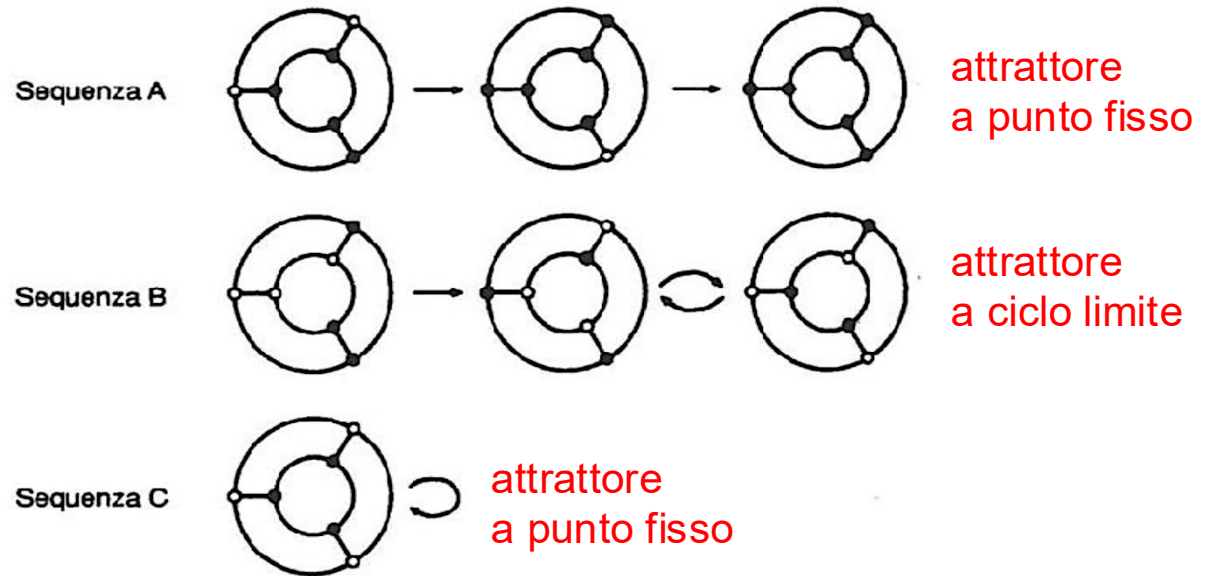
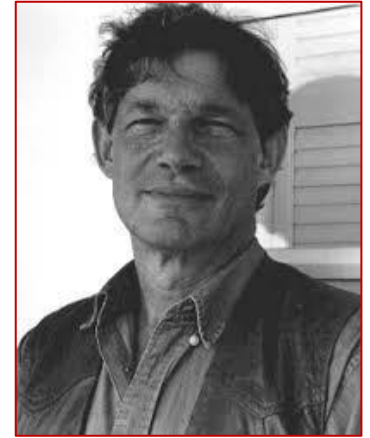


Figura 9-3  
Tre sequenze di stati in una rete binaria.

# Auto-Organizzazione al Margine del Caos

## Le Reti Binarie (o Booleane) di Kauffman

I **sistemi viventi** sono costituiti da una serie sterminata di relazioni, interconnesse fra loro, per cui si comportano in un certo senso come calcolatori che lavorano in parallelo: i **geni**, ad esempio, regolano a vicenda la propria attività direttamente attraverso altri geni o indirettamente per mezzo di proteine da loro stessi prodotte. Negli anni '90 Il biologo teorico **Stuart Kauffman** ha pensato di poterne studiare le connessioni utilizzando **reti binarie NK**, cioè reti costituite da **N elementi** binari (nodi ON-OFF) connessi con (in media) **K links** per nodo.



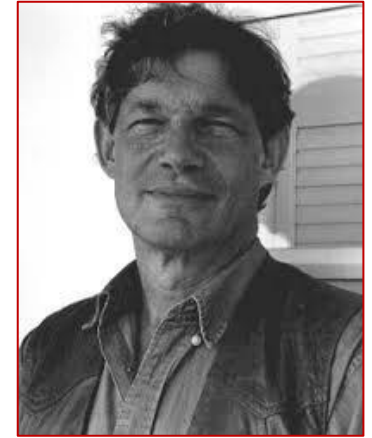
S.A.Kauffman

Quando **K è dell'ordine di N** le reti presentano un andamento del tutto **caotico** e sono molto sensibili alle perturbazioni, dovute anche al cambiamento di stato di uno solo dei nodi. Anche le reti in cui  $K < N$  hanno un andamento caotico. **Quando però  $K \sim 2$  si assiste all'emergere di un ordine spontaneo**: il numero di attrattori e la loro lunghezza si riducono a un valore circa pari alla radice quadrata di N. Per esempio, **in una rete di 100.000 elementi**, ciascuno a due ingressi, malgrado possa assumere  $2^{100.000}$  stati, va incontro a **solli 370 attrattori diversi**. Ciascun attrattore, inoltre, è stabile: quando viene perturbato, tende a ritornare nella situazione di partenza e pertanto simula un **comportamento omeostatico**, analogo a quello che caratterizza i sistemi viventi. Per  $K < 2$  invece si hanno solo attrattori a punto fisso.

# Auto-Organizzazione al Margine del Caos

## Le Reti Binarie (o Booleane) di Kauffman

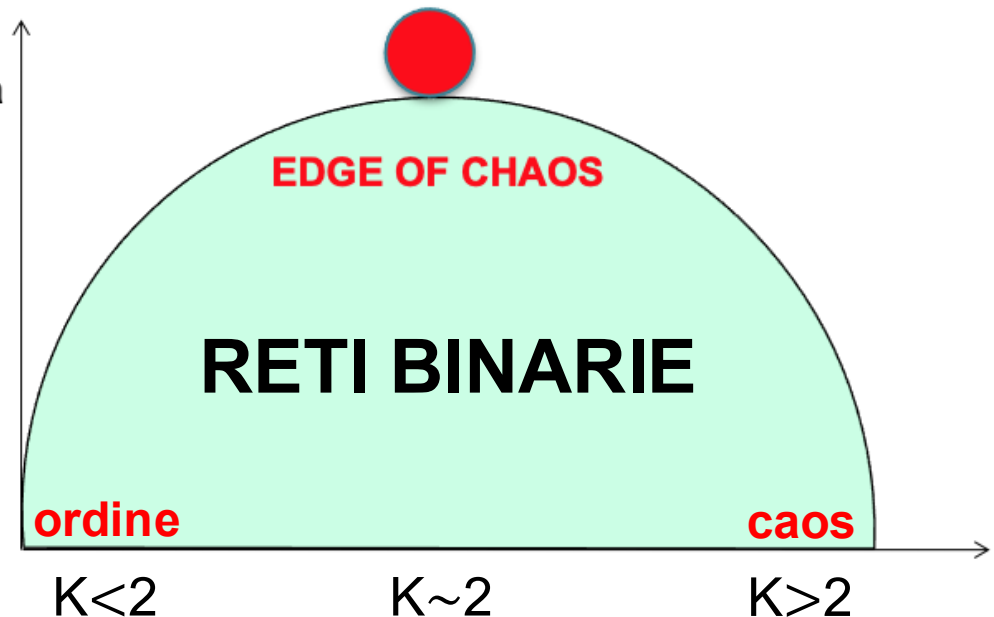
I **sistemi viventi** sono costituiti da una serie sterminata di relazioni, interconnesse fra loro, per cui si comportano in un certo senso come calcolatori che lavorano in parallelo: i **geni**, ad esempio, regolano a vicenda la propria attività direttamente attraverso altri geni o indirettamente per mezzo di proteine da loro stessi prodotte. Negli anni '90 Il biologo teorico **Stuart Kauffman** ha pensato di poterne studiare le connessioni utilizzando **reti binarie NK**, cioè reti costituite da **N elementi** binari (nodi ON-OFF) connessi con (in media) **K links** per nodo.



S.A.Kauffman

**Complessità**

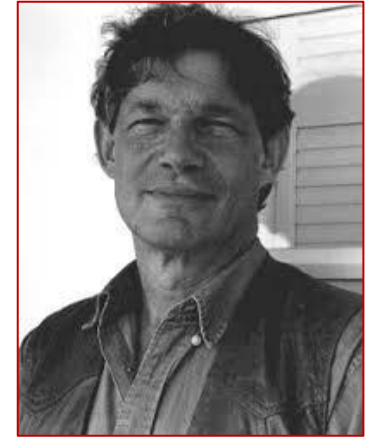
Dunque nelle reti binarie complesse si manifestano essenzialmente tre regimi di comportamento: un regime ordinato con componenti congelati, un regime caotico senza alcun componente congelato e un regime in bilico fra ordine e caos in cui i componenti congelati cominciano appena a «sciogliersi». L'ipotesi centrale di Kauffman è che i sistemi viventi esistano in questa regione ai «confini del caos».



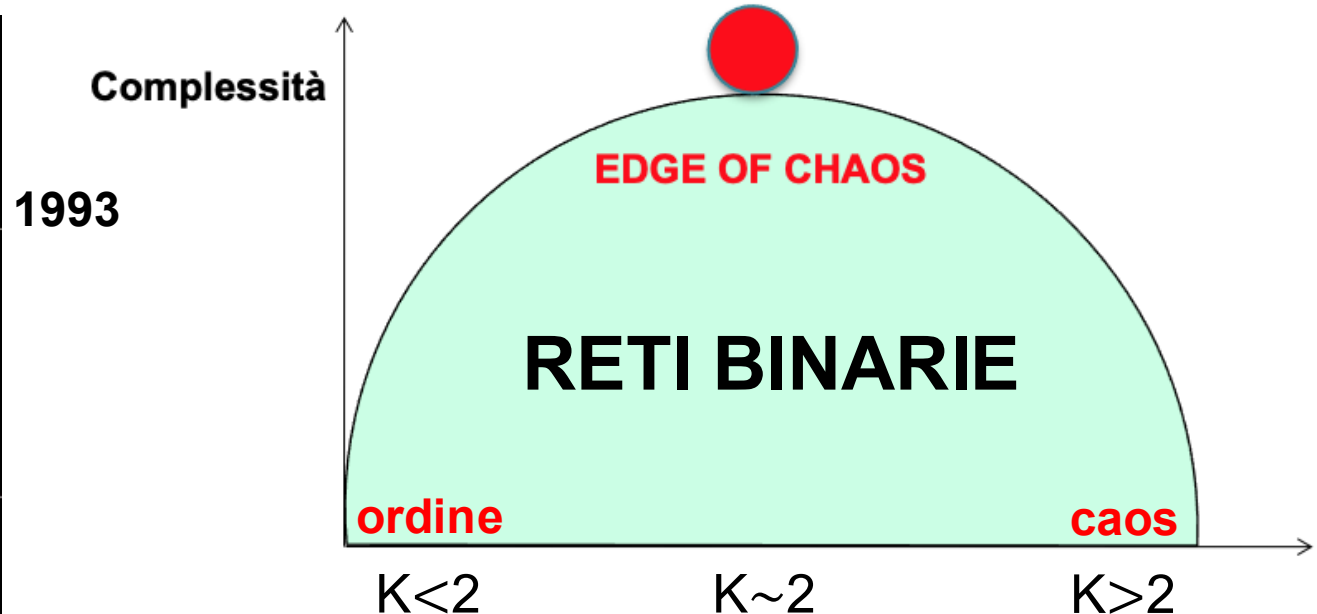
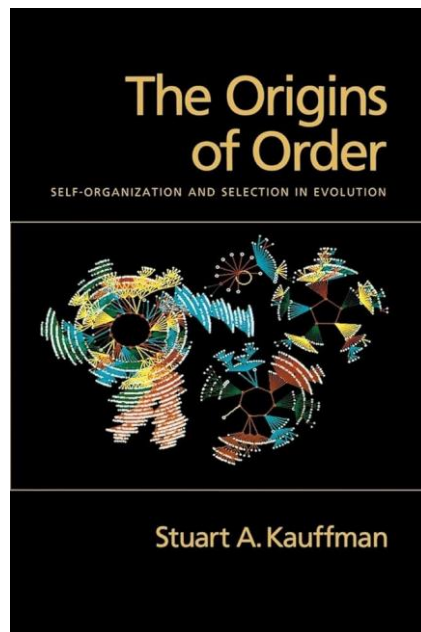
# Auto-Organizzazione al Margine del Caos

## Le Reti Binarie (o Booleane) di Kauffman

I **sistemi viventi** sono costituiti da una serie sterminata di relazioni, interconnesse fra loro, per cui si comportano in un certo senso come calcolatori che lavorano in parallelo: i **geni**, ad esempio, regolano a vicenda la propria attività direttamente attraverso altri geni o indirettamente per mezzo di proteine da loro stessi prodotte. Negli anni '90 Il biologo teorico **Stuart Kauffman** ha pensato di poterne studiare le connessioni utilizzando **reti binarie NK**, cioè reti costituite da **N elementi** binari (nodi ON-OFF) connessi con (in media) **K links** per nodo.



S.A.Kauffman



# Vita e complessità: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

Anche nel nostro Universo la complessità sembra emergere solo al margine del caos



Le recenti scoperte scientifiche mettono in luce un fatto che lascia alquanto sconcertati: come accade nel gioco "life", anche i parametri fondamentali del nostro universo sembrano calibrati in modo apparentemente **miracoloso** per permettere l'esistenza della vita e della complessità. Ad es., spostamenti anche minimi dei valori delle **costanti fondamentali** potrebbero dare luogo a universi altrettanto fisicamente sensati del nostro, ma senza alcuna speranza di ospitare un qualunque tipo di struttura complessa.

# Vita e complessità: un equilibrio instabile tra ordine e disordine

Anche nel nostro Universo la complessità sembra emergere solo al margine del caos



Le recenti scoperte scientifiche mettono in luce un fatto che lascia alquanto sconcertati: come accade nel gioco "life", anche i parametri fondamentali del nostro universo sembrano calibrati in modo apparentemente **miracoloso** per permettere l'esistenza della vita e della complessità. Ad es., spostamenti anche minimi dei valori delle **costanti fondamentali** potrebbero dare luogo a universi altrettanto fisicamente sensati del nostro, ma senza alcuna speranza di ospitare un qualunque tipo di struttura complessa.

NE RIPARLEREMO NEL SEMINARIO CONCLUSIVO...

# L'enigma “Riccioli d'Oro”

Perché viviamo in un universo favorevole alla vita?



Paul Davies

*“Io prendo sul serio la vita, la mente e la finalità, e ammetto che l'universo quanto meno sembra progettato con un elevato livello di ingegnosit . Non posso accettare questi aspetti come uno scrigno di meraviglie che ci sono soltanto per caso, che esistono senza una ragione”*

