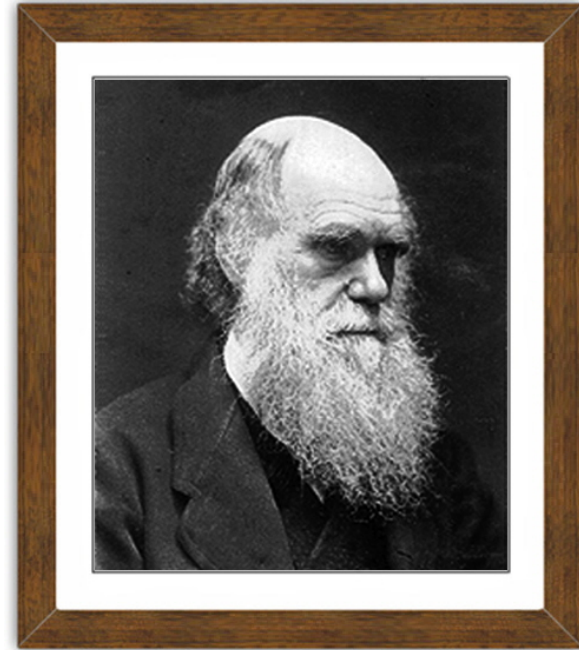
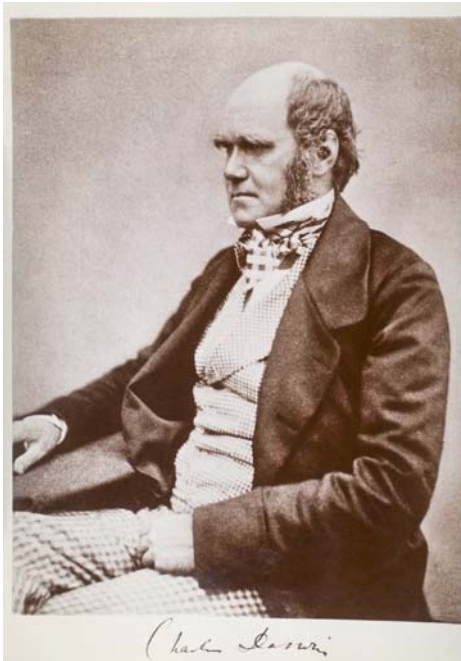


# Darwinovská evolúcia ako algoritmus (Univerzálny darwinizmus)

Vladimír KVASNIČKA  
FIIT STU, Bratislava

**Abstrakt.** V prednáške je prezentovaná moderná paradigma darvinovskej evolúcie, ktorá ju chápe ako univerzálny optimalizačný algoritmus, aplikovateľný nielen v biologických vedách, ale aj v rôznych oblastiach tak exaktných, ako aj sociálnych a behaviorálnych vied.



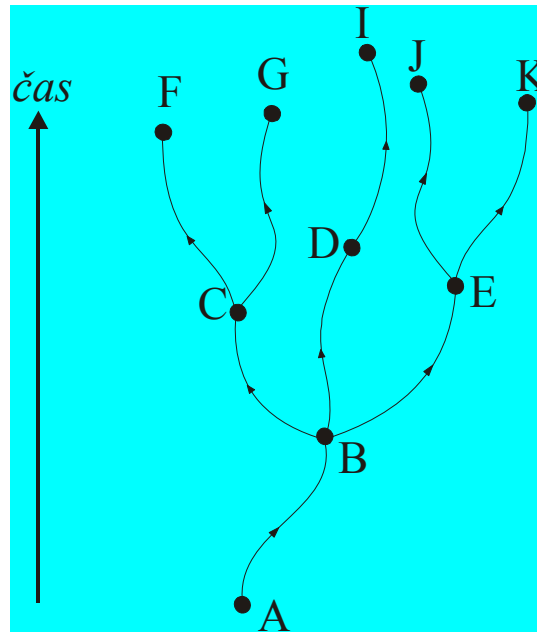
Charles Darwin (**1809** – 1882)

200. výročie narodenia C. Darwina

## Úvodné poznámky

Evolučná teória spočíva v jednoduchej myšlienke, že život je v čase premenlivý a mladšie formy života nasledujú za staršími formami. Podľa filozofujúceho biológa Mayra, koncepcia evolúcie spočíva v kombinácii nasledujúcich piatich princípov:

1. Živé organizmy sú *časovo premenné*, podliehajú evolučným zmenám.
2. Evolučné zmeny majú charakter *vetvenia*.
3. Nové druhy vznikli tak, že *populácia sa rozštiepila* na izolované podpopulácie, ktoré potom navzájom evolučne divergovali za vzniku nových druhov.
4. Evolučné zmeny sú *postupné – graduálne*.
5. Mechanizmom adaptívnej zmeny je *prírodný výber*.



Schematické znázornenie vzniku nových druhov (označených písmenami A, B, ...) v priebehu evolúcie. Druh A je predchodcom druhu B, druh B je spoločným predchodcom nových druhov C, D a E. Priebeh evolúcie sa dá názorne reprezentovať pomocou tohto „*stromu života*“.

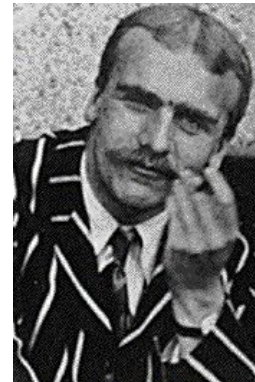
- Darwin bol evolučným gradualistom, ktorý veril v nahromadenie (akumuláciu) malých zmien v priebehu dlhých časových úsekov, ktoré sú interpretované ako evolučná zmena.
- Toto jeho „gradualistické“ evolučné presvedčenie bolo všeobecne prijaté až v prvej polovici 20. storočia hlavne zásluhou trojice matematikov – štatistikov Fishera, Wrighta a Haldanea, ktorý spojili populačnú genetiku s evolučnou teóriou za vzniku modernej evolučnej teórie nazývanej *neodarwinizmus*.



Sewall Wright



Ronald Fisher



John Haldane

- Dôležitosť izolácie populácie (Wright) vznikajúceho nového druhu zostala kontroverznou otázkou evolučnej teórie ešte o mnoho dlhšie. Tento pohľad na mechanizmus vzniku nových druhov sa stal všeobecne akceptovaným až zásluhou prác Mayra z polovice 20. storočia.

## **Súčasná evolučná biológia stojí pred dvoma dôležitými problémami, ktoré sa snaží vysvetliť**

- (1) *Neobyčajná rôznorodosť* foriem života na našej planéte. Až darwinizmus poskytol vysvetlenie tejto skutočnosti, kde vedľa seba existuje mnoho druhov, ktoré sú morfológicky zásadne odlišné a ktoré na prvý pohľad nemajú medzi sebou skoro nič spoločné.
- (2) *Adaptácia*, štruktúrovaná zložitosť organizmov, ich adaptácia na životné prostredie, je rovnako prekvapujúca ako rôznorodosť organizmov. Zmyslové orgány sú klasickým príkladom zložitej a jemne naladenej adaptácie. Medzi najväčšie úspechy darwinizmu patrí prírodovedecké vysvetlenie adaptácie pomocou prírodného výberu založeného na prežívaní lepšie prispôsobených organizmov (s väčším fitness) a dedení získaných vlastností.

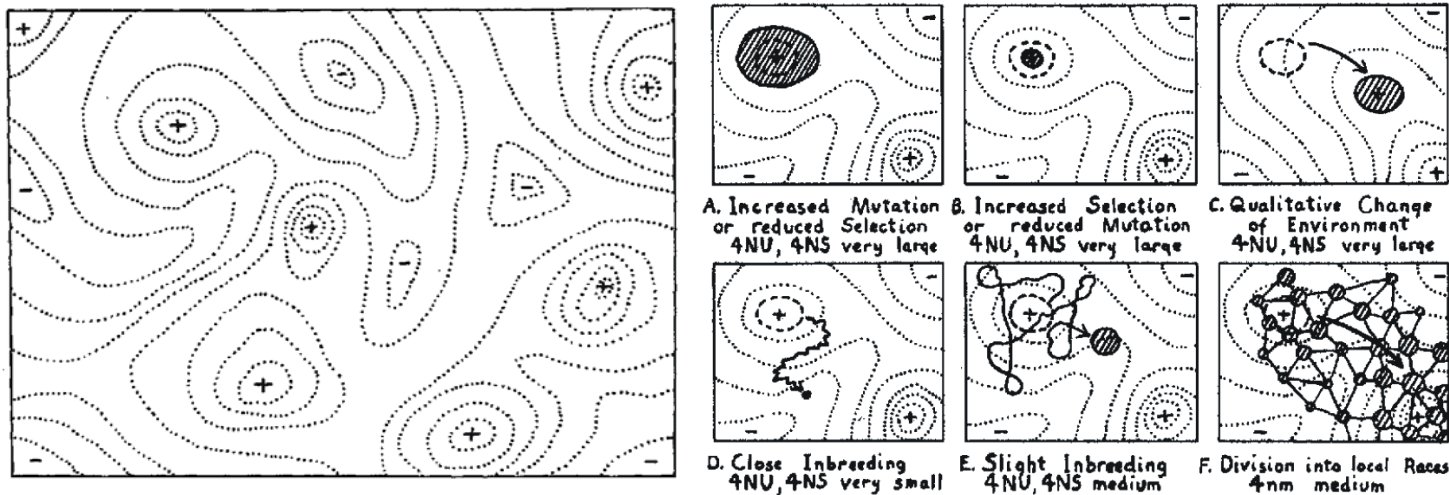
## Pochybnosti

- Určité pochybnosti pri akceptovaní Darwinovej evolučnej teórie neustále pretrvávajú v súvislosti s vysvetlením mechanizmov vzniku nových zložitostí. Tieto zložitosti majú komplexnú štruktúru, pričom ich architektúra je obvykle ireducibilného charakteru, t.j. nemôžeme odstrániť ani jeden element štruktúry bez straty funkčnosti celej zložitosti.
- Evolučný vznik nových kvalít, nových zložitostí, je obvykle sprevádzaný aj veľkou prestavbou genotypu organizmu, zmenou jeho modulárnej štruktúry a interakcie jednotlivých modulov medzi sebou. Gradualizmus klasického darwinizmu (aj neodarwinizmu) vychádza implicitne z predpokladu, že štruktúra genotypu je nemenná, môže sa meniť len zložením jednotlivých alel genotypu, bez zmeny jeho modulárnej štruktúry a pod. Tento problém stojí pred moderným darwinizmom ako dôležitá neriešená úloha, ktorej riešenie už bude vyžadovať úzku spoluprácu s informatikmi modelujúcimi *in-silico* evolúciu. *Evolučný nárast zložitosti je formálne zložitý problém, ktorý sa nedá riešiť len na verbálnej kvalitatívnej úrovni, ale vyžaduje spoluprácu s teoretickými biológmi a informatikmi, ktorí sa venujú počítačovým simuláciám evolúcie.*

## Wrightov pohľad na evolúciu ako na optimalizáciu

V prírodnom výbere má dominantné postavenie koncepcia *fitnes* organizmov, ktorý je špecifikovaný ako relatívna schopnosť prežitia a reprodukovania sa v danom *prostredí* a v danej *populácii*. Vo všeobecnosti, *fitnes* je chápaný nielen ako atribút genotypu ale aj populácie. Vlastnosti určujúce *fitnes* sa aspoň čiastočne prenášajú z rodičov na potomkov, t.j. sú zafixované v genotype jedincov populácie. Potomkovia rodičov s väčším *fitnes* budú početnejší a taktiež aj "silnejší" ako potomkovia "slabších" rodičov.





A

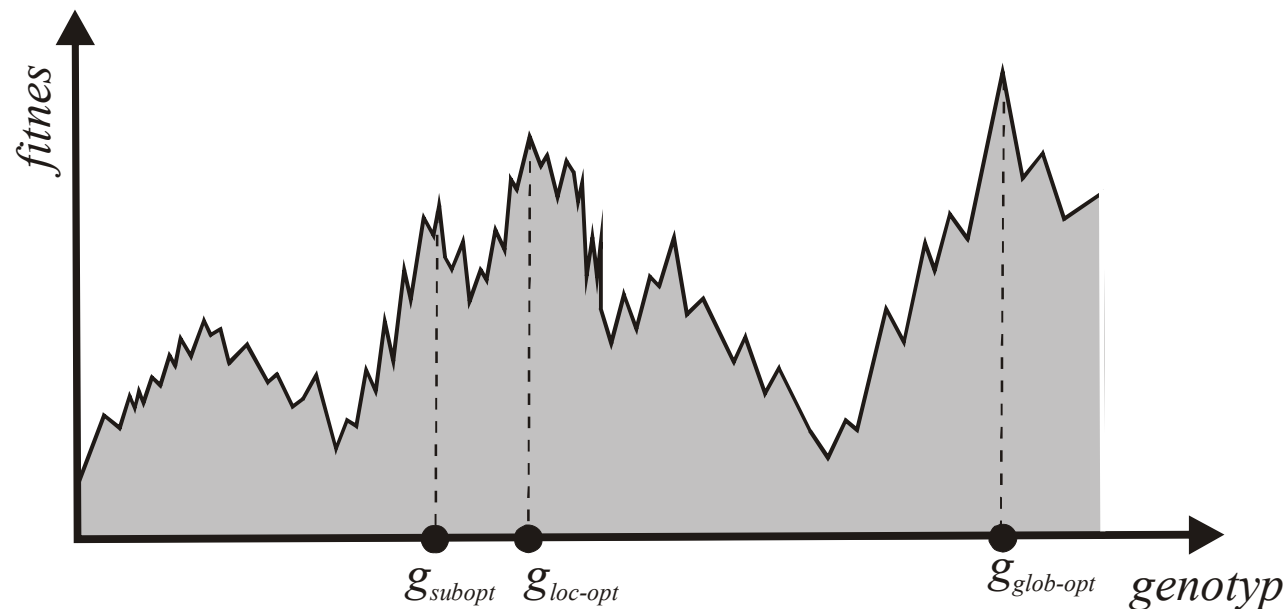
B

Jeden z najslávnejších obrázkov neodarwinizmu, ktorý pochádza od amerického populačného genetika a evolučného biológa Sewalla Wrighta. (A) Znárodňuje povrch fitness funkcie obsahujúci množstvo lokálnych extrémov (miním a maxim). Evolúciu charakterizoval ako adaptívny proces (v matematickej terminológii "optimalizačný proces"), kde genotyp populácie je adaptovaný tak, že dosiahne lokálne (snáď aj globálne) optimum – maximum na povrchu fitness funkcie. (B) Wright navrhoval rôzne mechanizmy, ako prekonať hlboké údolia medzi dvoma maximami. Svoju pozornosť v tomto smere sústredil hlavne na možnosť genetického driftu malej populácie, ktorá je dočasne izolovaná od hlavnej populácie a kde drift nadobúda význam s poklesom významu prirodzeného výberu. V takomto evolučnom „taviacom kotli“ dochádza k neočakávaným zmenám genotypu, čo sa môže prejaviť aj preskokom z jedného maxima na druhé maximum.

- Evolúcia populácie môže byť pomocou tohto obrázku interpretovaná ako pohyb populácie smerom k vrcholu s najväčším fitness.
- V dôsledku existencie mutácií, tento pohyb populácie na povrchu fitness má stochastický charakter.
- Práve vďaka mutáciám, organizmy populácie majú šancu „preskúmať“ väčšiu oblasť na povrchu fitness a tak potenciálne dosiahnuť v procese evolúcie globálne maximum na povrchu fitness.
- Evolučný proces môžeme charakterizovať ako *optimalizačný proces*. Formálne túto skutočnosť môžeme vyjadriť pomocou diskretného optimalizačného problému

$$\mathbf{g}_{opt} = \arg \max_{\mathbf{g} \in \{a,b,\dots\}^n} f(\mathbf{g})$$

- Evolučným cieľom organizmov je optimálna adaptácia v danom prostredí. Vlastnosti povrchu fitness (extrémna multimodálnosť) určujú ako ťažko sa požadované optimálne riešenie nájde „prirodzeným“ evolučným procesom.
- Wright formuloval aj ciele evolúcie takto „*Ústredným problémom evolúcie je navrhnuť taký mechanizmus, ktorým organizmy môžu nájsť spojitú cestu z nižšie položeného vrcholu na vyššie položený vrchol*“.



## Hollandov genetický algoritmus

- Genetické algoritmy boli navrhnuté Johnom Hollandom počiatkom 70-tych rokov minulého storočia.
- GA sa stali jednou z najbúrlivejšie rozvíjajúcich sa oblastí informatiky a umelej inteligencie.
- Možno konštatovať, že spolu s neurónovými sieťami tvoria jadro novovznikajúcej oblasti nazývanej *počítačová inteligencia*, ktorá je schopná riešiť praktické inžinierske problémy z informačných technológií, ktoré vyžadujú vysoký stupeň „inteligencie“. V tejto podkapitole ukážeme základné princípy genetických algoritmov.

- Genetický algoritmus nemanipuluje priamo so živými organizmami, ale s ich genetickou reprezentáciou.
- Pôvodný Hollandov názov pre túto reprezentáciu bol „chromozóm“, žiaľ táto pôvodná terminológia vyvolávala medzi biológmi rôzne asociácie s čisto biologickým významom tohto termínu, ktoré nesúviseli s problematikou genetického algoritmu, preto budeme tieto informačné entity nazývať „replikátory“.
- Postulujeme, že replikátory majú schopnosť sa rozmnožovať – replikovať, a to buď unárne (asexuálne) alebo binárne (sexuálne).
- Pri unárnej replikácii sa zúčastňuje procesu jeden replikátor - rodič, zatiaľ čo pri binárnej replikácii sa zúčastňujú procesu dva replikátory – rodičia.
- Rodičia (rodič) sú kvázináhodne vybraní z populácie v závislosti na ich fitness (replikátory s väčším fitness s väčšou pravdepodobnosťou vstupujú do replikácie) a produkujú nové replikátory - potomkov.

Budeme rozlišovať tieto tri zložky replikačného procesu:

- (1) *selekcia* rodičov, V prvom kroku binárnej replikácie sa vyberú pomocou stochastického operátora  $O_{\text{select}}$  z populácie  $P$  dva replikátory  $\mathbf{x}_1^{\text{old}} = O_{\text{select}}(P)$ ,  $\mathbf{x}_2^{\text{old}} = O_{\text{select}}(P)$  tak, že pravdepodobnosť ich výberu je úmerná ich fitness.
- (2) *replikácia* rodičov, pričom vznikajú potomkovia V druhom kroku použitím stochastického operátora replikácie  $O_{\text{repli}}$  z rodičov dostaneme potomkov  $\mathbf{x}_1^{\text{new}}$  a  $\mathbf{x}_2^{\text{new}}$ .
- (3) *návrat* potomkov do populácie.  $(\mathbf{x}_1^{\text{new}}, \mathbf{x}_2^{\text{new}}) = O_{\text{repli}}(\mathbf{x}_1^{\text{old}}, \mathbf{x}_2^{\text{old}})$

### Algoritmus 1.

$P :=$  náhodne vygenerovaná populácia replikátorov;

$t := 0$ ;

**while**  $t < t_{\max}$  **do**

**begin**  $t := t + 1$ ;

$Q := \emptyset$ ;

**while**  $|Q| < |P|$  **do**

**begin**  $x_1 := O_{\text{select}}(P)$ ;  $x_2 := O_{\text{select}}(P)$ ;

$(x_1', x_2') := O_{\text{repli}}(x_1, x_2)$ ;

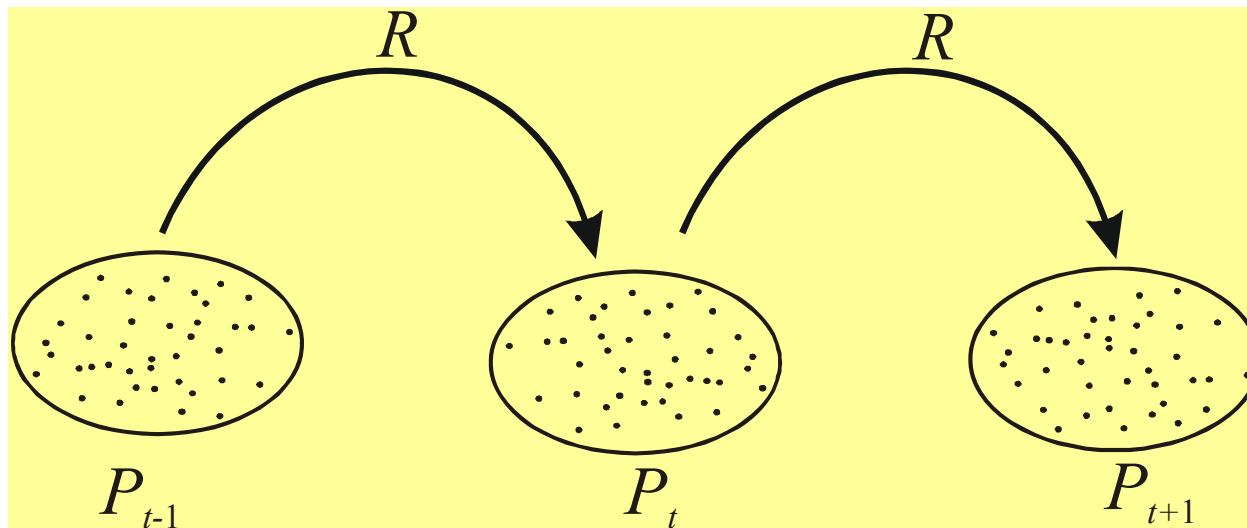
$Q := Q \cup \{x_1', x_2'\}$ ;

**end**;

$P := Q$ ;

**end**;

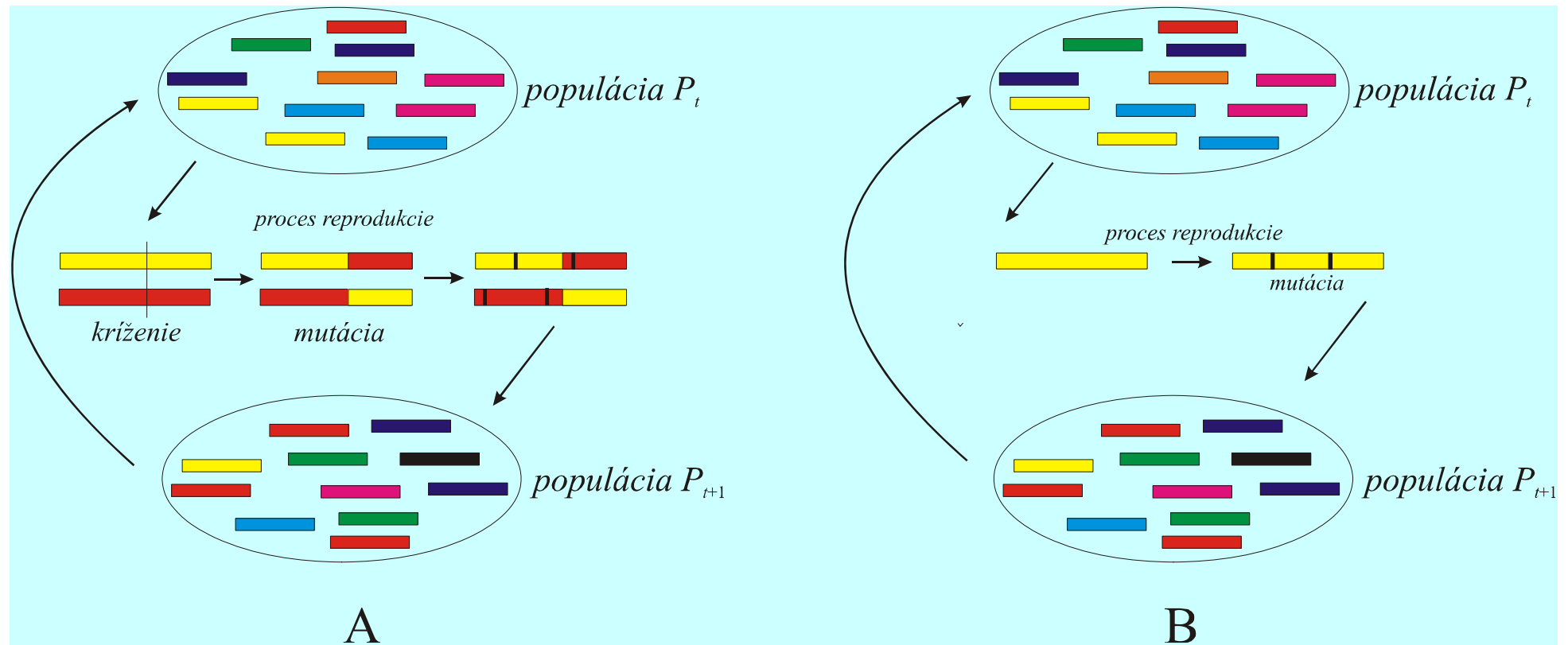
Schematické znázornenie rekurzívneho charakteru Darwinovej evolúcie, nová populácia sa vytvára z predchádzajúcej populácie aplikáciou stochastického operátora reprodukcie  $R$ .

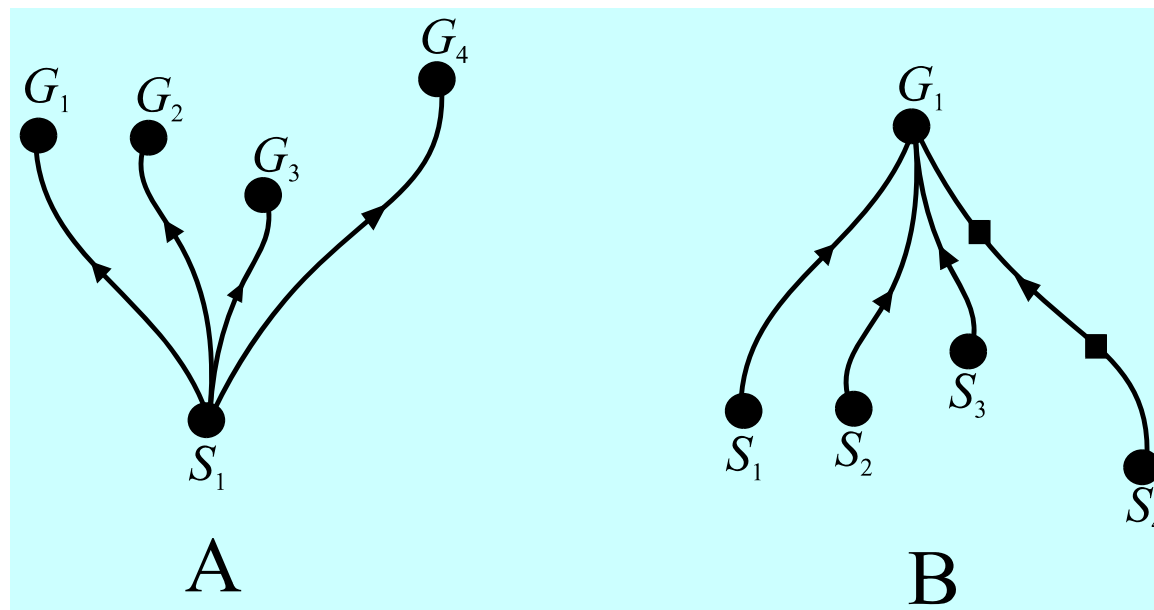


$$P_{t+1} = R(P_t)$$

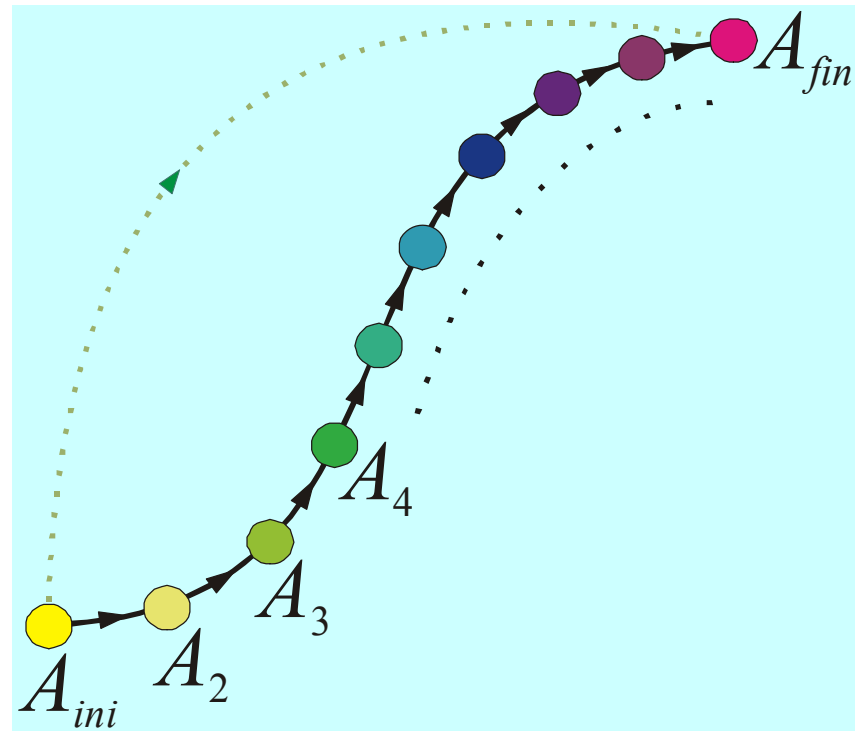


# Schematické znázornenie genetického algoritmu





- Diagram A znázorňuje prípad, v ktorom sledujeme rôzne priebehy evolúcie pre jeden východiskový bod  $S_1$ , v dôsledku stochastického charakteru evolúcie z tohto východiskového stavu môžeme dostať rôzne finálne stavy  $G_1$ ,  $G_2$ ,  $G_3$  a  $G_4$ .
- Diagram B odpovedá opačnej situácii, poznáme konečný stav evolúcie a hľadáme možné evolučné trajektórie s počiatočnými stavmi  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  a  $S_4$ , ktoré by viedli k danému finálnemu stavu  $G_1$ .
- Genetický algoritmus má silne stochastický charakter. V dôsledku existencie náhodných mutácií, kvázináhodného výberu do procesu reprodukcie, evolučné algoritmy nemajú deterministický charakter, t.j. nemôžeme presne predvídať evolúciu populácie.



Znázornenie evolučnej tvorby komplexného orgánu inicializovaného „protoorgánom“  $A_{ini}$ , cez prechodné riešenia  $A_i$ , až po konečné riešenie  $A_{fin}$ . Zložitosť orgánu postupne rastie, dva evolučne susedné orgány sú si podobné, evolučný prechod  $A_i \rightarrow A_{i+1}$  je dobre interpretovateľný pomocou mutácie genotypu organizmu. Každý orgán má špecifikovanú úlohu, ktorá určuje aj selekčný tlak na jeho vznik, tieto úlohy sa môžu v priebehu evolúcie podstatne meniť. Preto môžeme evolučnú úlohu vzniku komplexného orgánu formulovať ako zložitú optimalizačnú úlohu pohyblivého cieľa. Počiatočný a konečný stav je spojený čiarou, ktorá reprezentuje možnosť priameho „evolučného skoku“ z  $A_{ini}$  na  $A_{fin}$ . Táto evolučná zmena by vyžadovala zásadnú prestavbu genotypu, ktorá je jednou mutáciou nerealizovateľná, preto pravdepodobnosť takého evolučného skoku je skoro nulová.

Niekoľko poznámok k problémom reprodukcie a dedičnosti, ktorých významnou časťou je tzv. embryogenéza, čo je spôsob vzniku a vývoja nových jedincov zo zárodkov. Budeme rozlišovať dva druhy embryogenézy:

- *Epigenetická embryogenéza*, kde nový organizmus vzniká delením jednej "zárodočnej" bunky, tento druh embryogenézy sa vyskytuje na našej planéte pri reprodukcii biologických systémov. Môže byť zjednodušené chápaná ako *recept* na prípravu koláča, kde je uvedené nielen to čo koláč obsahuje ale aj jeho príprava.
- *Preformačná embryogenéza*, kde nový organizmus je reprezentovaný zárodkom, ktorý obsahuje všetky detaily dospelého organizmu. Tento typ embryogenézy môžeme formálne prirovnať k plánu budovy alebo stroja, kde sú podrobne uvedené všetky detaily. Existencia tohto druhu embryogenézy je pre nás hypotetická, na našej planéte sa nevyskytuje. Snáď v budúcnosti sa preformačná embryogenéza bude vyskytovať aj na našej planéte v súvislosti s reprodukciou umelých robotických systémov.

## Dennettov pohľad na evolúciu ako na algoritmus

- Dennett v knihe „*Darwin's Dangerous Idea*“ anticipoval Dawkinsove názory na univerzálnosť Darwinovej teórie tak, že zdôraznil jej algoritmický charakter (pozri odsek venovaný genetickému algoritmu), ktorý je nezávislý od materiálnej realizácie.
- Evolúcia, chápaná ako algoritmus, môže byť aplikovaná na rôznorodé systémy, v ktorých sme schopní identifikovať replikátory a ktorých podstata nemusí byť biologická.
- Dôvod prečo Dennett zdôrazňoval algoritmický charakter darwinovskej evolúcie, jej univerzálnosť v nezávislosti na materiálnej realizácii replikátorov bol ten, že chcel položiť solídne základy Dawkinsovej memetiky, v ktorej bola použitá paradigma Darwinovej evolúcie k vysvetleniu niektorých fenoménov šírenia kultúry. Pretože sa jedná o abiotickú oblasť aplikácie myšlienok Darwinovej evolúcie, považoval Dennett za potrebné najprv sa vyrovnat' s otázkou jej aplikovateľnosti mimo biologické systémy. U nás sa filozofickými aspektmi evolúcie systematicky zaoberá Dušan Gálik z FÚ SAV.

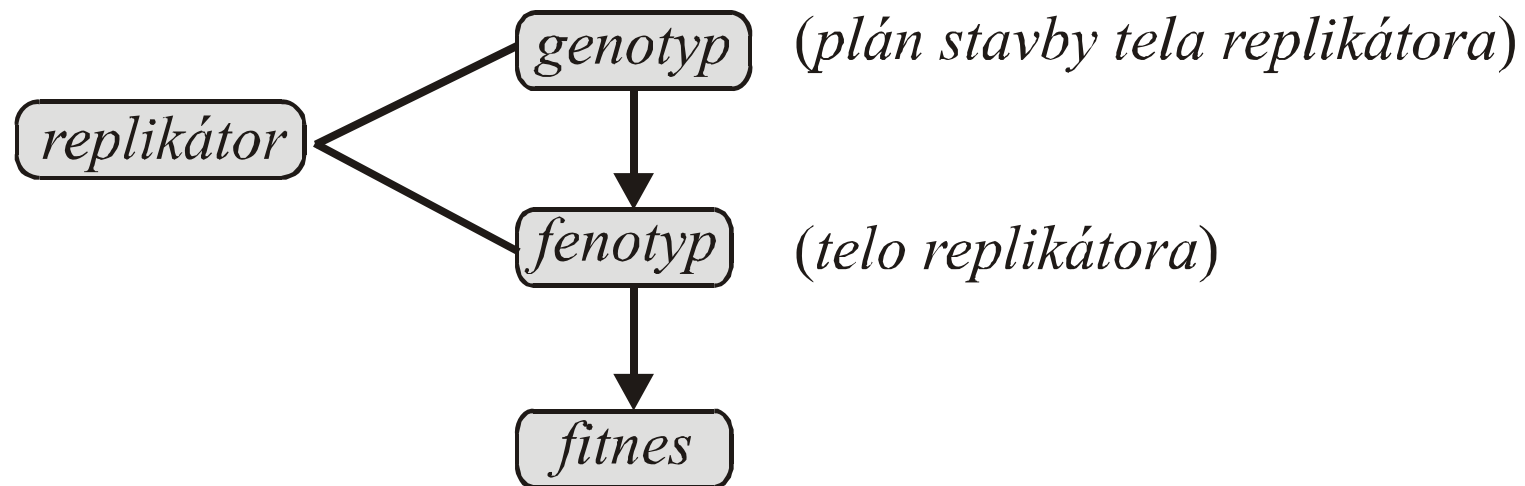
## Darwinovský systém

Najvšeobecnejšia formulácia základnej idey univerzálneho darwinizmu je uskutočnená pomocou koncepcie *darwinovského systému* založeného na nasledujúcich dvoch postulátoch (určité náznaky tejto všeobecnej formulácie už boli vykonané pri popise Hollandovho genetického algoritmu):

- *Darwinovský systém sa skladá z populácie replikátorov* – jedincov/objektov, ktoré za určitých vhodných podmienok sú schopné *replikácie* - rozmnožovania. Replikačný proces spočíva v „kopírovaní“ jedincov do populácie, pričom toto „kopírovanie“ sa uskutočňuje s *určitými malými chybami*. Z tohto predpokladu nepresnej replikácie (s malými chybami) vyplýva, že *populácia nie je homogénna*, obsahuje jedincov – replikátory, ktoré vykazujú malú variabilitu.
- Každý replikátor populácie je ohodnotený funkciou *fitnes*, ktorá vyjadruje schopnosť replikátora prežiť a úspešne vstupovať do replikačného procesu. *Prírodný výber* v darwinovskom systéme spočíva v tom, že jedinci populácie nie sú vyberaní do replikačného procesu náhodne, ale s *pravdepodobnosťou úmernou ich fitnes* (hovoríme, že výber sa deje kvázináhodne).

- Pojem „replikátor“ je potrebné chápať ako relatívne samostatnú entitu, ktorá existuje v nejakom prostredí a vytvára spolu s ostatnými replikátormi populáciu.
- Najjednoduchší prístup k implementácii replikátora je jeho stotožnenie s nejakou informáciou, ktorá kóduje jeho „telo“.
- Z tohto dôvodu môžeme využívať biologickú terminológiu a rozlišovať dve rôzne špecifikácie replikátora, jeho *genotyp* a *fenotyp*.
  - (2) Genotyp je informácia o architektúre replikátora, zatiaľ čo
  - (3) fenotyp je „telo“ replikátora.
- Vzťah medzi genotypom a fenotypom obvykle je silne závislý na typu darwinovského systému.
- Čo bude pre nás dôležité, je skutočnosť, že fitness replikátora je určený schopnosťou fenotypu prežívať v danom prostredí a vstupovať do výhodných interakcií s inými replikátormi z populácie

Replikátor je charakterizovaný tak genotypom, ako aj fenotypom. Fitnes replikátora je určený schopnosťou fenotypu prežívať v danom prostredí a vstupovať do výhodných interakcií s inými replikátormi z populácie.





- Postulujeme, že replikátor je reprezentovaný svojím *genotypom*  $\mathbf{x}$ , ktorý, ako už bolo poznamenané, obsahuje zakódovanú informáciu o konštrukcii replikátora (pripomeňme si Dawkinsove prirovnanie genotypu k receptu na koláč).
- *Populácia* replikátorov je množina genotypov

$$P = \{\mathbf{x}_1, \mathbf{x}_2, \dots, \mathbf{x}_p\}$$

- Vzájomný vzťah medzi triádou „genotyp – fenotyp – fitness“ je reprezentovaný postupnosťou dvoch zobrazení

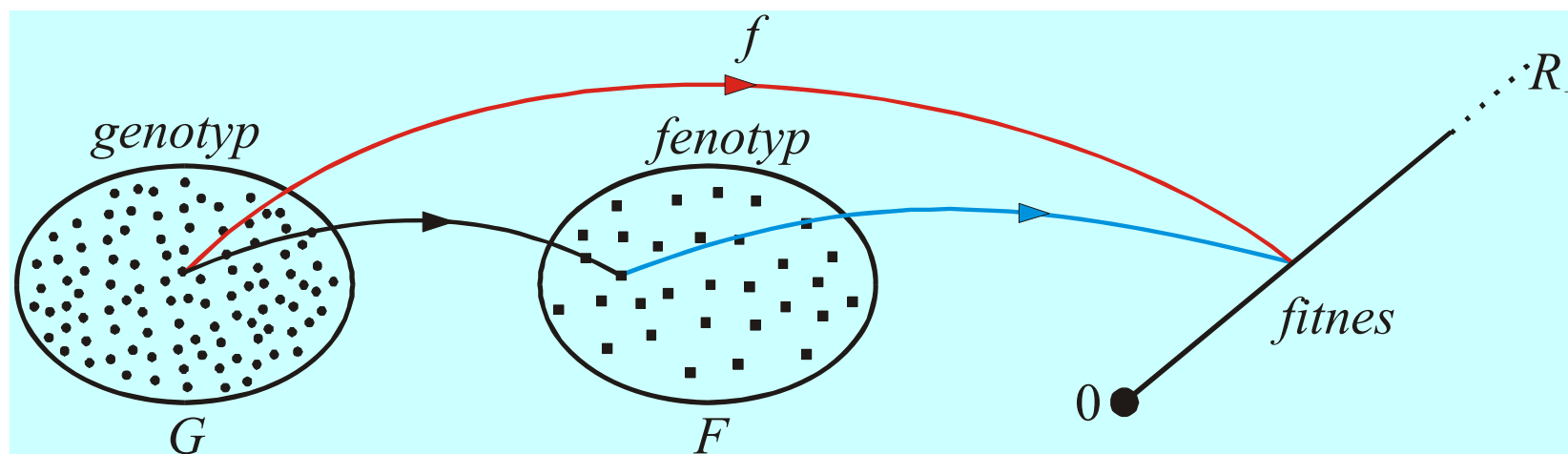
$$G \xrightarrow{\text{fenotyp}} F \xrightarrow{\text{fitness}} [0, \infty)$$

Prvé zobrazenie priradí každému genotypu telo – organizmus, nazývaný fenotyp. V biológii toto zobrazenie predpokladá existenciu procesu nazývaného embryogenéza, t. j. tvorba organizmu zo zárodka – genotypu. Skrátaná forma dvojstupňového zobrazenia má tvar (pozri obr. 10)

$$G \xrightarrow{f} [0, \infty)$$

kde nové zobrazenie  $f$  vznikne zložením dvoch zobrazení, zobrazenia genotypu na fenotyp a zobrazenia fenotypu na fitness.

Znázornenie jednoduchých zobrazení genotypu na fenotyp a fenotypu na fitness, a zloženého zobrazenia genotypu priamo na fitness.



- Prečo je užitočné explicitne uvažovať fenotyp ako sprostredkovateľa medzi genotypom a fitness? Táto otázka je plne legitímna z pohľadu matematiky, avšak je potrebné poznamenať, že koncepcia fenotypu reprezentuje veľmi efektívnu a plodnú heuristiku pre interpretáciu univerzálneho darwinizmu.
- Cieľom evolúcie nie je obvykle požadovaný genotyp, ale fenotyp vykazujúci určité vlastnosti. Z tohto pohľadu môžeme povedať, že darwinovská evolúcia je reprezentovaná postupnosťou fenotypov, ktorých vlastnosti sú bližšie a bližšie k vlastnostiam cieľového hypotetického fenotypu.

**Fitnes replikátora  $x \in P$  je určený dvoma rôznymi prístupmi.**

(1) chápe fitnes ako atribút replikátora (vloženého do nejakého prostredia  $E$ ), interakcie daného replikátora s populáciou sa ignorujú, potom

$$fitnes(\mathbf{x}) = F(\mathbf{x}; E)$$

kde prostredie  $E$  je chápané ako parameter funkcie, ktorá replikátor  $\mathbf{x}$  ohodnotí fitnes, táto funkcia je určená len pomocou jeho genotypu (a prípadného vplyvu prostredia).

(2) je založený na predstave, že táto veličina je dominantne určená len interakciou daného replikátora  $\mathbf{x}$  s ostatnými replikátormi v populácii (plus vplyv prostredia  $E$ )

$$fitnes(\mathbf{x}) = \sum_{\substack{x' \in P \\ x' \neq x}} F(\mathbf{x}, \mathbf{x}'; E)$$

- Tento druhý prístup postuluje, že dominantná časť fitness je určená práve interakciou replikátorov v populácii, kde nie je dôležitá architektúra toho-ktorého replikátora (môžeme povedať, že táto prispieva nemennou časťou k fitness).
- Takto je určené fitness replikátorov v aplikáciách evolučnej teórie hier (napr. pri štúdiu evolučného vzniku kooperácie v populácii).
- V týchto aplikáciách zahájených Maynard Smithom a Axelrodom pred 30 rokmi, fitness replikátorov je určený schopnosťou spolupracovať alebo nespôlpracovať s inými replikátormi z populácie, a nie ich vnútornou architektúrou. V tomto prípade funkcia fitness nie je fixne zadaná, ale závisí od zloženia celej populácie. Z tohto pohľadu potom môžeme tento druh evolučnej optimalizácie interpretovať ako tzv. „problém pohyblivého cieľa“, kde povrch fitness funkcie sa dynamicky mení s evolúciou populácie. Problém emergencie sociálnych štruktúr v multiagentových systémoch bude študovaný v sekcii 4.

## **Koevolúcia**

Teória darwinovskej evolúcie obvykle implicitne predpokladá existenciu jednej populácie, ktorá je predmetom evolúcie uskutočňovanej mechanizmami popísanými vyššie.

Existujú však prípady, keď dva rôzne druhy replikátorov medzi sebou silne interagujú (napr. dve populácie rôznych druhov, ktoré sú v symbiotickom vzťahu, jeden druh produkuje látku, ktorá je vitálne dôležitá pre prežitie druhého druhu). V abiotických aplikáciách sú koevolučné modely dôležité pre štúdium rôznych kultúrnych fenoménov.

## Budeme študovať dva rôzne modely koevolúcie

- *Kompetitívny koevolučný model*, kde existujú dve kvázinezavislé populácie, ktoré sú zložené z replikátorov rôznych druhov. Interakcia medzi týmito rôznymi populácia spočíva vo výpočte fitness replikátorov z jednotlivých populácií,

$$fitness(\mathbf{x}) = F_1(\mathbf{x}) + \sum_{\mathbf{y} \in P_2} F_{12}(\mathbf{x}, \mathbf{y}) \quad (\forall \mathbf{x} \in P_1)$$

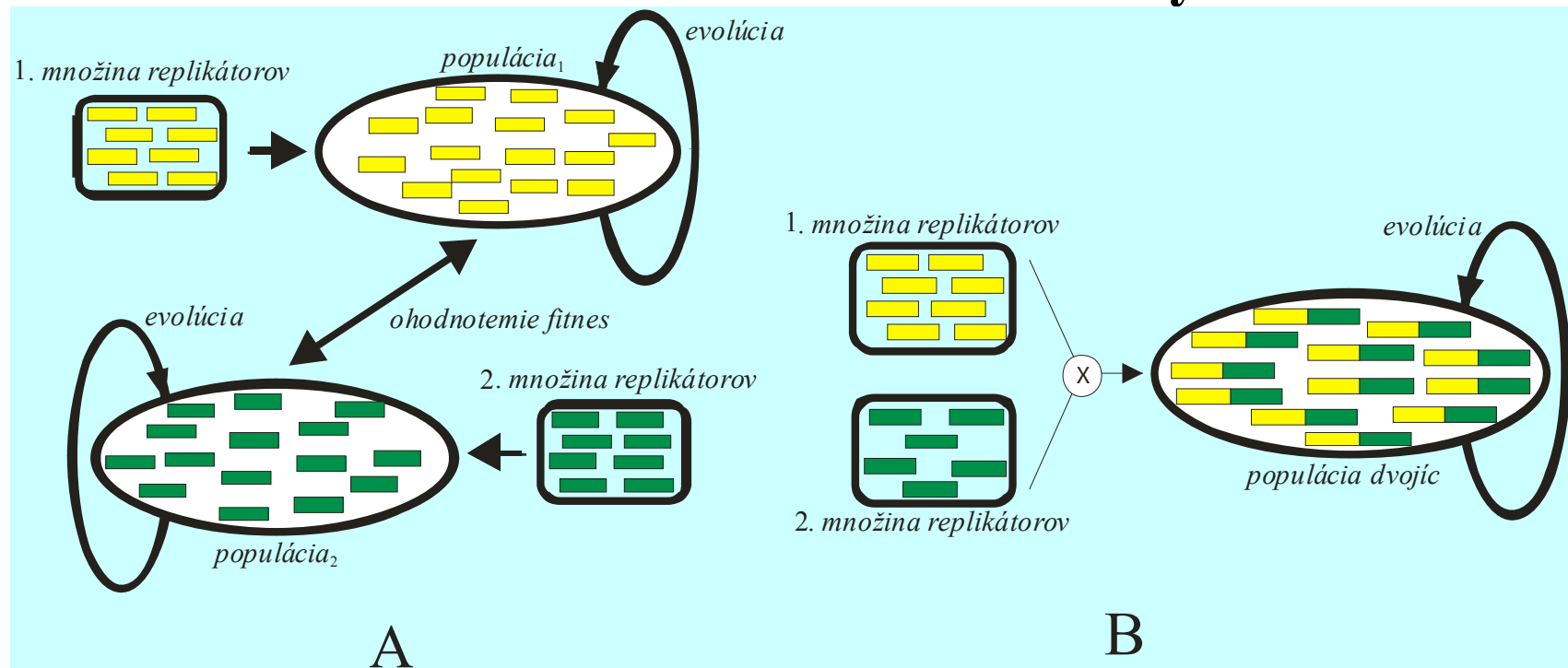
$$fitness(\mathbf{y}) = F_2(\mathbf{y}) + \sum_{\mathbf{x} \in P_1} F_{21}(\mathbf{y}, \mathbf{x}) \quad (\forall \mathbf{y} \in P_2)$$

- *Kooperatívny koevolučný model*, v ktorom existuje len jedna populácia, ale táto populácia je zložená z komplexov (usporiadaných dvojíc) replikátorov rôzneho druhu. Tieto komplexy sú chápané ako nezávislé objekty evolúcie, ich fitness je určený napr. takto

$$fitness(\mathbf{x}, \mathbf{y}) = F_1(\mathbf{x}) + F_2(\mathbf{y}) + G(\mathbf{x}, \mathbf{y})$$

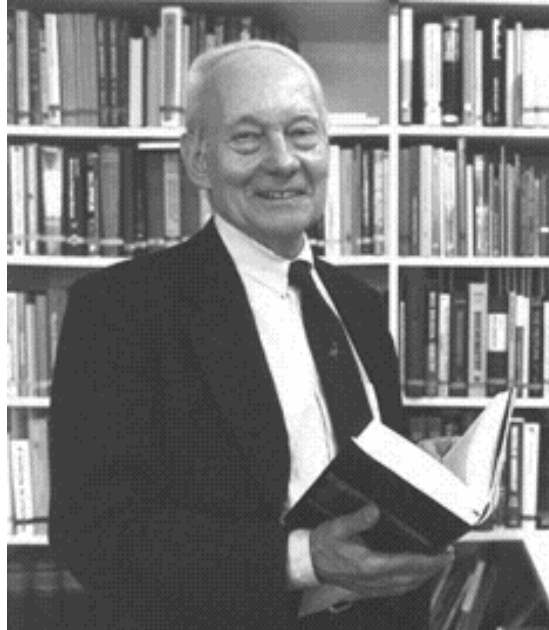
Tento model sa používa vtedy, keď jednotlivé komponenty neexistujú nezávislé, sú na sebe silne závislé. Ako ilustračný príklad pre kooperatívnu koevolúciu môže slúžiť „kultúrna“ aplikácia zaoberajúca sa koevolúciou génov a mémov.

## Dva rôzne koevolučné modely





# Eigenova a Schustrova teoria molekulárneho darwinizmu



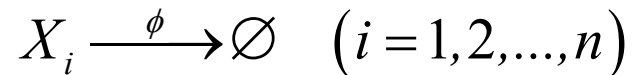
**Manfred Eigen (1927-)**

- M. Eigen, Self organization of matter and the evolution of biological macro molecules. *Naturwissenschaften*, **58**(1971), 465.
- M Eigen and P. Schuster, The hyper cycle, *Naturwissenschaften* **64**(1977), 541; **65**(1978), 7; **65**(1978), 341. (See also M. Eigen and P. Schuster, *The Hypercycle: A principle of natural self-organization*. Springer Verlag, Berlin, 1979)

- Eigenova a Schustrova teória molekulárneho darwinizmu postihuje elementárne aspekty evolúcie na úrovni biomakromolekúl. Tento model evolúcie poskytuje semikvantitatívnu teóriu, ktorá je schopná interpretovať mnohé pojmy a fenomény evolúcie, ako napr. úlohu neutrálnych mutácií v priebehu adaptačného procesu.
- Dôležitú úlohu v našom prístupe hrajú metódy *umelej chémie*, ktorá je v súčasnosti považovaná za oblasť úzko súvisiacu s umelým životom. Tento prístup je založený na metafore chemostatu (chemického reaktora), ktorý obsahuje "molekuly" reprezentované abstraktnými objektmi (reťazcami znakov, grafmi, formulami z nejakého jazyka, atď.). Molekuly sú v chemostate transformované pomocou "chemických reakcií" na iné prípustné objekty, pričom pravdepodobnosť týchto transformácií je striktne určená štruktúrou reagujúcich objektov.
- Kinetika procesov prebiehajúcich v chemostate je popísaná Eigenovými replikátorovými diferenciálnymi rovnicami, ktoré majú svoj „zdravý“ základ vo fyzikálnej chémii (zákon účinných hmotností).

## Eigenove replikátory

Študujme molekuly - replikátory  $X_1, X_2, \dots, X_n$ , ktoré sú schopné nasledujúcich dvoch chemických reakcií

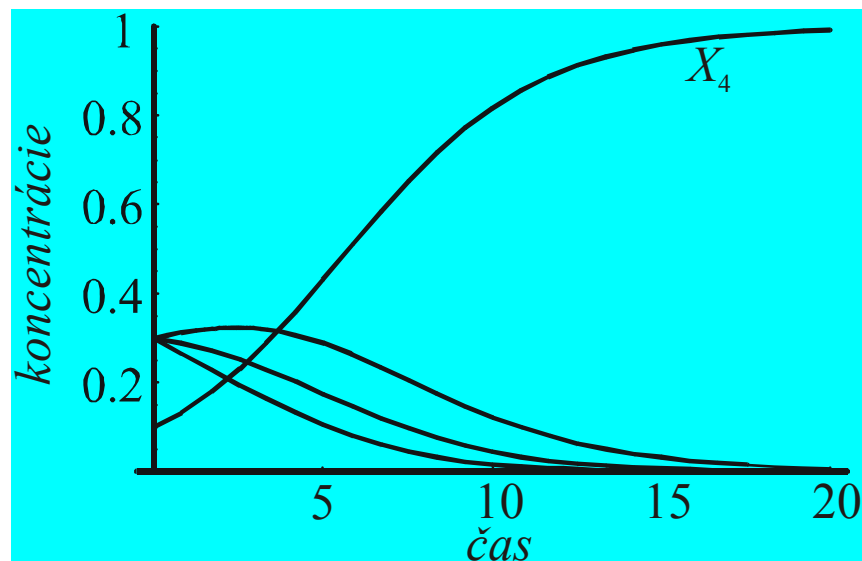


Ak použijeme k týmto reakciám štandardný fyzikálno-chemický zákon účinných hmotností, dynamika kinetického systému obsahujúceho obe reakcie je určená diferenciálnymi rovnicami

$$\dot{x}_i = x_i (k_i - \phi) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$

kde  $0 \leq x_i \leq 1$  je koncentrácia molekuly  $X_i$ . Zried'ovací tok  $\phi$  je chápaný ako "voľný parameter", ktorý sa nastaví tak, aby suma časových derivácií koncentrácií bola nulová,  $\sum \dot{x}_i = 0$

$$\dot{x}_i = x_i \left( k_i - \sum_{j=1}^n k_j x_j \right) \quad (i = 1, 2, \dots, n)$$



Časový priebeh koncentrácií 4-zložkového systému s rýchlostnými konštantami  $k_1=1$ ,  $k_2=2$ ,  $k_3=3$  a  $k_4=4$ . Molekuly  $X_4$  víťazia, aj keď ich počiatočná koncentrácia bola najmenšia, v čase  $t>15$  systém už obsahuje skoro výlučne len molekuly  $X_4$ , ostatné vymizli.

Riešenie tohto systému diferenciálnych rovníc vyhovuje asymptotickej podmienke, kde "prežíva" len tá molekula, ktorá má maximálnu rýchlostnú konštantu  $k_{max}$ , zatiaľ čo ostatné molekuly vymiznú

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_i(t) = \begin{cases} 1 & (\text{pre } k_i = k_{max} = \max\{k_1, \dots, k_n\}) \\ 0 & (\text{ostatné prípady}) \end{cases}$$

Podmienka konštantnosti sumy koncentrácie (t.j.  $\sum x_i = 1$ ) zavádza do systému dodatočný "*selekčný tlak*", replikujúce sa molekuly eliminujú ostatné molekuly.

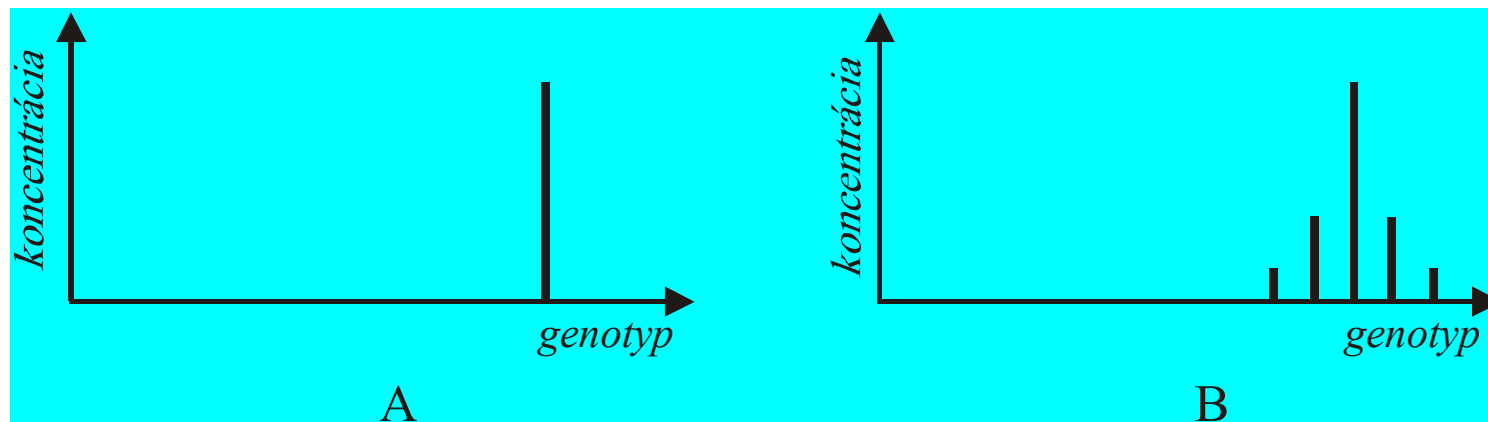
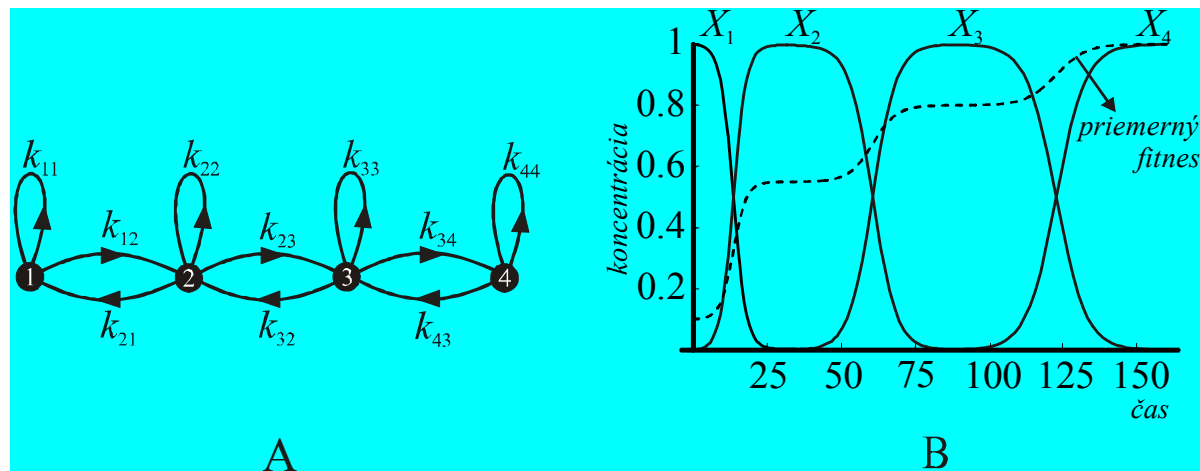


Diagram A znázorňuje asymptotickú situáciu  $t \rightarrow \infty$  pre systém replikátorov bez mutácií, ktoré sa presne replikujú. Diagram B znázorňuje asymptoticky stabilný stav systému, kde replikácia nie je presný proces, kde sa už uvažujú mutácie pri replikačnom procese. Stabilný stav je zložený z niekoľkých replikátorov, pričom najväčšia koncentrácia prislúcha replikátoru s maximálnou rýchlostnou konštantou  $k_{max}$ , ostatné replikátory sa vyskytujú s podstatne menšou koncentráciou. Replikátory vyskytujúce sa súčasne s hlavným víťazom  $X_{max}$  sú tie, ktoré sú mu blízke a sú z neho tvorené mutáciami.

## Replikátory a molekulová Darwinova evolúcia

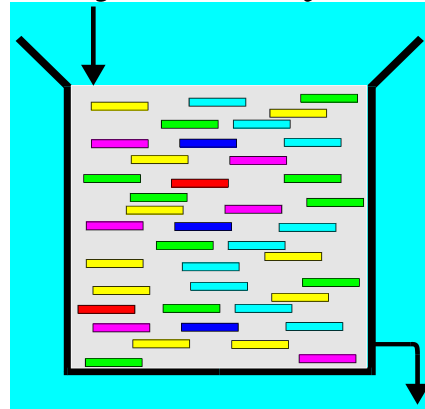
Eigenov systém replikátorov s mutáciou (t.j. replikácie s chybami) je vhodným prostriedkom na simuláciu *molekulárnej Darwinovej evolúcie*.

Študujme hypoteticky reakčný systém obsahujúci postupnosť  $n$  replikátorov  $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$ . Tieto replikátory vyhovujú podmienkam, že  $X_i$  môže produkovať pomocou chybných replikácií susedné replikátory  $X_{i\pm 1}$



## Metafora chemického reaktoru - chemostat

Uvažujme chemický reaktor - *chemostat*, ktorý obsahuje formálne objekty nazývané „*molekuly*“, ktoré sú reprezentované reťazcami znakov. Chemostat nie je priestorovo štruktúrovaný, v chémii sa hovorí, že je s dobrým miešaním (well stirred reactor),



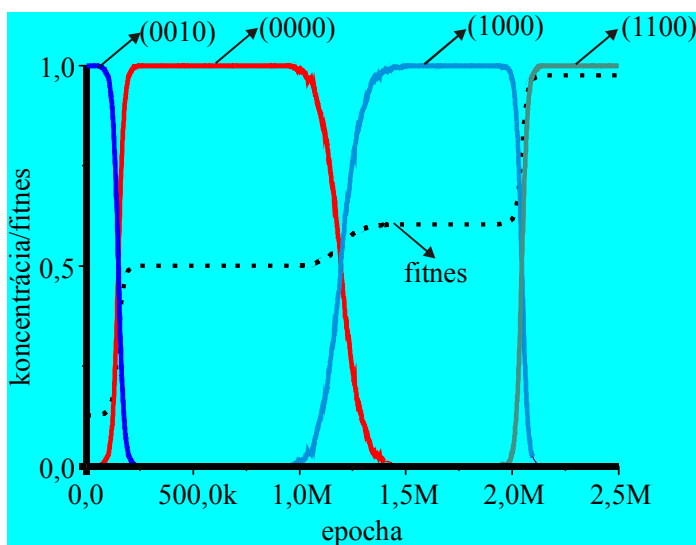
- (1) náhodný výber replikátora  $M$  (ktorý je totožný s  $X_i$ ) z chemostatu,
- (2) pre takto vybraný replikátor sa uskutoční s pravdepodobnosťou úmernou rýchlostnej konštante  $k_{ii}$  proces replikácie, pričom vznik chybného replikátora  $M'$  (ktorý je totožný s  $X_j$ ) je uskutočnený s pravdepodobnosťou úmernou rýchlostnej konštante  $k_{ij}$ .
- (3) Vzniknutým novým replikátorom  $M'$  (bez mutácie alebo s mutáciou) sa nahradí iný náhodne vybraný replikátor z chemostatu (t.j. vo všetkých elementárnych krokoch máme v chemostate konštantný počet replikátorov).



## Algoritmus 2.

```
chemostat := náhodne vygenerovaná množina replikátorov;  
t := 0;  
while  $t < t_{\max}$  then  
begin  $t := t + 1$ ;  
     $X := O_{\text{select}}(\text{chemostat})$ ;  
    if  $\text{random} < \text{prob}_{\text{rep}}(X)$  then  
        begin  $X' := O_{\text{mut}}(X)$ ;  
             $X'' := O_{\text{select}}(\text{chemostat})$ ;  
             $\text{chemostat} := (\text{chemostat} + \{X'\}) - \{X''\}$ ;  
        end;  
end;
```

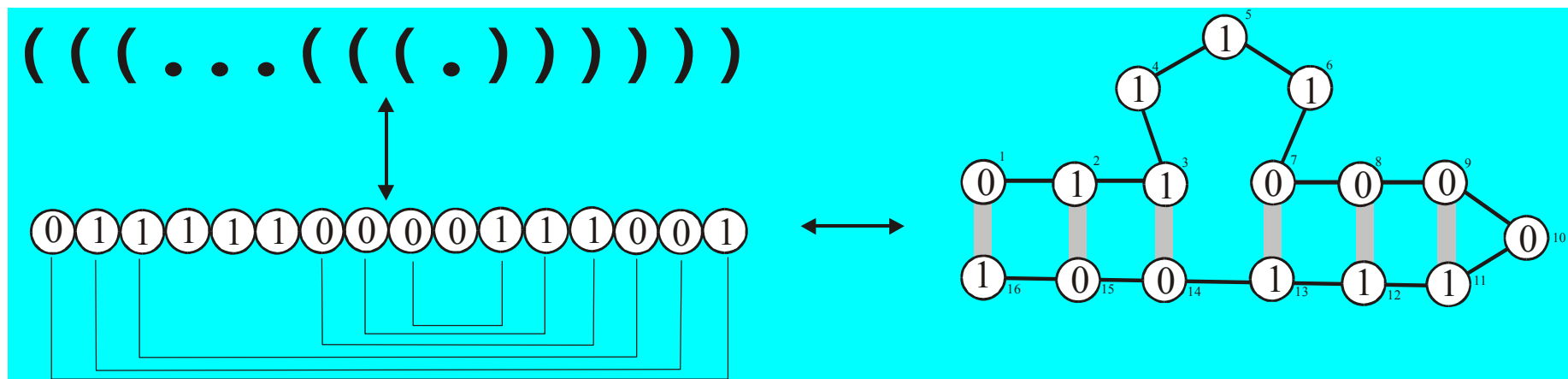
Všeobecné idey chemostatu budú ilustrované jeho použitím ako optimalizátora binárnej funkcie  $f : \{0,1\}^n \rightarrow [0,1]$ , ktorá zobrazuje binárne reťazce  $\mathbf{x} = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  dĺžky  $n$  na reálne čísla z intervalu  $\langle 0,1 \rangle$ . Naším cieľom bude nájsť optimálne riešenie  $\mathbf{x}_{opt}$ , ktoré maximalizuje binárnu funkciu  $f$  nad množinou všetkých možných binárnych reťazcov dĺžky  $n$ .

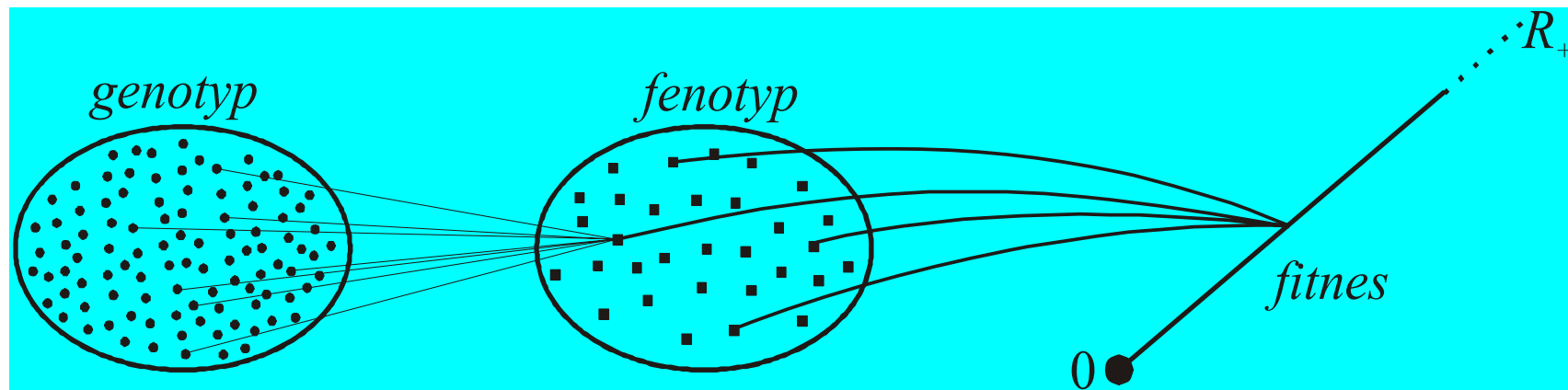


- Z tohto ilustračného príkladu vyplýva, že metafora Eigenových replikátorov poskytuje efektívny *replikátorový optimalizačný algoritmus*, ktorý je veľmi podobný štandardnému genetickému algoritmu, avšak je založený na úplne odlišnej metafore ako GA, metafora darwinovskej evolúcie v GA je nahradená metaforou chemostatu replikátorov.
- *Eigenova fenomenologická teória replikátorov tvorí vhodný teoretický rámec pre počítačové simulačné štúdia molekulárnej darwinovskej evolúcie* (t.j. biomakromolekúl, ako sú RNA alebo DNA, ktoré sú schopné replikačných procesov).

## Folding (skladanie) binárnych reťazcov

Na základe analógie s RNA molekulami zavedieme tzv. folding (sekundárnu štruktúru) aj pre binárne reťazce, kde úlohu komplementárnych báz hrajú dvojice 0 a 1. Folding binárneho reťazca je špecifikovaný ako zoznam spárovaných binárnych komplementárnych báz  $i-j$  (pre  $i < j$ ) a nespárovaných jedincov  $k$





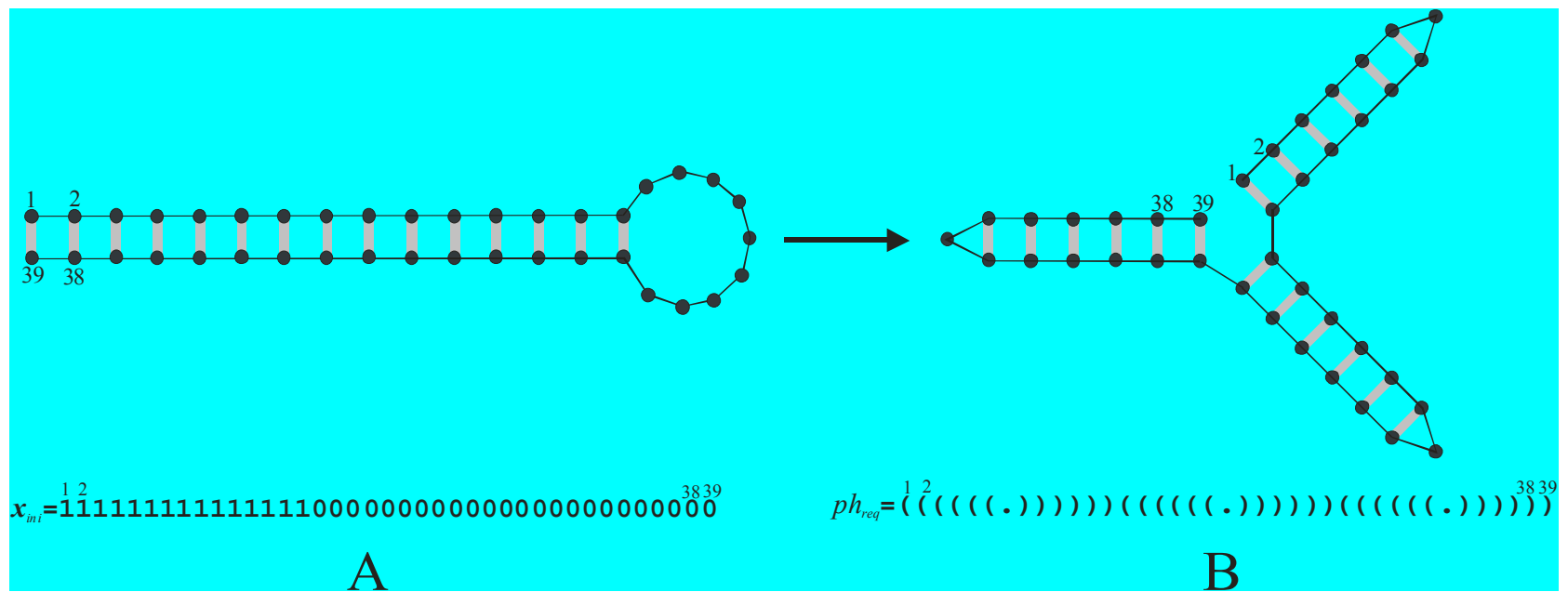
Schematické znázornenie zobrazení genotypu na fenotyp a fenotypu na fitness pre prípad binárnych reťazcov. Obe zobrazenia sú typu mnoho-na-jeden, t.j. existuje silná redundancia v kódovaní fenotypu pomocou genotypu a v kódovaní fitness pomocou fenotypu. Táto vlastnosť redundancie je dôležitý predpoklad pre existenciu neutrálnych etáp darwinovskej evolúcie, v ktorých je fitness konštantný.

## Všetky možné genotypy reprezentované binárnymi reťazcami dĺžky $n=7$ a im priradené fenotypy (foldingy) s hodnotami fitness

No.	Genotyp	fenotyp	fitness
1	(0000000)(1111111)	.....	1
2	(0000001)(0000100)(1111011)(1111110)	....(.)	1
3	(0000010)(1111101)	...(.)	0
4	(0000011)(0001001)(0001101)(0010010)(0010110) (0011000)(0011100)(0100011)(0100111)(0101001) (0110010)(0110110)(0111000)(0111100)(1000011) (1000111)(1001001)(1001101)(1010110)(1011000) (1011100)(1100011)(1100111)(1101001)(1101101) (1110010)(1110110)(1111100)	..((.))	0
5	(0000101)(0010001)(0101100)(0101110)(0110000) (0111010)(1000101)(1001111)(1010001)(1010011) (1101110)(1111010)	..((.))	3
6	(0000110)(0011010)(1100101)(1111001)	..((.))	5
7	(0000111)(0001111)(0010011)(0011011)(0100101) (0101101)(0110001)(0111001)(1000110)(1001110) (1010010)(1011010)(1100100)(1101100)(1110000) (1111000)	(((.)))	7
8	(0001000)(1110111)	...(..)	0
9	(0001010)(1110101)	((.))	0
10	(0001011)(0001100)(0001110)(0011001)(0011110) (0100001)(0100100)(0100110)(0110011)(0110100) (1001011)(1001100)(1011001)(1011011)(1011110) (1100001)(1100110)(1110001)(1110011)(1110100)	..(..)	0
11	(0010000)(1101111)	..(...)	1
12	(0010100)(0111011)(0111110)(1000001)(1000100) (1101011)	(.)(.)(.)	1
13	(0010101)(0101010)(1010101)(1101010)	..((.))	1
14	(0010111)(0011101)(0100010)(0101000)(1010111) (1011101)(1100010)(1101000)	..(..)	0
15	(0011111)(1100000)	((.))	0
16	(0100000)(1011111)	..(....)	1
17	(0101011)(1010100)	(..)(.)(.)	0
18	(0101111)(1010000)	(.)(.)(.)(.)	5
19	(0110101)(0110111)(1001000)(1001010)	(.)(..)	0
20	(0111101)(1000010)	(..(..))	3
21	(0111111)(1000000)	(.....)	3

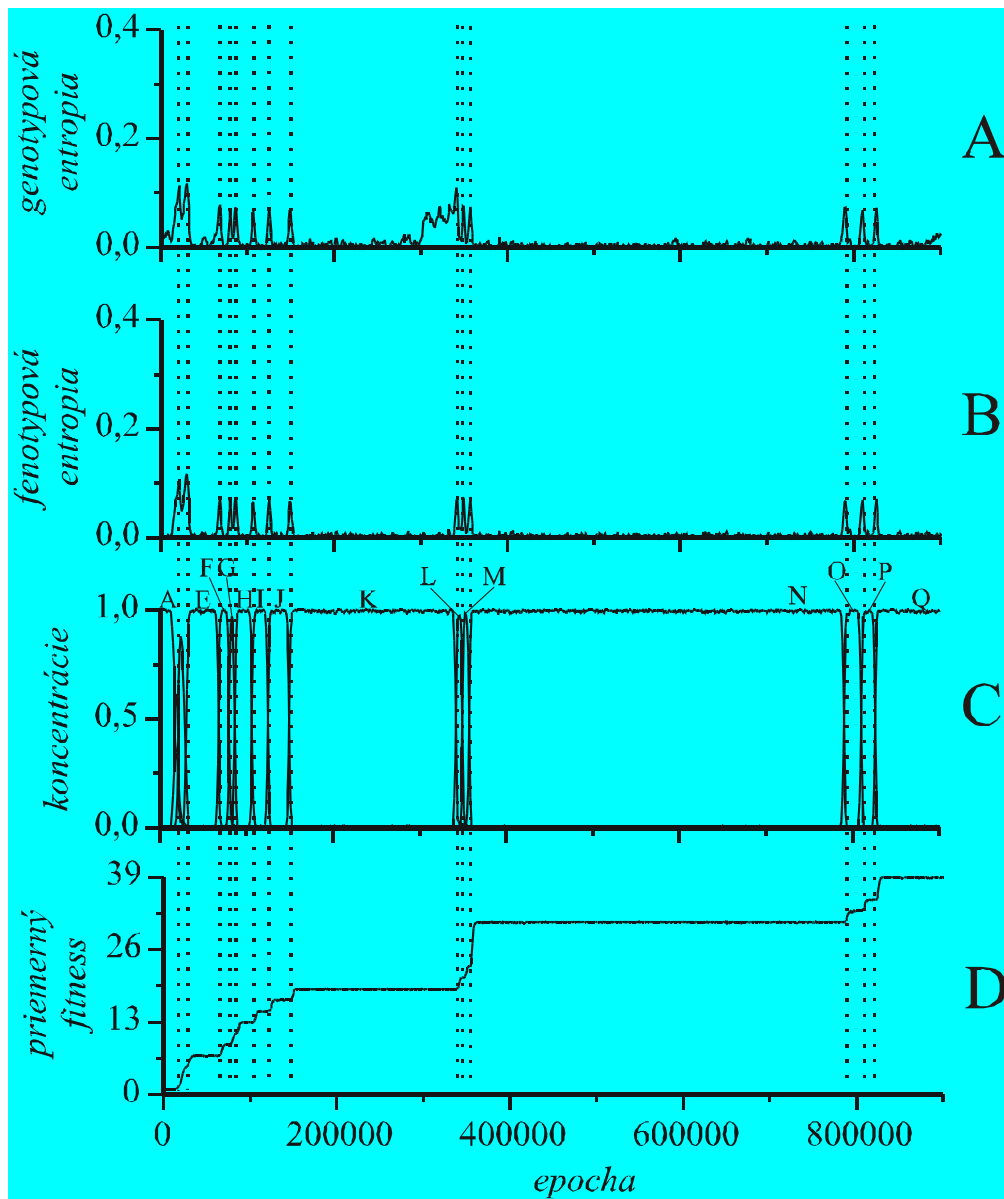
Koncepcia foldingu umožňuje zaviesť triádu základných pojmov evolučnej biológie: *genotyp*, *fenotyp*, a *fitnes*:

- (1) genotyp  $\mathbf{x}$  je reprezentovaný binárnym reťazcom dĺžky  $n$ ,  
$$\mathbf{x} = (x_1 x_2 \dots x_n) \in \{0,1\}^n,$$
- (2) fenotyp  $ph(\mathbf{x})$  je určený foldingom reťazca  $\mathbf{x}$ ; formálne,
- (3) fitnes je reprezentovaný kladným reálnym číslom, je atribútom genotypu  $\mathbf{x}$ , jeho ohodnotenie fitnes je realizované pomocou pridruženého fenotypu.

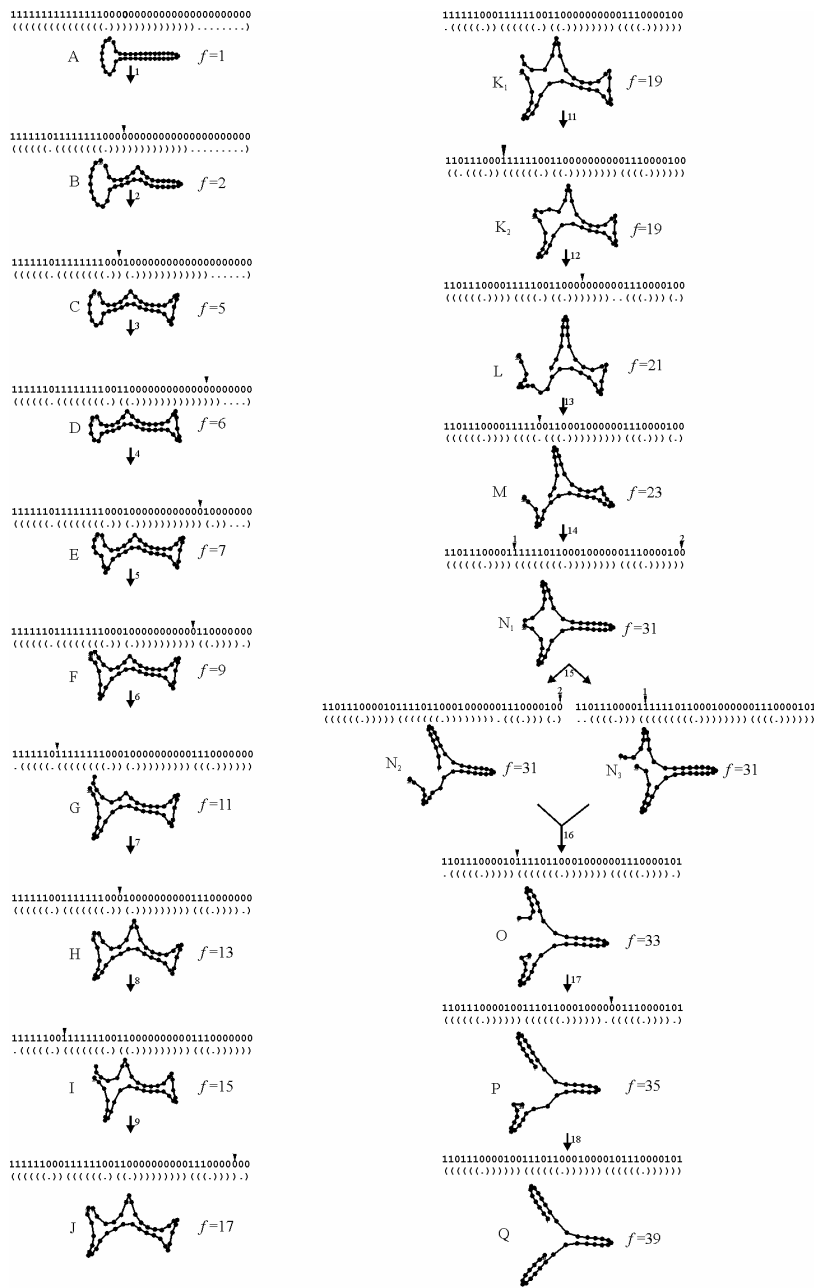


- (A) Počiatočný binárny reťazec  $x_{ini}$  vyjadrený binárnym reťazcom dĺžky 39, v hornej časti diagramu je taktiež uvedený folding – fenotyp tohto reťazca.
- (B) Cieľový fenotyp pre genotypy vyjadrené binárnymi reťazcami dĺžky  $n=39$ .

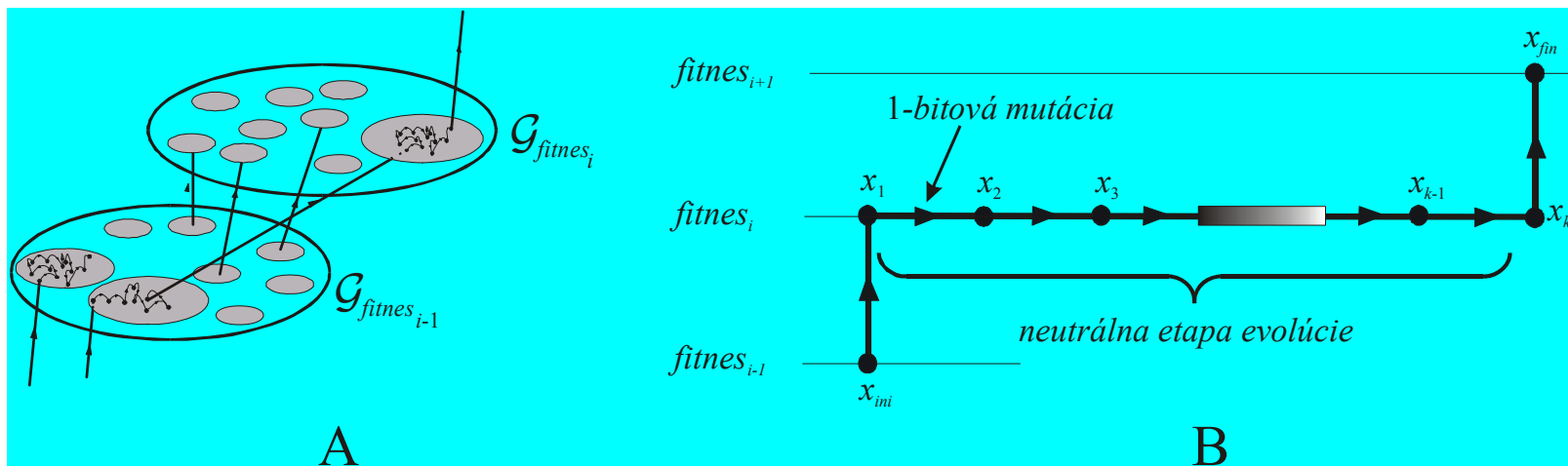




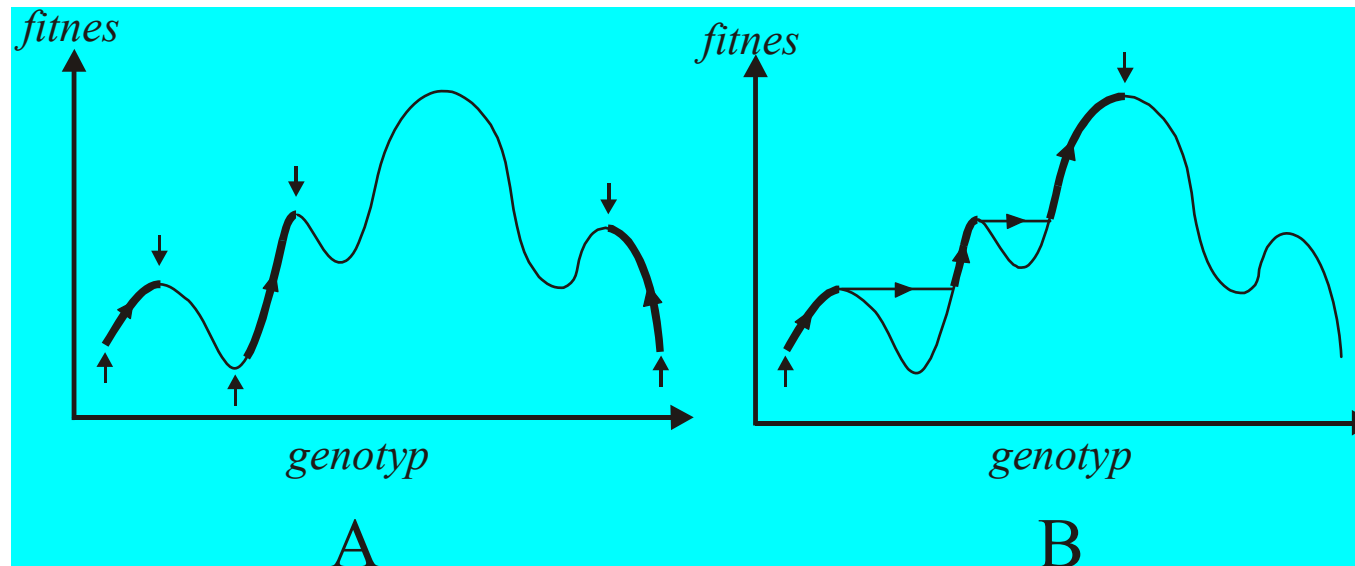
Priebehy (A) genotypovej entropie, (B) fenotypovej entropie, (C) koncentračných profilov dominantných genotypov a (D) priemerného fitness..



Priebeh evolúcie v chemostate, kde počiatkový genotyp je špecifikovaný binárnym reťazcom  $x_{ini}$  s lineárnym foldingom a cieľový fenotyp je špecifikovaný útvarom „vrtuly“. Identifikovalo sa 18 prechodných stavov, ktoré sú zostrojené z predchádzajúcich pomocou 1-bitovej mutácie (t.j. medzi danými binárnymi reťazcami je jednotková Hammingova vzdialenosť). Existujú dva prípady neutrálnych mutácií, prechody 11 a 15. Tieto prechody sú rôzneho typu, prvý prechod je priradený postupnosti neutrálnych mutácií, zatiaľ čo, druhý prechod reprezentuje dve paralelné neutrálne mutácie



Schematické znázornenie skoku medzi dvoma neutrálnymi etapami, kde sa fitness mení skokom  $f \rightarrow f'$ . (A) V prvej neutrálnej etape, evolúcia vykonáva lokálne prehľadávanie, kde počiatočný genotyp reprezentuje riešenie z posledného „skoku“ a finálne riešenie je schopné „preskočiť“ na riešenie z množiny  $\mathcal{G}_f$ . Neutrálna etapa znovu opakuje, až je nájdené v rámci množiny  $\mathcal{G}_{f'}$  nové riešenie, ktoré je schopné preskočiť na nasledujúcu neutrálnu množinu. (B) Podrobnejší „rozpis“ neutrálnej etapy s nemenným fitness  $fitness_i$ , postupnosť genotypov  $x_1$  až  $x_k$  tvorí neutrálnu stáziu, v ktorej sa pripravuje evolúcia na ďalší „skok“ do množiny genotypov s väčším fitness.



(A) Ilustratívny priebeh povrchu funkcie fitnes pre molekulovú Darwinovu evolúciu, keď neutrálne mutácie neexistujú. Evolučná adaptácia vždy končí v najbližšom lokálnom maxime (v tomto prípade môže byť Darwinova evolúcia charakterizovaná ako lokálny optimalizátor, kde fitnes populácie je „zamrznuté“ na najbližšom maxime). (B) Ak **neutrálne mutácie existujú** (zobrazenie genotypu na fenotyp je redundantné), potom povrch fitnes funkcie obsahuje množstvo „chodníčkov“ s konštantným fitnes, ktoré umožňujú evolúcii prekonanie hlbokých údolí na povrchu fitnes funkcie. Darwinova evolúcia má dobrú šancu k dosiahnutiu globálneho maxima v priebehu adaptačného procesu.

## **Evolúcia v multiagentových systémoch**

- Cieľom je aplikovať myšlienky univerzálneho darwinizmu k evolúcii multiagentových systémov, ktorých fitness je určený hlavne schopnosťou špecificky interagovať s ostatnými agentmi populácie.
- Genotyp agentov špecifikuje spôsob interakcie s inými agentmi, pričom detaily jeho fenotypu – „telesnej schránky“ – sú ignorované.
- Tieto aplikácie multiagentových systémov spolu s univerzálnym darwinizmom znamenajú v súčasnosti významný prienik informatických metód k simuláciám sociálnych javov, akými sú evolučná emergencia kooperácie, altruizmu, etnickej kooperácie alebo konfliktu, normy správania sa, jazyka, mémov, atď.

Študujme populáciu agentov (organizmov),  $P = \{A_1, A_2, \dots, A_n\}$ , kde agent  $A$  je špecifikovaný genotypom  $\mathbf{x} = \mathbf{x}(A)$ . Fitness agentov z populácie je určený vzťahom (pozri sekciu 2)

$$fitness(A) = \sum_{\substack{A' \in P \\ A' \neq A}} F(A, A')$$

ktorý určuje fitness agenta  $A$  ako sumu „platieb“, ktoré sú priradené interakciám daného agenta s ostatnými agentmi populácie. Fitness agentov je plne určený „stratégiou“ vzájomnej interakcie, ktorá je dominantná pre ich prežívanie a reprodukciu, zatiaľ čo, architektúra samotného agenta je v tomto prístupe nemenná. Fenotyp agenta reprezentovaný stratégiou interakcie s ostatnými agentmi. V zjednodušenom prístupe tieto stratégie splyvajú priamo s genotypom agenta, takže koncepcia dichotómie medzi genotypom a fenotypom agenta v tomto prístupe neplatí.

# Sociálne dilemy

- Ako vyplýva z teórie hier v ekonómii, aplikovanej tiež často na analýzu pretekov v **zbrojení medzi štátmi**, zjednodušenej zo skúmania ďalej preberaného "problému väzňov" (prisoner's dilemma – väžňova alebo väzenská dilema), *kooperácia sa môže vynoriť zo sebeckého záujmu, keď je výhodná pre obidvoch.*
- Keď hľadáme racionálne dôvody, či pri našej interakcii s niekým iným (s našim obchodným alebo iným partnerom) pristúpiť na kooperáciu, alebo nie, naše rozhodnutie by malo byť založené na *racionálnych argumentoch a nie na predsudkoch a ideologických dôvodoch.*
- Medzi sociálne dilemy napríklad patrí oblasť životného prostredia (keď ho znečistím, negatívny vplyv na mňa je malý a úspora veľká, aj keď súčet negatívnych vplyvov pre všetkých je významnejší ako moja úspora), obchodné vojny, vyjednávanie medzi krajinami a sociálne interakcie. Tu všade je výber medzi altruistickým správaním, kooperatívnym, alebo egoistickým. Na modelovanie toho sa používajú hry, ktoré dovoľujú analýzu rôznych scenárov.

## **„Väzňova dilema“.**

- Dvaja zloději boli zatknutí políciou pre vylúpenie *Národnej Poctivej Sporiteľne*, a boli separovane umiestnení do cely predbežného zadržania.
- Každému z páchatel'ov záleží o mnoho viac na tom, aby bol oslobodený on, ako na tom, aby bol oslobodený jeho spolupáchatel'.
- Polícia nemala dostatok dôkazov k súčasnému usvedčeniu oboch páchatel'ov, prokurátor dal každému tento „diabolský“ návrh: *„Môžete si vybrať, buď sa priznať k lúpeži, alebo mlčať. Ak sa priznáte vy a váš komplic sa neprizná, tak potom celú vinu za lúpež dám na vášho komplica, ktorý bude odsúdený na mnohoročný trest a vy budete oslobodený. Podobne, ak vy budete mlčať a váš komplic sa prizná k činu, potom on bude oslobodený a vy dostanete mnohoročný trest. Ak budete obaja mlčať a nepriznáte sa, potom, aj keď nerád, navrhнем súdu, aby vás oboch odsúdil iba na podmienený trest. V opačnom prípade, ak sa obaja priznáte, navrhнем vaše odsúdenie, ale sľubujem vám trest, ktorý tiež bude mnohoročný, ale kratší, ako v prípade, že by sa len jeden z vás priznal a druhý mlčal. Ak sa mienite priznať, dozorcovi nič nepovedzte, na druhý deň ráno vás znovu navštívim a môžete mi oznámiť vaše rozhodnutie“.*



- “Dilema”, pred ktorou stoja obaja väzni, spočíva v tom, že nech sa druhý z nich rozhodne akokoľvek, vždy je lepšie nemlčať a priznať sa, než nepriznať svoju vinu.
- Táto dilema ilustruje konflikt medzi individuálnou a skupinovou racionálnosťou. Skupina ktorej členovia preferujú svoj vlastný záujem obvykle skončí horšie, ako tá skupina, ktorej členovia uprednostňujú skupinové záujmy.
- Tento problém bol navrhnutý a široko diskutovaný už počiatkom 50-tych rokov 20 storočia Merrillom Floodom a Melvinom Dresherom vo vtedy veľmi známej Rand Corporation inštitúcii, kde sa vedci snažili použiť teóriu hier k odhaleniu zákonitostí globálnej nukleárnej stratégie.
- Väzňova dilema sa stala často používaným prístupom k vysvetleniu vzniku kooperácie v rôznych sociálnych, ekonomických a iných systémoch, kde sa pomocou matematickej teórie hier a/alebo počítačových simulácií hľadajú „racionálne dôvody“ k tomu, prečo a za akých okolností je výhodnejšie spolupracovať, než ako nespolupracovať.

## Princípy hry "väzňovej dilemy"

"Väzňova dilema" (VD) je hrou medzi dvoma hráčmi, kde každý z nich má výber z dvoch možností: *spolupracovať* (cooperate – C) alebo *podvádzať* (defect – D). Matica platieb tejto hry je daná takto

$$f = \begin{pmatrix} R & S \\ T & P \end{pmatrix} \Leftrightarrow \begin{pmatrix} 3 & 0 \\ 5 & 1 \end{pmatrix}$$

Keď oba hráči spolupracujú, potom dostanú „odmenu“  $R$  (reward), ktorá by mala byť väčšia ako bodový zisk „trest“  $P$  (punishment) získaný obidvoma hráčmi, keď podvádzajú. Ale keď jeden hráč podvádza (hrá  $D$ ) zatiaľ čo ten druhý spolupracuje (hrá  $C$ ), potom podvádzajúci získa výplatu bodov  $T$  (temptation - pokušenia) ktorá je väčšia ako  $R$ , zatiaľ čo spolupracujúci dostáva počet bodov  $S$  (sucker – ten, čo naletel) ktorá je menšia ako  $P$ .

- Uvažujme hráča – agenta  $A$ , jeho stratégia  $s(A)$  je súbor pravidiel, ktoré použije pri výbere ťahu  $C$  alebo  $D$  (spolupráce alebo podvádzania) proti druhému hráčovi, na základe predošlej histórie hry.
- Pri iba jednej iterácii by samozrejme bolo výhodné zradiť pri polovičnej šanci stretnúť spolupracujúceho, no keď sa iterácie s tým istým spoluväzňom opakujú a vopred nie je známy počet iterácií, metóda ako sa zachovať nie je jasná.
- Hra sa opakuje  $t_{max}$ -krát (dôležitý parameter hry), na záver hry sa spočítajú platby jednotlivých hráčov.

**Stratégia** je určená pomocou 3-bitového vektora (t.j. hráči si pamätajú predchádzajúci ťah oponenta)  $s = \{s_1, s_2, s_3\} \in \{0,1\}^3$ , kde jednotlivé zložky (0 – kooperácie, 1 – nekooperácia) majú túto interpretáciu:

(1)  $s_1$  určuje prvý ťah hráča: ak  $s_1=0$ , potom hráč kooperuje, v opačnom prípade, ak  $s_1=1$ , nekooperuje.

(2)  $s_2$  určuje ťah hráča v prípade, že druhý hráč v predchádzajúcom kroku kooperoval: ak  $s_2=0$ , potom hráč kooperuje, v opačnom prípade, ak  $s_2=1$ , nekooperuje.

(3)  $s_3$  určuje ťah hráča v prípade, že druhý hráč v predchádzajúcom kroku nekooperoval: ak  $s_3=0$ , potom hráč kooperuje, v opačnom prípade, ak  $s_3=1$ , nekooperuje.

## Príklad stratégie

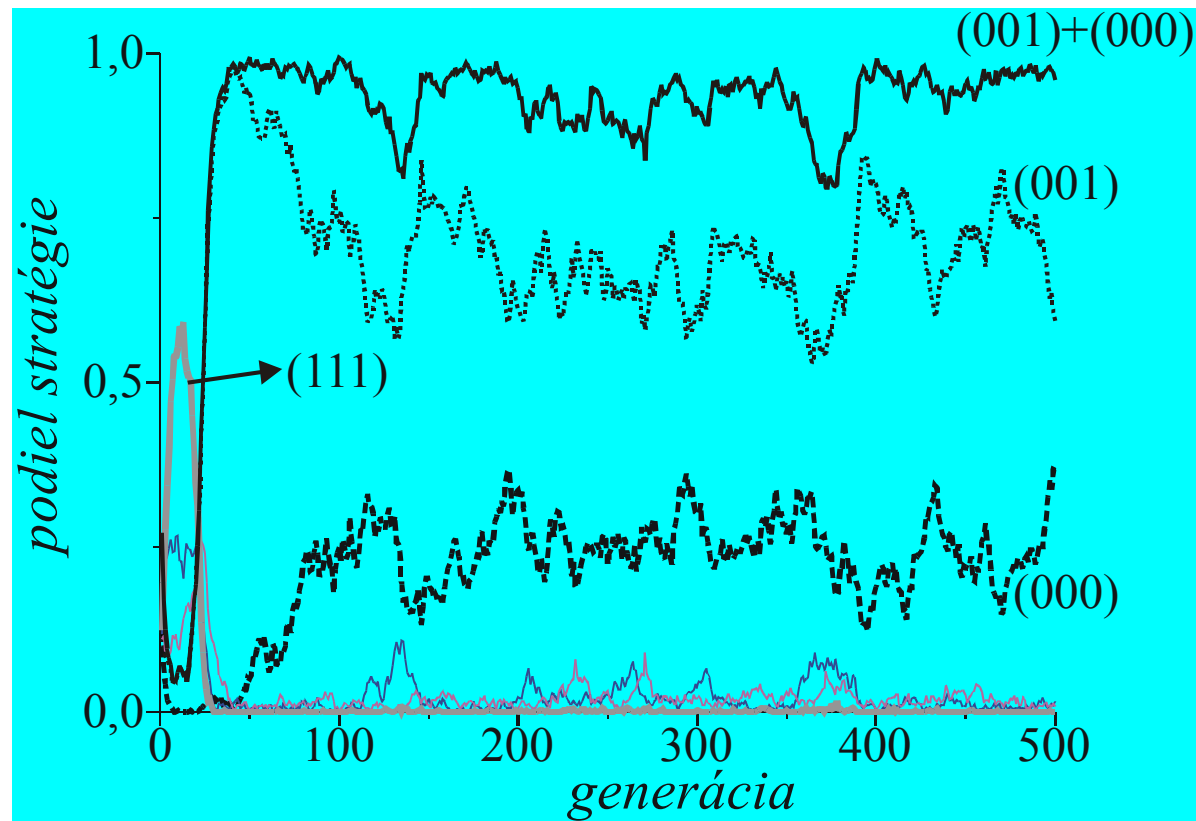
Majme dve stratégie  $s(A)=(010)$  a  $s(B)=(101)$ , potom nasledujúcich 5 ťahov hráčov  $a$  a  $b$  a taktiež aj jednotlivé platby na základe matice platieb (1) sú určené pomocou nasledujúcej tabuľky

ťah	agent $A$		agent $B$	
	ťah	platba	ťah	platba
1	0	0	1	5
2	0	3	0	3
3	1	5	0	0
4	1	1	1	1
5	0	0	1	5
suma		9		14

V prvom ťahu oba hráči použijú ťahy, ktoré sú určené prvou zložkou ich stratégií. V nasledujúcich ťahoch už sú determinovaní ťahom súpera v predchádzajúcom ťahu.

## Simulácia emergencie stabilnej stratégie pomocou genetického algoritmu

- Pri plánovaní stratégie na základe predchádzajúcich skúseností s protihráčom sa často používa genetický algoritmus.
- Táto aplikácia genetického algoritmu prvýkrát vznikla zo spolupráce amerického politológa Roberta Axelroda s informatikom a tvorcom genetických algoritmov Johnom Hollandom a rozvíjala sa ďalej pre zložitejšie modely medzinárodnej bezpečnosti odpovedajúce napr. na otázku, koľko z rozpočtu vydávať na obranu.
- V časovom priebehu je zaujímavé sledovať vývoj kooperatívnych a nekooperatívnych stratégií. Kooperatívne stratégie sa spočiatku ukázali menej výhodné, no v neskorších štádiách prevážili.

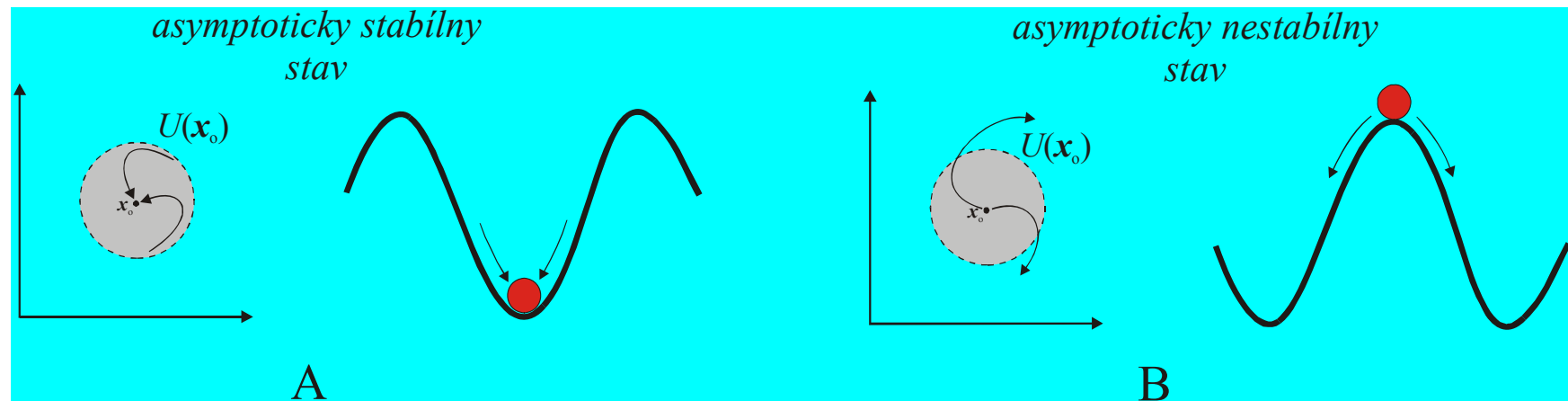


Výsledky genetického algoritmu použitého pre emergenciu výslednej stratégie, pričom populácia stratégií bola inicializovaná náhodne. V priebehu evolúcie algoritmu spontánne emergovali dve „kooperatívne“ stratégie (001) a (000), ktoré zahajujú hru kooperáciou a na kooperáciu súpera v predchádzajúcom ťahu odpovedajú kooperáciou v nasledujúcom ťahu. V dôsledku toho, že väčšinová stratégia (001) neprodukuje „podvod“, menšinová stratégia (000) nemá príležitosť reagovať spoluprácou na podvod.

- Vybraté stratégie vstupujú do vlastného procesu reprodukcie, ktorý obsahuje kríženie a mutáciu.
- Výsledné stratégie – potomkovia tvoria novú populáciu, ktorá keď obsahuje rovnaký počet potomkov, ako mala pôvodná populácia počet rodičov, nahradí rodičovskú populáciu populáciou potomkov.
- Numerické výsledky genetického algoritmu ukazujú, že ako výsledné stratégie emergujú dve podobné stratégie (001) a (000), ktoré obe zahajajú hru kooperáciou a na kooperáciu odpovedajú kooperáciou. Líšia sa v reakcii na podvod, prvá stratégia (001) reaguje na podvod podvodom, zatiaľ čo druhá stratégia (000) „hlúpo“ reaguje na podvod kooperáciou.
- Stratégia (001) sa nazýva podľa Axelroda *tit-for-tat* (vo voľnom preklade, ako ty mne, tak ja tebe). Menšinová stratégia „*dobrák*“ (000) má šancu prežiť iba popri stratégii tit-for-tat.



## Evolučne stabilné stratégie



Znázornenie *asymptoticky stabilného* (A) a *asymptoticky nestabilného* (B) stavu s jednoduchou fyzikálnou interpretáciou guľôčky, ktorá je buď v jamke (príklad asymptoticky stabilného stavu), alebo je na vrchole kopčeka (príklad asymptoticky nestabilného stavu). Ľavé časti obrázkov odpovedajú presnej matematickej definícii stavov, pre asymptoticky (ne)stabilný stav  $x_0$  existuje také okolie  $U(x_0)$ , že ak trajektória má počiatkový stav v tomto okolí, potom asymptoticky (pre  $t \rightarrow \infty$ ) trajektória vždy končí v bode  $x_0$  (vždy opúšťa okolie).

## tragédia spoločného

- Modelový príklad egoistických tendencií erodujúcich spoluprácu je tzv. tragédia spoločného definovaná Garrettom Hardinom r. 1968: "Predstavte si pastvinu prístupnú pre všetkých. Dá sa očakávať, že každý pastier sa pokúsi držať na spoločnej pastvine toľko dobytká, ako sa len dá. Ako racionálny jedinec, každý pastier sa snaží maximalizovať svoj zisk. Explicitne alebo implicitne sa pýta: "Akú zmenu výnosu pre mňa znamená prídavok jedného alebo viac zvierat k môjmu stádu?"
- Keď si racionálny pastier spočíta pozitívnu a negatívnu časť prínosu, vychádza mu, že jediné rozumné riešenie je preňho pridať ďalšie zviera k stádu. A ešte ďalšie ...
- Ale toto je záver každého racionálneho pastiera zdieľajúceho pastvinu. V tom je tá tragédia. ***Každý človek je uväznený v systéme, ktorý ho núti zväčšovať svoje stádo bez obmedzenia*** - v svete ktorý je limitovaný. ... Sloboda v užívaní spoločnej pastviny prináša skazu pre všetkých."

## Kódovanie stratégií

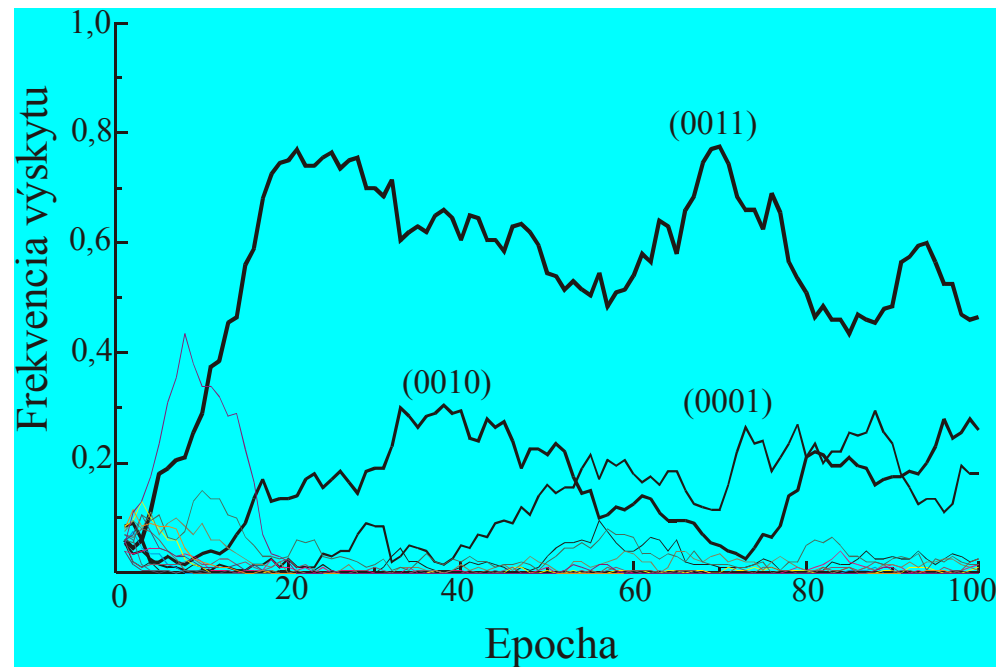
$$\mathbf{s} = (s_1, s_2, s_3, s_4) \in \{0,1\}^4$$

Hru „tragédia spoločného“ hrá  $n=3$  ( $n \geq 2$ ) účastníkov, stratégia hry každého účastníka je popísaná binárnym vektorom

$s_1$	..... prvý tah
$s_2$	..... tah ak všetci 3 oponenti kooperovali
$s_3$	..... tah ak aspoň 2 oponenti kooperovali
$s_4$	..... tah ak aspoň 1 oponent kooperoval

0.....kooperácia (K)

1.....nekooperácia (N)



Tragédia spoločnej pastviny a jej modelovanie troma pastiermi. Výsledok genetického algoritmu – zobrazenie frekvencie výskytu stratégií pre spoluprácu troch hráčov. Ako je vidno, vyhráva stratégia 0011, ktorá znamená, že na začiatku je výhodné spolupracovať, a pokiaľ všetci spolupracujú, aj pre mňa je výhodné spolupracovať. Pokiaľ ale iba jeden nespupracuje, je aj pre mňa výhodné nespupracovať.

- Všeobecné vlastnosti víťaznej stratégie: hra je *zahájená kooperáciou*, ak v predchádzajúcom ťahu *všetci oponenti kooperovali, potom kooperuj*, ak v predchádzajúcom ťahu *aspoň jeden oponent nekooperoval, potom nekooperuj*.
- Pretože vo väčších celkoch sa vždy nájde nekooperujúci jedinec, nastáva všeobecná nespolupráca - tragédia spoločnej pastviny napr. u rybolovu v medzinárodných vodách, pri rúbaní pralesov, starosti o spoločné zavodňovanie alebo znečisťovanie atmosféry. Politológ Axelrod tvrdí, že k tomu, aby v spoločnosti vznikla kooperácia, musia v nej existovať inštitúcie, ktoré kontrolujú - penalizujú nekooperáciu.

- Okrem zavedenia administrátora trestajúceho nespoluprácu sa emergenciu spolupráce dá dosiahnuť aj priestorovým rozmiestnením stratégií, ktoré potom môžu interagovať iba s blízkymi stratégiami, alebo zavedením "dobrého mena" jedincov, kedy si jedinci vymieňajú informácie o spolupráci či nespolupráci ostatných, a k tým, čo nespolupracovali s ostatnými, sa správajú, ako keby nespolupracovali s nimi - tzv. moralistická agresia.
- Ďalšou možnosťou je aj tzv. skupinový výber, kde súťaž prebieha nielen medzi jedincami v rámci populácie, ale aj medzi populáciami. Populácia s príliš veľa sebami má oproti ostatným populáciám nižšie priemerné skóre u jedincov, preto zanikne. U biológov je táto predstava uznávaná iba obmedzene, pretože rýchlosť výmeny jedincov je väčšia ako rýchlosť výmeny populácií, a teda populácia sa skôr nakazí egoizmom, ako by mala zvíťaziť nad inou už egoistickou populáciou. U spoločností ale toto vysvetlenie môže mať svoj význam.
- Evolučné štúdium väzňovej dilemy sa dá použiť aj na modelovanie vnútro- a medzietnických vzťahov.

# Závery

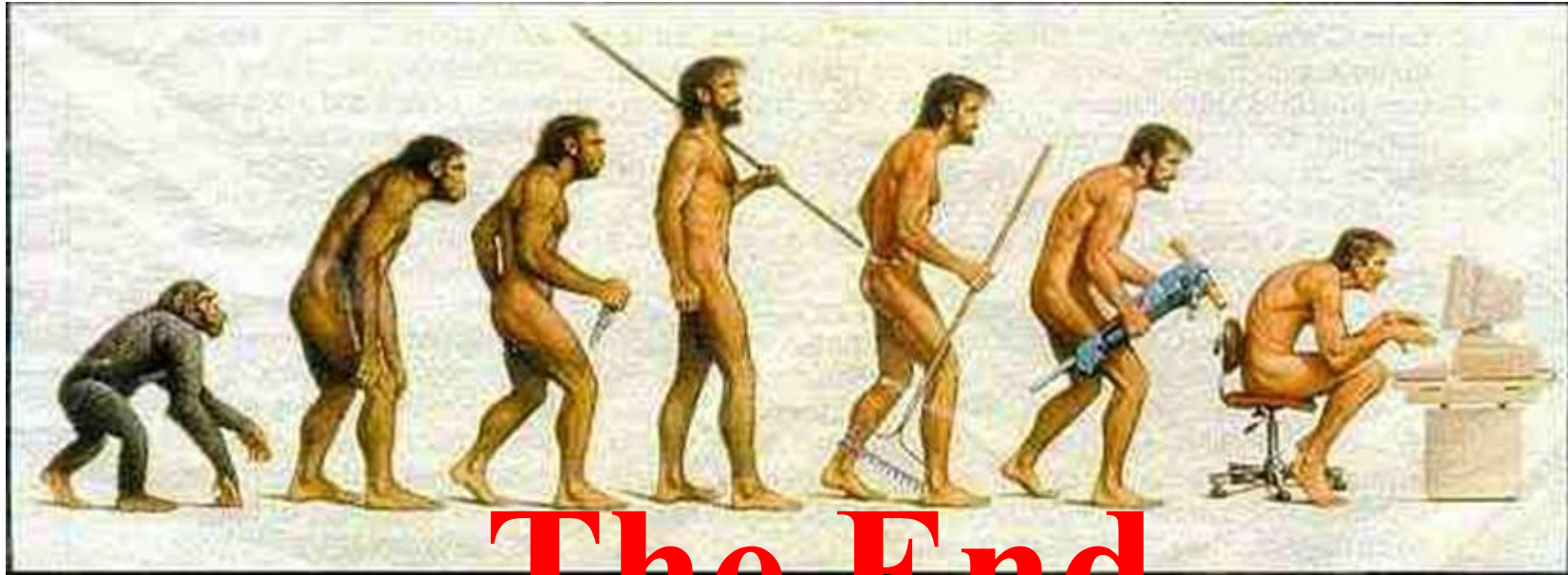
- Metafora *univerzálneho darwinizmu rozširuje* princípy darwinizmu ako univerzálneho prístupu k štúdiu evolúcie nielen v biológii, ale aj v iných vedných oblastiach (chémia, sociálne vedy, informatika, umelá inteligencia, kognitívna veda,...).
- V *informatike univerzálny darwinizmus* poskytuje jedinečnú možnosť simulácií darwinovskej evolúcie prostriedkami „in silico“ (t. j. počítačom), môžeme konštatovať tieto všeobecné závery:
- *Evolučné algoritmy tvoria robustný* optimalizačný prostriedok pre rôzne kombinatoriálne úlohy (napr. z teórie grafov, operačného výskumu, inžinierskej praxe návrhu zložitých zariadení, a pod.).
- *Evolučné multiagentové systémy umožňujú počítačové simulácie sociálnych systémov*, emergenciu kooperácie a komunikácie vypracovať evolučné základy memetiky ako špeciálneho prípadu multiagentových systémov, študovať etnické konflikty v multiagentových systémoch, a pod.
- Univerzálny darwinizmus umožňuje *informatike aktívne interagovať so sociálnymi a behaviorálnymi vedami*.



Emma Darwin (1808 – 1896)

As a young man, Darwin made a list of marriage's pros and cons. Cons included loss of time and no reading in the evening. Pros included companionship ("better than a dog anyhow") and children. In the end, he concluded: "Marry — Marry. Marry Q.E.D." Q.E.D. stands for the Latin phrase "quod erat demonstrandum," which is used at the end of mathematical proofs to indicate that the proof is complete.





**The End**