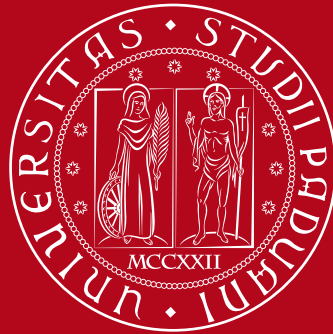


1222 • 2022
800
ANNI



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

La fisica dei sistemi complessi: cosa sono e perché sono importanti

Sandro Azaele

Dipartimento di Fisica e Astronomia “G. Galilei”

8 febbraio 2022: XX edizione della Giornata Fermiana

La scoperta di Nettuno



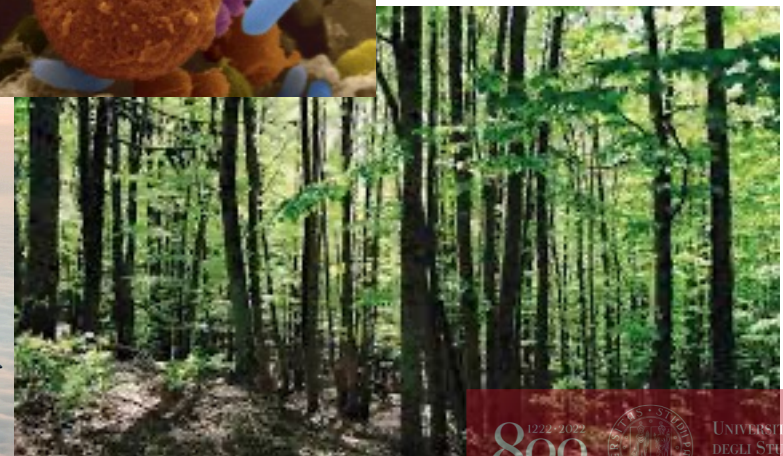
Isaac Newton



Urbain Le Verrier

- Nel 1821 Alexis Bouvard pubblica delle tabelle con le posizioni di Urano, ma le osservazioni astronomiche evidenziano delle importanti deviazioni.
- Bouvard ipotizza l'esistenza di un corpo ancora ignoto che perturba l'orbita di Urano.
- Nel 1845–46, Urbain Le Verrier calcola la massa e l'orbita del corpo che potrebbe spiegare le deviazioni delle posizioni di Urano.
- Il 23 settembre 1846 Johann Galle scopre Nettuno proprio nella posizione calcolata da Le Verrier.

Perchè le leggi della fisica funzionano? Funziona solo il riduzionismo?



Proprietà emergenti

The behavior of large and complex aggregates of elementary particles is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, **at each level of complexity entirely new properties appear**, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other.

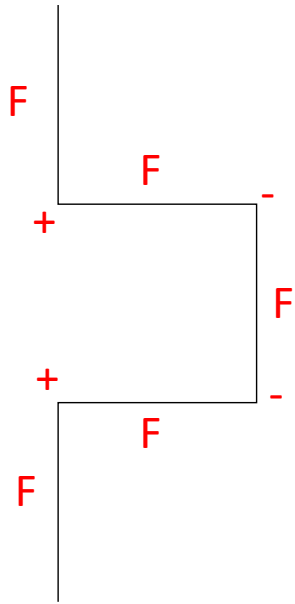
P.W. Anderson, More is Different, 1972

La conoscenza dei costituenti elementari di un sistema e delle loro leggi fondamentali sono necessarie *ma non sufficienti* a spiegare tutte le proprietà di sistemi con molti costituenti.

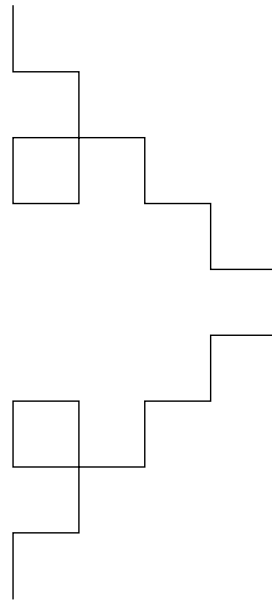
Un sistema complesso ha bisogno di leggi complesse?

Sistema di Lindenmayer (alfabeto di simboli per disegnare figure):

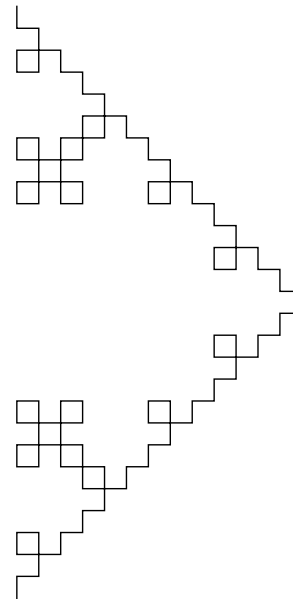
Partenza: F; Regola da iterare: $F \rightarrow F+F-F-F+F$ (curva di Koch)



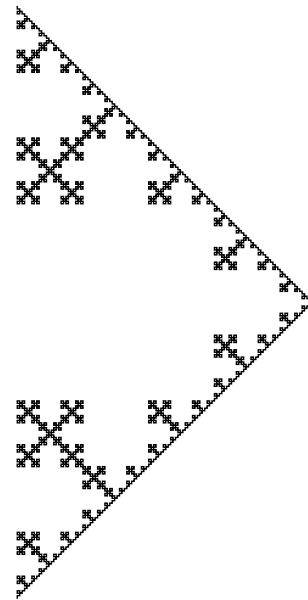
Prima iterazione



Seconda iterazione



Terza iterazione



Quinta iterazione

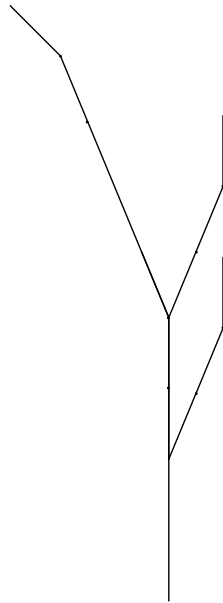
Un sistema complesso ha bisogno di leggi complesse?

Sistema di Lindenmayer (alfabeto di simboli per disegnare figure):

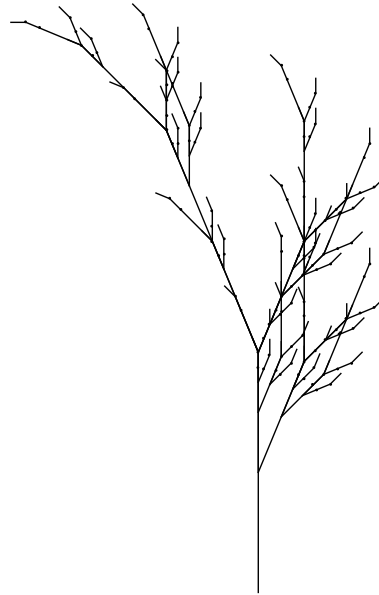
Felce di Barnsley



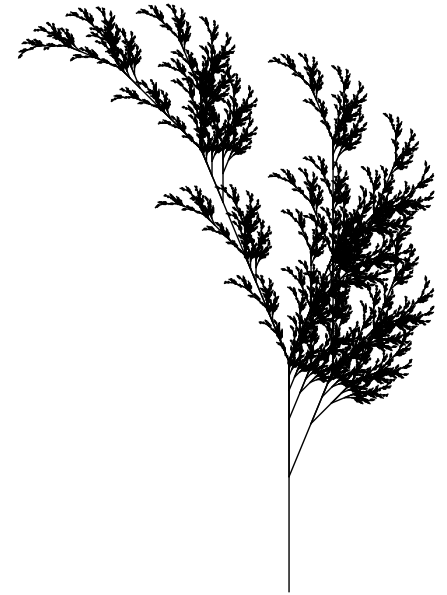
Prima iterazione



Seconda iterazione

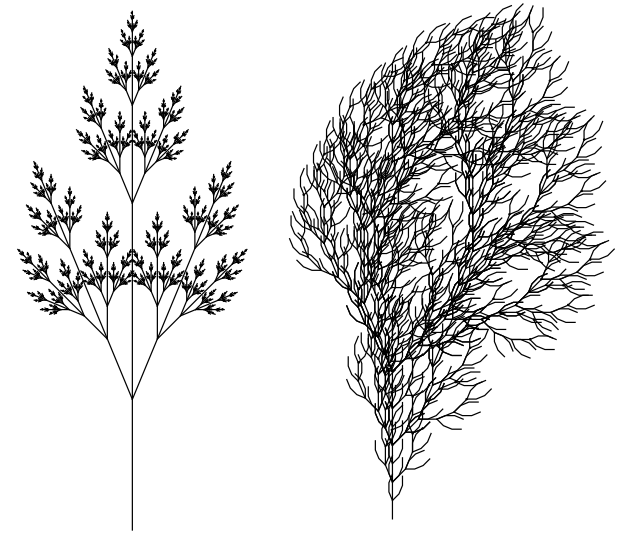
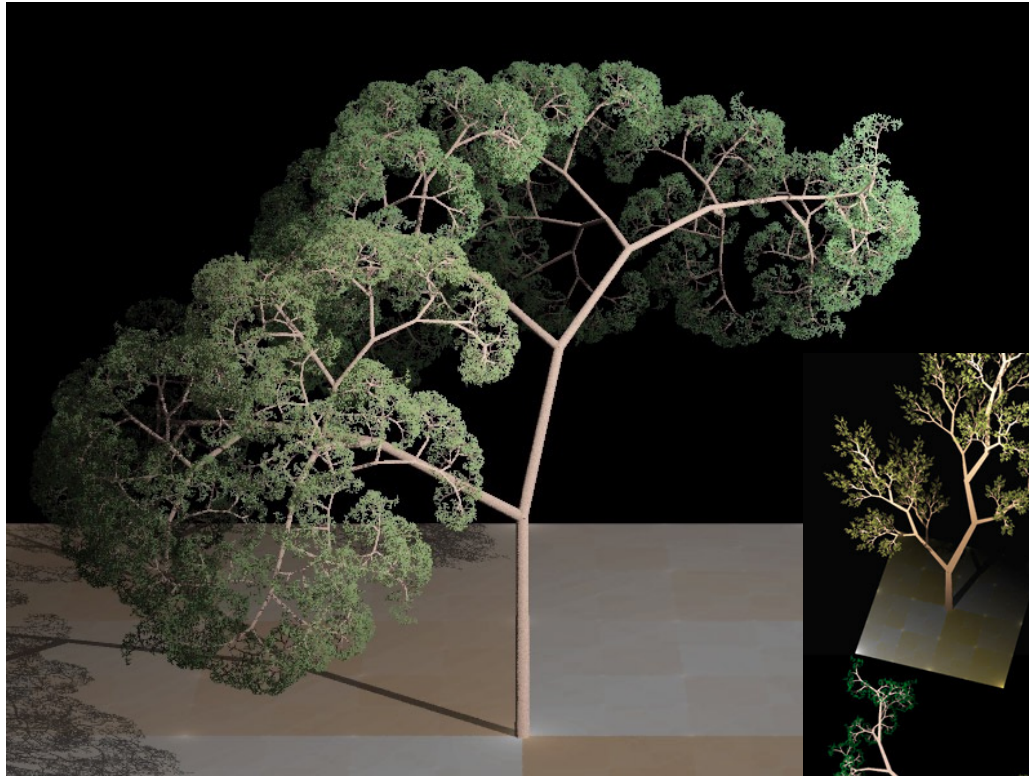


Quarta iterazione



Settima iterazione

Sistema di Lindenmayer



Forme complesse da regole semplici...





Un sistema complesso ha bisogno di leggi complesse?

Un modo per capire le proprietà emergenti: la meccanica statistica



Ludwig Boltzmann
(1844-1906)

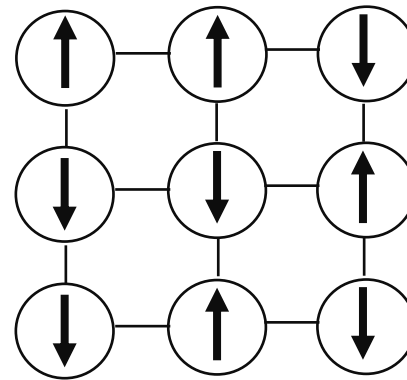
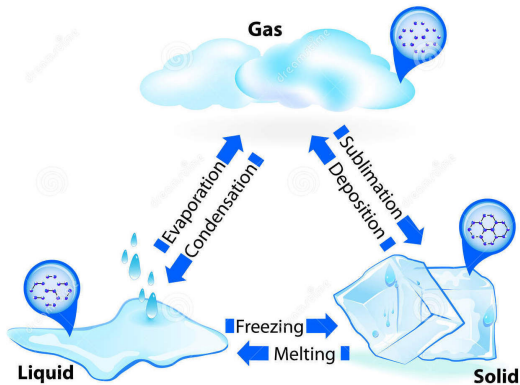
Interazioni tra i costituenti elementari (atomi,
molecole,...) di un sistema fisico



Predizione dei comportamenti macroscopici
del sistema fisico

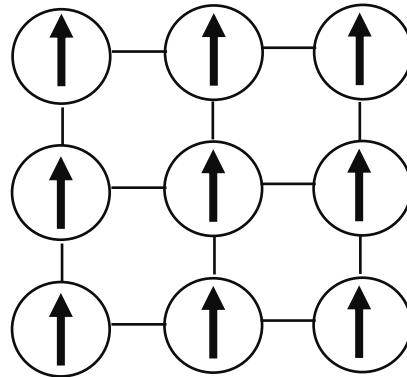
la meccanica statistica: transizioni di fase e fenomeni collettivi

Diverse transizioni di fase



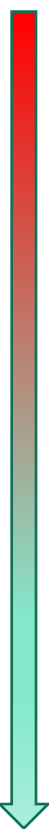
Fase disordinata
(alta temperatura)

TEMPERATURA CRITICA T_c →



Fase ordinata
(bassa temperatura)

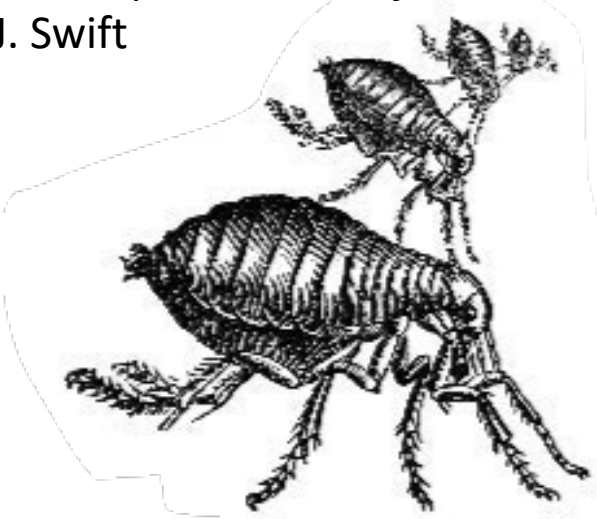
T



la meccanica statistica: transizioni di fase e fenomeni collettivi

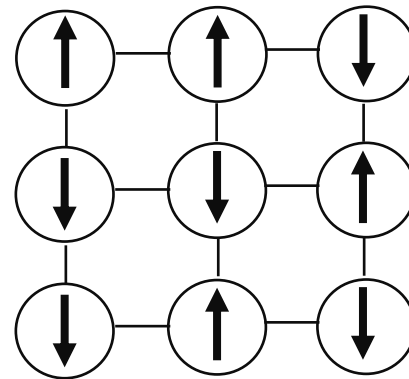
*So, naturalists observe, a flea
Has smaller fleas that on him prey;
And these have smaller still to bite 'em;
And so proceed ad infinitum.*

J. Swift



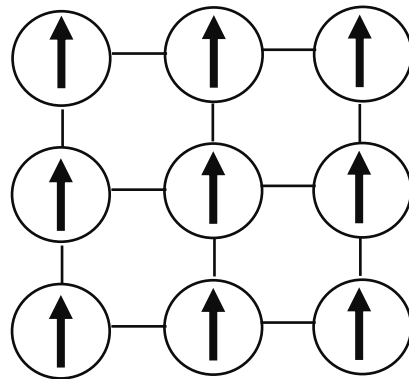
Invarianza di scala, $y = ax^b$

Universalità



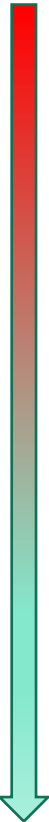
Fase disordinata
(alta temperatura)

TEMPERATURA CRITICA T_c



Fase ordinata
(bassa temperatura)

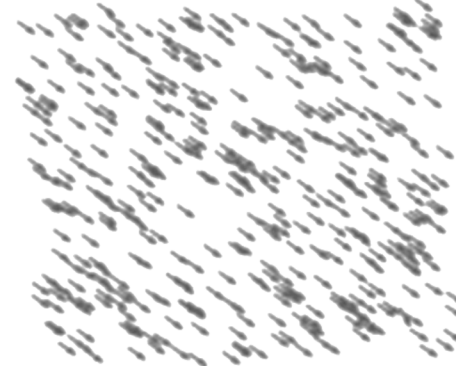
T



La potenza dei modelli: metafore della realtà



Fase disordinata



Fase ordinata



Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021

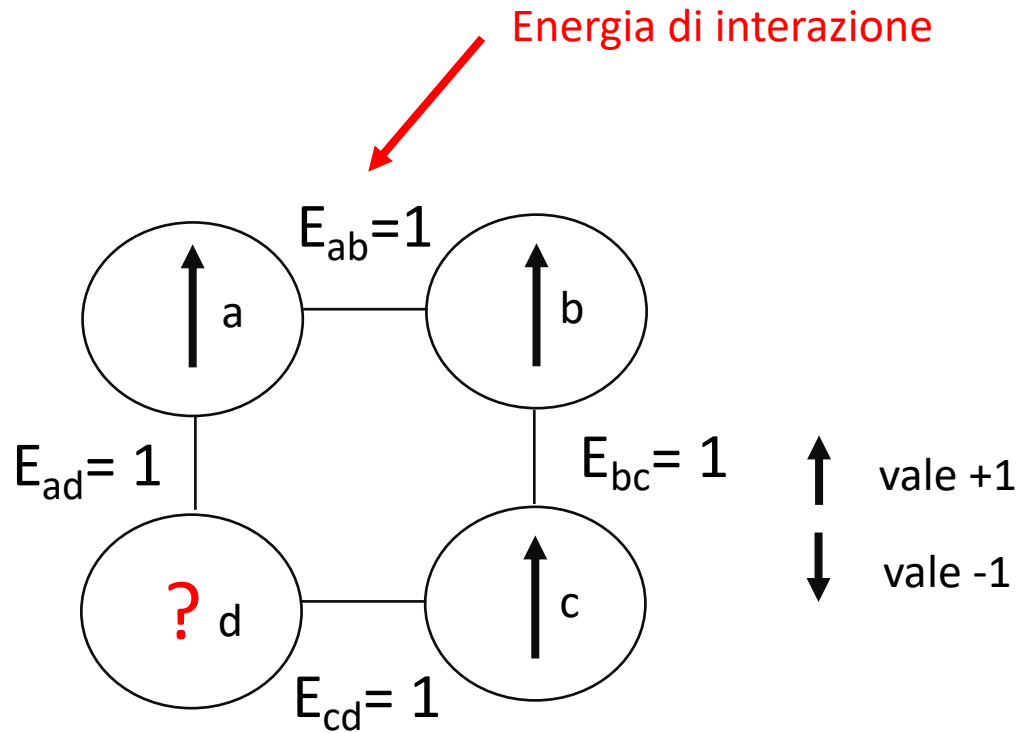


“for the discovery of the interplay of disorder and fluctuations in physical systems from atomic to planetary scales”

Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



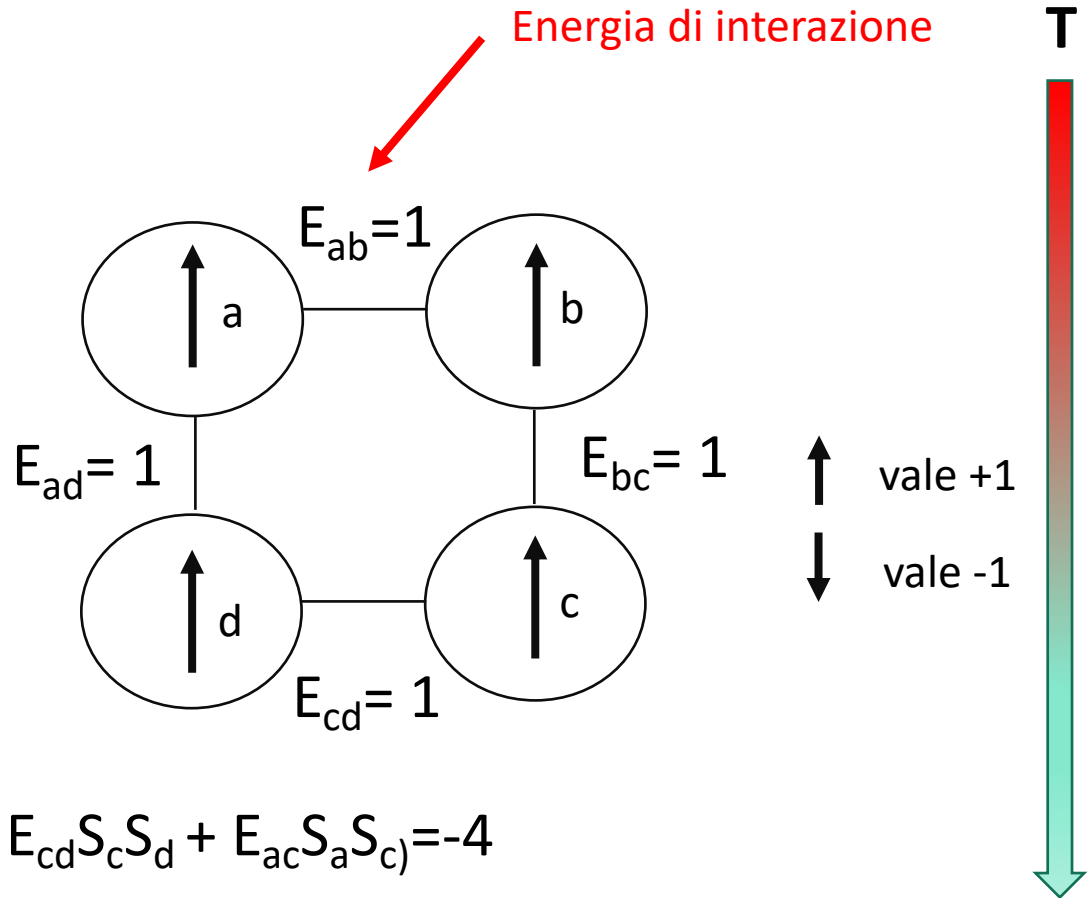
IMAGE: TWITTER / @NOBELPRIZE / AP



Qual è l'energia minima?

$$E = -(E_{ab}S_aS_b + E_{bc}S_bS_c + E_{cd}S_cS_d + E_{ac}S_aS_c) = ?$$

Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



Qual è l'energia minima?

$$E = -(E_{ab}S_aS_b + E_{bc}S_bS_c + E_{cd}S_cS_d + E_{ad}S_aS_d) = -4$$

L'energia *minima* si ottiene quando tutte le frecce (spin) puntano nella stessa direzione (basse temperatura).

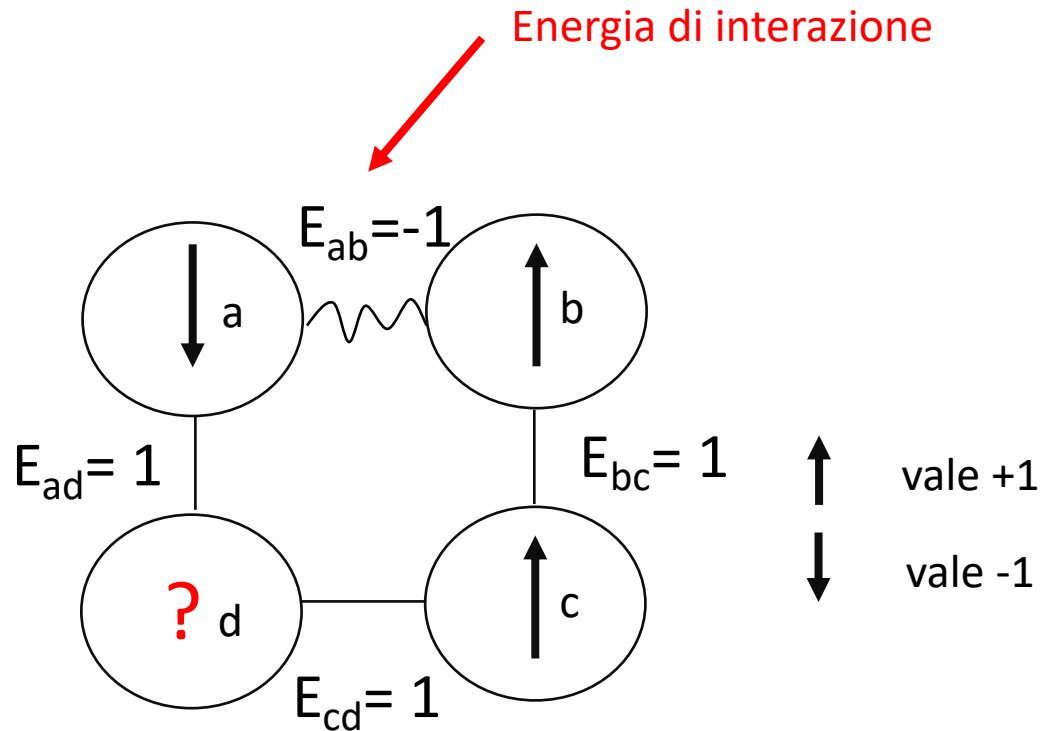
Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



Non c'è modo di allineare gli spin nella stessa direzione!
Non c'è modo di andare d'accordo: FRUSTRAZIONE.

Qual è l'energia minima?

$$E = -(E_{ab}S_aS_b + E_{bc}S_bS_c + E_{cd}S_cS_d + E_{ad}S_aS_d) = ?$$



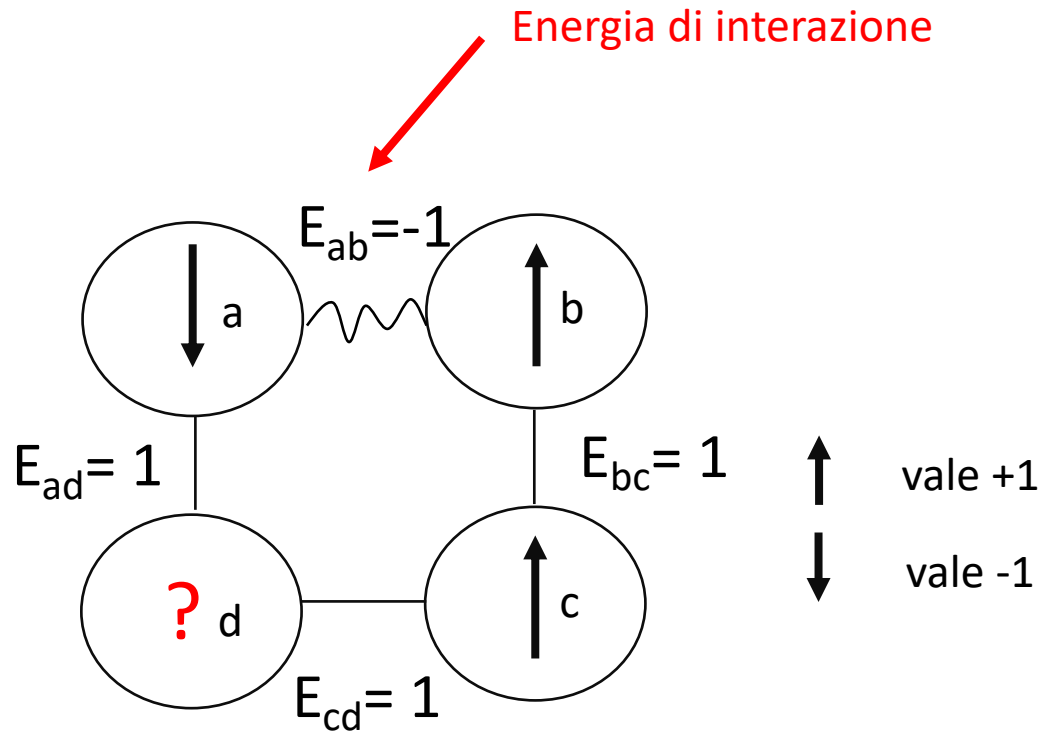
Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



Non c'è modo di allineare gli spin nella stessa direzione!
Non c'è modo di andare d'accordo: FRUSTRAZIONE.

Qual è l'energia minima?

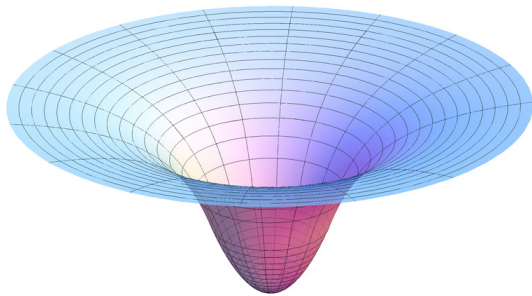
$$E = -(E_{ab}S_aS_b + E_{bc}S_bS_c + E_{cd}S_cS_d + E_{ad}S_aS_d) = -2$$



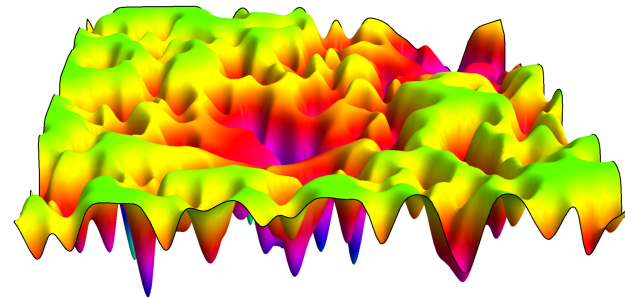
Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



Parisi ha capito come
studiare matematicamente
le proprietà dei minimi.
Ordine nascosto!



Sistema senza disordine

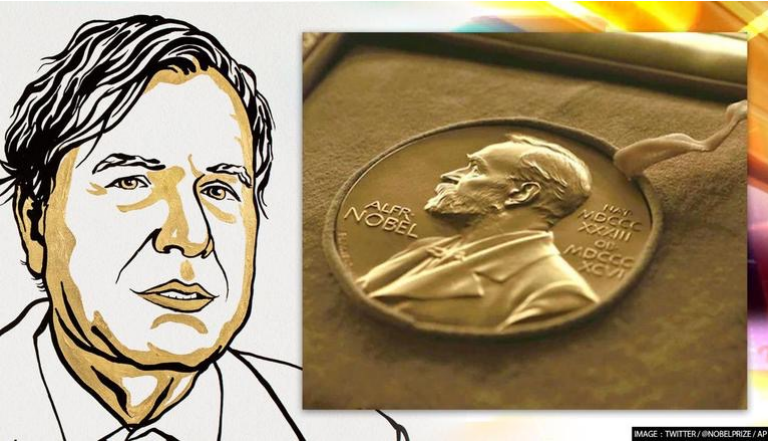


Sistema disordinato

L'energia ha MOLTI minimi, non uno solo. Non c'è una sola soluzione ottimale!
Ce ne sono molte che sono “abbastanza” buone (o non buone).

→ Complessità

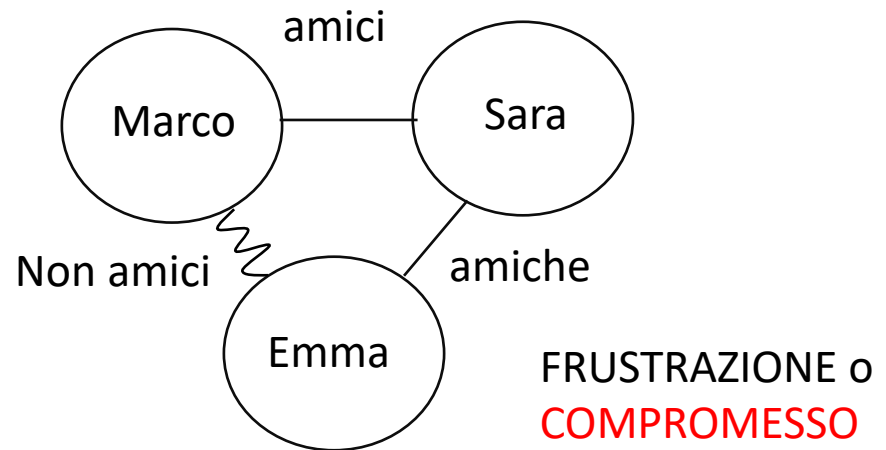
Il “nostro” premio Nobel per la fisica 2021



Applicazioni:

- Liquidi super-raffreddati
- Solidi con impurità
- Random laser
- ...
- Intelligenza artificiale
- Neuroscienze
- Ecologia, evoluzione
- ...

due amici al bar



In una cena con molte persone, se non tutti vanno d'accordo, ci sono molte possibili scelte (compromessi) per sedersi a tavola e la convergenza è lenta.



Se avvengono variazioni utili in organismi, certamente questi avranno migliori possibilità di affermarsi nella lotta per la vita; e in forza del principio di ereditarietà, essi tenderanno a generare una progenie con caratteristiche simili. Chiamo selezione naturale questo principio di sopravvivenza del più adatto (*Survival of fittest*)

OR THE
PRESERVATION OF FAVOURED RACES IN THE STRUGGLE
FOR LIFE.

BY CHARLES DARWIN, M.A.,

FELLOW OF THE ROYAL, GEOLOGICAL, LINNEAN, ETC., SOCIETIES;
RESEARCHES DURING H. M. S. BEAGLE'S VOYAGE

Dalla lotta per la vita, dalla guerra della natura, dalla carestia, dalla morte, direttamente deriva il più alto risultato che si possa concepire, cioè la produzione di animali superiori.

LONDON:

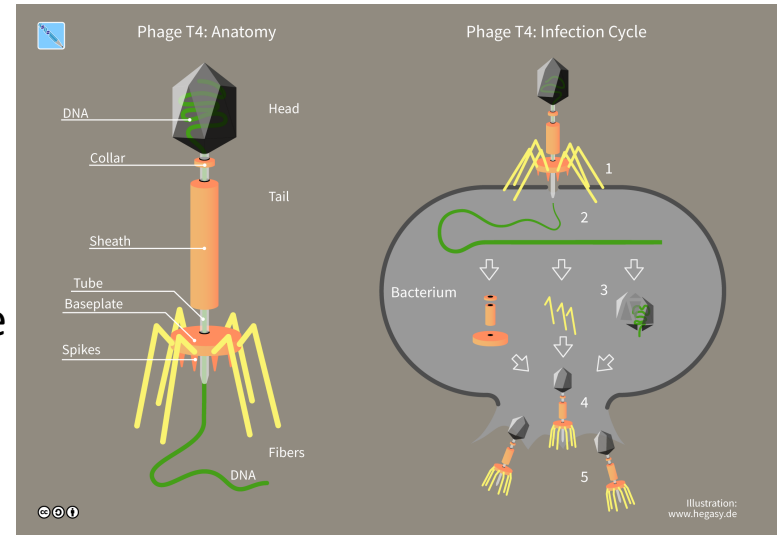
JOHN MURRAY, ALBEMARLE STREET.

1859.

Una «forza» non meno importante della competizione: la cooperazione

... e non solo delle forme superiori.

Batteriofagi emettono un peptide per chiamare a raccolta altri batteriofagi e infettare altri batteri



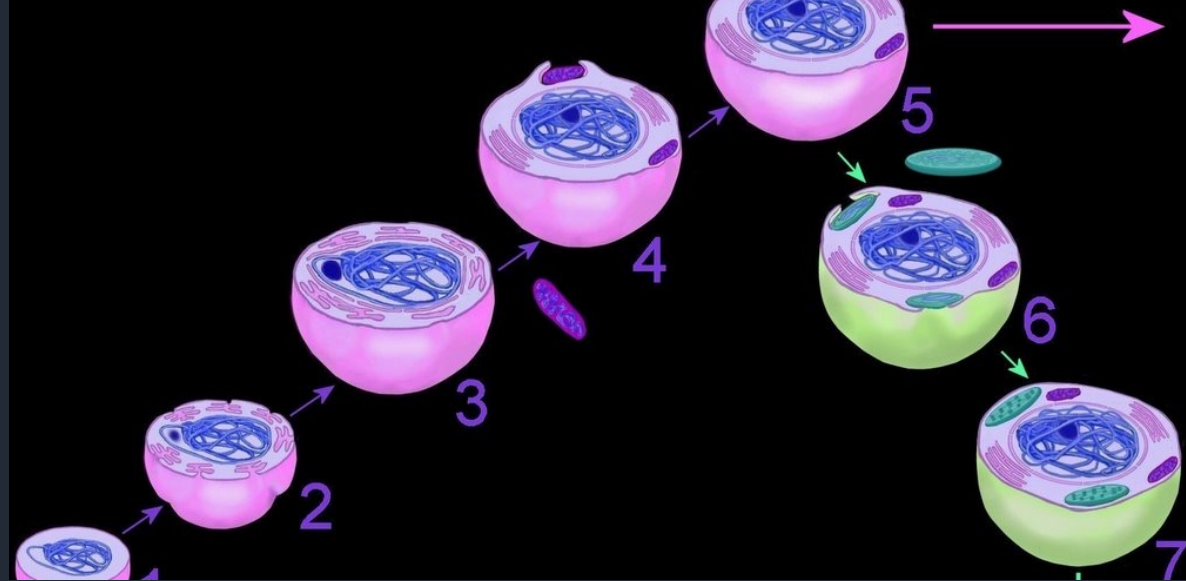
Di Guido4 - Opera propria, CC BY-SA 4.0,



Una «forza» non meno importante della competizione: la cooperazione

- Cooperazione tra organuli cellulari, tra cellule...tra specie...
- La cooperazione non è solo un tipo di interazione, è un'interazione che può produrre qualcosa di nuovo! *La cooperazione può produrre complessità...*

Nascita delle cellule eucariote e l'endosimbiosi

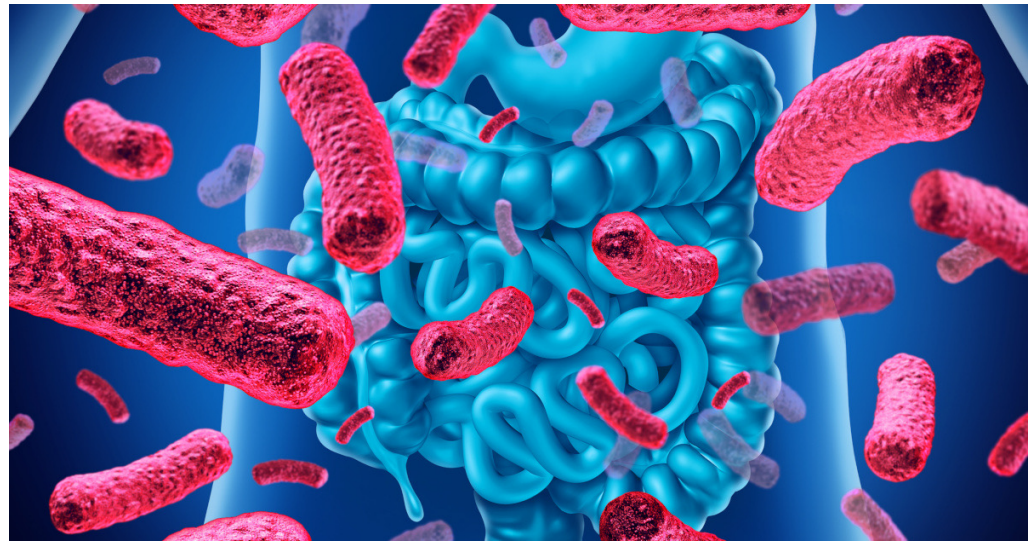


Life did not take over the globe
by combat, but by networking
L. Margulis

Microbiota

Batteri, archaea, virus, funghi vivono nel nostro corpo (sulla pelle, nelle mucose della bocca e delle vie respiratorie, nell'intestino). Svolgono funzioni digestive, metaboliche o immunitarie, indispensabili alla nostra salute... questo *dipende* da dove viviamo.

- Il numero di individui di questi microorganismi è 10 volte superiore alle cellule del nostro corpo.
- L'informazione genetica totale contenuta nei microorganismi che ci abitano, è 100 volte più grande del genoma umano.
- *Siamo un ecosistema, piuttosto che semplici individui.*

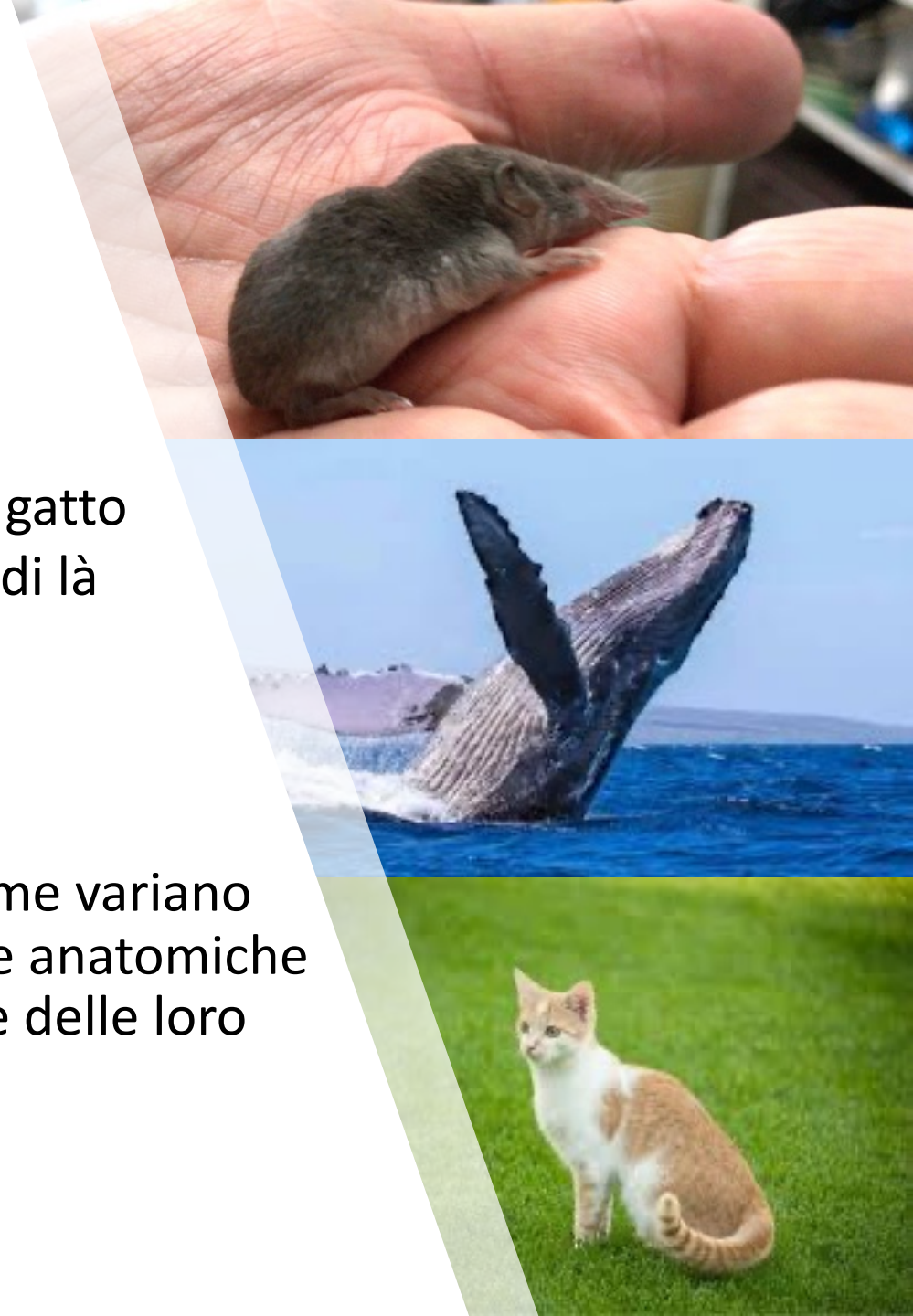


Siamo forse un **olobionte**?

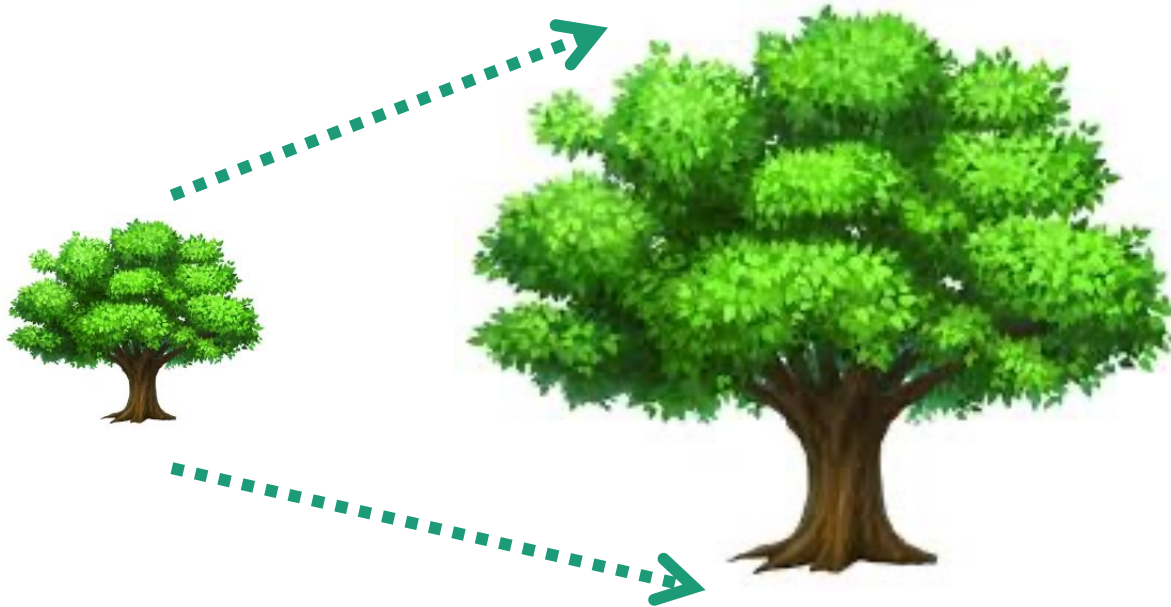
Esistono delle leggi generali in biologia/ecologia?

Il toporagno, la megattera e il gatto hanno qualcosa in comune al di là di essere mammiferi?

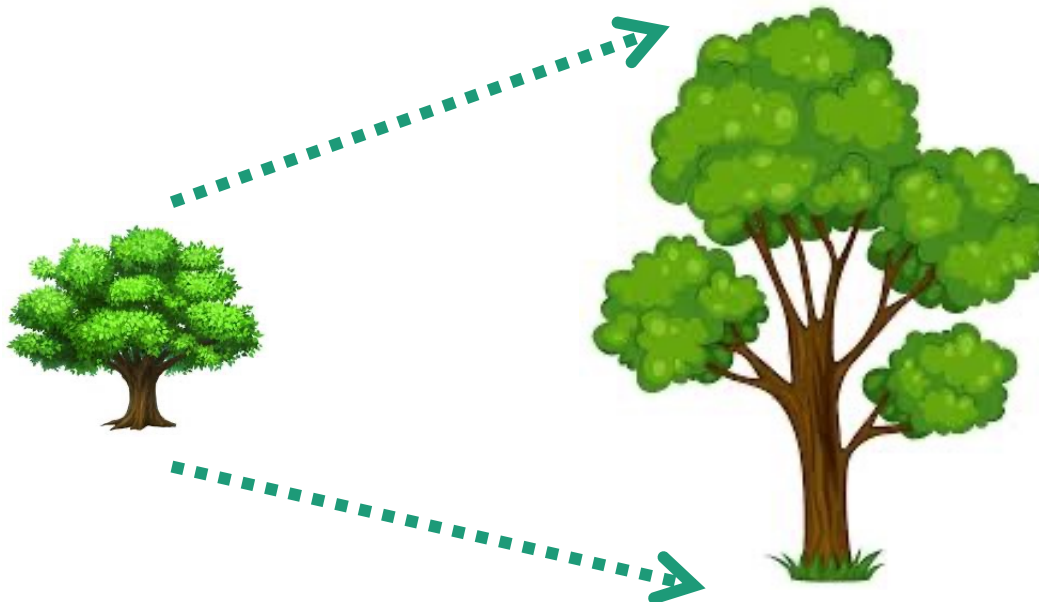
Allometria di scala: studia come variano le caratteristiche fisiologiche e anatomiche negli esseri viventi in funzione delle loro dimensioni.



Allometria di scala (allometric scaling)

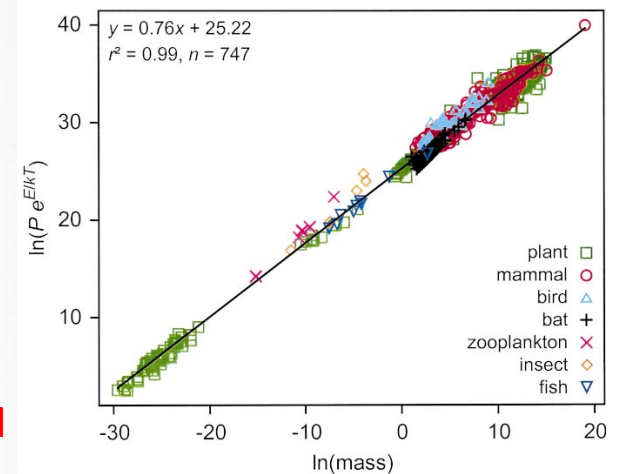
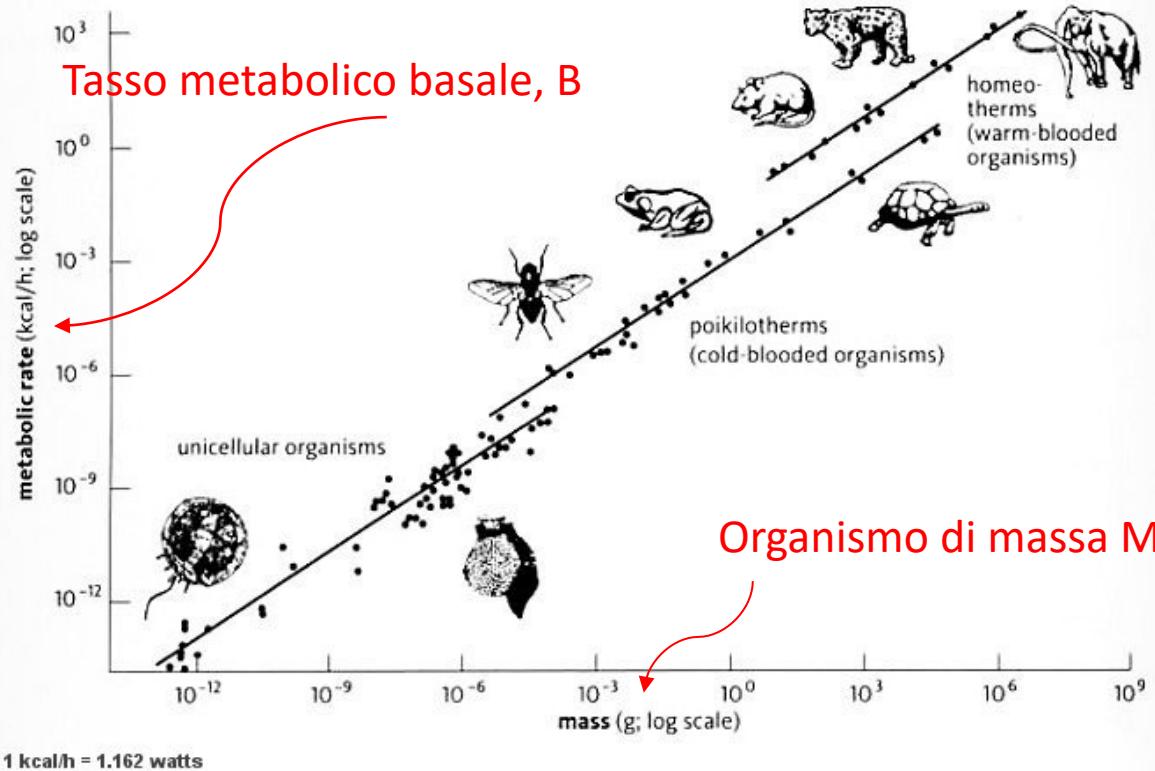


ISOMETRIA
DI SCALA
(proporzionalità
lineare)



ALLOMETRIA
DI SCALA

La legge di Kleiber (1932)



$$B = cM^{3/4}$$

Proprietà emergente?

Quanto mangiano un topo e un elefante rispetto a noi?

Un topolino è circa 100 volte più piccolo di noi, dobbiamo quindi dargli da mangiare 100 volte di meno?



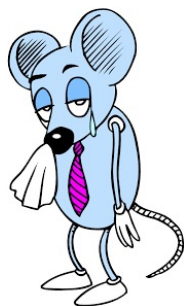
Un elefante è circa 100 volte più grande di noi, dobbiamo quindi dargli da mangiare 100 volte di più?

Quanto mangiano un topo e un elefante rispetto a noi?



Un elefante è circa 100 volte più grande di noi, dobbiamo quindi dargli da mangiare 100 volte di più?

Quanto mangiano un topo e un elefante rispetto a noi?



Le cellule di un elefante consumano meno di quelle di un topo

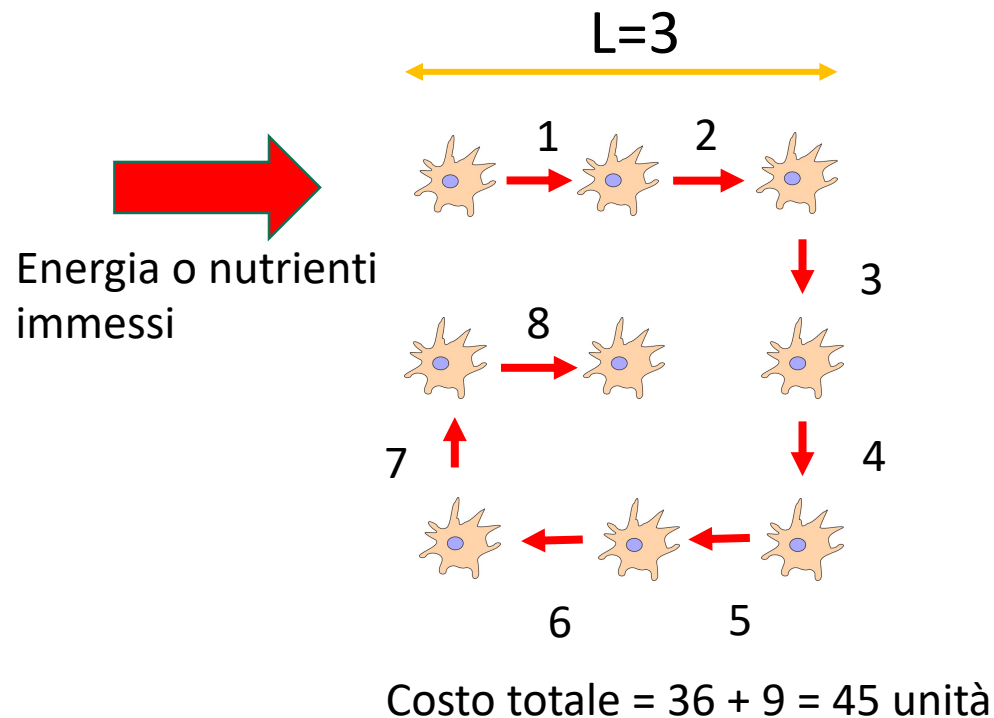
$$B=cM^{3/4}$$

... ma perchè proprio $3/4$?

Gli animali e le piante sono dotati di una **rete di distribuzione** grazie alla quale i nutrienti raggiungono le cellule fino alle estremità dell'organismo.

$B=cM^{3/4}$... ma perchè proprio $3/4$?

Gli animali e le piante sono dotati di una **rete di distribuzione** grazie alla quale i nutrienti raggiungono le cellule fino alle estremità dell'organismo.

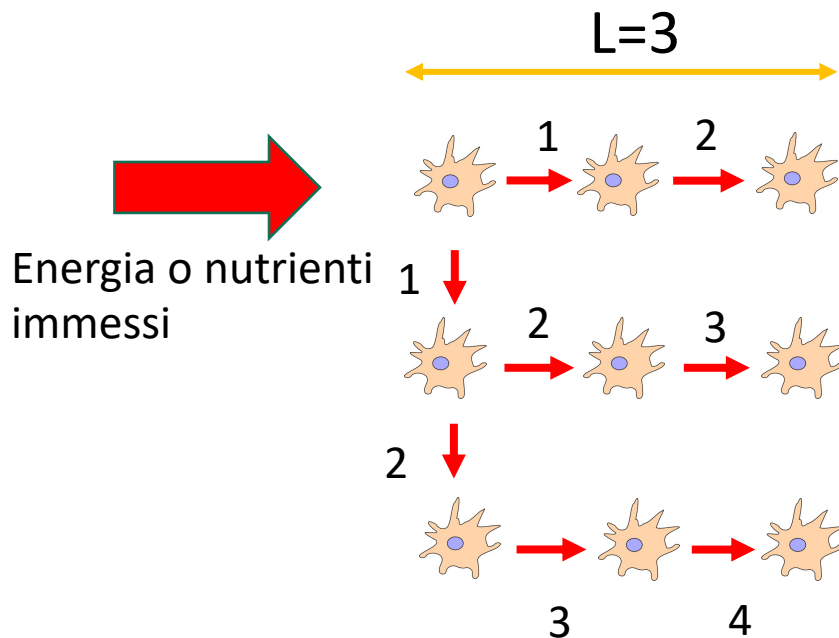


1. Ogni cellula consuma una unità di energia;
2. Per trasportare energia da una cellula all'altra c'è un costo di una unità di energia;

Si può fare di meglio?

$B = cM^{3/4}$... ma perchè proprio $3/4$?

Gli animali e le piante sono dotati di una **rete di distribuzione** grazie alla quale i nutrienti raggiungono le cellule fino alle estremità dell'organismo.



Rete ottimale

1. Ogni cellula consuma una unità di energia;
2. Per trasportare energia da una cellula all'altra c'è un costo di una unità di energia;

$$B = 3^2 \quad M = 3^3 \quad \longrightarrow \quad B \sim L^d \quad M \sim L^{d+1} \quad \longrightarrow \quad B \sim M^{d/(d+1)}$$

Ci sono altre leggi allometriche?

Frequenza cardiaca
proporzionale a $M^{-1/4}$

Durata della vita media
proporzionale a $M^{1/4}$



(Frequenza cardiaca $M^{-1/4}$) x (Durata della vita media $M^{1/4}$) = costante

Il numero medio di battiti cardiaci nella vita di un organismo non dipende dalla sua massa (circa 1.5×10^9)

Potrebbero esistere animali grandi quanto Godzilla?

Le dimensioni dei capillari non dipendono dalle dimensioni degli animali

Il numero di capillari è proporzionale a $M^{3/4}$



Se i capillari sono troppo distanti tra di loro non riescono a fornire ossigeno a tutte le cellule.
Stime approx danno masse max di 100 tonnellate....

Molto altro nei sistemi complessi...

- Teoria delle reti complesse
- Caos deterministico
- Complessità in molti altri sistemi come quelli biologici (dalle cellule al cervello), economici e sociali.

Attualmente non abbiamo una teoria dei fenomeni emergenti che si possa applicare in condizioni generali.

Nuove idee ed entusiasmo!

Una raccomandazione...

Einstein fondò nel 1902 una piccola accademia di amici (*l'Accademia Olimpia*). Si riunivano per leggere e discutere insieme di scienza e filosofia (E. Mach, Poincaré, J.S. Mill, D. Hume, B. Spinoza, M. de Cervantes...)

Steve Jobs (2005), Università di Stanford, cerimonia di laurea.

Stay hungry, stay foolish

Grazie dell'attenzione!