



UNIVERSITÀ  
degli STUDI  
di CATANIA

## ALESSANDRO PLUCHINO HOME PAGE

DIPARTIMENTO DI  
FISICA E ASTRONOMIA "ETTORE MAJORANA"



HOME BIO PUBLICATIONS TEACHING BOOKS ET AL

### Highlights

#### Ig Nobel 2022



#### The 20<sup>th</sup> First Annual Ig Nobel 2010 Prize Ceremony



#### ALESSANDRO PLUCHINO LA FIRMA DELLA COMPLESSITÀ



Welcome to the

# Alessandro Pluchino HOME PAGE



Associate Professor of Theoretical Physics  
Computational and Mathematical Models

[alessandro.pluchino@ct.infn.it](mailto:alessandro.pluchino@ct.infn.it)  
[alessandro@pluchino.it](mailto:alessandro@pluchino.it)

### Events-Talks

IGNORANTE  
RIVERENTEMENTE

## TALENTI, FORTUNA E ALEACRAZIA

Democrazia a sorte. La sorte della  
democrazia.

© Alessandro Pluchino  
© Fabrizio Scirombino - Salvatore Del Giudice  
© Sergio Pinna

XII FESTA  
SCIENZA  
FILOSOFIA  
20 - 23 APRILE 2023  
FABRIANO  
21 - 22 APRILE 2023



Video del Web-Meeting del 1 dicembre 2022  
**Talento e fortuna**

Libri per dialogare di complessità  
1° Complexity Theory Class Meeting  
organizzato da Complexità e Società  
in collaborazione con il network società Beniati



## PIANO NAZIONALE LAUREE SCIENTIFICHE FISICA UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI CATANIA

## BACHECA STUDENTI

**Ricevimento:** di norma presso il DFA (Stanza 319, Terzo Piano) il lunedì dalle 11.00 alle 12.00 e il giovedì dalle 10:00 alle 11:00. E' sempre possibile programmare l'incontro in **modalità telematica** su piattaforma TEAMS o Google MEET. In ogni caso, si prega di contattarmi anticipatamente via **email**.

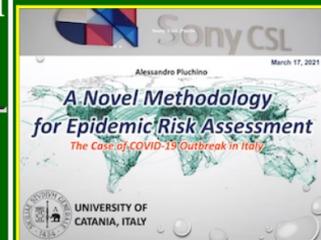
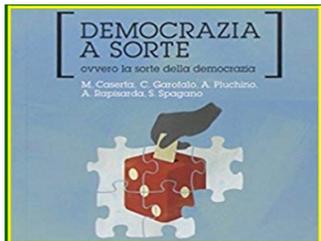
## DOTTORATO IN SISTEMI COMPLESSI PER LE SCIENZE FISICHE, SOCIO-ECONOMICHE E DELLA VITA

- Si avvisano i dottorandi del **XXXIX CICLO** che lezioni del corso "**Agent Based Models: Simulating Complex Systems**" per il 2024 inizieranno lunedì 4 marzo.

- Per qualsiasi richiesta di informazioni i dottorandi sono pregati di contattarmi via **email**.

## CORSO DI SISTEMI DINAMICI, CAOS E COMPLESSITA' (DFA)

- Si avvisano gli studenti del corso di "**Dinamic Systems, Chaos and Complexity**" che le lezioni per l'a.a. 2023-2024 inizieranno il 4 marzo e proseguiranno ogni lunedì e martedì, dalle 9.00 alle 11.00 in aula I (DFA).





UNIVERSITÀ  
degli STUDI  
di CATANIA

ALESSANDRO PLUCHINO HOME PAGE

DIPARTIMENTO DI  
FISICA E ASTRONOMIA "ETTORE MAJORANA"



HOME BIO PUBLICATIONS TEACHING BOOKS ET AL

**LAUREA TRIENNALE IN FISICA (L-30)**

**CORSO DI SISTEMI DINAMICI, CAOS E COMPLESSITA'**

**6CFU, Secondo Semestre A.A.2023-2024**

**Programma 2023-2024**

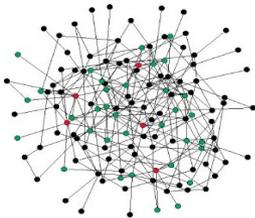
Avvertenza: per far girare i programmi NetLogo occorre scaricare e installare la [versione 6.4.0](#).

PRIMA PARTE: Introduzione alla nuova Scienza della Complessità

**LEZIONE 01: Introduzione alla nuova Scienza della Complessità (04/03/2024)**

## Contenuti del corso

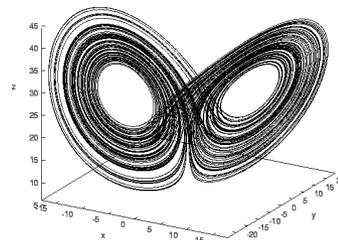
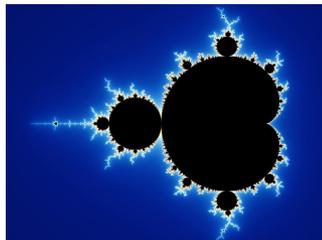
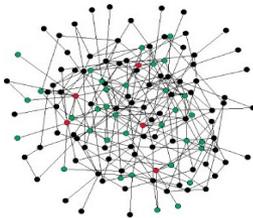
**Introduzione alla nuova scienza della complessità.** Sistemi non lineari, criticità auto-organizzata, reti complesse, fenomeni emergenti, automi cellulari, sincronizzazione, sociofisica ed econofisica, ***PARTE IN COMUNE CON I DOTTORANDI***



## Contenuti del corso

**Introduzione alla nuova scienza della complessità.** Sistemi non lineari, criticità auto-organizzata, reti complesse, fenomeni emergenti, automi cellulari, sincronizzazione, sociofisica ed econofisica, **PARTE IN COMUNE CON I DOTTORANDI**

**Sistemi a pochi gradi di libertà.** Sistemi dinamici dissipativi, continui (flussi) e discreti (mappe), ad una e due dimensioni. Attrattori a punto fisso e ciclo limite. Biforcazioni. Flussi a tre dimensioni. Rotte verso il caos. Esponenti di Lyapunov. Dimensione frattale. Sistemi Hamiltoniani in una e due dimensioni. Il teorema KAM.

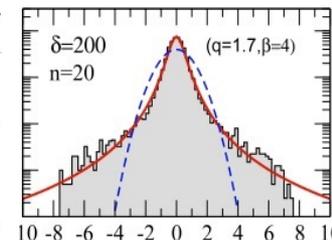
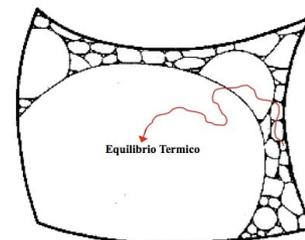
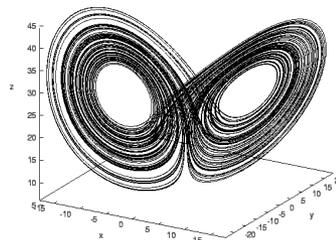
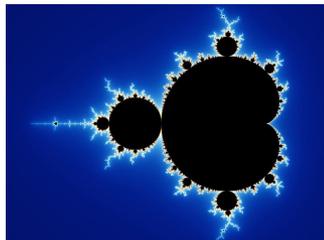
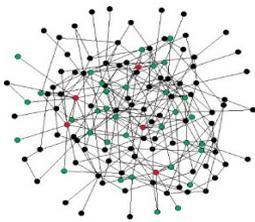


## Contenuti del corso

**Introduzione alla nuova scienza della complessità.** Sistemi non lineari, criticità auto-organizzata, reti complesse, fenomeni emergenti, automi cellulari, sincronizzazione, sociofisica ed econofisica, **PARTE IN COMUNE CON I DOTTORANDI**

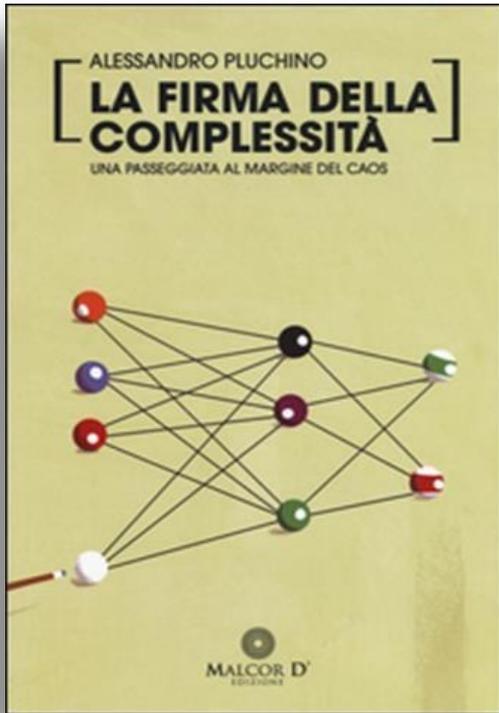
**Sistemi a pochi gradi di libertà.** Sistemi dinamici dissipativi, continui (flussi) e discreti (mappe), ad una e due dimensioni. Attrattori a punto fisso e ciclo limite. Biforcazioni. Flussi a tre dimensioni. Rotte verso il caos. Esponenti di Lyapunov. Dimensione frattale. Sistemi Hamiltoniani in una e due dimensioni. Il teorema KAM.

**Sistemi a molti gradi di libertà.** Richiami di termodinamica. Entropia di Clausius e freccia del tempo. Ordine e disordine nell'universo. Introduzione alla meccanica statistica classica all'equilibrio. Entropia di Boltzmann e teorema H. La teoria degli "ensemble" di Gibbs. Fine-tuning e problema delle condizioni iniziali a bassa entropia. Introduzione alla meccanica statistica non estensiva. Entropia di Tsallis e teorema del limite centrale generalizzato. Sistemi con interazioni a lungo raggio. Sistemi complessi al margine del caos.

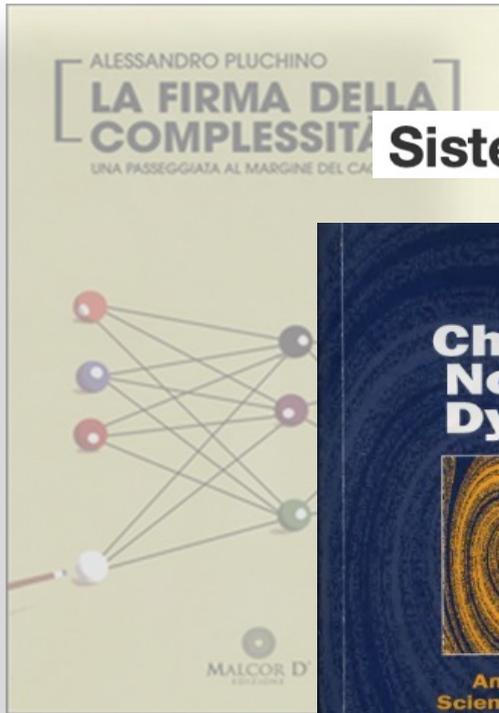


**TESTI PRINCIPALI CONSIGLIATI**

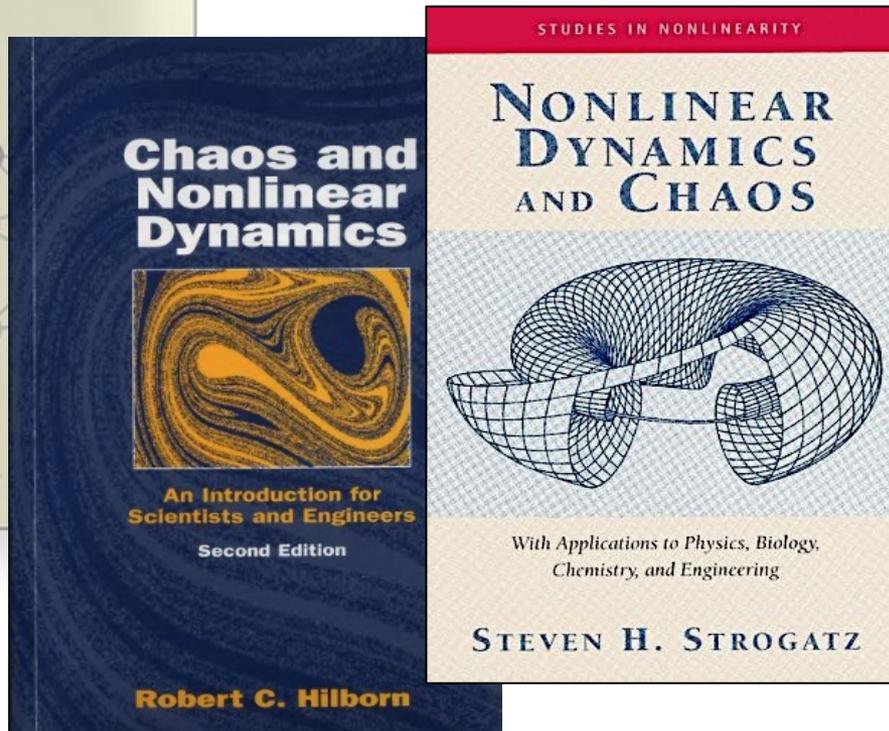
**Introduzione alla nuova scienza della complessità.**



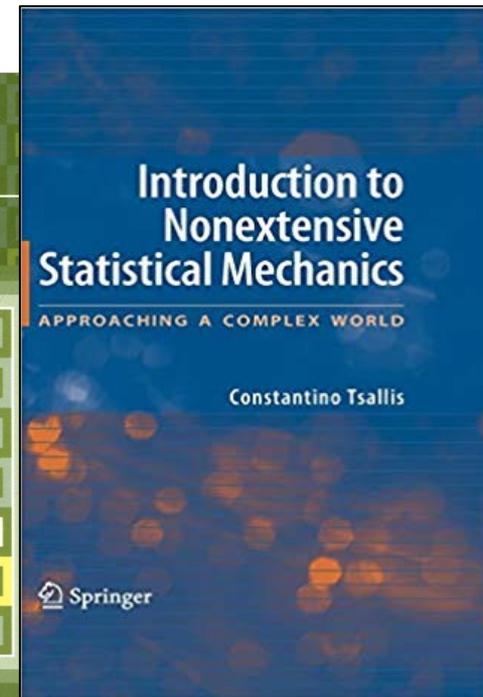
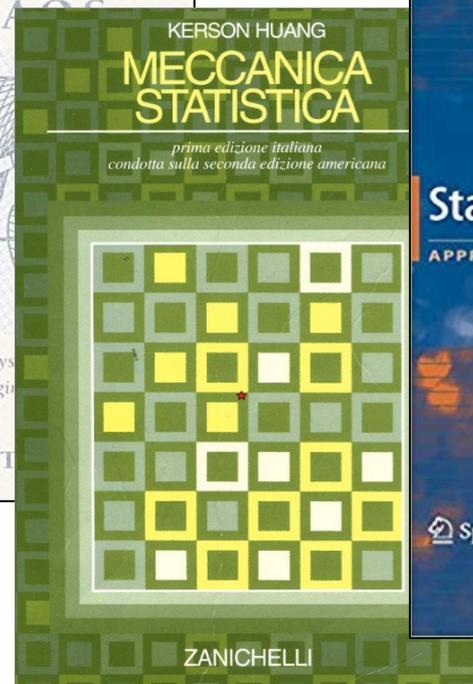
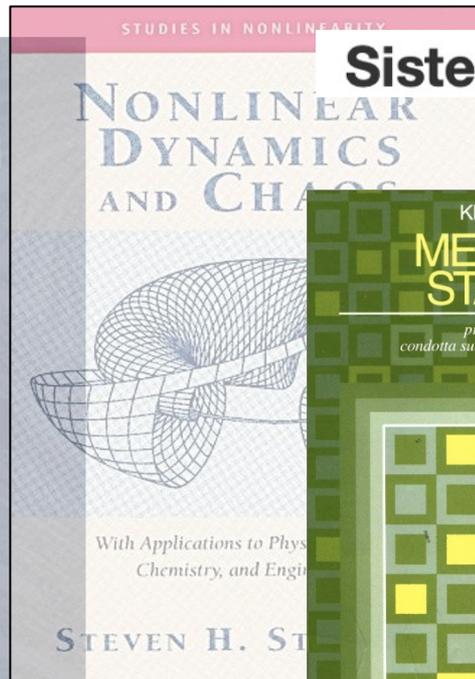
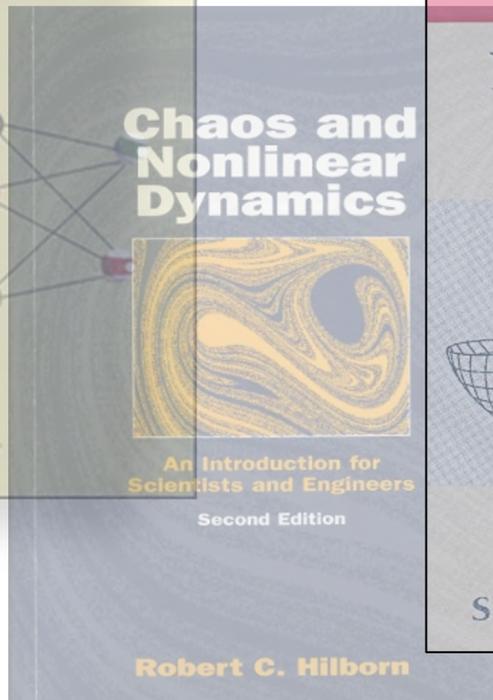
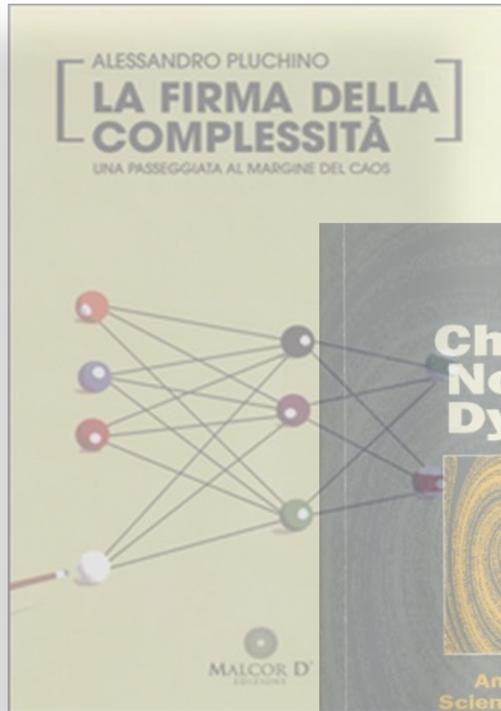
**TESTI PRINCIPALI CONSIGLIATI**



**Sistemi a pochi gradi di libertà.**



**TESTI PRINCIPALI CONSIGLIATI**



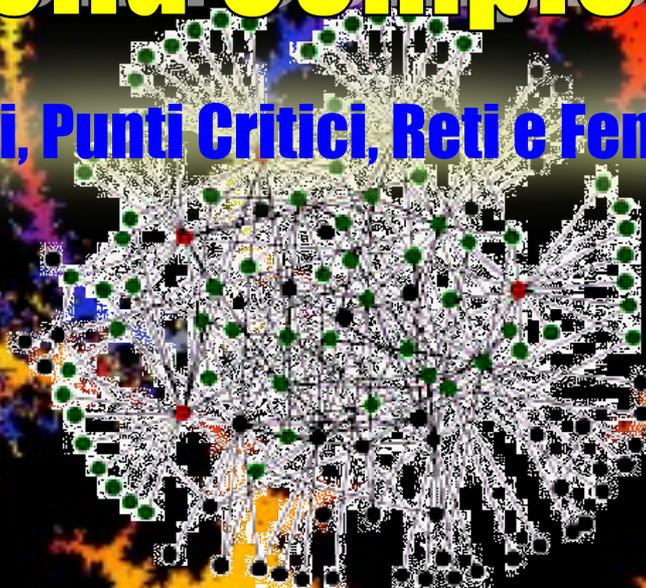
**Sistemi a molti gradi di libertà.**

**ESAME FINALE**



# **Introduzione alla Nuova Scienza della Complessità**

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



**Direzioni delle  
Scienze Fisiche  
dal XVI secolo**

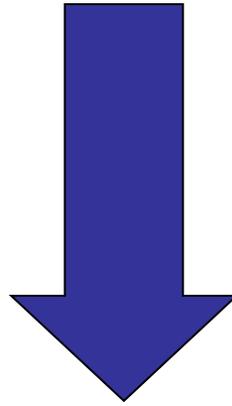


**verso l'infinitamente  
grande**

Astronomia,      Astrofisica,  
Relatività      Generale,  
Cosmologia, ...



# Direzioni delle Scienze Fisiche dal XVI secolo



**verso l'infinitamente grande**

Astronomia, Relatività, Cosmologia, ...  
Astrofisica, Generale, ...



**verso l'infinitamente piccolo**

Chimica, Fisica Nucleare, Meccanica Quantistica, Teoria delle Stringhe, ...

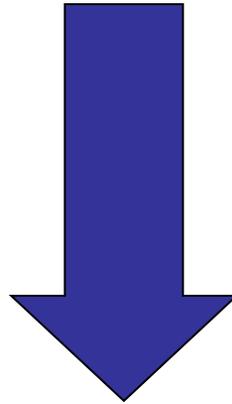


**Direzioni delle Scienze Fisiche dal XVI secolo**



**verso l'infinitamente grande**

Astronomia, Relatività, Cosmologia, ...  
Astrofisica, Generale, ...



**verso l'infinitamente piccolo**

Chimica, Fisica Nucleare, Meccanica Quantistica, Teoria delle Stringhe, ...



**Dalla seconda metà del XX secolo**



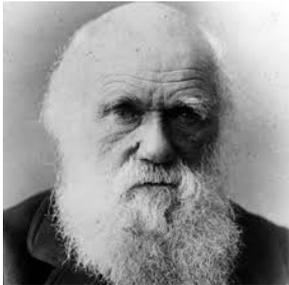
**verso l'infinitamente complesso**



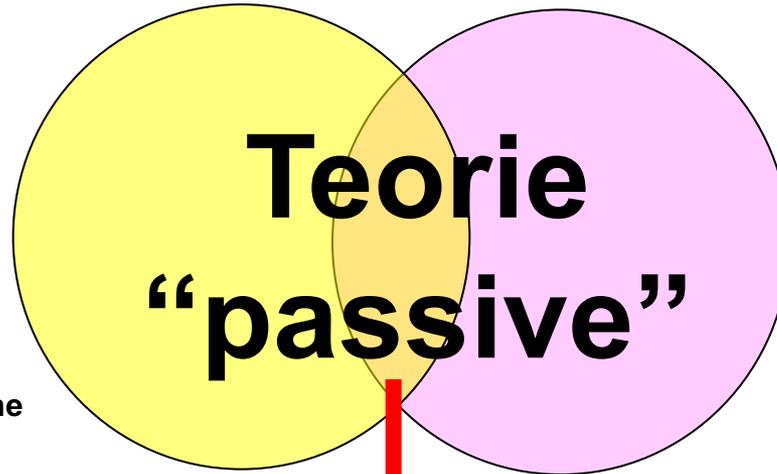


**il Computer!**

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



**Modelli Verbali**  
(ad.es. Teoria dell'Evoluzione di Darwin)



**Modelli Matematici**  
(ad.es. Meccanica Newtoniana)

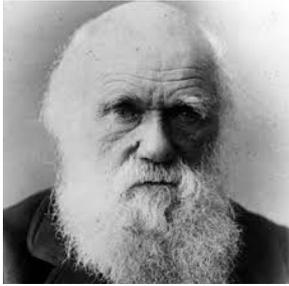
# Teorie Scientifiche



**Predizioni  
empiriche**

**Verifica  
Sperimentale (VERIFICA  
ESTERNA)**





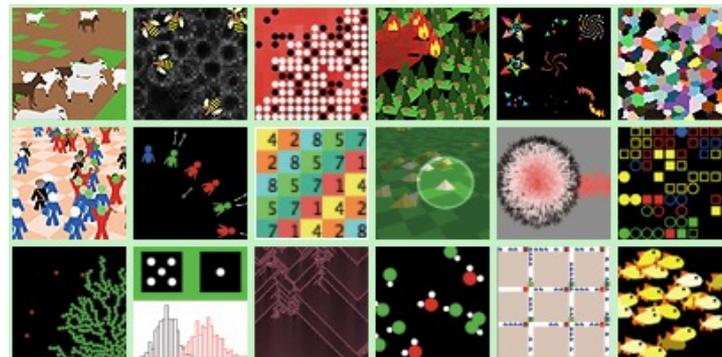
**Modelli Verbali**  
(ad.es. Teoria dell'Evoluzione di Darwin)



**Modelli Matematici**  
(ad.es. Meccanica Newtoniana)



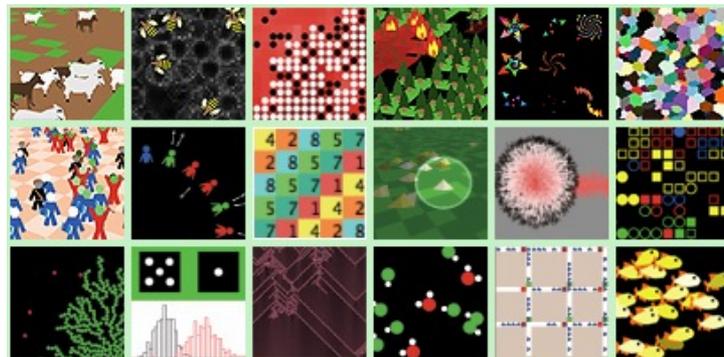
**Modelli Simulativi**



# Teorie Scientifiche

# Teorie “attive”

Modelli Simulativi



# Teorie “attive”

Simulazioni



Programma per computer



Calibrazione  
e confronto



**MIGLIORE VERIFICA  
INTERNA della TEORIA:**  
Le **predizioni empiriche**  
sono i risultati che la  
simulazione produce  
quando gira in un computer,  
quindi con maggior potere  
computazionale e meno  
errori e condizionamenti  
rispetto allo scienziato

Verifica  
Sperimentale (**VERIFICA  
ESTERNA**)



# Teorie “attive”

Simulazioni



Programma per computer



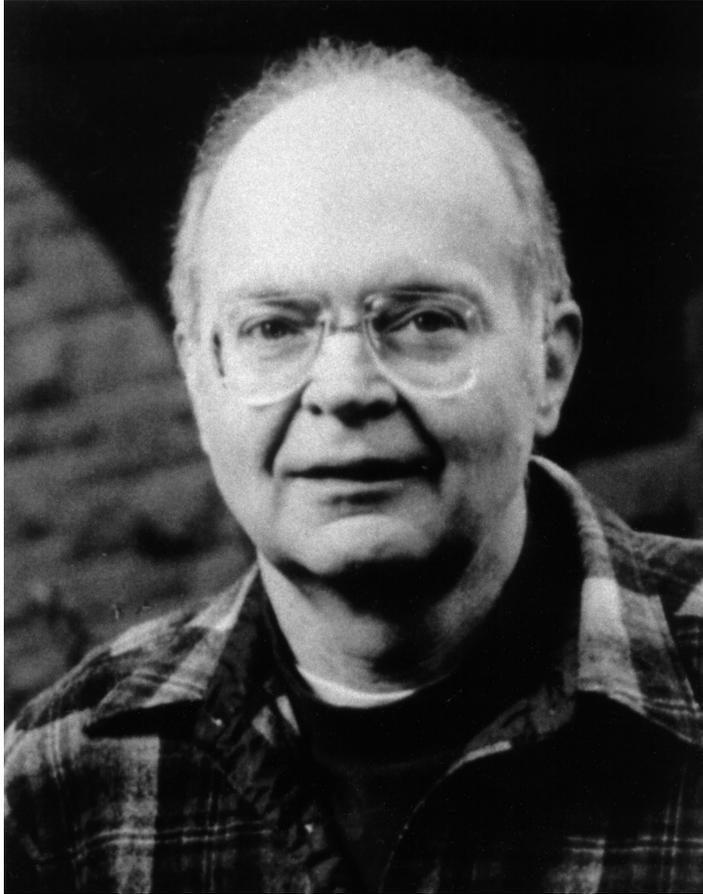
Calibrazione  
e confronto



**MIGLIORE VERIFICA  
INTERNA della TEORIA:**  
Le **predizioni empiriche**  
sono i risultati che la  
simulazione produce  
quando gira in un computer,  
quindi con maggior potere  
computazionale e meno  
errori e condizionamenti  
rispetto allo scienziato

Verifica  
Sperimentale (**VERIFICA  
ESTERNA**)





**“La Scienza è quello che capiamo sufficientemente bene da saperlo spiegare a un computer”**

**Donald Knuth – Informatico americano**



# il XX Secolo e le Teorie delle tre "C"



anni Settanta

anni Ottanta

anni Novanta

## Teoria delle **C**atastrofi

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



R. Thom

## Teoria del **C**aos

Imprevedibilità,  
autosimilarità, non-linearità,  
sensibilità alle condizioni  
iniziali, "effetto farfalla",  
geometria frattale



B. Mandelbrot

## Teoria della **C**omplessità

Sistemi dinamici lontani  
dall'equilibrio, meccanica  
statistica non-estensiva,  
sincronizzazione, criticità  
auto-organizzata, reti  
complesse, fenomeni emergenti  
at the "edge of chaos"



P. Bak



S. Strogatz



C. Tsallis

**Ma, innanzitutto,...**  
**...che cos'è un sistema complesso?**



# “Complicato” non vuol dire “Complesso”...

Una automobile, per quanto complicata possa apparire, non è un sistema complesso, perchè le relazioni tra le sue parti sono progettate per essere lineari e dunque prevedibili. In un sistema lineare, infatti:

- (1) gli effetti sono proporzionali alle cause
- (2) vale il principio di sovrapposizione, secondo cui l'effetto complessivo prodotto da tutte le cause è uguale alla somma degli effetti prodotti da ogni singola causa (in altre parole, «il tutto è uguale alla somma della parti»).



# “Complicato” non vuol dire “Complesso”...

Se però mettete assieme **cento, mille automobili** in competizione all'interno di un ambiente confinato (la rete stradale di una città), ecco che il sistema diventa **non lineare**:

- (1) non vale più il principio di sovrapposizione, quindi il tutto diventa «maggiore» della «somma delle parti»
- (2) cause anche molto piccole possono produrre effetti talvolta enormi...



# “Complicato” non vuol dire “Complesso”...

Se però mettete assieme **cento, mille automobili** in competizione all'interno di un ambiente confinato (la rete stradale di una città), ecco che il sistema diventa **non lineare**:

- (1) non vale più il principio di sovrapposizione, quindi il tutto diventa «maggiore» della «somma delle parti»
- (2) cause anche molto piccole possono produrre effetti talvolta enormi...



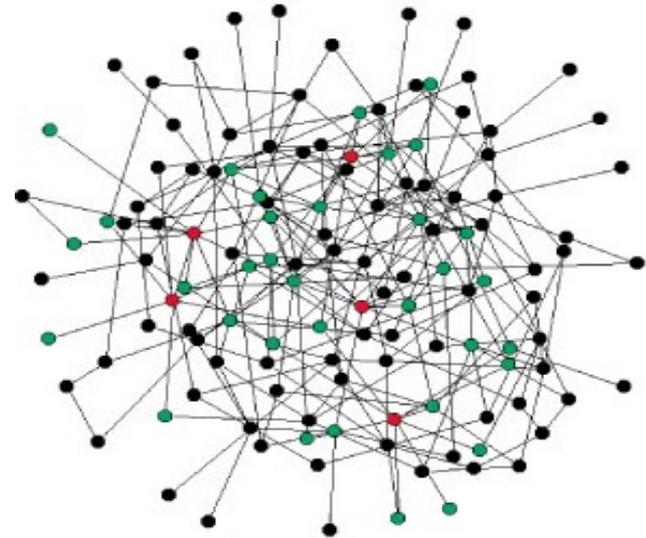
Un sistema del genere è estremamente **imprevedibile**, presenta forti correlazioni interne ed è sensibile alla sua storia passata: in una parola, è un sistema **complesso!**

# Due possibili descrizioni di un sistema complesso

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



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



# Due possibili descrizioni di un sistema complesso

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



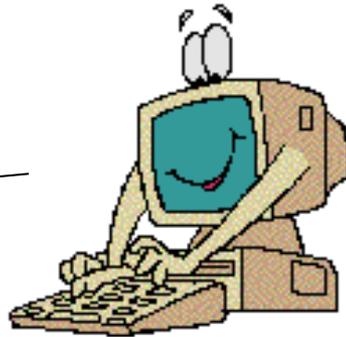
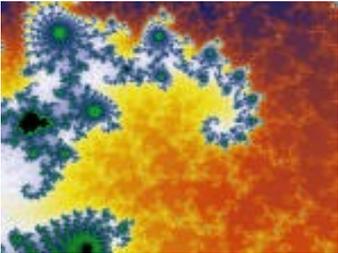
Da un punto di vista topologico (cioè se ci interessa invece sapere “chi interagisce con chi”) è anche possibile descrivere un sistema complesso come una rete (network) costituita da un certo numero di nodi (particelle, cellule, piante, animali, individui, opinioni, automobili, etc...) collegati tra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



Vedremo comunque che in entrambi i casi il sistema complesso mostrerà delle proprietà e dei **comportamenti inaspettati e talvolta perfino sorprendenti**, molto spesso impossibili da prevedere basandosi solo sulle caratteristiche dei singoli elementi che lo costituiscono...



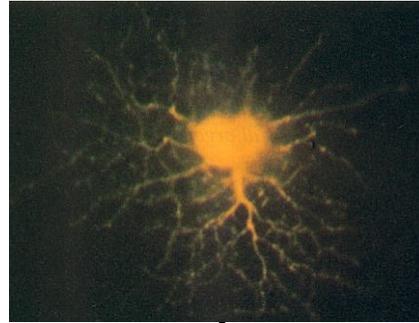
## **Autosimilarità e Invarianza di Scala**



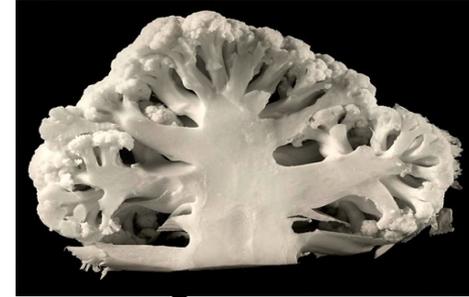
**Proprietà tipiche  
dei sistemi complessi**

# Autosimilarità in natura

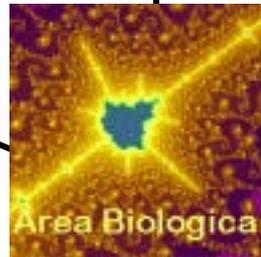
**neuroni**



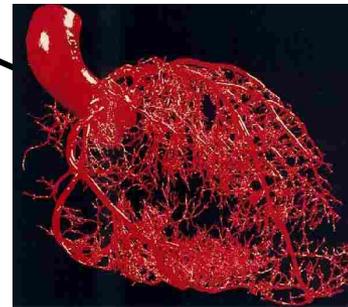
**cavolfiore**



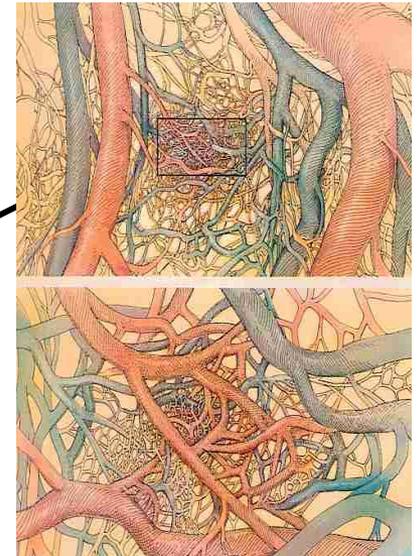
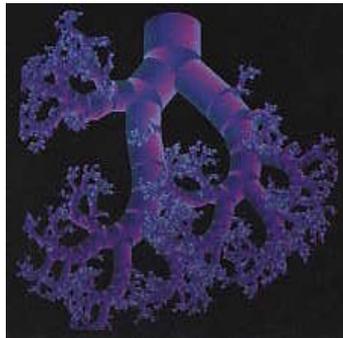
**foglie**



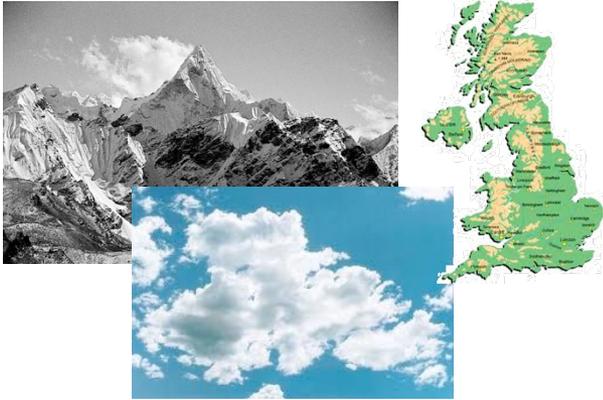
**cuore**



**bronchi**

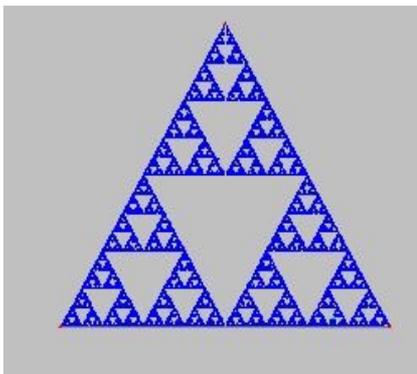


# Autosimilarità in matematica: i Frattali



Per descrivere matematicamente **oggetti complessi, frastagliati o irregolari**, come la linea costiera di un'isola, il profilo di una catena montuosa o la struttura di una nuvola, i matematici hanno introdotto il concetto di "frattale".

Più precisamente, il termine "frattale" venne coniato nel 1975 dal matematico francese **Benoît Mandelbrot**, e deriva dal latino **fractus** (rotto, spezzato), così come il termine frazione.



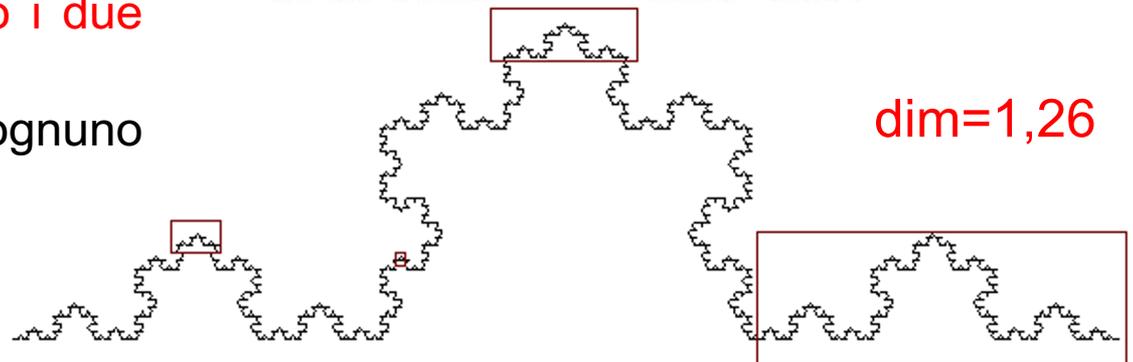
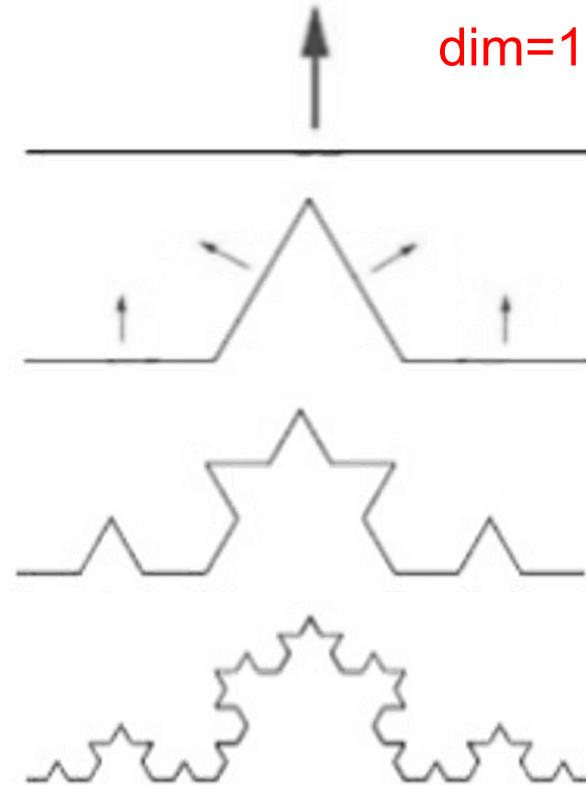
Un **frattale** è un oggetto geometrico che si ripete nella sua struttura allo stesso modo su scale diverse, ovvero che non cambia aspetto anche se visto con una lente d'ingrandimento. In altre parole è un oggetto dotato delle proprietà di **auto-similarità e invarianza di scala**. Ma ha anche la strana caratteristica matematica di possedere una **dimensione frazionaria**.

# Come si genera l'autosimilarità...

## La curva di Koch

Procedura di generazione della curva di Koch a partire da un segmento:

1. dividere il segmento in tre segmenti uguali;
2. cancellare il segmentino centrale, sostituendolo con due segmenti ad esso identici che costituiranno i due lati di un triangolo equilatero;
3. tornare al punto 1 per ognuno degli attuali segmenti.



# L'insieme di Mandelbrot

.  $P_0 \rightarrow$  successione  
divergente

$$P_0 = x + i y$$

$$Z_0 = 0$$

$$Z_1 = Z_0^2 + P_0$$

$$Z_2 = Z_1^2 + P_0$$

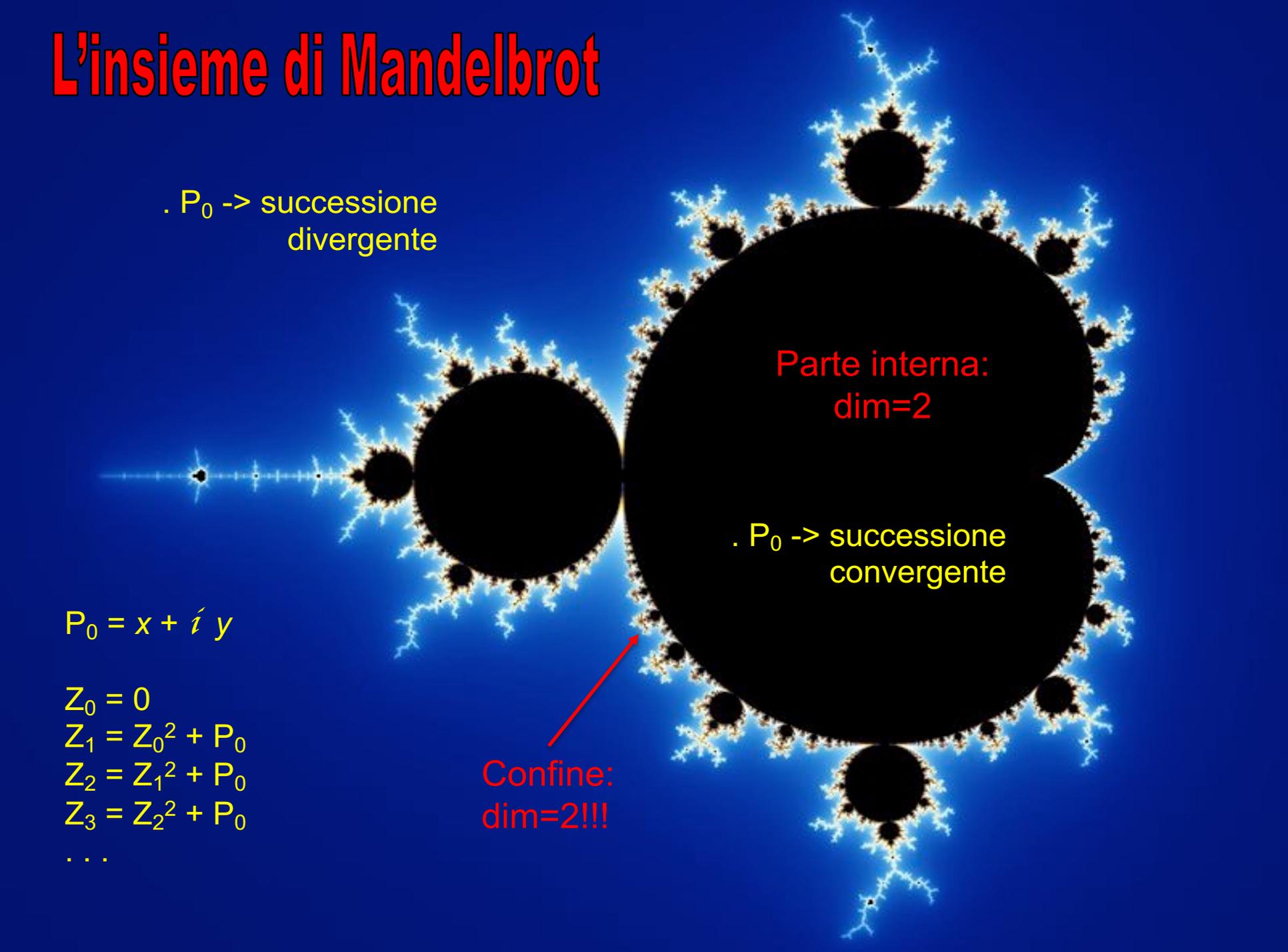
$$Z_3 = Z_2^2 + P_0$$

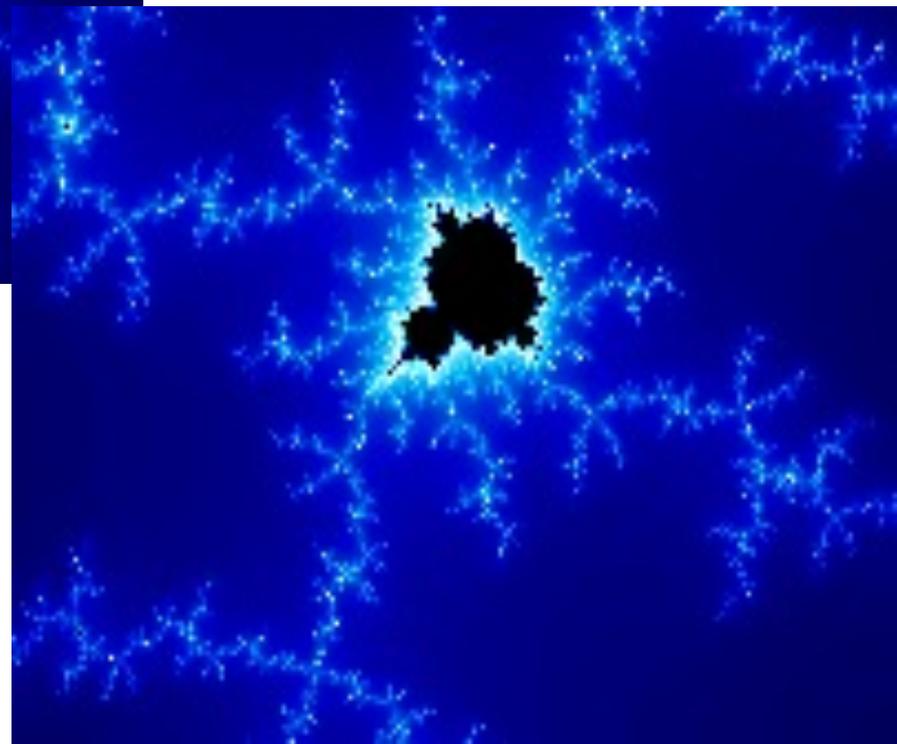
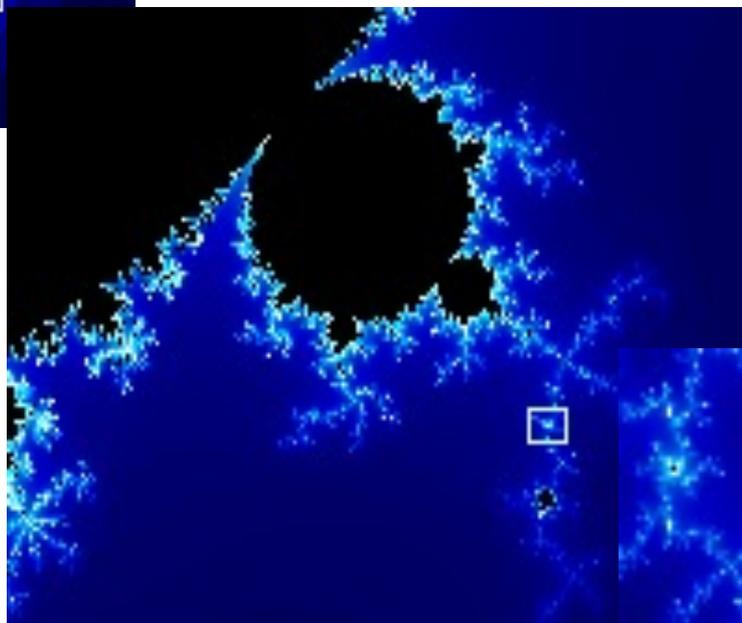
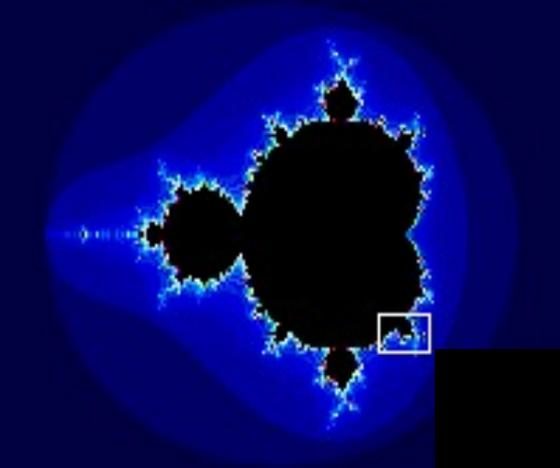
...

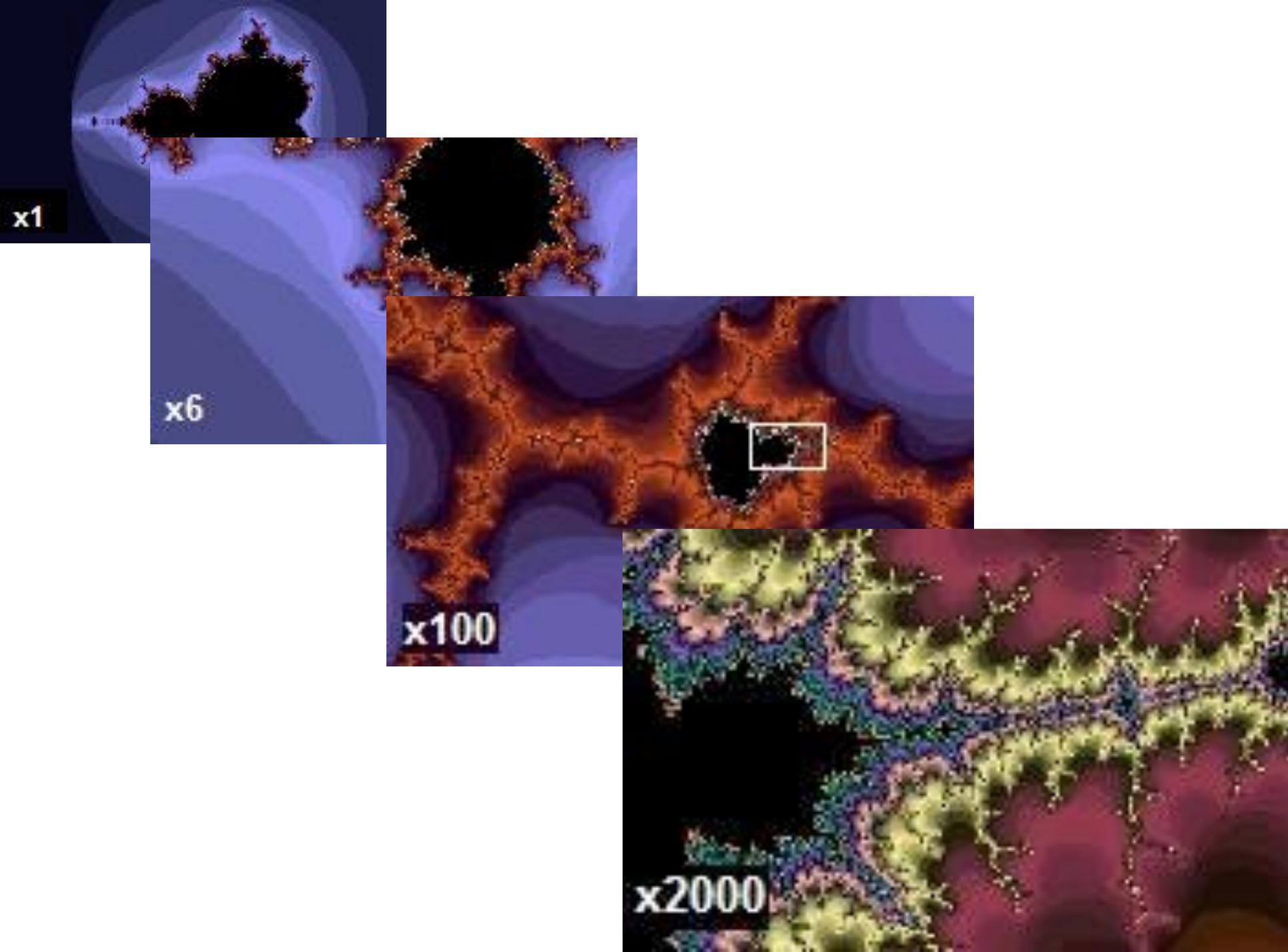
Parte interna:  
dim=2

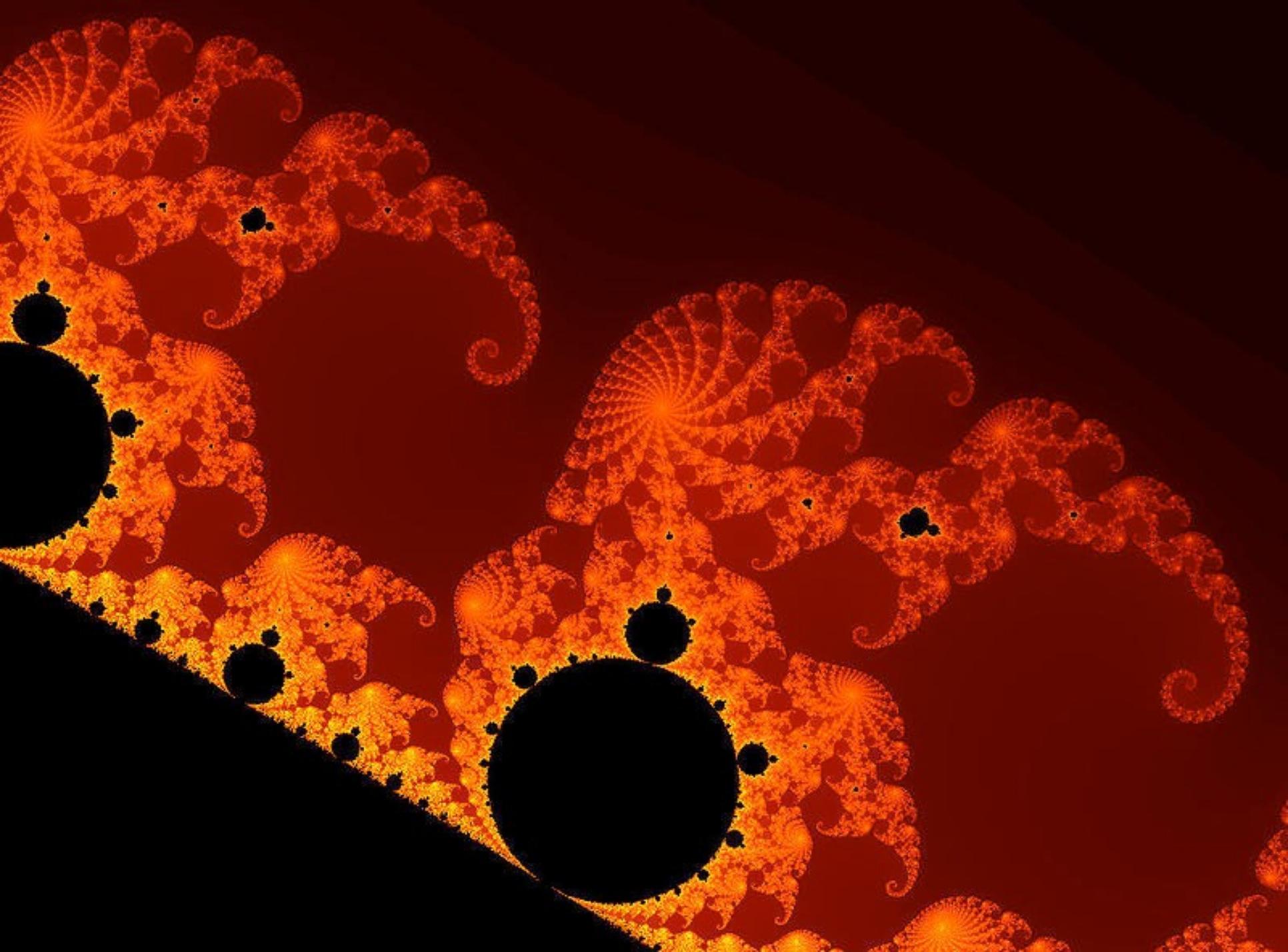
.  $P_0 \rightarrow$  successione  
convergente

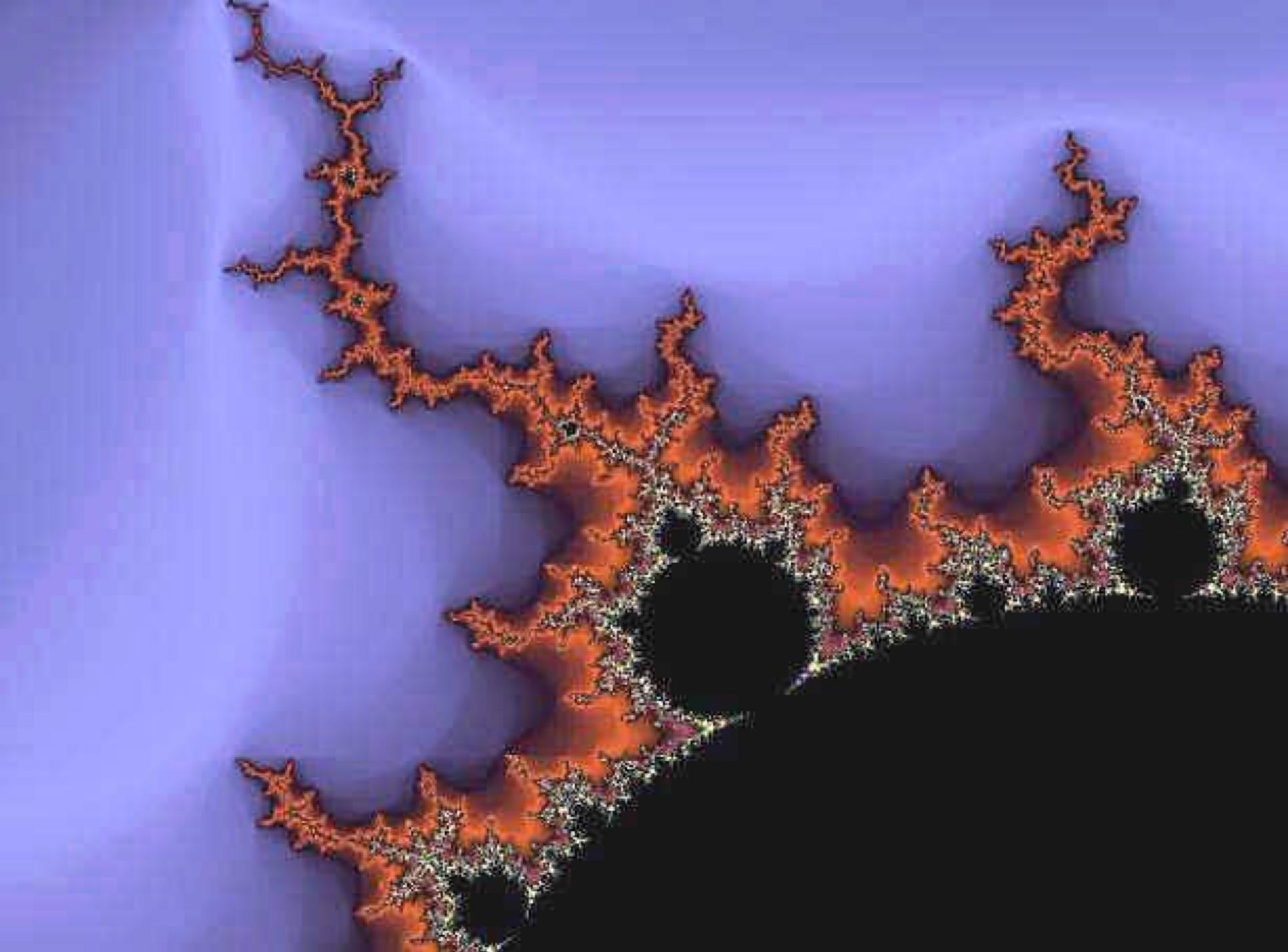
Confine:  
dim=2!!!

The image shows the Mandelbrot set, a complex fractal structure. It consists of a large central black region with a highly detailed, jagged, and self-similar boundary. The interior of the set is solid black, while the boundary is a complex, fractal-like structure with many small, intricate details. The set is set against a dark blue background. A red arrow points from the text 'Confine: dim=2!!!' to the boundary of the set. The text 'Parte interna: dim=2' is located inside the black region, and '. P\_0 -> successione convergente' is located just outside the boundary. The text '. P\_0 -> successione divergente' is located in the upper left area of the image.











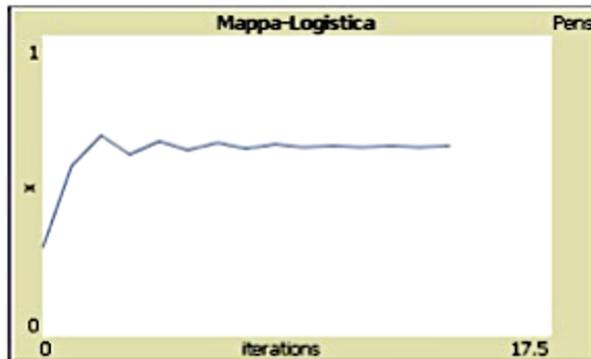


# Dalla geometria alla dinamica: la Mappa Logistica (1D)

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n)$$

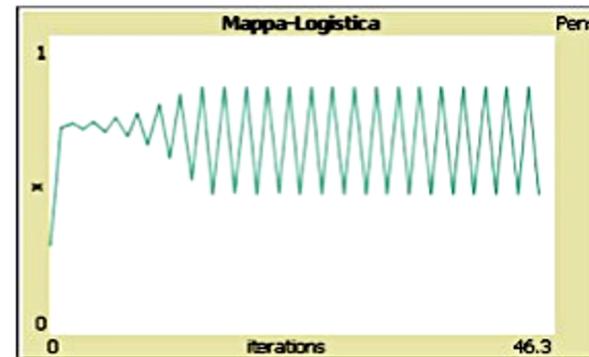
**Attrattori a punto fisso**

$$0 < A < 3$$



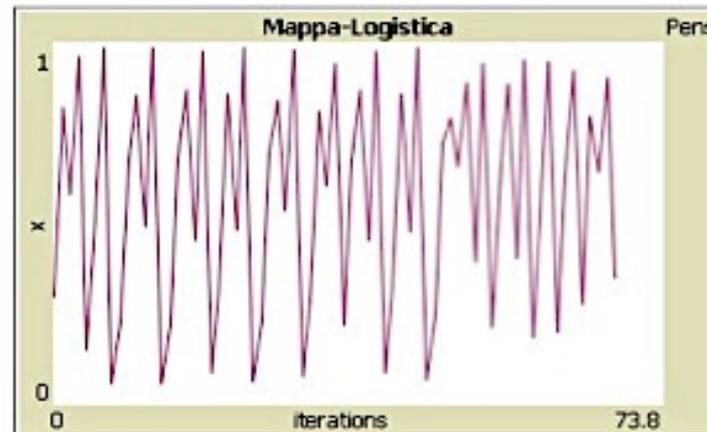
**Attrattori a ciclo limite**

$$3 < A < 3.56994$$



**Attrattore caotico (caos deterministico!)**

$$3.56994 < A < 4$$

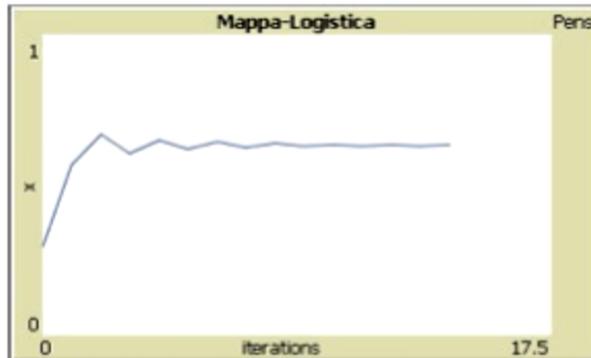


# Dalla geometria alla dinamica: la Mappa Logistica (1D)

$$x_{n+1} = Ax_n(1 - x_n)$$

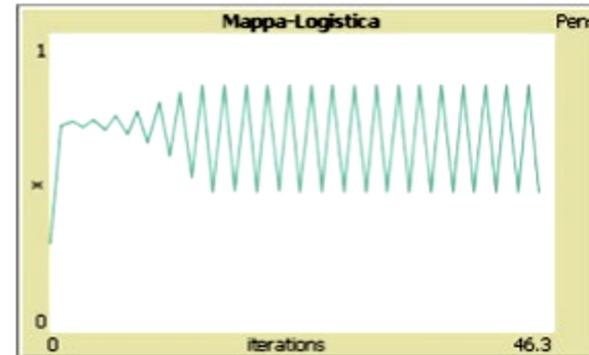
**Attrattori a punto fisso**

$$0 < A < 3$$



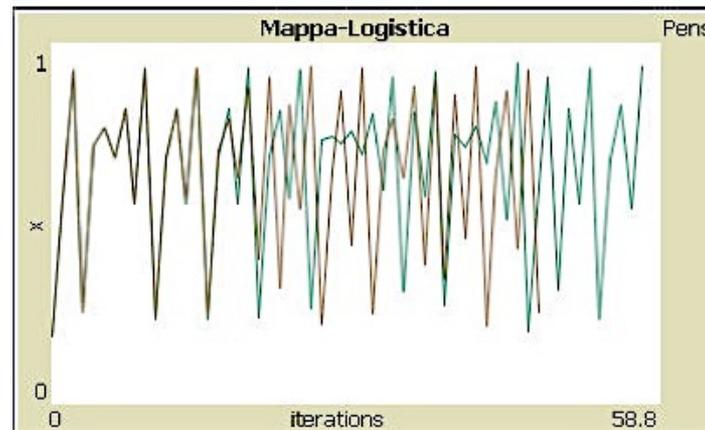
**Attrattori a ciclo limite**

$$3 < A < 3.56994$$



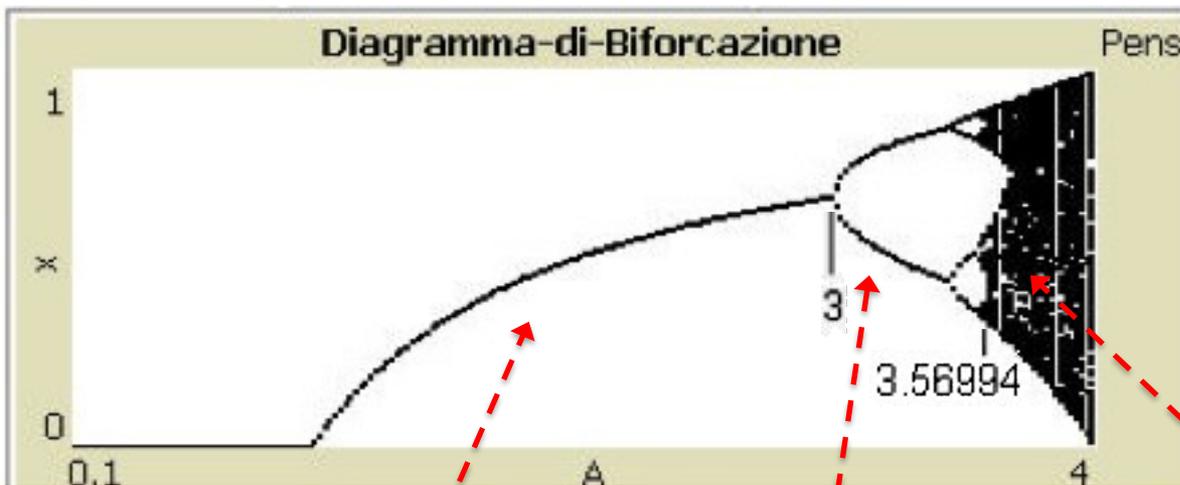
**Attrattore caotico (caos deterministico!)**

$$3.56994 < A < 4$$



**SENSIBILITA' ALLE  
CONDIZIONI INIZIALI!**

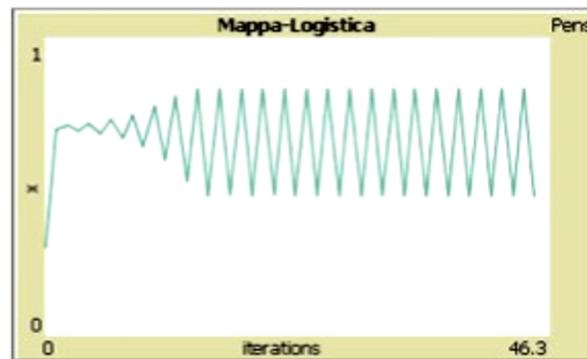
# Dalla geometria alla dinamica: la Mappa Logistica (1D)



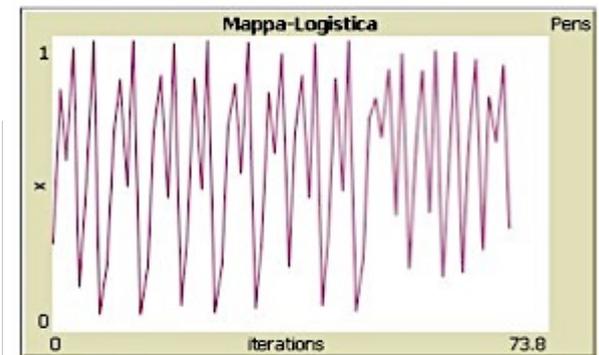
**Attrattori a punto fisso**  
 $0 < A < 3$



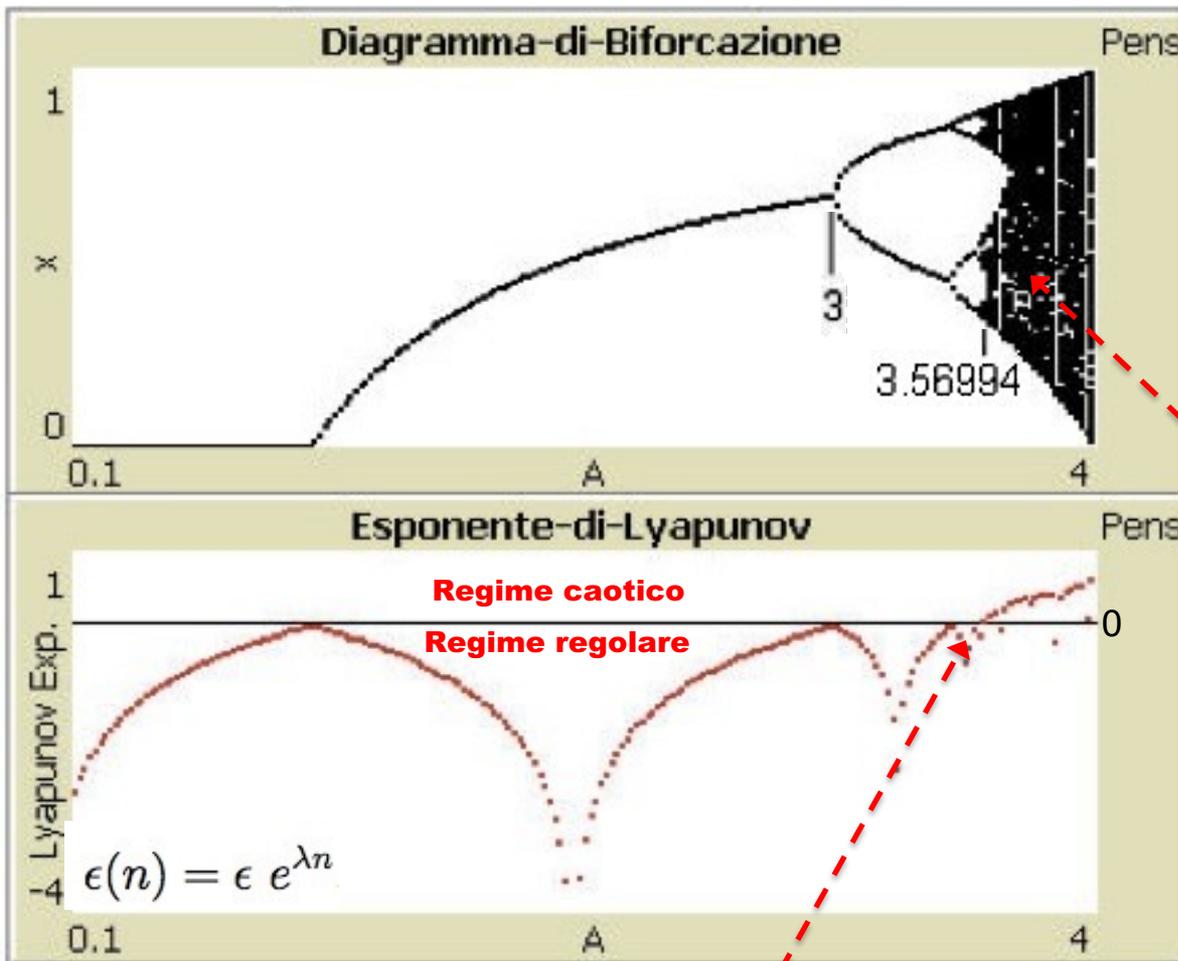
**Attrattori a ciclo limite**  
 $3 < A < 3.56994$



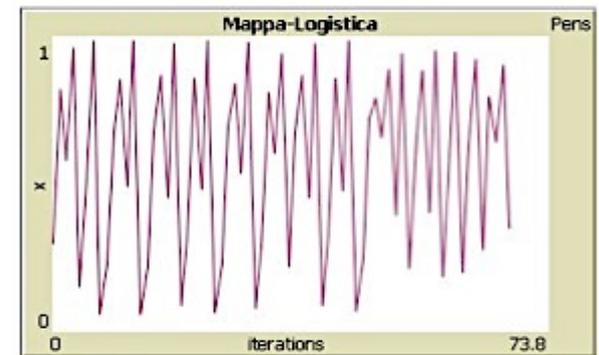
**Attrattore caotico**  
 $3.56994 < A < 4$



# Autosimilarità e caos nella Mappa Logistica

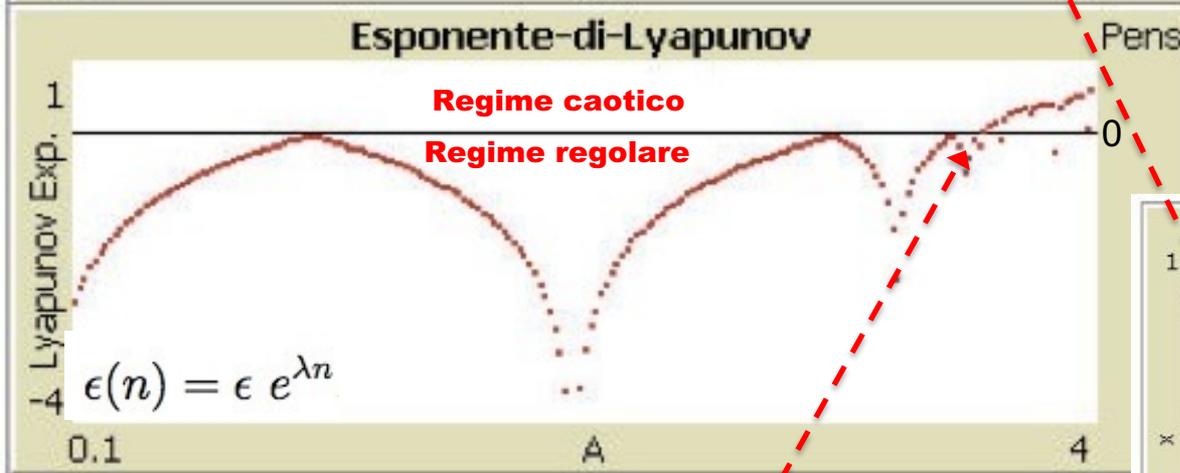
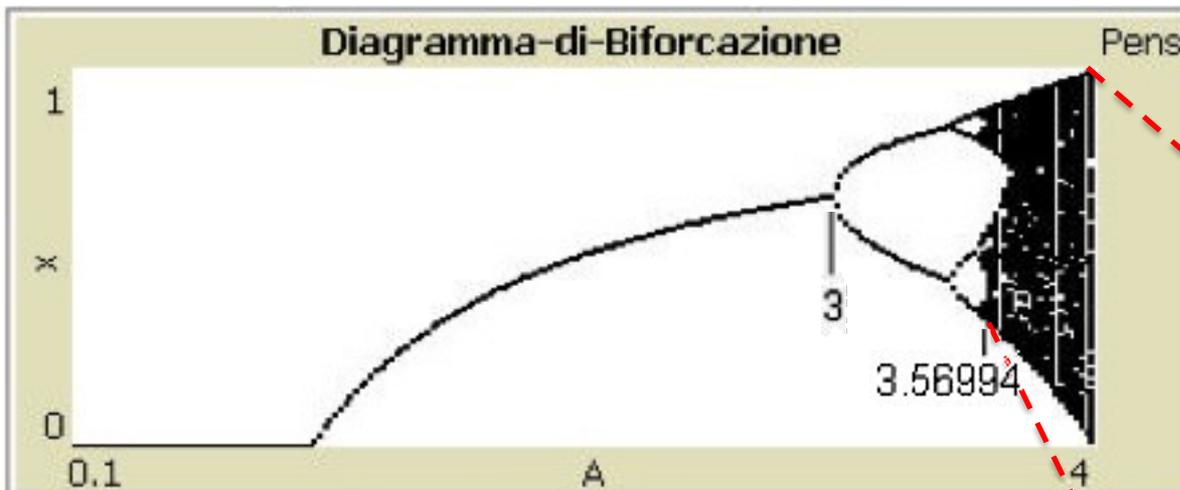


**Attrattore caotico**  
 **$3.56994 < A < 4$**

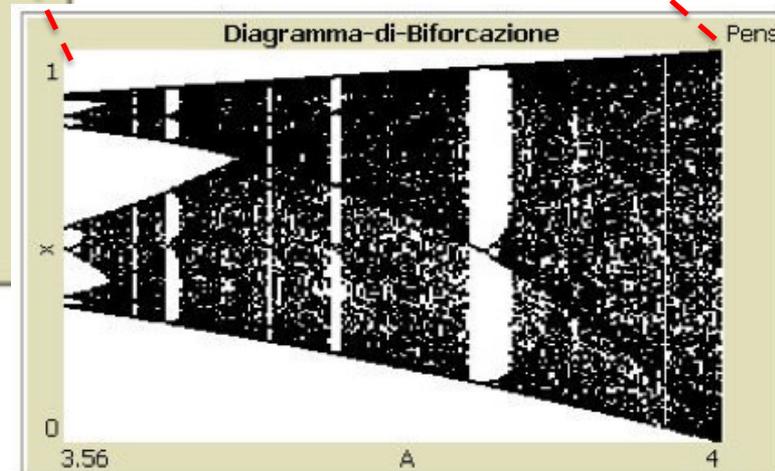


**Edge of Chaos**  
 **$\lambda \approx 0$**

# Autosimilarità e caos nella Mappa Logistica

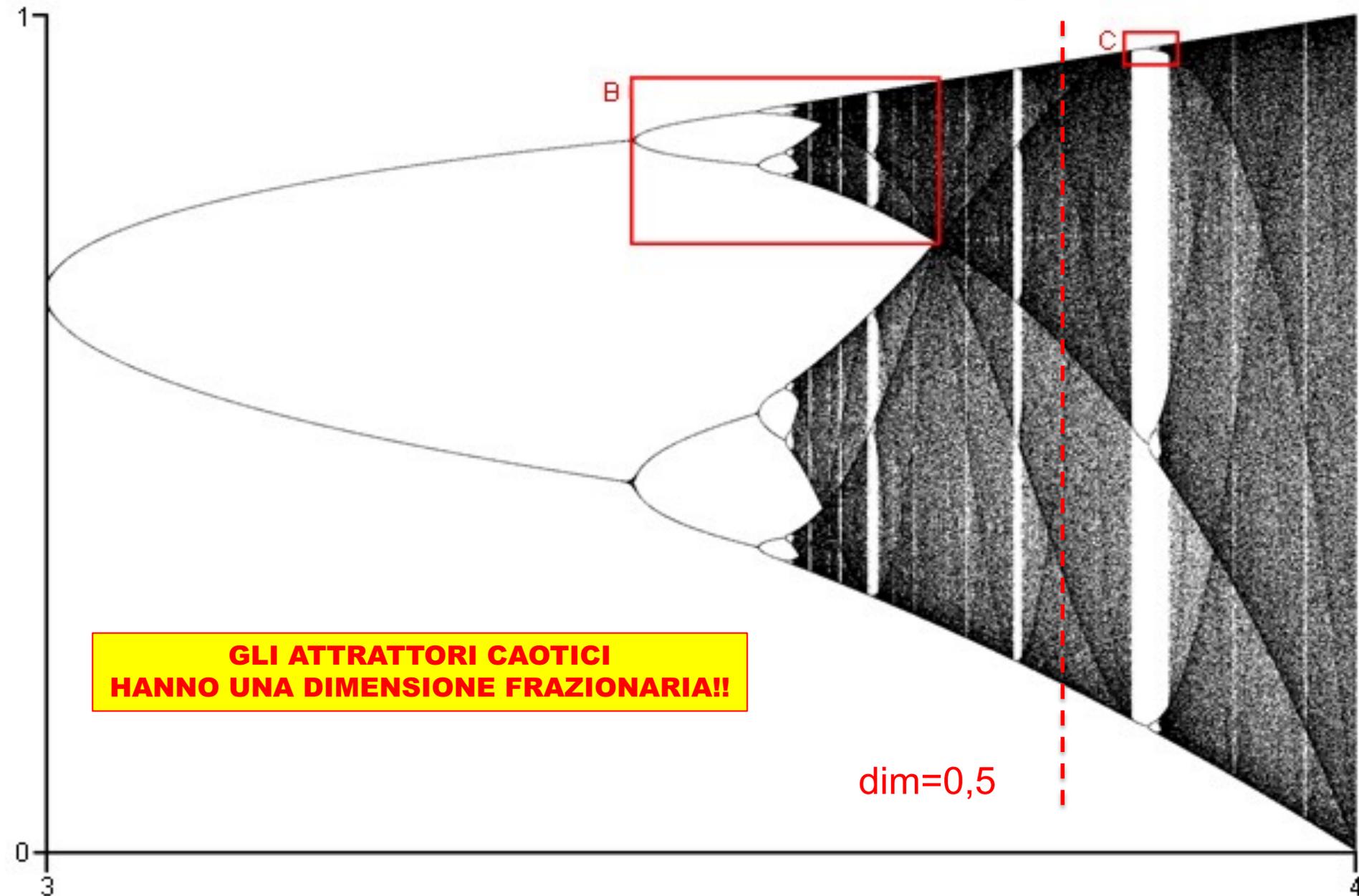


**Edge of Chaos**  
 $\lambda \approx 0$



**AUTOSIMILARITA'!**

# Autosimilarità e caos nella Mappa Logistica



# Autosimilarità e caos in 3 dimensioni: l'Attrattore di Lorenz

