



Centrum pro výzkum  
toxických látek  
v prostředí

# Stabilita a chaos v ekologii

**Inovace a rozšíření výuky zaměřené  
na problematiku životního prostředí na PŘF  
MU (CZ.1.07/2.2.00/15.0213) spolufinancován  
Evropským sociálním fondem a státním  
rozpočtem  
České republiky**

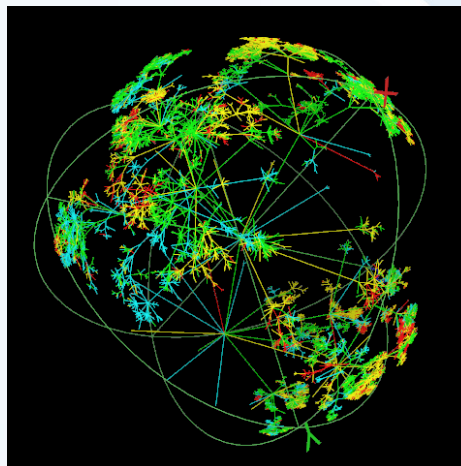


INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ



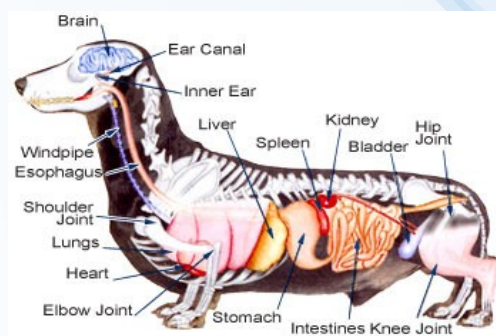
Centrum pro výzkum  
toxických látek  
v prostředí

# Základní vlastnosti složitých systémů



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

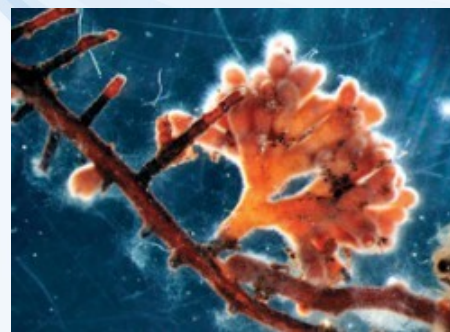
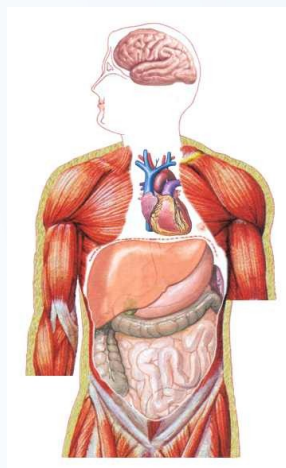
- Systémové vlastnosti zmizí, jakmile je systém rozložen na izolované (neinteragující části).
- Systémy vykazují určité hierarchické vnitřní uspořádání, existují v nich subsystémy.



- Jednotlivé hierarchické úrovně systémů vykazují různé stupně komplexity.
- Komplexitou rozumíme složitost (z lat. *complexus*, objetí, shrnutí), přesněji míru složitosti nějakého komplexního systému.

System je definován jako soubor prvků, které jsou ve vzájemné nenáhodné interakci, a má tyto základní vlastnosti:

Vlastnosti každého prvku v tomto systému ovlivňují skrze síť vzájemných vazeb s ostatními prvky vlastnosti celého systému i těchto prvků.



Úrovně systému jsou takto provázány na všech hierarchiích.

Na každé úrovni hierarchie složitého systému se objevují nové emergentní vlastnosti.

*System je více než pouhá suma  
svých částí*



+



+



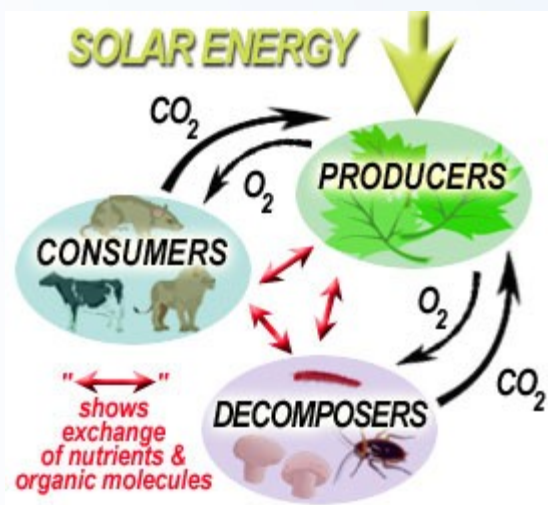
≠



V přírodě se setkáváme s živými systémy na dvou základních úrovních:

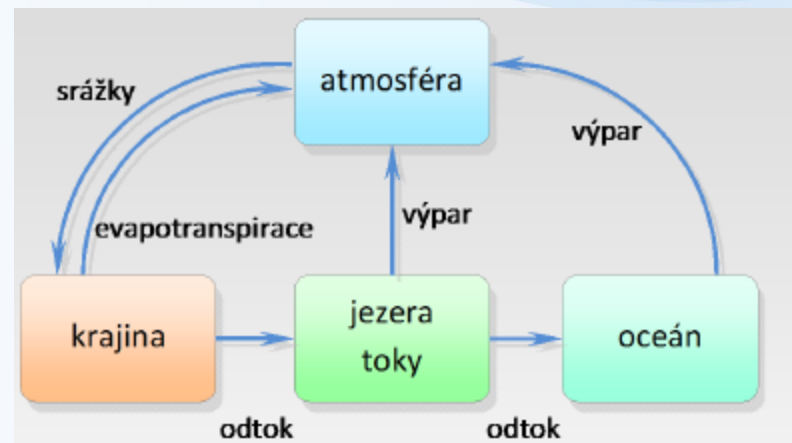
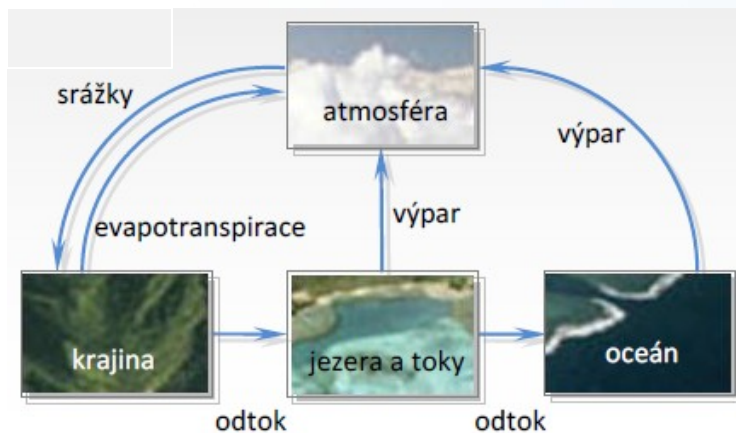
- na úrovni organismu
- na úrovni ekosystému

Ekosystém je heterogenní (hybridní) systém složený z biologického subsystému (obvykle biocenózy) a ze subsystému prostředí (tzv. ekotopu).

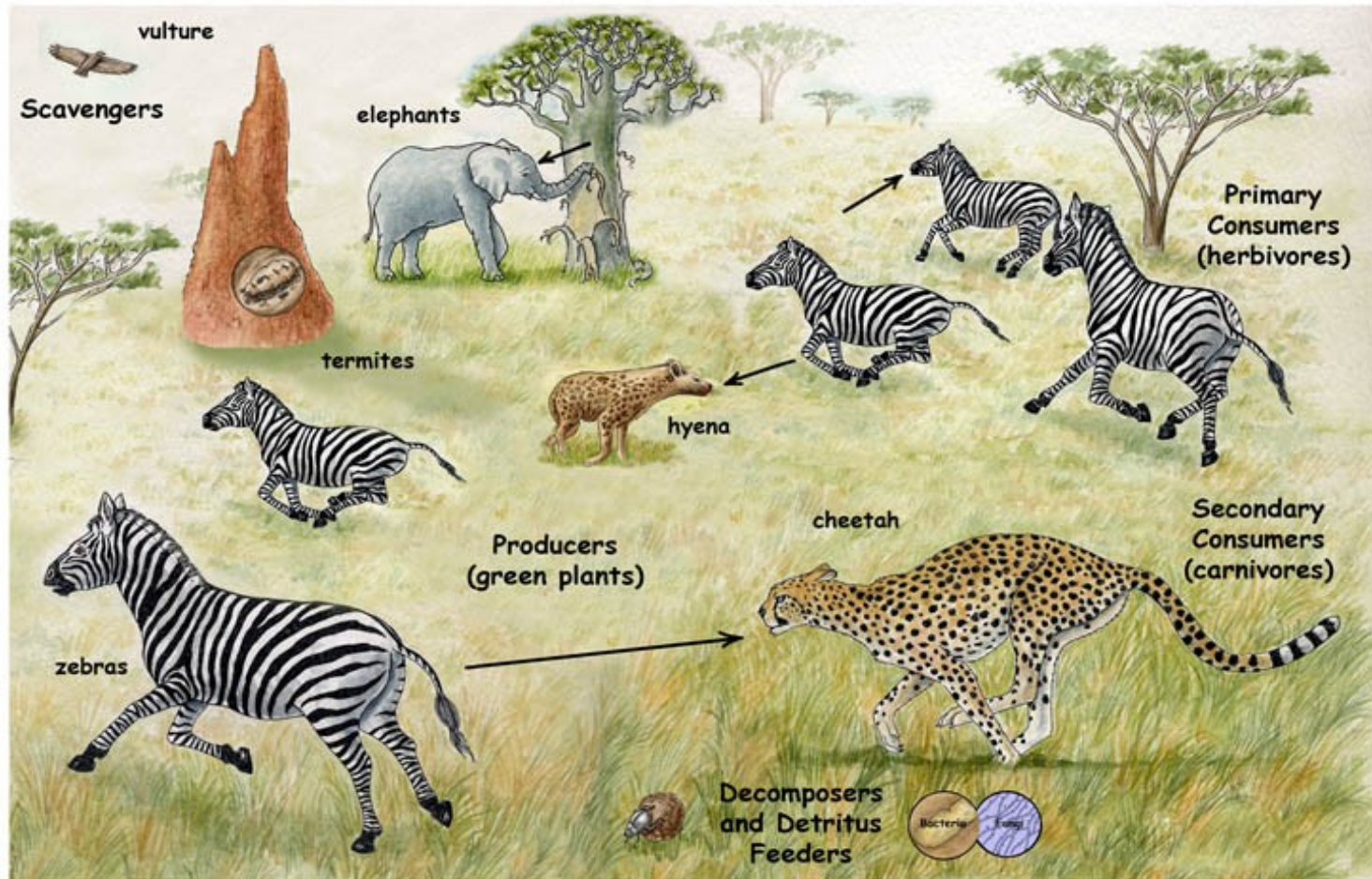


Z teorie systémů vyplývají dva závěry důležité pro jakékoliv pochopení procesů v systémech:

- Funkční propojení částí je důležitější, než tyto části samotné, ty jsou systému a jeho fungování podřízeny.
- Části mají význam především na základě toho, jakou plní v systému funkci: induktor, regulátor, řídicí veličina, tlumič, hranice, výměník, rezervoár, modifikátor



# Grassland Food Web



©Sheri Amsel

[www.exploringnature.org](http://www.exploringnature.org)



Centrum pro výzkum  
toxických látek  
v prostředí



- Některé principiálně nutné funkce (viz výše), musí vždy někdo „zastávat“.
- S jistou funkcí je někdy spojená volná nika v ekosystému: vakovlk v Austrálii: KONVERGENCE



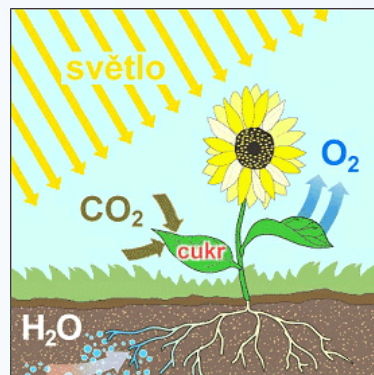
- Ekologická nika (resp. nika) je termín z obecné ekologie popisující nároky populace určitého druhu v ekosystému.

## Charakteristické vlastnosti živých systémů

• U neživých systémů je ve většině případů stabilita vázána na neměnné, izolované subjekty tedy více méně **uzavřené systémy**:

• U živých systémů je rovnováha výsledkem dynamických procesů: každý živý systém je závislý na toku látek a energie ze svého prostředí.

• O těchto systémech říkáme, že jsou ve stavu dynamické rovnováhy se svým okolím, všechny takové jsou **otevřené systémy**.



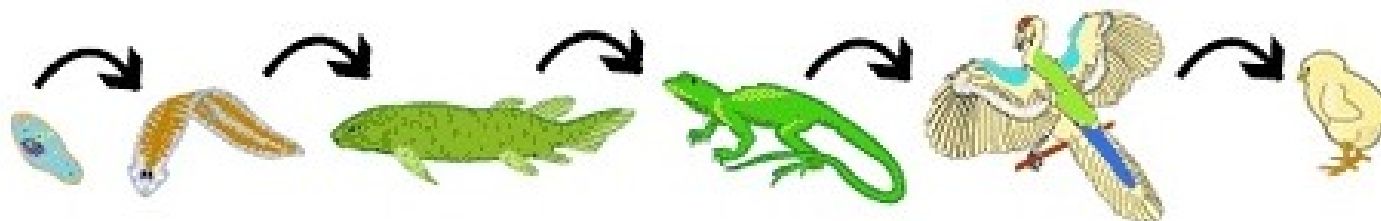
U živých systémů, kromě toho, že jsou v optimálním stavu v dynamické rovnováze (rovnovážný stav), nacházíme ještě další charakteristické vlastnosti:

- **Homeostáza**

- **Schopnost samoorganizace**



## • *Schopnost evoluce a růstu komplexnosti*



### EKOLOGICKÁ SUKCESE

přirozený vývoj po lokální disturbanci, zvyšování komplexity a diverzity → klimax



lišejníky

mechy

trávy



křoviny

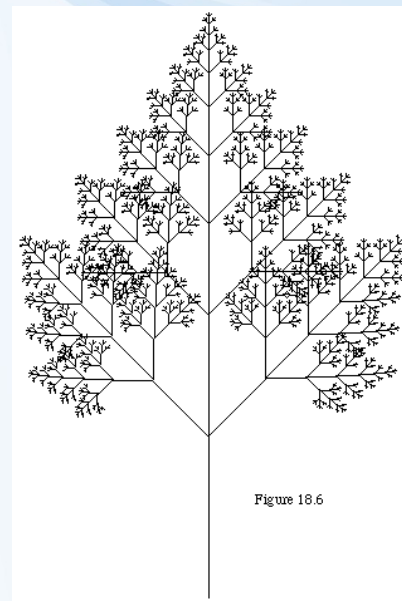
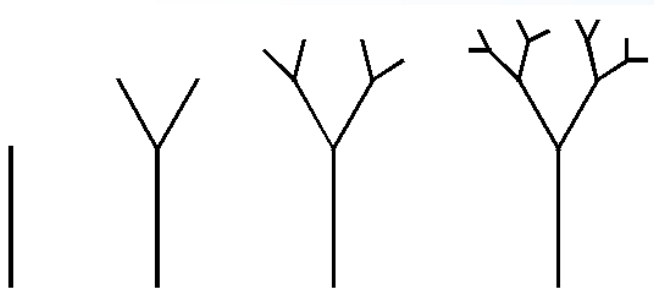
mladé stromy

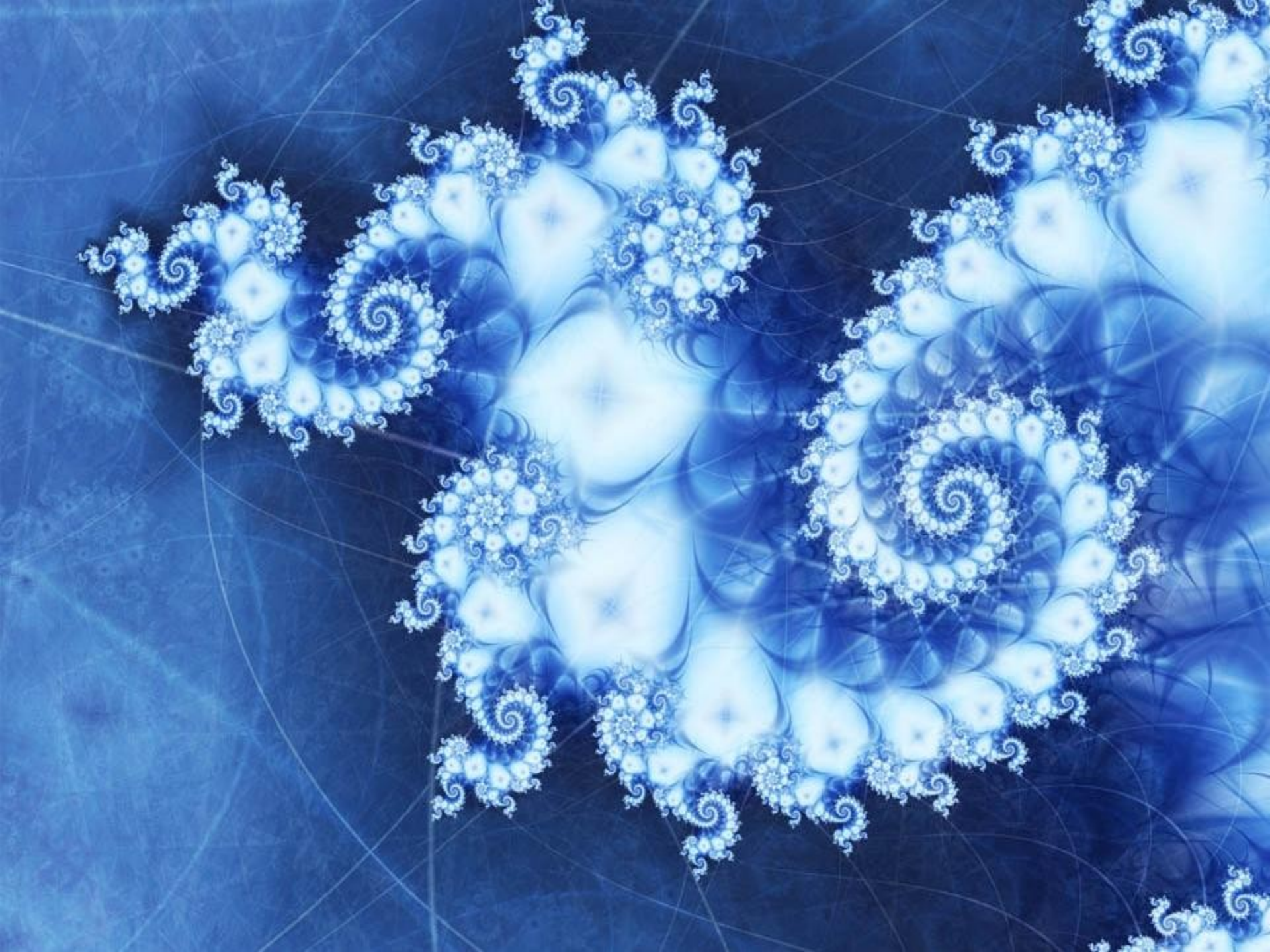
vzrostlý les

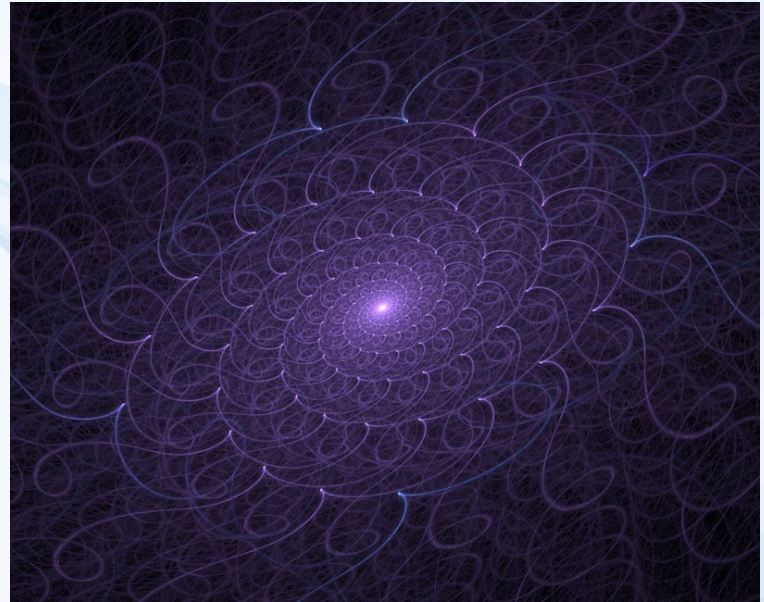
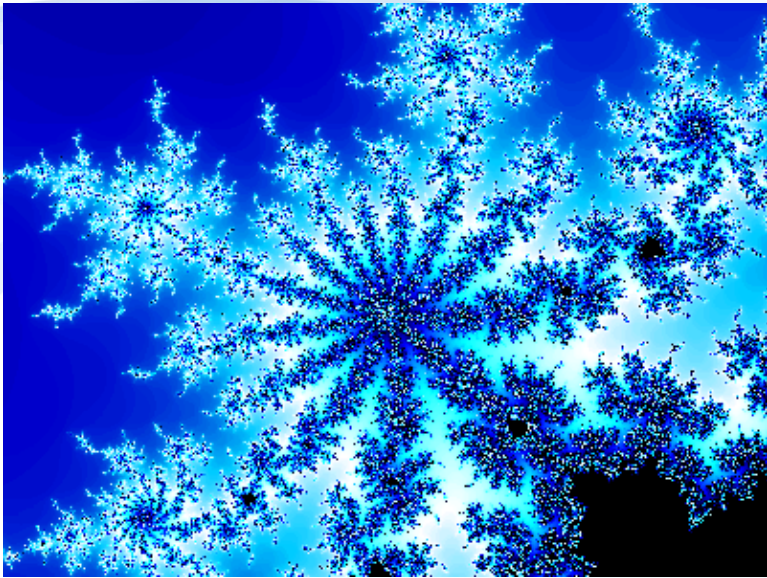


Mnohé živé ale i neživé systémy vykazují **fraktální strukturu**.

Fraktální struktura souvisí s tím, že ve struktuře některých systémů se opakují stále stejné motivy a to v různých měřítcích, celý objekt je tak vystavěn jakoby na základě stejného, stále se opakujícího motivu.





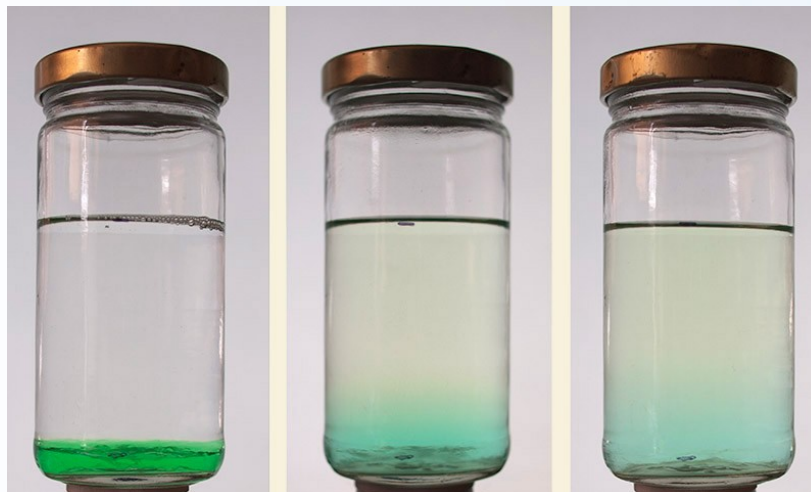


# Chování složitých systémů v organickém i anorganickém světě

Mnoho jevů v našem vesmíru nelze vysvětlit pomocí zákonů klasické mechaniky a zákona zachování energie.

Existuje však něco, co bývá označováno jako šipka času. V přírodě totiž pozorujeme děje, které v čase probíhají vždy jedním směrem, hovoříme o **dějích nevratných**.

Děj proběhne jedním směrem samovolně, ovšem návrat zpět je v intencích samovolného průběhu nemožný.





Všechny tyto děje spojuje přítomnost jistého gradientu, nerovnováhy jistých sil, potenciálů. Nerovnováha pak způsobuje děj, který vede k zániku vlastní, děj iniciující diference.



***asymetrie je příčinou jevů***

Se zánikem původní diference se vytvoří rovnovážný stav, který je stabilní. Jedná se o speciální a velmi důležitý typ stabilního stavu, který nazýváme **termodynamická rovnováha.**

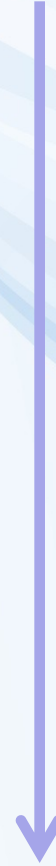
O výchozím (počátečním) stavu systémů s přítomností gradientu říkáme, že příslušné systémy jsou *vzdáleny od termodynamické rovnováhy*.

Fyzikové 19. století věřili, že jakmile dojde k vymizení gradientů nastane jev, který označili tepelná smrt vesmíru.

Hnací sílu ustalování této termodynamické rovnováhy popíšeme veličinou zvanou **entropie**.

Entropie je veličina, která byla definována při vyčíslování účinnosti parních strojů.

**ale!**

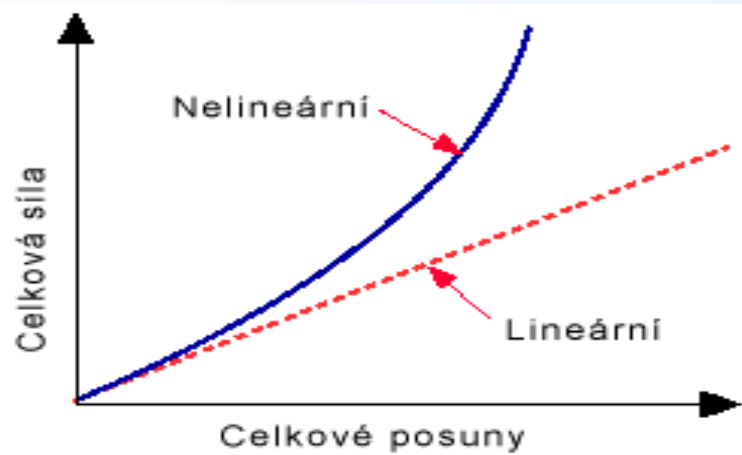


***Živé organismy jsou typickými příklady otevřených systémů vzdálených od termodynamické rovnováhy.***



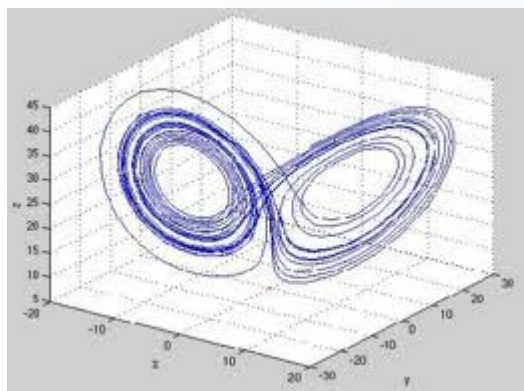
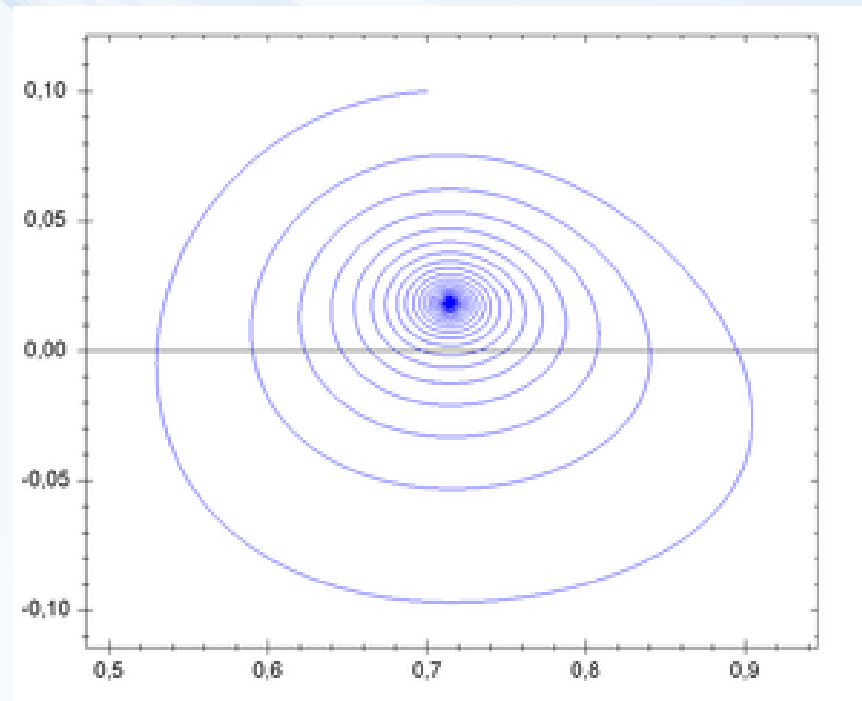
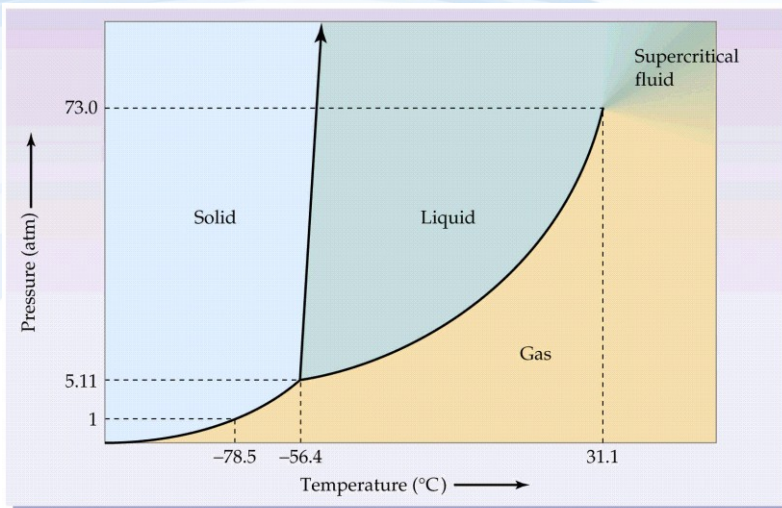
# Příklady vývoje složitých systémů

- Jak jsme si již řekli, živé systémy se nacházejí ve stavu vzdáleném od termodynamické rovnováhy, pro tyto systémy je typické, že se mohou chovat nelineárně.
- **Nelineárním chováním** rozumíme, že odezva systému (například změna některé pro systém důležité vlastnosti: teploty, tlaku, pH) na změnu jistého parametru (zpravidla parametru prostředí) není obecně úměrná změně tohoto parametru, tzn., že někdy i malá změna parametru, může obecně způsobit velkou změnu systému.

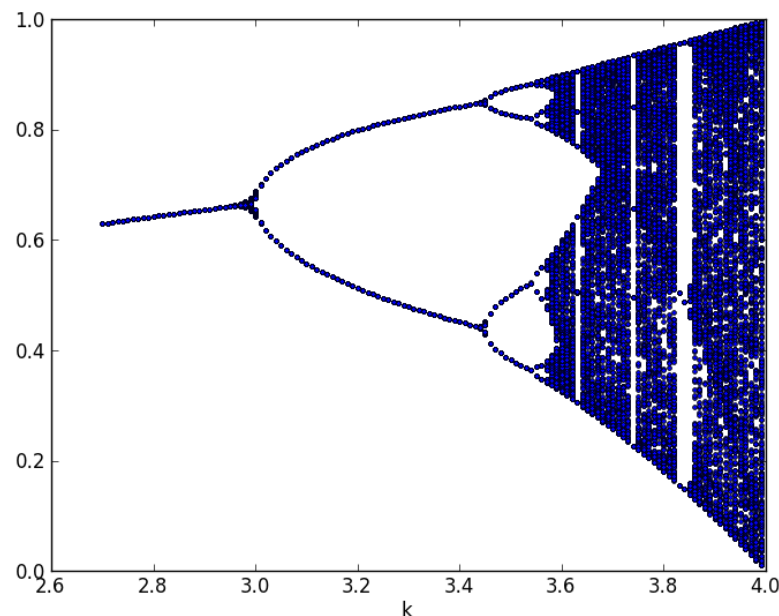


- ***Stav systému často popisujeme pomocí jisté trajektorie, dávající např. do souvislosti stavové proměnné (např. teplota, objem, tlak) ve fázovém prostoru.***
- ***U dynamických systémů je jednou z proměnných čas.***
- Fázový prostor je pak množina všech možných stavů dynamického systému.
- Část fázového prostoru nazýváme fázový diagram.
- Vývoj dynamického systému je tedy popsán jistou křivkou (trajektorií) ve fázovém prostoru či fázovém diagramu.





*Chaosem označujeme vlastnost některých nelineárních dynamických systémů, které jsou velmi citlivé vůči malé změně počátečních podmínek.*



Tuto citlivost popisujeme ***efektem motýlího křídla***.

V dlouhém časovém období chování chaotických systémů nelze předpovědět.

Náhodné chování některých jevů znamená, že jsme dosud neodhalili deterministický základ tohoto chování.





S nelineární dynamikou se můžeme setkat například v makroekonomice, na akciovém trhu, u meteorologických jevů, u kolonií mravenců, při zemětřesení, dopravních zácpách, u živých organismů, ekosystémů, epidemií, imunitního systému, říčních sítí, rostlinných porostů v krajině, pruhů a skvrn na kůži některých savců, tvaru mořského pobřeží a srdečních rytmů.

Chaotické chování řady systémů má určité společné vlastnosti, které nám umožňují *do jisté míry* předpovídat jejich budoucí vývoj.

Pro složité systémy bývá často jistý parametr kritický a překročením jisté kritické hodnoty tohoto parametru nastává ***kolaps***.

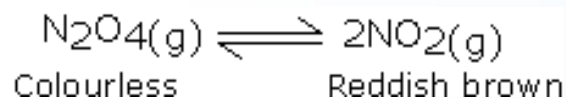
***Pro kolaps je typická neprediktabilita.***

Vzhledem ke změnám v životním prostředí způsobených antropogenní činností, lze v některých případech silně ovlivněných ekosystémů předpokládat kolapsovou transiční dynamiku.

*nevratnost*



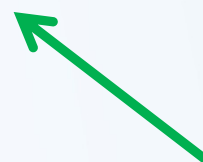
Pokud se u daného systému setkáváme s více stabilními stavy (například dvěma stabilními stavy) a přechod mezi nimi se děje v jednom směru po jiné vývojové trajektorii, než přechod ve směru opačném, nazýváme tento jev **hystereze**



**rozhodují pouze počáteční podmínky + vratnost**



**hystereze a nevratnost**



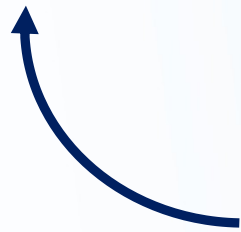
# Hystereze u biologických systémů



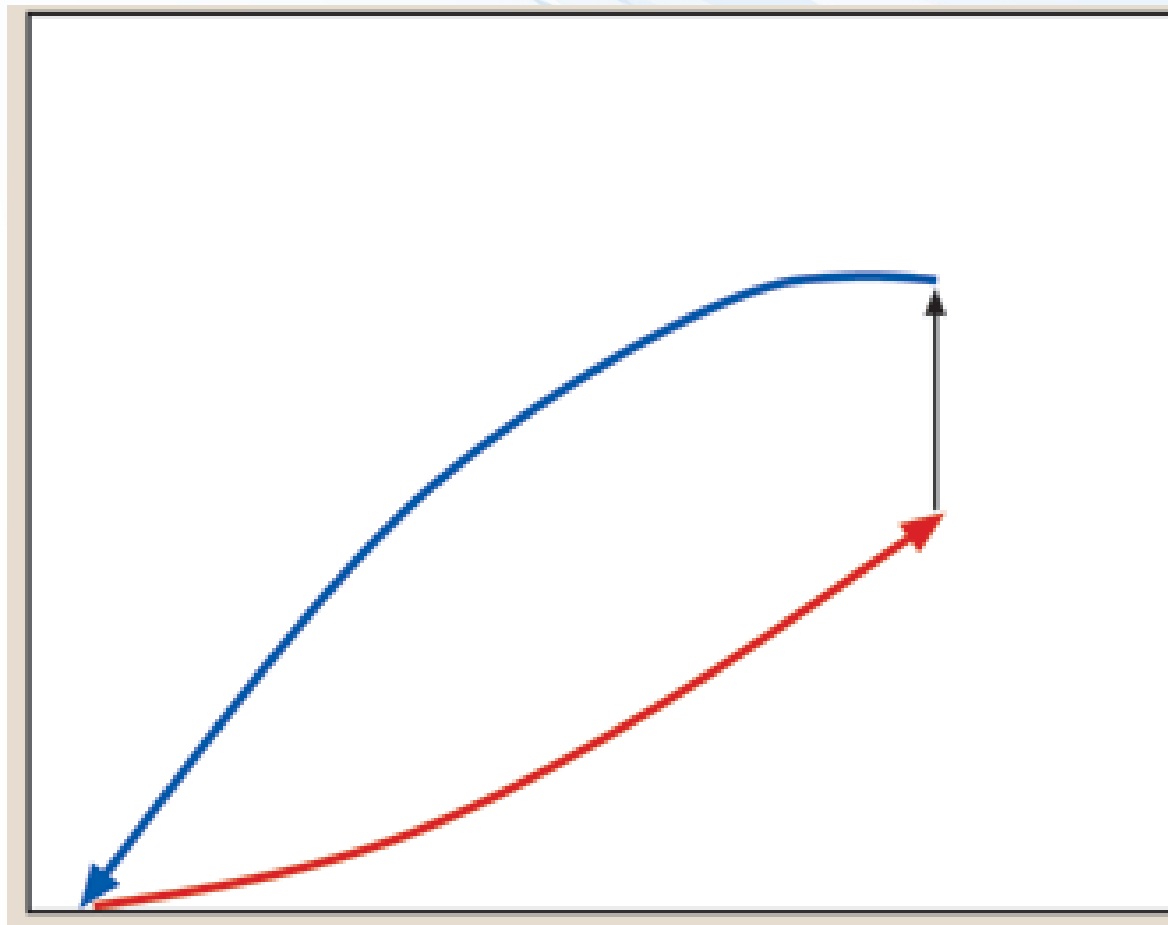
kolaps



sukcese

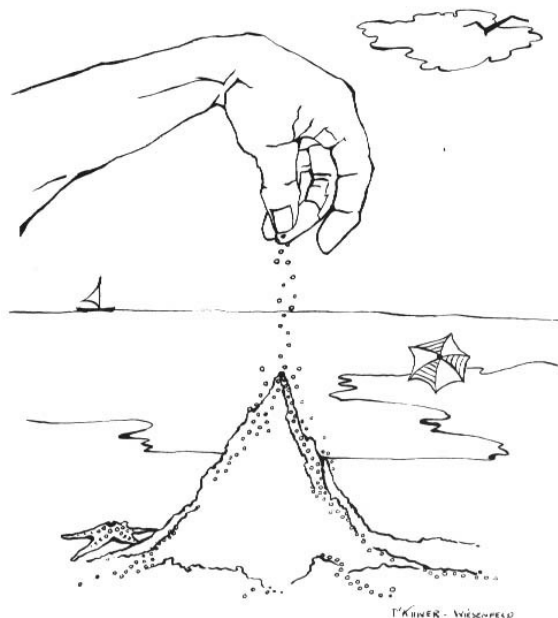


Hystereze: přechod do jednoho ze dvou stavů se děje kontinuálně, přechod do druhého obsahuje kolaps



# Kolaps a samoorganizované kritično

- složité systémy se vyznačují postupnou kumulací drobných změn až do okamžiku, kdy dosáhnou takzvaného kritického stavu, v němž kolabují



## *Model hromady písku*

- čím větší je lavina, tím má menší frekvenci výskytu
- není přitom možné předpovědět, jak velká lavina se v daném okamžiku uvolní, lze učit pouze pravděpodobnost toho, jak velká bude.
- větší laviny mají menší pravděpodobnost výskytu, vedou však k větším změnám systému

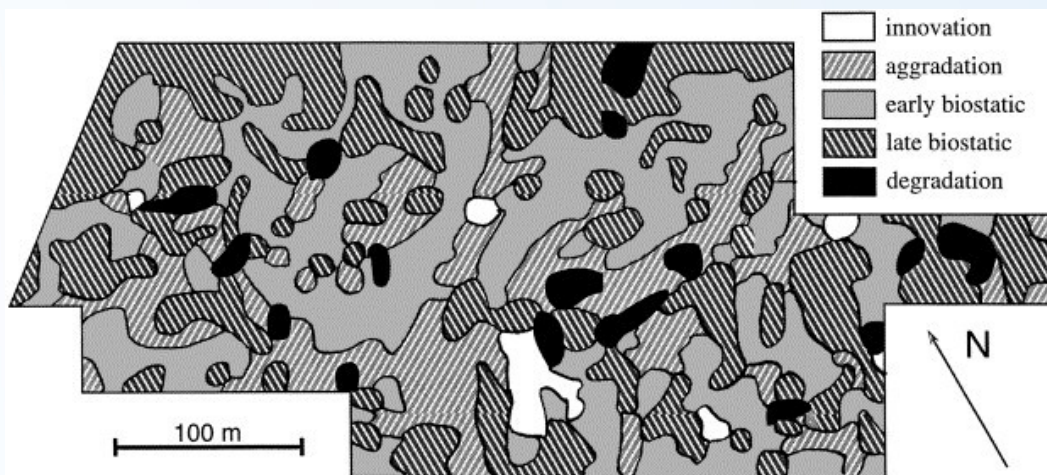


# Samorganizované kritično a dynamika boreálních lesů



Velké požáry jsou díky struktuře ekosystému méně pravděpodobné, než požáry malé, podobně jako rozložení lavin u modelu hromady písku.

V Yellowstonském národním parku správa dlouho hasila drobné požáry v dobré víře, že tím prospívá ohraně ekosystému...







## Důležité závěry z třetí přednášky

System je více než pouhá suma svých částí

Z termodynamického hlediska dělíme systémy na *otevřené* a *uzavřené*, zvláštním případem uzavřených systémů jsou systémy izolované.

V přírodě se setkáváme s živými systémy na dvou základních úrovních:

- na úrovni organismu
- na úrovni ekosystému

Ekosystém je heterogenní (hybridní) systém složený z biologického subsystému (obvykle biocenózy) a ze subsystému prostředí (tzv. ekotopu).

Žádný organismus si v přírodě nevystačí sám, každý je součástí nějakého ekosystému.

Ekosystémy mají, jako všechny systémy s autoregulací, jistou vnitřní strukturu a nezávisle na konkrétním typu ekosystému lze abstrakcí a redukcí získat schematický model ekosystému, v němž se vyskytují jisté funkce: induktor, regulátor, tlumič, hranice, rezervoár, modifikátor, které jsou spojeny s odpovídajícími nikami.

S tím souvisí pojem ekologické konvergence.

***Živé systémy (organismy a ekosystémy) mají následující důležité a charakteristické vlastnosti:***

- udržují homeostázu
- schopnost samoorganizace
- schopnost evoluce a růstu komplexnosti
- některé vykazují fraktální strukturu

***Živé organismy jsou typickými příklady otevřených systémů vzdálených od termodynamické rovnováhy.***

Pro popis změn a vývoje systémů (jejich dynamiky) je důležité porozumění pojmům *vratný* a *nevratný* proces.

Z hlediska samovolnosti průběhu dějů v přírodě (např. vedení tepla, difúze) je nevratnost popsána veličinou zvanou entropie (budeme se jí ještě hodně věnovat).

Samovolně vratné jsou ty děje, při nichž nedochází ke změně entropie.



Vývoj dynamického systému je popsán jistou křivkou (trajektorií) ve fázovém prostoru či fázovém diagramu.

Fázový prostor je množina všech možných stavů dynamického systému. Část fázového prostoru nazýváme fázovým diagramem.

Pokud systém pozorujeme od jistého okamžiku  $t_0$ , pak množinu proměnných, popisujících systém v čase  $t_0$ , nazýváme počátečními podmínkami.

Vztah (eko)systému a jeho prostředí je důležitý pro pochopení vratnosti a nevratnosti dějů v prostředí, kde ještě existují gradienty a jejich změna (což prostředí na Zemi zcela jistě je, jinak by život nebyl možný).

Uvažujme, že se změní podmínky prostředí (z počátečních) a v důsledku toho dojde ke změnám v systému, následně se podmínky vrátí zpět k počátečním, pak pokud:

- se systém navrátí do původního stavu hovoříme o vratnosti (stav systému určují pouze počáteční a konečné podmínky), viz příklad s oxidem dusičitým.
- systém se do původního stavu nevrátí, pak hovoříme o nevratnosti

Další typickou vlastností složitých systémů je nelineární chování. Nelinearita přináší některé specifické druhy chování složitých systémů: ***chaos, kolaps a hysterezi.***

***Chaosem*** označujeme vlastnost některých nelineárních dynamických systémů, které jsou velmi citlivé vůči malé změně počátečních podmínek. Chaos přináší náhlé zmnožení možných vývojových trajektorií systému. O tom, po které z těchto možných trajektorií se bude systém dále ubírat, rozhoduje i nepatrná změna vnějších podmínek. Tuto citlivost popisujeme ***efektem motýlího křídla.***

***Kolaps*** je specifický druh velmi prudké změny v systému, může jít například o náhlou redukci biomasy, snížení úživnosti půdy. Příznačná je ona náhlost a skokový charakter změny důležité veličiny popisující systém.

Vzhledem ke změnám v životním prostředí způsobených antropogenní činností, lze v některých případech silně ovlivněných ekosystémů předpokládat kolapsovou transiční dynamiku.

Pro demonstraci jevu ***hystereze*** uvažujeme fázový diagram popisující systém, který má dva stabilní stavy: pak pokud se přechodové trajektorie z jednoho stavu systému do druhého různí, hovoříme o hysterezi, aktuální stav systému totiž neurčují pouze počáteční podmínky, ale i jeho historie.

Uvedli jsme si několik příkladů hystereze u živých systémů. Složité systémy se mohou vyznačovat postupnou kumulací drobných změn až do okamžiku, kdy dosáhnou takzvaného kritického stavu, v něm kolabují, což přibližuje například model hromady písku.