

## **9. prednáška**

### **Umelý život (Artificial Life)**

# Umelý život - Artificial Life

## Čo je to umelý život?

simulácia životných prejavov jednotlivcov alebo skupín:

biológia, informatika, fyzika, sociológia, psychológia, ekonómia (modelovanie situácií, kedy si firmy konkurujú alebo kedy spolupracujú, zapojenie teórie hier, riadenie priemyselných komplexov) , filozofia

- hardware: robotika, nanotechnologie, evolware
- software: počítačové programy (aj víry)
- wetware: replikujúce sa makromolekuly, RNK

Christopher Langton (1. konferencia ALife):

Štúdium umelých systémov, ktoré vykazujú správanie charakteristické pre prírodné živé systémy: samoorganizáciu, adaptáciu, evolúciu, ko-evolúciu, metabolizmus atď. To zahŕňa biologické a chemické experimenty, počítačové simulácie a čisto teoretické rozbory. Subjektom výskumu sú procesy prebiehajúci na molekulárnej, sociálnej a evolučnej úrovni. Cieľom je extrahovať základné princípy organizácie živých systémov a ich vývoja.

Vizionári:

Umelý život znamená vytvorenie a vylepšovanie účinnosti *nových foriem života*, iba v inom médiu ako sú uhľovodíky, teda väčšinou na báze kremíkových čipov v počítačoch (ako napr. počítačové vírusy) alebo v "železe" predstavovanom (nano)robotmi.

Praktici:

Cieľom umelého života je vypracovať nové metódy pre *štúdium života*, vedúce k lepšiemu pochopeniu tohto biologického fenoménu. Umelý život poskytuje možnosť robiť experimenty, ktoré by boli v tradičnej biológii extrémne komplikované alebo nemožné (reprodukovateľnosť a rýchlosť). Zatiaľ čo klasická biológia sa snaží život analyzovať, umelý život smeruje k syntéze aspoň niektorých črt života zo základných vlastností živej hmoty ako je súperenie, spolupráca alebo napríklad parazitizmus a vzťah dravec—korisť, vývoj druhov.

Predmetom štúdia je nielen napodobovanie pozemského života, ale aj simulácia, ako by život mohol vyzerat' za iných podmienok. Veľa práce smeruje k počítačovej simulácii umelých bytostí a umelých svetov, v ktorých tieto bytosti žijú.

## Definície života

Problémy: autoreprodukcia a mulica

1. Život je skôr určitý vzor v čase a priestore, ako špecifický materiálny objekt.
2. Je schopný sa reprodukovať, či už sám alebo s pomocou hostiteľského organizmu.
3. Obsahuje informáciu, pomocou ktorej je vybudovaný.
4. Obsahuje metabolizmus premeny jedného druhu hmoty na iný spojený s produkciou energie.
5. Funkčne interaguje s okolím.
6. Jeho časti sa navzájom funkčne dopĺňajú.
7. Je stabilný v meniacom sa prostredí.
8. Je schopný sa vyvíjať.
9. Rastie.

Živé systémy majú vnútornú štruktúru vykazujúcu niekoľko základných vlastností:

- Absenciu striktného centrálného riadenia
- Čiastočnú autonómiu nižších podštruktúr
- Vysokú úroveň prepojenosti medzi podštruktúrami
- Nelineárne vzájomné ovplyvňovanie podštruktúr v sieti

Pozitívne vlastnosti živých systémov:

- adaptabilita (v rámci učenia jedného živočícha, drobné "taktické" zmeny)
- vývoj (v rámci druhu, zmena génov alebo zamerania vývoja - od génov k adaptácii kultúry)
- odolnosť spôsobená redundanciou
- schopnosť narastania systému bez nutnosti meniť jeho základné vlastnosti (krdeľ vtákov alebo kobyliiek môže narastať rádovo bez nutnosti meniť systém správania sa - jediná topológia schopná neobmedzeného rastu a neriadeného učenia je sieť)

neodstrániteľné nedostatky:

- neoptimálnosť - vzhľadom na to, že je systém určený pre neustále sa meniace podmienky, neustále hľadanie výhodnejších ciest a kontrola podmienok znižuje jeho výkonnosť vtedy, keď sú podmienky stabilné a systém našiel optimum.
- nekontrolovateľnosť - prítomnosť "emergentného" správania vylučuje priame riadenie systému.
- nepredvídateľnosť
- dlhé a postupné budovanie systému - nutný vývoj potrebuje čas.

## Umelá inteligencia a agenti

|                                       |   |   |
|---------------------------------------|---|---|
| presne stanovené pravidlá             | × | komplexné prostredie s meniacimi sa podmienkami   |
| program inteligentný hneď od začiatku | × | od najjednoduchších jednotiek k emergentným javom |

“distribuovaná umelá inteligencia”:

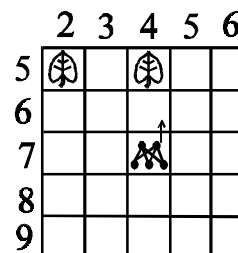
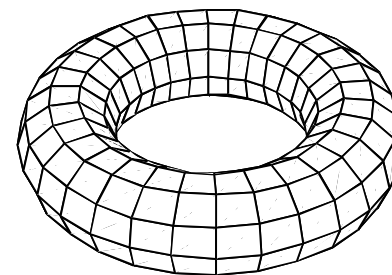
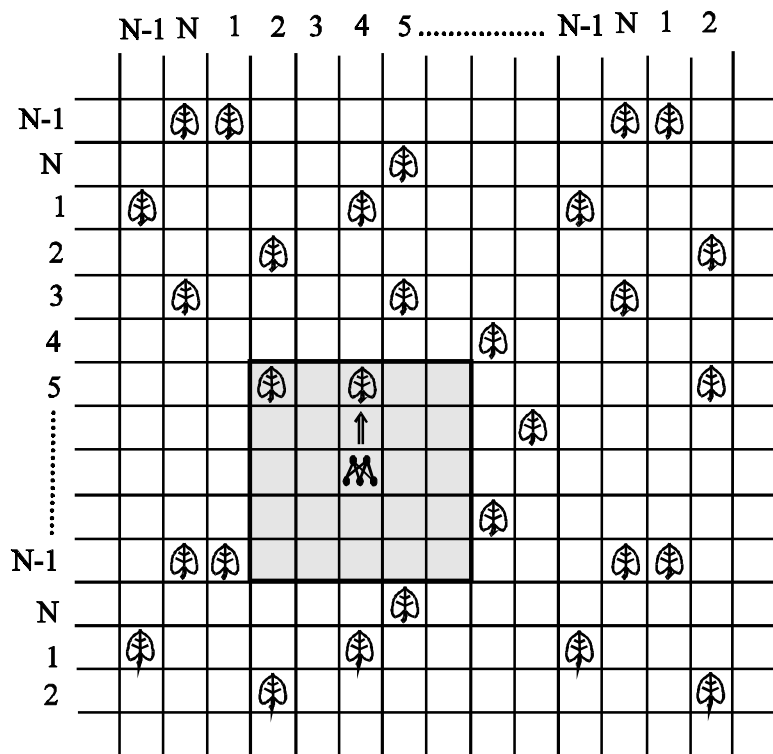
*Autonómny agent* je program, ktorý na základe informácií z prostredia ovplyvňuje vlastný stav a stav susedných agentov alebo prostredia samotného, buď individuálne alebo “v tímovej práci”. Agenti pracujú v operačnom systéme, databáze alebo v počítačovej sieti. Po počítačom nastavení pracuje samostatne.

Príklad: riadenie letovej prevádzky letiska alebo prevádzky továrne, kde každý stroj má svojho “agenta” starajúceho sa o dodávky energie, surovín a o odvoz hotových produktov.

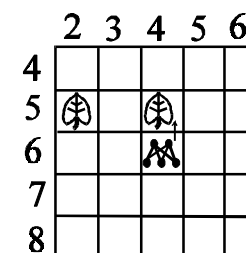
Počítačové *virusy* ako agenti

- teoreticky aj pozitívne, napríklad udržiavanie integrity databázy.

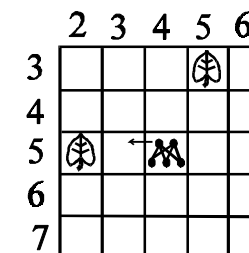
Simulátory umelého života: SimLife



1. krok

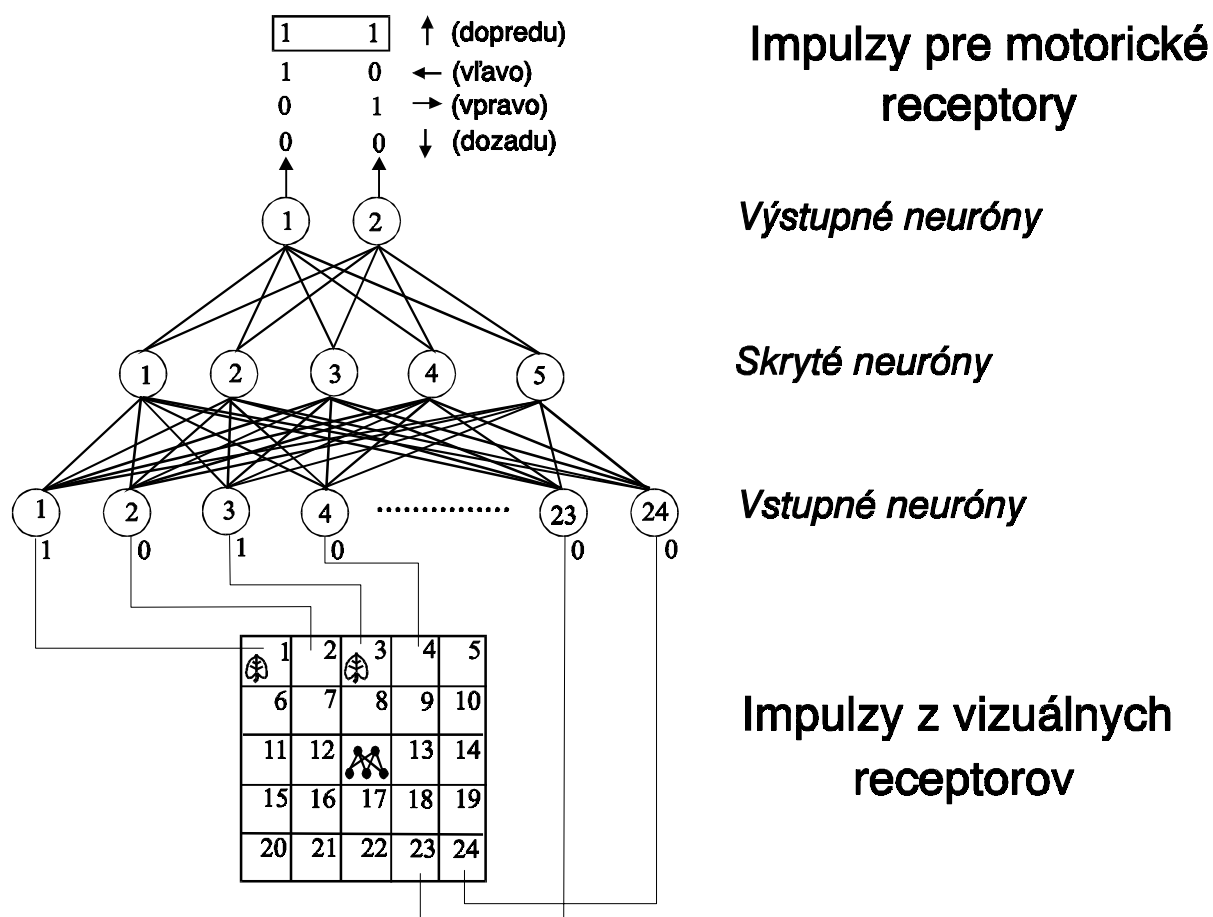


2. krok



3. krok

Organizmus riadený neurónovou sieťou na mriežke typu  $N \times N$ . Živí sa náhodne rozmiestnenými lístkami a má za cieľ pozbierať za svoj život (daný počtom krokov na susedné pole) čo najviac lístkov. Vníma iba svoje najbližšie (vytieňované) okolie. Musí určiť smer, kde je najviac najbližších lístkov. Pravouhlá mriežka je stočená do toroidu – pneumatiky.



Riadiacej jednotky predchádzajúceho organizmu. realizovaná trojvrstvou neurónovou sieťou. Vstupné neuróny získavajú signály z vizuálnych receptorov pre okolité políčka (0 pre neprítomnosť lístku, inak 1). Skryté neuróny pomáhajú spracovať prijatú informáciu pre výstupné neuróny, ktoré rozhodujú o smere budúceho pohybu organizmu. Spoje medzi neurónmi sú ohodnotené váhami, ktoré tak ovplyvňujú “inteligenciu” neurónovej siete. Najúspešnejšie organizmy sa množia a vymieňajú si vzájomne časti “dedičnej informácie” - váhy medzi neurónmi.



# Evolúcia pravidiel a systémy Aristida Lindenmeyera (1968)

modifikácia formálnej gramatiky, produkčné pravidlá používané na modelovanie rastu a rozvoja organizmov - použitie

- simulátory, morfogénézia paprade
- počítačová animácia

Tvorba "kríka", kde L-systém je daný nasledovnými pravidlami:

Štartovný bod F

Produkčné pravidlo  $F \rightarrow F [+F][-F]$

F znamená nakresli čiaru (začíname kolmou čiarou z počiatočného bodu so súradnicami 0,0 do koncového bodu so súradnicami 0,10)

[ znamená zapamätať si súradnice koncového bodu a zodpovedajúcu zmenu súradníc

$dx = x_{\text{koncový}} - x_{\text{počiatočný}}$ ,  $dy = y_{\text{koncový}} - y_{\text{počiatočný}}$

] znamená vrátiť sa na zapamätané súradnice bodu a zodpovedajúce dx a dy

+ znamená otočiť sa doľava - nové súradnice:

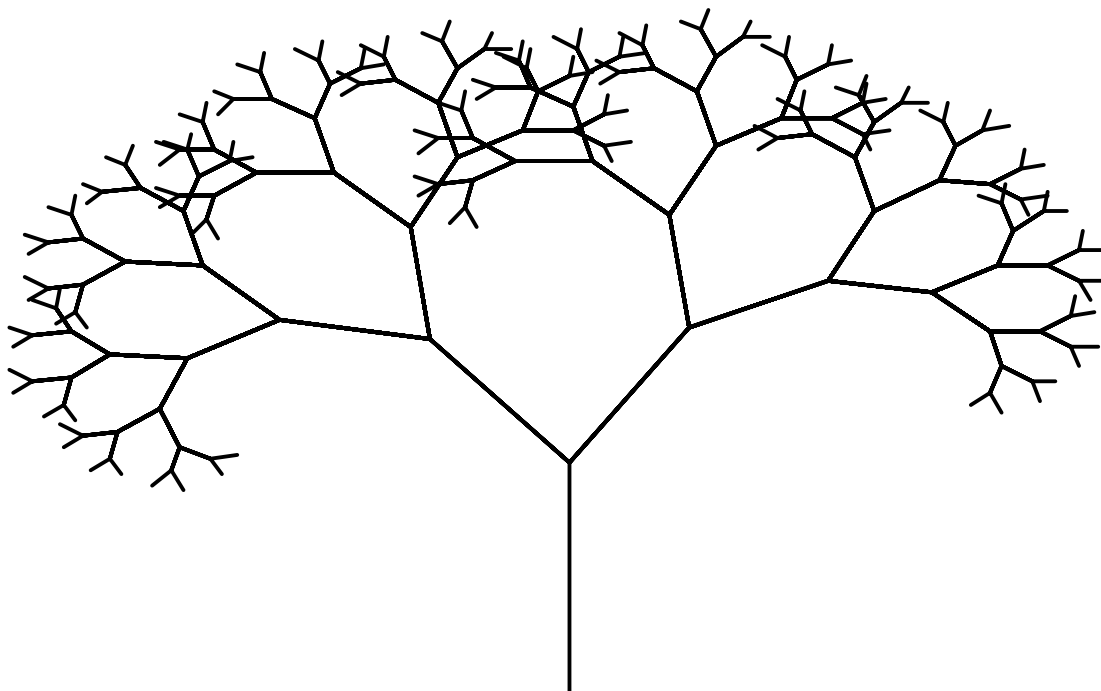
$x_{\text{koncový}} = x_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\cos(40^\circ) dx - \sin(40^\circ) dy)$

$y_{\text{koncový}} = y_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\sin(40^\circ) dx + \cos(40^\circ) dy)$

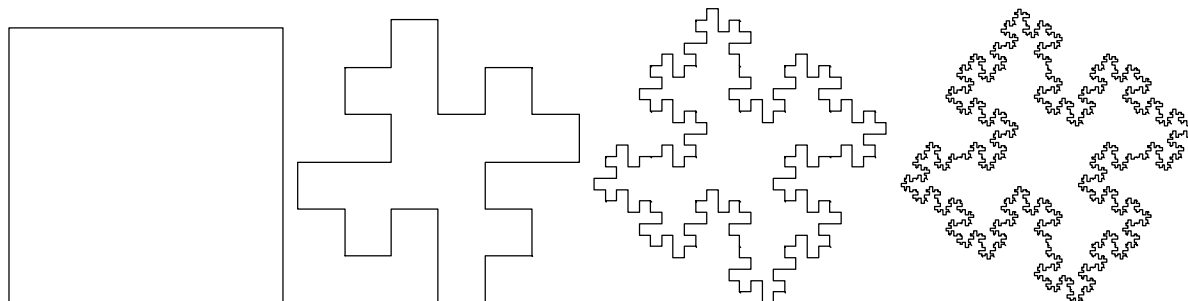
- znamená otočiť sa doprava - nové súradnice:

$x_{\text{koncový}} = x_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\cos(33^\circ) dx + \sin(33^\circ) dy)$

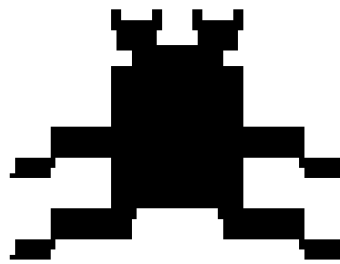
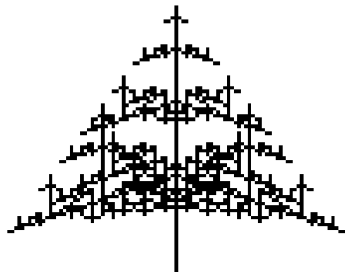
$y_{\text{koncový}} = y_{\text{počiatočný}} + 0.7 (\sin(33^\circ) dx - \cos(33^\circ) dy)$



Lindenmayerov systém  $F \rightarrow F [+F][-F]$  interpretovaný uvedenými pravidlami a rovnicami, s rekúziou do úrovne 7.



Lindenmayerov systém pre štartovný bod  $F+F+F+F$ , produkčné pravidlo  $F \rightarrow F+F-F-FF+F+F-F$ . Uhol otáčania bude  $90^\circ$  a zmenšenie sa použije iba pri rekúzii. Výsledkom je kvadratický ostrov Helgy Kochovej, čo je fraktálová štruktúra (pre zobrazený odsek bez daného merítka nie je možné povedať, aký je veľký).



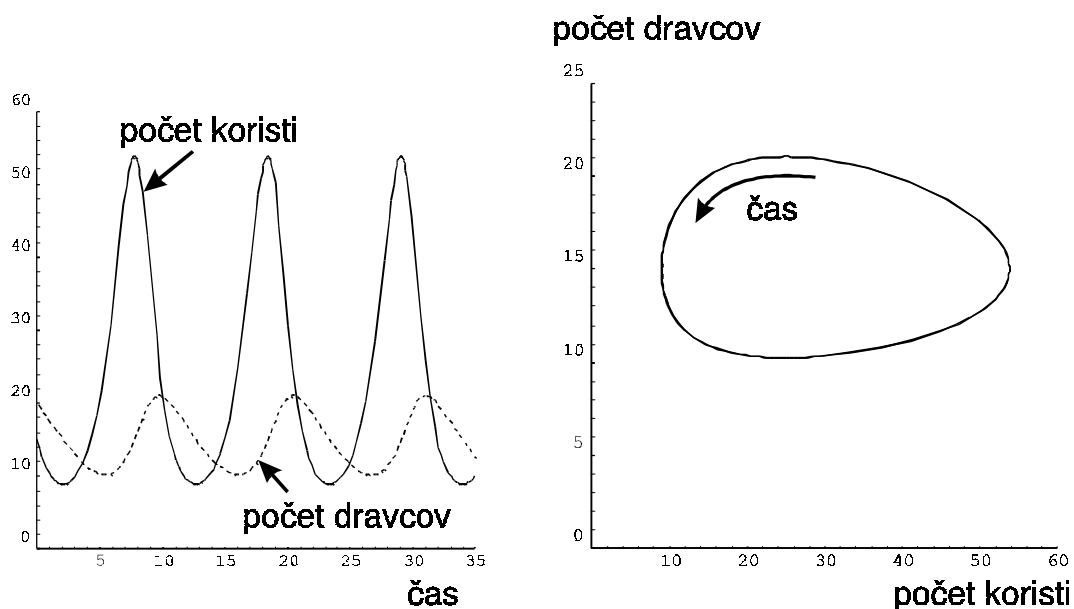
Richard Dawkins: kniha "Blind Watchmaker" – (1987) tvorba "bytostí" volaných `Biomorph'  
Strom, žaba a samuraj, obrázky vytvorené algoritmom založeným na rekurzii a pravidlách podobných Lindenmayerovým systémom, kde sú ale pravidlá zakódované chromozómami, ktoré prechádzajú drobnými zmenami. Užívateľ má napr. na výber z 8 možných obrázkov, a ten, ktorý si vyberie, tvorí základ pre ďalších 8 obrázkov vytvorených pomocou náhodne pozmenených pravidiel. Po niekoľkých desiatkach cyklov výberov sa potom dajú získať zaujímavo vyzerajúce obrázky.

Karl Sims (1994): genetický systém na vývoj "umelých bytostí" zložených z blokov, spojených kĺbmi, poháňaných svalmi a riadených "obvodmi". Tieto umelé bytosti boli potom testované na schopnosť pohybovať sa po povrchu, skákať, plávať a pod.

## Evolučná dynamika a modelovanie krdľa

vzťah dravec - korisť, vyjadrený Lotkovou a Volterrovou rovnicou (1925-1926)

oscilácie u počtov ulovených králikov a rysov vo viac ako storočie starých záznamoch Hudson's Bay Company, kedy sú maximá počtov ulovených králikov vzdialené od seba vždy desať rokov, nasledované maximami počtov ulovených rysov



$N_1(t)$  korisť,  $N_2(t)$  dravci v čase  $t$

bez dravcov sa korisť rozmnožuje rýchlosťou  $r_1$

bez koristi dravci hynú rýchlosťou  $r_2$

$b_1$  schopnosť dravcov požírať korisť

$b_2$  vplyvu koristi na rozmnožovanie dravcov.

$$dN_1(t)/dt = N_1(r_1 - b_1 N_2), \quad dN_2(t)/dt = N_2(-r_2 + b_2 N_1)$$

$$r_1 = 1.5, \quad b_1 = 0.1 \quad r_2 = 0.25 \quad b_2 = 0.01$$

$$\text{a } N_1(0) = 15 \text{ a } N_2(0) = 20$$

Verhulstova (r. 1838) a Pearlova (r. 1920)  
logistická rovnica s inhibičným efektom

$$dN / dt = N(r - sN)$$

kedy  $r = a_1 - a_2$  a  $s = b_1 + b_2$  pre kladné konštanty  $a_1$ ,  
 $a_2$ ,  $b_1$ ,  $b_2$  a môžeme písať

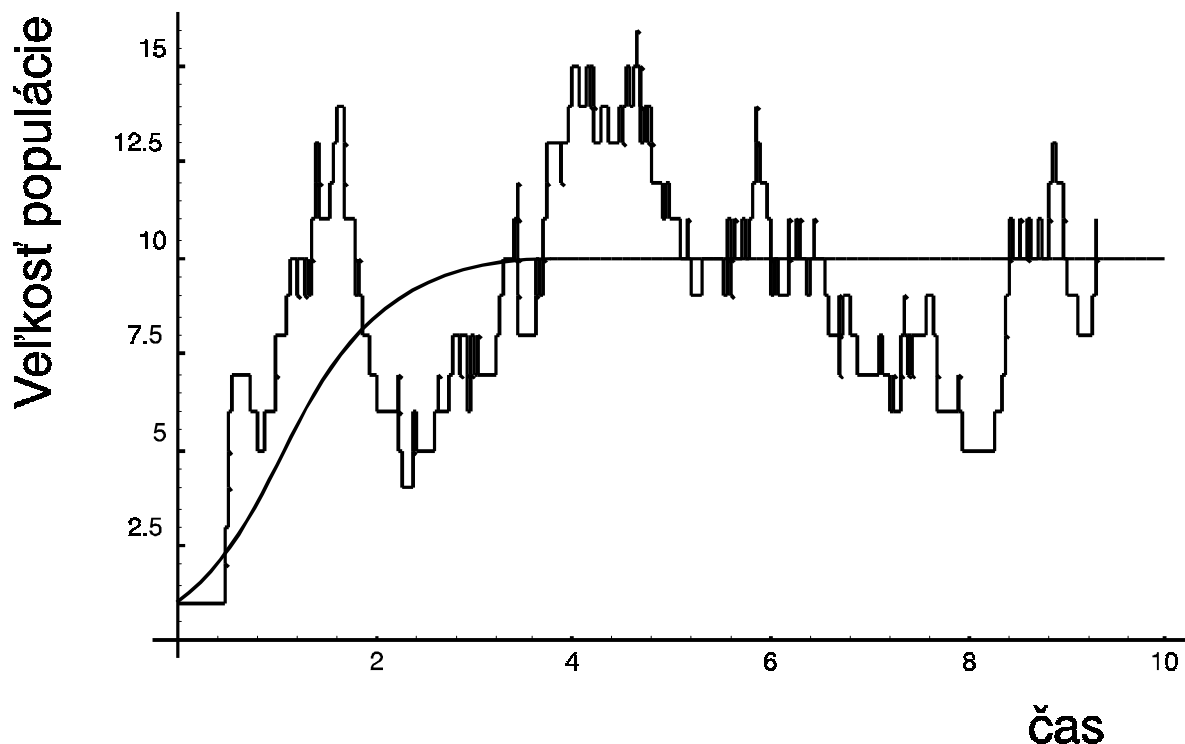
rýchlosť rastu populácie  $B(N) = N(a_1 - b_1N)$

a vymieranie  $D(N) = N(a_2 + b_2N)$

s medzičasom  $S$  pre náhodnú premennú  $Y_2$  s  
uniformnou distribúciou z intervalu  $(0,1)$ ,

$$s = \frac{-\ln Y_2}{B(N) + D(N)}$$

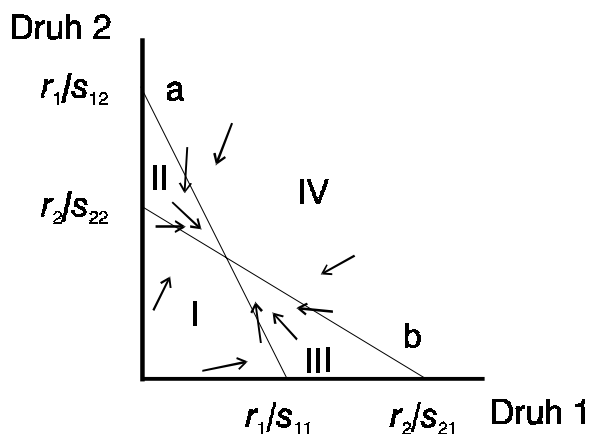
Stochastický model:



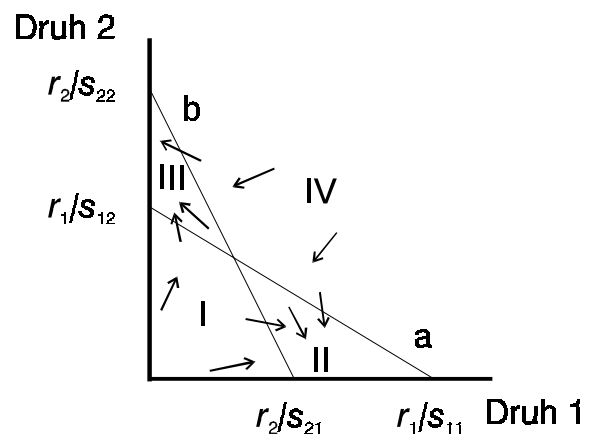
## Súťaženie dvoch druhov:

$$\begin{aligned} dN_1/dt &= N_1(r_1 - s_{11}N_1 - s_{12}N_2) \\ dN_2/dt &= N_2(r_2 - s_{21}N_1 - s_{22}N_2) \end{aligned}$$

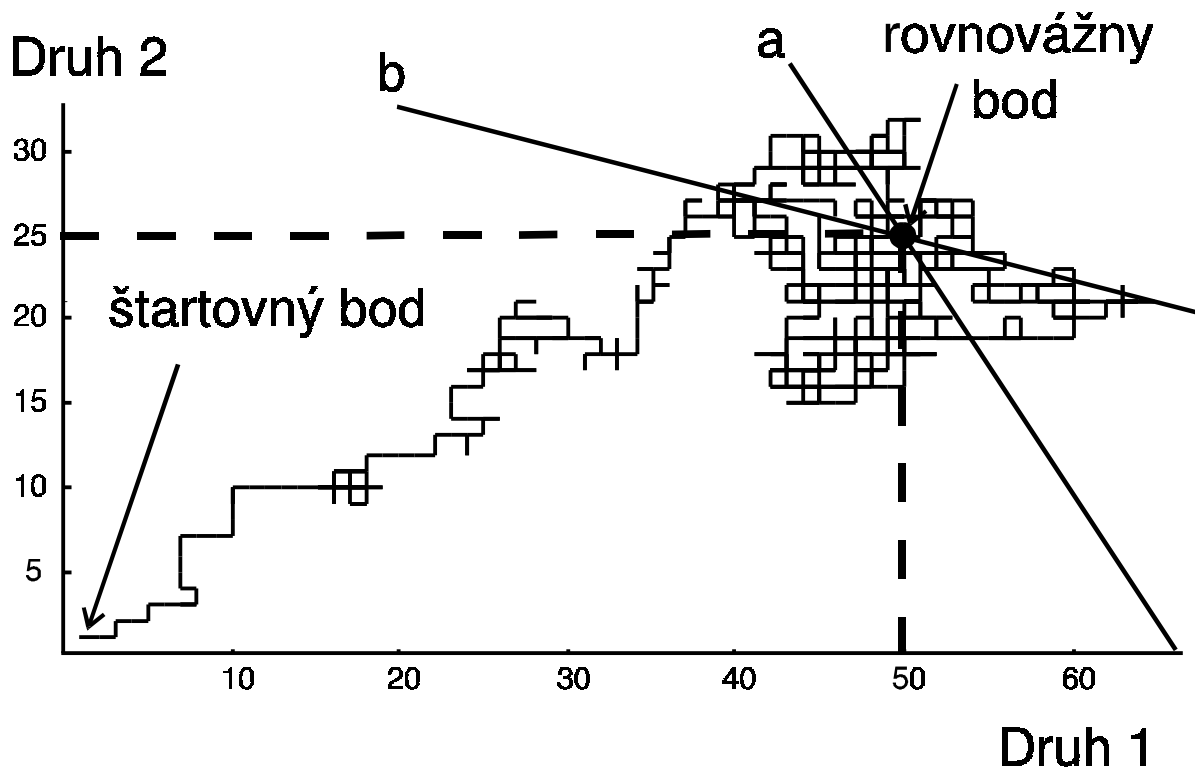
1. Keď  $r_1/r_2 > s_{12}/s_{22}$  aj  $s_{11}/s_{21}$ , potom druh 1 vyhráva.
2. Keď  $r_1/r_2 < s_{12}/s_{22}$  aj  $s_{11}/s_{21}$ , potom druh 2 vyhráva.
3. Keď  $s_{12}/s_{22} < r_1/r_2 < s_{11}/s_{21}$ , potom existuje stabilné rovnovážne riešenie
4. Keď  $s_{11}/s_{21} < r_1/r_2 < s_{12}/s_{22}$ , potom existuje nestabilné rovnovážne riešenie.



stabilnú rovnováhu v  
prekrižení *a* a *b*



nestabilná rovnováhu v  
mieste prekriženia



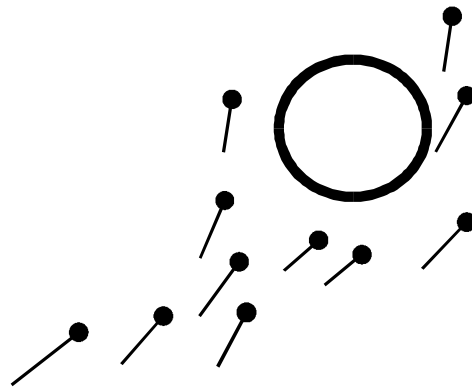
Modelovanie prvých 1000 zmien veľkostí populácií pri súťažení dvoch druhov. Populácie začínajú s veľkosťami  $N_1=N_2=1$ . Klukatou čiarou sú zobrazené postupné zmeny veľkostí populácií, ktoré sa po približnom dosiahnutí rovnovážneho stavu “potulujú vôkol”. Obrázok odpovedá prvému diagramu stability z predchádzajúceho obrázku pre konštanty  $r_1=2.0$ ;  $s_{11}=0.03$ ;  $s_{12}=0.02$ ;  $r_2=1.5$ ;  $s_{21}=0.01$ ;  $s_{22}=0.04$ .

Načo modelovať a nepoužiť analytické riešenie diferenciálnych rovníc? Stačí pridať priestorové vzťahy, t.j. umiestniť “živočíchy” na mriežku a diferenciálne rovnice prestávajú platiť.

## Správanie sa krdľa bez centrálného riadenia

Craig Reynolds (1987) základný model "vtáka", nazvaný "*boid*"

- vyhýbať sa kolízii s okolitými "vtákmi"
- prispôbiť rýchlosť okolitým "vtákom"
- snažiť sa držať sa blízko okolitých "vtákov"
- (môže sa pridať základný smer, ktorým vtáky letia, nutnosť vyhýbať sa prekážkam, pridať malé náhodné zmeny smeru a rýchlosti vtákov apod.)



Každý "vták" pritom vidí iba svojich najbližších susedov. Tieto základné vlastnosti sú dostačujúce na vytvorenie prirodzeného správania sa krdľa. Keď sa napr. objaví prekážka, krdel' sa bez akéhokolvek centrálného riadenia rozdelí na dve časti, ktoré sa po obletení prekážky spoja. Použité na realistické animovanie netopierov vo filmoch Batman sa vracia a Cliffhanger.



## Celulárne automaty

diskrétne dynamické systémy zložené z rovnakého typu "buniek", ktorých správanie je kompletne špecifikované ich momentálnym vlastným stavom a stavmi "buniek" v ich najbližšom okolí. Čas, priestor a stav systému je tu diskrétny. Bunky nemajú pamäť a sú rozložené na pravidelnej mriežke (jedno či viacrozmernej). Stavov všetkých buniek sa v priebehu jedného časového kroku menia súčasne.

Zákony zmien sú lokálne a uniformné. Na základe veľmi jednoduchých zákonov ale vznikajú veľmi zložité štruktúry a vzory správania vyšších celkov (zložitých vzorov).

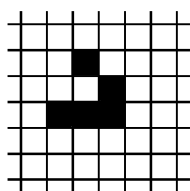
- Stanislaw M. Ulam v Los Alamos (1945-1950?)
- autoreplikujúce organizmy, nutné na evolúciu: John von Neumann 200 000 buniek, 29 stavov
- najpopulárnejším celulárnym automatom je hra "Život" (Life), navrhnutá r. 1970 Johnom Hortonom Conwayom, mladým matematikom z Cambridge. Conway zjednodušil počet možných stavov bunky z Von Neumannových 29 iba na 2: bunka mohla byť alebo živá, alebo mŕtva.

Pravidlá pre „Life“:

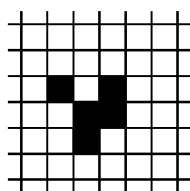
1. STABILNÝ STAV: Keď má daná bunka dvoch živých susedov, ostáva v rovnakom stave ako predtým aj v ďalšej generácii.

2. RAST: Keď má bunka presne troch živých susedov, bude v ďalšej generácii živá bez ohľadu na jej momentálny stav.

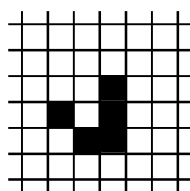
3. SMRŤ: Keď má bunka počet susedov 0, 1, 4-8, bude v nasledujúcej generácii "mŕtva". Bunka teda "zomrie na podchladenie alebo na prehriatie, keď má málo alebo veľa susedov".



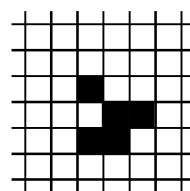
Čas 1



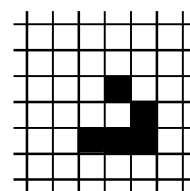
Čas 2



Čas 3



Čas 4

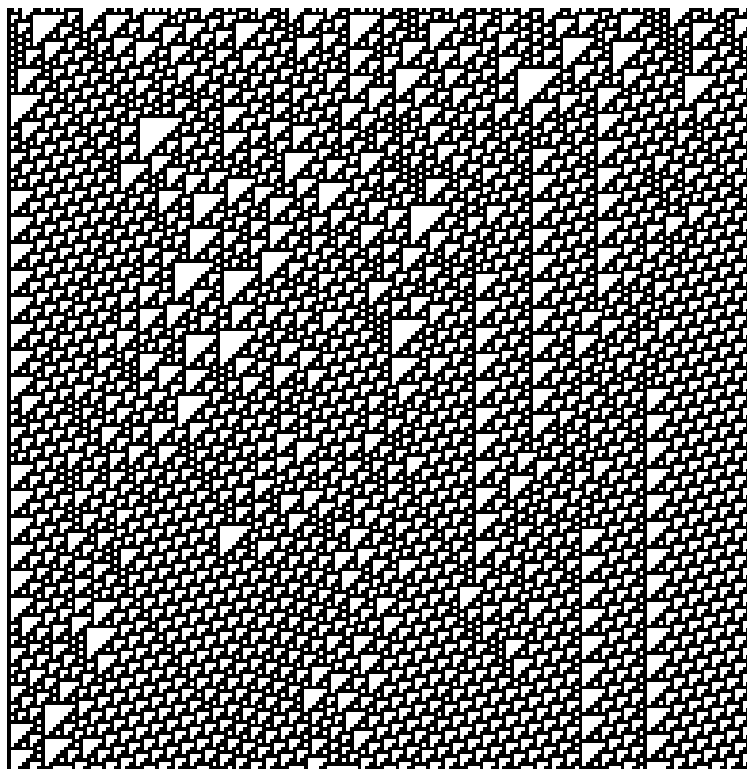


Čas 5

Štruktúra "kízák" zo hry "Life" (primitívneho celulárneho automatu). Táto štruktúra sa vždy po štyroch krokoch opakuje, pričom sa pohybuje vpravo dolu. Existuje veľa takýchto objektov, ktoré vzájomnými zrážkami môžu zanikať alebo tvoriť iné druhy štruktúr. "Kízák" si možno predstaviť ako bit 1 (jeho neprítomnosť ako bit 0) a smer jeho pohybu ako drôt. Z takýchto a podobných štruktúr potom možno zostaviť celý virtuálny počítač.

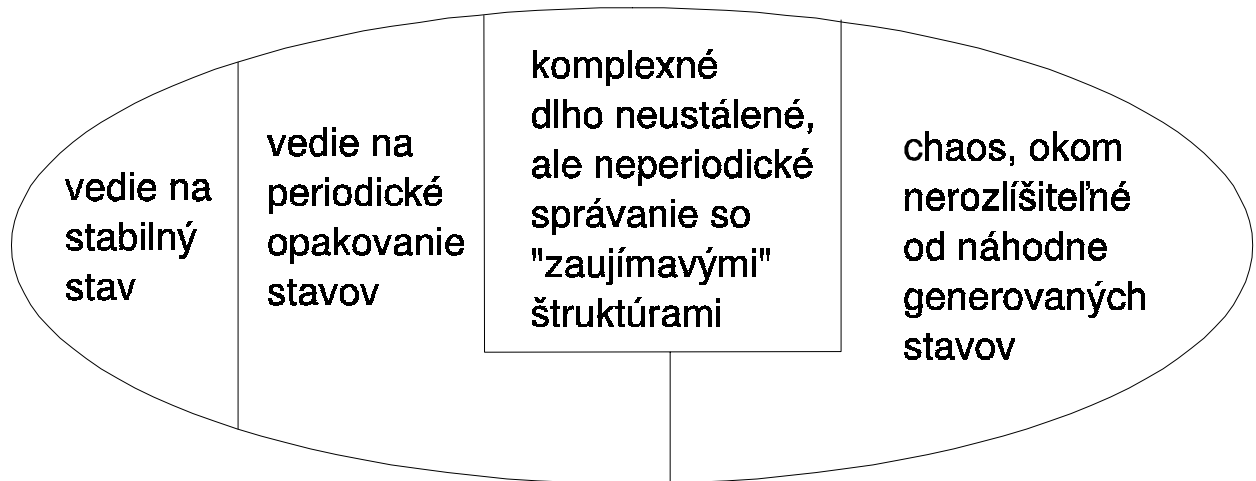
## Jednorozmerný celulárny automat

Bunky sú iba v jednom riadku (formálne spojenom do cyklu) a možné stavy buniek 0 = biela, a 1 = čierna. Prechodové pravidlá: momentálny stav bunky (v prostriedku) a jej ľavého a pravého suseda.  $1,1,1 \Rightarrow 1$ ;  $1,1,0 \Rightarrow 0$ ;  $1,0,1 \Rightarrow 0$ ;  $1,0,0 \Rightarrow 0$ ;  $0,1,1 \Rightarrow 1$ ;  $0,1,0 \Rightarrow 0$ ;  $0,0,1 \Rightarrow 0$ ;  $0,0,0 \Rightarrow 1$ . Počiatok je generovaný náhodne. Podobné systémy sa používajú na modelovanie fibrilácií srdca alebo oscilačných chemických reakcií, a na odpoveď, prečo zložité systémy ako sú živé organizmy môžu vzniknúť vo svete, kde základným zákonom je zvyšovanie entropie. Dynamika zmien riadených informáciou prevzala kontrolu nad dynamikou zmien určených tokom energie.



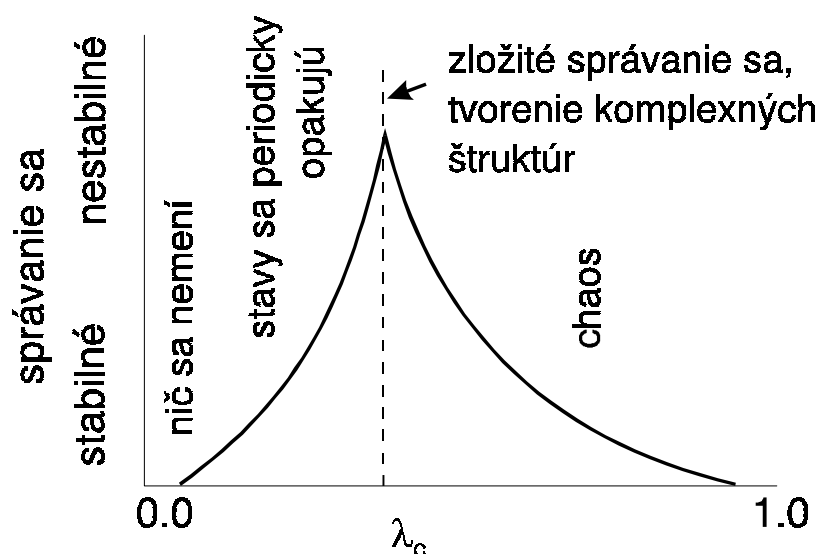
# Vznik komplexných javov

Stephen Wolfram (1986) - triedy:

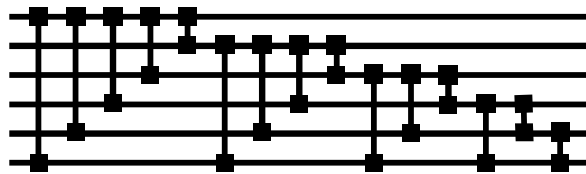


Christopher Langton (1986): parameter lambda. Nech počet pravidiel funkcie, ktoré vedú k neaktívnemu stavu, je  $n$ . Nech ostatných  $K^N - n$  prechodových pravidiel je vybraných náhodne

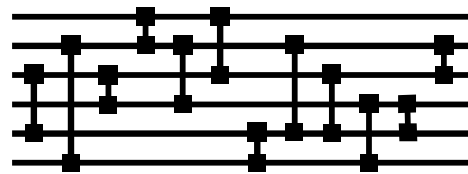
$$\lambda = \frac{K^N - n}{K^N}$$



## Kooperácia alebo súťaženie?



Bublínkové triedenie



Výsledok evolúcie

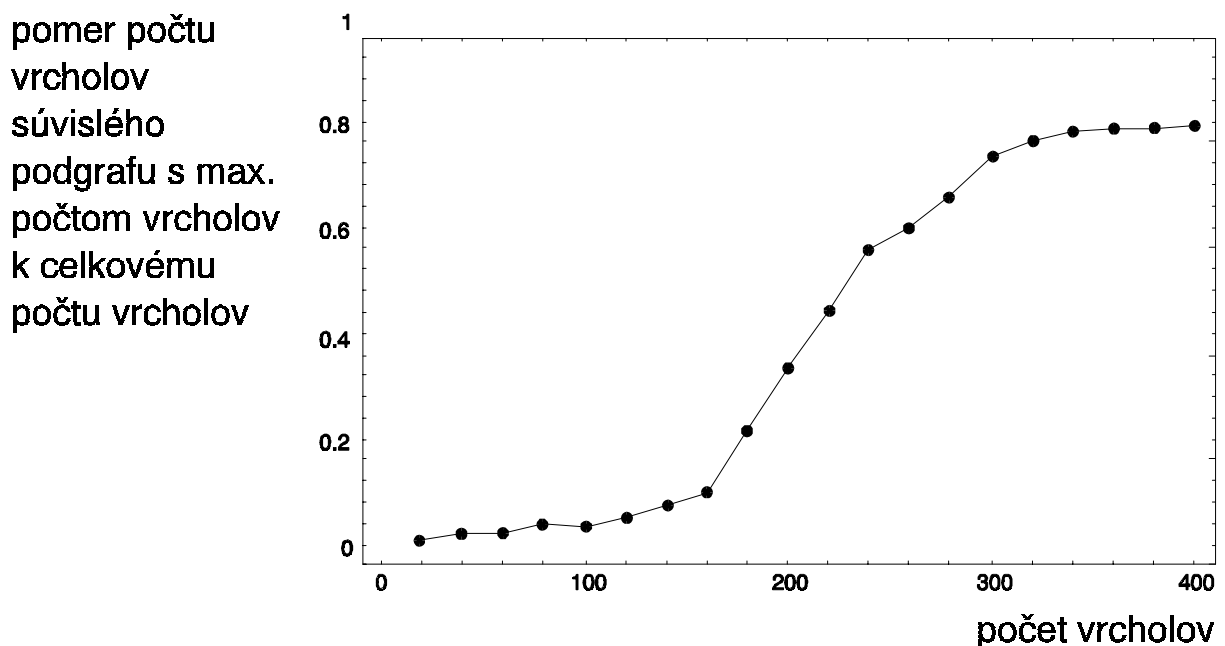
Korektné siete na triedenie sady čísel podľa veľkosti. Bublínkové triedenie dokáže porovnať 6 čísel s použitím 15 porovnaní, zatiaľ čo jednej z minimálnych korektných sietí napravo stačí iba 12 porovnaní. Takýchto minimálnych korektných sietí existuje viac (môžeme napríklad prehodiť prvé dve porovnaná).

Koevolúcia: Hillis (založil firmu Thinking Machine, vyrábajúcu počítače Connection Machine - 65536 procesorov) a Ollson nechali (1991) vyvíjať siete ako jeden „druh“ a zoznamy ako druhý „druh“, teda „dravca“, s vynikajúcimi výsledkami. 16 čísel pomocou povedzme 64 porovnaní by vyžadovalo vyskúšať  $10^{154}$  sietí a každú pre  $10^{13}$  zoznamov

## Vznik života evolúciou neživého

Virtuálny svet **Toma Raya** (1992) z University of Delaware nazvaný *Tierra* (jazyk 32 5bitových inst., samoreprodukujúce sa programy súťažia o CPU a pamäť)+**Christopher Adami** systém *Avida* na mriežke

**Stuart Kauffman** (1987) zo Santa Fe: procesy samoorganizácie sietí, “zapínanie” génov pri diferenciácii buniek, imunitný systém, modelovanie *vzniku života z hypercyklov reakcií aminokyselín* v “prebiotickej polievke”.



Generácia náhodných grafov s rovnakou pravdepodobnosťou výskytu hrany (reakcie) medzi dvoma vrcholmi (zlúčeninami). Pri určitej hranici rôznorodosti zlúčenín sa ich väčšina zapojí do siete reakcií - nastáva tvorba hypercyklov.

Knihy:

S. Levy. *Artificial Life: The Quest for a New Creation*. Pantheon, New York, 1992.

Karl Sigmund: *Games of Life: Exploration in Ecology, Evolution and Behaviour*. Oxford University Press, New York, 1993.

C. Langton: *Artificial Life: An Overview*. MIT Press, Cambridge, MA, 1995.

Konferencie:

*Artificial Life*

*European Conference on Artificial Life*

*From animals to animats: International Conference on Simulation of Adaptive Behavior*

Centrá:

Santa Fe, Los Alamos, Massachusetts Institute of Technology, Japonsko

Časopisy:

*The Artificial Life Journal*, MIT Press

*Adaptive Behavior*, MIT Press

*Evolutionary Computation*, MIT Press

*Complex Systems*, published by: Complex Systems Publications

Web: <http://alife.santafe.edu/alife/index.html>