

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Július Krempaský

Vznik nových kvalit očami fyzika

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 27 (1982), No. 4, 181--195

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139800>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1982

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

Vznik nových kvalít očami fyzika*)

Július Krempaský, Bratislava

Článok pojednáva o mechanizme vzniku nových kvalít v otvorených systémoch, t.j. v systémoch, ktoré sú v interakcii so svojim okolím a o možnostiach využitia príslušného formalizmu na výklad kvalitatívnych zmien nielen v neživej, ale aj v živej prírode. Je ukázané, že táto možnosť nevyplýva len z náhodnej podobnosti javov v neživom a živom svete, ale že má hlbšie príčiny spočívajúce v tom, že biologické a sociologické systémy sú z hľadiska určitých aspektov svojej evolúcie izomorfné s neživými systémami.

Cieľom článku je súčasne poukázať na to, že súčasná fyzika založená na skúmaní nerovnovážnych a nelineárnych javov pomohla odstrániť určitú rozdielnosť vo filozofickej a fyzikálnej interpretácii evolúcie systémov a ukázala, že mechanizmus vzniku nových kvalít vo fyzike je v dokonalom súlade so všeobecnými zákonmi dialektiky.

1. Úvod

Slovo „kvalita“ sa vyskytuje prakticky vo všetkých vedách a používa sa často aj v hovorovej reči, ale len vo fyzike má tento pojem kvantitatívne vymedzený obsah. Mierou kvality systému môže byť v mnohých prípadoch jeho entropia, ktorú možno jednoznačne pre každý systém definovať. Čím nižšia je entropia systému, tým má vyššiu „kvalitu“. Spravidla to, čo je kvalitnejšie, je aj vzácnejšie a zriedkavejšie. V matematickej reči: vykytuje sa s menšou pravdepodobnosťou. Aj z toho možno dedukovať, že keby sme ponechali systém bez vonkajšieho zásahu jeho vlastnému spontánnemu vývoju, asi by prechádzal postupne do stavov s väčšou pravdepodobnosťou výskytu, t.j. do stavov charakterizovaných nižšou kvalitou. Tento záver exaktne formulovaný 2. termodynamickou vetou je pozoruhodný v tom, že je v rozpore s filozofickými tézami, podľa ktorých sa svet vyvíja od nižších foriem na vyššie. Ďalšia rozdielnosť vo filozofickom a fyzikálnom hodnotení evolučných procesov jestvovala v tom, že podľa fyzikálnej teórie je osud každého systému jednoznačne a úplne deterministicky určený dynamickými rovnicami a hraničnými a počiatočnými podmienkami, kým podľa filozofickej interpretácie je vývoj „dialektickou jednotou determinizmu a náhodnosti“. Filozofia

*) Výťah z prednášky prednesenej na zjazdoch JČSMF a JSMF v dňoch 12.—14. 10. 1981 v Karlových Varoch.

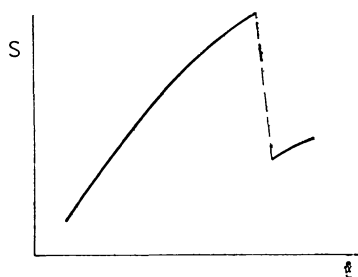
teda pripisuje náhode rovnaký význam, ako nevyhnutnosti, kým vo fyzike sa vplyvu náhodných činiteľov (fluktuáciám) na evolúciu systémov donedávna nevenovala žiadna pozornosť.

Na „obranu“ fyzikov treba povedať, že záver o spontánnom prechode systémov do stavov vyznačujúcich sa väčšou entropiou, t.j. nižšou kvalitou, platí len pre izolované systémy a že fyzika tým nevyklučuje kvalitatívne zmeny do stavov s menšou entropiou v prípadoch, keď sa jedná o otvorené systémy. Skutočne, keď systém má možnosť interagovať so svojim okolím, dochádza ku kvalitatívnym zmenám. Ľahko však zistíme, že stav s vyššou kvalitou môže vzniknúť len v tom prípade, ak systém odovzdá svoju energiu do okolia. Pri fázových premenách, pri ktorých sa nemení voľná energia, je

$$(1) \quad \delta S = \frac{\delta U}{T},$$

kde δS je zmena entropie, δU zmena vnútornej energie a T teplota. Zmena $\delta S < 0$ vyžaduje aj zmenu $\delta U < 0$, t.j. pokles vnútornej energie systému. Kvapalina pri určitých podmienkach skutočne prechádza do stavu s dokonalejšou štruktúrou, t.j. vyššou kvalitou tým, že odovzdá do okolia teplo. Je však zrejmé, že takáto evolúcia ku dokonalejším formám postupným ochladzovaním nemôže byť tým mechanizmom, ktorý by zodpovedal mechanizmu postulovanému filozofmi. Pri takom ponímaní vzniku nových kvalít by sme napr. vôbec nedokázali pochopiť možnosť vzniku života na Zemi.

Je jasné, že nádej fyzikov na správne pochopenie mechanizmu vzniku nových kvalít sa mohla upierať len na procesy, pri ktorých systém prijíma z okolia energiu (prípadne aj hmotu) a pri ktorých entropia systému postupne narastá, a očakávať, že hádam v niektorom kritickom okamihu sa zo začiatku nám bližšie z neznámych príčin entropia systému skokom zmenší (obr. 1). Dnes už vieme, že takéto procesy sa aj v neživom svete dost



Obr. 1.

často vyskytujú a možno konštatovať, že už aj vieme, prečo a za akých okolností ku takým procesom dochádza. Pritom sa s prekvapením zistilo, že aj s pomerne nenáročnou matematikou možno vypracovať relatívne dokonalý formalizmus pre opis týchto fenoménov. Tým sa, ako uvidíme neskôr, otvorila možnosť aj intenzívnejšiemu prieniku fyziky a matematiky do vied o živých systémoch, kde sa im donedávna nedávala príliš veľká šanca hlavne preto, že hneď prvý a najdôležitejší záver klasickej fyziky o tom, že systémy spontánne len degenerujú, bol v príkrom rozpore s pozorovaním v živých systémoch.

2. Podmienky vzniku nových kvalít

Zásluha o vypracovanie teórie vzniku nových štruktúr patrí najmä Prigogineovi, nositeľovi Nobelovej ceny za chémiu, a jeho spolupracovníkom [1–3], pričom v súčasnosti sa tieto javy v širšom meradle skúmajú najmä na pôde „synergetiky“ [4–7]. Základné podmienky vzniku nových kvalít možno formulovať takto:

1. Systém musí byť otvorený, t.j. musí interagovať s okolím.
2. Interakciu s okolím sa musí systém dostať do stavov veľmi vzdialených od rovnováhy.
3. Dynamické rovnice opisujúce evolúciu systému musia byť nelineárne.
4. V systéme sa musí objaviť vhodná fluktuácia.

Matematickým obrazom situácie pred a po vzniku nových kvalít sú stacionárne riešenia nelineárnych dynamických rovníc. Tieto riešenia môžu byť stabilné alebo nestabilné, čo z hľadiska vývoja systému značí, že pri malej poruche sa systém vráti do pôvodného stacionárneho stavu, resp. sa už do neho nevráti, čím sa dostane do nového kvalitatívne od neho odlišného stavu. Kritické „body“, v ktorých sa stabilita riešenia mení na nestabilitu, sa nazývajú bifurkácie. Možno ukázať, že týmto bodom zodpovedá vo fyzike stav, v ktorom sa znamienko zmeny tzv. produkcie entropie systému mení z kladného na záporné. Systém sa teda stáva fyzikálne nestabilným vtedy, keď ďalší nárast intenzity interakcie systému s okolím je spojený s poklesom produkcie entropie. Stimulom tejto nestability býva vhodná porucha, ktorá sa v daných kritických podmienkach už spontánne neutlmí, ale rastie do „makroskopických“ dimenzií a privedie celý systém do nového stacionárneho stavu vyznačujúceho sa dokonalejšou štruktúrou.

Príkladov takýchto procesov z oblasti neživého sveta je celý rad: rozkmitanie struny pri jej trení sláčikom, vznik „štruktúrného“ prúdenia kvapalín pri veľkých teplotných gradientoch (tzv. Bénardove nestability), Gunnova a Ovshinskeho dióda, laser, vznik časových a časopriestorových štruktúr v určitom okruhu biochemických reakcií (Žabotinského-Belousove experimenty), atď. Stručný prehľad týchto fenoménov s príslušnou teóriou možno nájsť napr. v knihe [8].

Vidíme, že v určitých „exponovaných“ situáciách aj vo vývoji neživých systémov hrá dôležitú úlohu náhodilý činiteľ, t.j. malá porucha, čo prvý raz explicitne formuloval Prigogine pri preberaní Nobelovej ceny. Tým sa vlastne fyzikálna teória evolúcie systémov stala dokonalou konkretizáciou filozofických téz o vývoji materiálneho sveta. Prínosom fyziky je, že stanovila presné kritéria, za ktorých sa „filozofický“ odvodený mechanizmus vývoja môže pozorovať aj v neživom svete. Z faktu, že neživý svet sa spontánne len ťažko dostáva do stavov tak vzdialených od rovnováhy, aby sa mohli prejaviť nelinearity a že aj výskyt vhodnej fluktuácie môže sa ukázať málo pravdepodobný, vyplýva, že neživý svet sa spontánnym vývojom len veľmi zriedkavo dostáva do kvalitatívne vyšších foriem. Fyzikov už teraz neprekvapuje, prečo sa napr. vznik života skúma v „baňkách“ s extrémnymi podmienkami, napr. pri elektrických výbojoch. V rovnovážnych, resp. blízkorovnovážnych podmienkach jednoducho nemôže dôjsť ku vzniku vyššej kvality.

3. Kvalitatívne zmeny v biologických a sociologických systémoch

Biologický svet existuje trvale v stavoch vzdialených od rovnováhy – to je podmienka existencia života – a jeho „dynamika“ je prakticky vždy nelineárna, takže evolúcia ku vyšším kvalitám v ňom je omnoho pravdepodobnejšia ako v neživom svete. Jedinou podmienkou, ktorá tu nie je automaticky splnená, je prítomnosť vhodnej fluktuácie. V sociologických systémoch je však aj táto podmienka takmer vždy splnená, pretože ju vedome realizuje inteligentná bytosť – človek. Neprekvapuje nás už preto, že biologická ríša speje ku vyšším formám podstatne rýchlejšie ako neživý svet, avšak ešte vždy dosť pomaly na to, aby sme to mohli bezprostredne registrovať, kým vývoj sociologických systémov prebieha takmer pred našimi očami.

Keďže fyzika dokázala za pomoci matematiky vytvoriť uspokojivú kvantitatívnu teóriu vzniku nových kvalít v neživom svete, mohlo by sa ukázať ako zaujímavé a možno aj prospešné pozrieť sa na biologické a sociologické procesy „očami“ fyzika, kde sa takéto procesy uskutočňujú v podstatne väčšej intenzite ako v neživom svete. Naskytá sa tu príležitosť „fyzikálne“ pochopiť vznik nových kvalít aj v živom svete, v ktorom mnohé vlastnosti často sa len opisujú, ale nevysvetľujú a z ktorých viaceré sú predmetom obdivu. Z oblasti biologických systémov možno bez nárokov na úplnosť a systematickosť spomenúť napr. tieto vlastnosti:

1. Výmena látok.
2. Samoreprodukcia.
4. Selekcia pri biochemických procesoch.
5. Mutácia.
6. Vznik nových druhov.
7. Cykličnosť životných procesov, ich vznik a zánik.
8. Priestorová štruktúra – charakteristické lokality v rastlinnej a živočíšnej ríši.
9. Účelnosť a prispôbenie.

Vzniká otázka, či aj samotný Darwinov princíp prirodzeného výberu nemožno bez zvyšku dedukovať zo všeobecnejších a jednoduchších princípov.

Pri vývoji sociologických systémov tiež pozorujeme výskyt javov, ktoré sú „fyzikálne“ zaujímavé, napr.:

1. Náhle kvalitatívne zmeny relatívne menších sociologických systémov, napr. bankrót podnikov v kapitalistických krajinách, náhla zmena chovania systému a pod.
2. Kvalitatívne zmeny vo veľkých sociologických systémoch, napr. revolučné zmeny v štátoch a pod.
3. Časové štruktúry, napr. výskyt revolučných zmien, periodický výskyt kríz v kapitalizme a pod.
4. Priestorové štruktúry – výskyt jednotlivých štátov, kmeňové štruktúry atď.
5. Nápadná podobnosť mechanizmu vzniku kvalitatívnych zmien v spoločnosti so vznikom nových kvalít v neživom svete: stavy vzdialené od rovnováhy – nelinearita – fluktuácia – nová kvalita.
6. Zretelné náznaky pôsobenia Le Chatelierovho a Prigogineovho princípu v sociologických systémoch – v blízkom okolí rovnováhy (resp. stacionárneho stavu)

systém spontánne likviduje pokusy o porušenie stability a po kvalitatívnej zmene minimalizuje svoju produkciu entropie.

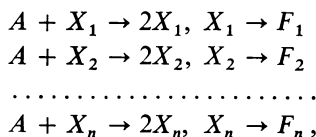
Uvedené príklady naznačujú mnoho spoločných znakov medzi neživými a živými systémami a úlohou fyziky je objasniť, do akej miery a za akých okolností možno aj procesy v živých systemoch pochopiť na základe poznatkov z fyziky neživých systémov.

4. Fyzikálno-matematické modelovanie biologických a sociologických procesov

4.1 Biochemické reakcie

Je známe, že živý svet je založený na biochemických reakciách, ktorých vlastná dynamika vyplývajúca z rýdzo fyzikálnych interakcií často celkom prirodzene poskytuje vysvetlenie viacerých vyššie uvedených „podivuhodných“ vlastností živého sveta. Ide najmä o tzv. autokatalytické reakcie charakterizované tým, že samotná syntetizovaná látka je katalyzátorom príslušnej reakcie. Podľa počtu zložiek vstupujúcich do reakcie a podľa stupňa nelinearity príslušných dynamických rovníc vzniká pri určitých podmienkach celý rad nových kvalít, ktorý prirodzeným spôsobom vysvetľujú niektoré pozorované fenomény. Prehľad o tom poskytuje tabuľka 1.

Všetky závery uvedené v tejto tabuľke možno matematicky dokázať. S niektorými tu uvedenými prípadmi sa stretne v ďalšom; na tomto mieste budeme ilustrovať vznik novej kvality pri autokonkurenčných reakciách, ktorá sa prejavuje vznikom selekcie. Uvažujme systém reakcií, pri ktorých sa z jedinej východiskovej látky A (potravinu) syntetizujú (autokatalytickým spôsobom) látky X_1, X_2, X_3, \dots pričom ďalšími reakciami tieto látky zanikajú. Možno ich schematicky opísať takto:



kde F_n sú produkty, ktoré zo systému odchádzajú do okolia. Keďže množstva látok vznikajúce pri chemických reakciách sú úmerné koncentráciám látok vstupujúcich do reakcií C_i , môžeme pre uvedené reakcie napísať tieto dynamické rovnice

$$(2) \quad \frac{dC_A}{dt} = \varphi_A - C_A \sum_i^n k_i C_i$$

$$(3) \quad \frac{dC_i}{dt} = \varphi_i + (k_i C_A - k'_i) C_i, \quad i = 1, 2, 3, \dots,$$

kde veličiny φ_A , resp. φ_i značia prítoky príslušných látok za jednotku času a k_i , resp. k'_i príslušné konštanty charakterizujúce rýchlosť reakcií. Reakcie môžu prebiehať pri určitých vonkajších podmienkach, napr. pri podmienke, že zdroj potravy je obmedzený ($\varphi_A = \text{konšt.}$) a $\varphi_i = 0$. Táto podmienka si vynucuje vznik selekčného procesu. Dokážeme to tak, že budeme skúmať stacionárne riešenia rovníc (2) a (3) a „odolnosť“ týchto stacionárnych riešení voči malým poruchám, t.j. ich stabilitu.

Tab. 1

Počet zložiek	Stupeň nelinearity	Ďalšie charakteristiky	Nová kvalita	Vysvetľuje
1	2		Dva odlišné stavy	Evolúcia jednoduchých systémov
1	3	Homog.	Bistabilné stavy	Regulácia
1	3	Nehomog.	Vlnové fronty	Šírenie plameňa, šírenie nervových vzruchov, vznik solitónov
2	2		Trigery, oscilácie okolo „stredú“	Lotkove-Volterrove cykly, regulačné procesy
2	3	Homog.	Limitné cykly, časové štruktúry	Periodické biolog. procesy (srdce, spánok, potrava atď.)
2	3	Nehomog.	Časopriestorové štruktúry	Žabotinského-Belousovo-ve pokusy, chemický model pamäte
2	e^{ax}		Časopriestorové štruktúry	Migrácia obyvateľstva, vznik lokalít
$\cong 2$	2	Autokonkurenčné reakcie	Selekčné procesy	Základné vlastnosti života: výmena látok, samoreprodukcia a selekcia
$\cong 2$	2	Konkurenčné reakcie + transkripcia pomocou kódov	Vznik nových látok + procesy selekcie Eigenove supercykly	Výmena látok, samoreprodukcia, selekcia, mutácia a vznik nových druhov. Darwinov princíp
	Veľmi vysoký	Silná nehomogenita	Transport proti koncentračnému gradientu	Transport cez membrány

Systémy rovníc (2) a (3) majú n stacionárnych riešení

$$C_1^{(1)} = \frac{\varphi_A}{k'_1}, \quad C_2^{(1)} = C_3^{(1)} = \dots C_n^{(1)} = 0, \quad C_A^{(1)} = \frac{k'_1}{k_1}$$

$$C_2^{(2)} = \frac{\varphi_A}{k'_2}, \quad C_1^{(2)} = C_3^{(2)} = \dots C_n^{(2)} = 0, \quad C_A^{(2)} = \frac{k'_2}{k_2}$$

.....

$$C_n^{(n)} = \frac{\varphi_A}{k'_n}, \quad C_1^{(n)} = C_2^{(n)} = \dots C_{n-1}^{(n)} = 0, \quad C_A^{(n)} = \frac{k'_n}{k_n}$$

Priradíme jednotlivé riešenia tak, aby platila nerovnosť

$$(4) \quad \frac{k_1}{k'_1} < \frac{k_2}{k'_2} < \frac{k_3}{k'_3} \dots < \frac{k_n}{k'_n}$$

a hľadáme stabilitu uvedených riešení metódou malej poruchy $c_i = C_i - C_i^{(j)} = \text{konšt.} \cdot e^{p_i t}$, kde t je čas. Pre n -té stacionárne riešenie by sme dostali vzťahy

$$p_1 = -k'_1 \left(1 - \frac{k_1 k'_n}{k'_1 k_n} \right), \dots, p_{n-1} = -k'_{n-1} \left(1 - \frac{k_{n-1} k'_n}{k'_{n-1} k_n} \right)$$

$$p_n = -\frac{k_n \varphi_A}{2k'_n} \left[1 \pm \sqrt{\left(1 - \frac{4k_n'^2}{k_n \varphi_A} \right)} \right].$$

Vzhľadom na nerovnosti (4) sú všetky tieto parametre záporné, čo značí, že n -té riešenie je stabilné, pretože pri každej malej poruche stacionárnej hodnoty táto porucha exponenciálne s časom zanikne. Naopak, každé iné stacionárne riešenie je nestabilné (aspoň jedna hodnota parametra p je kladná), takže pri každej malej poruche takého stavu systém sa kvalitatívne zmení a zaujme stav zodpovedajúci n -tému riešeniu. Vidíme, že samotná dynamika biochemických reakcií si pri zadaných podmienkach vynucuje selekčný proces. Keď je syntéza látok riadená kódmi (uloženými v DNK a RNK kyselinách) s nenulovou pravdepodobnosťou vzniku chýb pri transkripcii, dochádza ku syntéze nových látok, ktoré vstupujú do konkurečných reakcií a tam buď zanikajú, ak majú vzhľadom na okrajové podmienky horšie parametre, alebo víťazia, ak majú lepšie parametre. Tak dochádza ku mutácii a vzniku nových druhov. Podobne možno pochopiť vývoj rôznych vlastností charakterizujúcich ochranu a prispôbenie daného druhu.

4.2 Systémy bez vonkajšej regulácie

Je známe, že určitý okruh biochemických reakcií, vzájomné spolužitie dvoch druhov zvierat (typu dravec – obeť) a dvoch sociologických systémov (rozdelených napr. príslušnosťou k politickej strane, klubu a pod.) možno opísať rovnakými rovnicami, známymi ako Lotkove-Volterrove rovnice [9]

$$(5) \quad \frac{dC_1}{dt} = \alpha_1 C_1 - \alpha_{12} C_1 C_2$$

$$(6) \quad \frac{dC_2}{dt} = \alpha_{12} C_1 C_2 - \alpha_2 C_2,$$

kde C_1 a C_2 značia koncentrácie, resp. početnosti jednotlivých zložiek. Tieto rovnice predurčujú spomínaným systémom evolúciu vyznačujúcu sa určitou časovou štruktúrou. Možno to ľahko dokázať tým, že zavedením označení $y_1 = \alpha_{12} C_1 / \alpha_2$, $y_2 = \alpha_{12} C_2 / \alpha_1$, $A = \alpha_1 / \alpha_2$ a $t' = \alpha_2 t$ prevedieme systém rovníc (5) a (6) do tvaru

$$(7) \quad \frac{dy_1}{dt'} = A(1 - y_2) y_1$$

$$(8) \quad \frac{dy_2}{dt'} = (y_1 - 1) y_2,$$

nájde jeho stacionárne riešenia ($y_{1s} = 0$, $y_{2s} = 0$, resp. $y_{1s} = 1$ a $y_{2s} = 1$) a preskúname odolnosť týchto stacionárnych riešení voči malým poruchám v koncentrácii $\delta y = y - y_s$. Tak zistíme, že netriviálne stacionárne riešenie, t.j. riešenie zodpovedajúce hodnotám $y_{1s} = 1$ a $y_{2s} = 1$ je nestabilné a že pri malej odchýlke od neho sa systém rozkmitá podľa funkcií

$$(9) \quad \delta y_1 = \delta y_1(0) \cos \omega t' - \delta y_2(0) \omega \sin \omega t'$$

$$(10) \quad \delta y_2 = \delta y_2(0) \cos \omega t' + \frac{1}{\omega} \delta y_1(0) \sin \omega t',$$

kde $\omega = A^{1/2}$. Z matematického hľadiska sa jedná o tzv. kmitanie okolo stabilného stredú. Je známe, že takéto striedanie koncentrácií jednotlivých zložiek sa experimentálne skutočne pozorovalo (Žabotinského-Belousovove experimenty [10], periodický výskyt rysov a zajacov podľa zápiskov kanadských poľovníkov, atď.).

Možno dokázať [11], že k rovniciam (5) a (6) sa dá skonštruovať taký lagrangián, že uvedené rovnice prejdú na Hamiltonove rovnice, ak sa zavedú nové vhodné premenné. Z toho vyplýva, že aj keď tu ide o riešenie čisto biologických, resp. aj sociologických problémov, možno pri ich riešení využiť dokonale rozpracovaný formalizmus analytickej mechaniky. V citovanej práci [11] sa skúmajú aj zložitejšie systémy opísané všeobecne rovnicami typu

$$(11) \quad \frac{dC_i}{dt} = \alpha_i C_i - \beta^{-1} \sum_j \alpha_{ij} C_i C_j,$$

kde koeficienty α_{ij} splňujú relácie $\alpha_{ij} = -\alpha_{ji}$. Z toho potom vyplýva, že rovnice (11) majú stacionárne riešenie len pre párny počet zložiek. Ukazuje sa, že aj tieto všeobecné Lotkove-Volterrove rovnice majú celý rad zaujímavých aplikácií v biológii a sociológii.

4.3 Systémy s externou reguláciou

Dvojzložkový systém s nelinearitou druhého rádu neumožňuje okrem už uvedeného „kmitania okolo stabilného stredú“ žiadny iný druh časovej štruktúry, ako sa to dokazuje v publikácii [3]. Preto ak chceli autori (Prigogine a Nicolis) dosiahnuť vybudenie nových štruktúr, museli prejsť na skúmanie systémov s nelinearitou tretieho rádu. Ľahko však ukážeme, že tento cieľ možno dosiahnuť omnoho jednoduchšie, a to zavedením určitej externej regulácie do systému. Takto postavený problém má omnoho širšiu oblasť aplikability, pretože opisuje systémy, v ktorých dynamika evolúcie je určená vnútornými (objektívnymi) zákonmi a zásahom subjektu do tohoto procesu, čo je charakteristické pre určité biologické a prakticky všetky sociologické systémy. V oblasti biologickej sa môže napr. jednať o vývoj systému dvoch spolunažívajúcich druhov, ak samotný proces zvonku ovplyvňuje človek (chovateľ, hájnik a pod.).

Externá regulácia sa prejaví v tom, že k členom na pravej strane rovníc (5) a (6) pristúpia členy R a S vyjadrujúce prírastok koncentrácie jednotlivých zložiek za jednotku času vyvolaný vonkajším zásahom. Vhodnou modifikáciou týchto konštant dosiah-

neme, že systém rovníc (5) a (6) pri vonkajšej regulácii nadobudne tvar

$$(12) \quad \frac{dy_1}{dt'} = A(1 - y_2) y_1 + r$$

$$(13) \quad \frac{dy_2}{dt'} = (y_1 - 1) y_2 + s.$$

Stacionárne riešenia týchto rovníc sú odlišné od stacionárnych riešení príslušných rovníc bez externej regulácie. Keď teraz preskúmame stabilitu týchto stacionárnych riešení metódou malej poruchy $\delta y = \text{konšt.} \cdot e^{pt}$, zistíme, že parameter p pri predpoklade, že veličiny r aj s sú konštanty, má hodnoty

$$p_{1,2} = -a \pm (a^2 - b)^{1/2},$$

kde

$$a = \frac{1}{2}[(1 - y_{1s}) - A(1 - y_{2s})]$$

$$b = A[1 - (y_{1s} + y_{2s})].$$

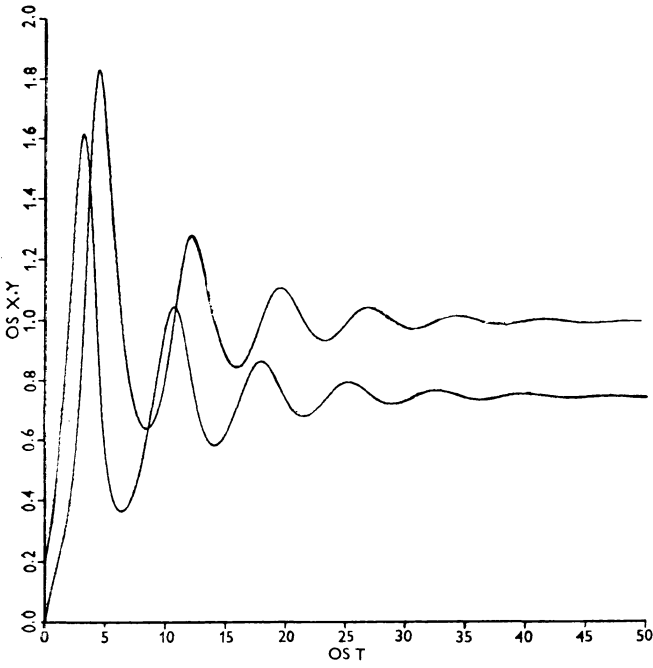
Keďže $y_{1s} \neq 1$ a $y_{2s} \neq 1$, môžeme vhodnou reguláciou, t.j. voľbou členov R a S dosiahnuť, že dvojica riešení p_1 a p_2 nadobudne hodnôt charakteristických pre ľubovoľný zo šiestich známych prípadov vyskytujúcich sa v dvojzložkových systémoch (stabilný a nestabilný uzol, stabilné a nestabilné ohnisko, kmitanie okolo stabilného streda a nestabilné sedlo). Neregulovaný systém sa teda môže (konštantnou) vonkajšou reguláciou aperiodickým spôsobom vrátiť ku stacionárnej hodnote koncentrácií svojich zložiek, alebo sa od nej vzdialíť, ďalej periodickým spôsobom prejsť do stacionárneho stavu alebo do stavu charakterizovaného inou frekvenciou i amplitúdou a napokon je tu možnosť realizovať bistabilné stavy, resp. zostať v stave charakterizovanom kmitaním okolo stabilného streda. Prípad utlmenia kmitov reguláciou, resp. prípad vybudenia nových kmitov je znázornený na obr. 2, resp. 3.

Pozoruhodný je najmä prípad s vybudením periodického procesu s postupne rastúcou amplitúdou, ktorá sa napokon vďaka okrajovým podmienkam ustáli. Tomuto prípadu sa hovorí limitný cyklus. Zaujímavé pritom je, že frekvencia týchto vybudených oscilácií je určená parametrami externej regulácie, t.j. parametrami r a s , ktoré sme považovali za konštanty. Tieto procesy poskytujú bázu pre výklad mnohých javov pozorovaných v živom svete. Je známe, že (konštantným) prijímaním určitých látok možno zvyšovať frekvenciu biologických procesov (napr. tlkot srdca), kým prijímaním iných ju naopak, znížiť. Rovnako možno na základe tohoto modelu dobre „porozumieť“ štartu, resp. zániku rôznych biologických cyklov.

Veľmi ľahko možno ukázať, že externou reguláciou sa dosiahne, že Lotkove-Volterrove systémy s ľubovoľným počtom zložiek opísané rovnicami (11) môžu mať stacionárne riešenia. Aj tento poznatok má značnú aplikabilitu pri skúmaní sociologických systémov.

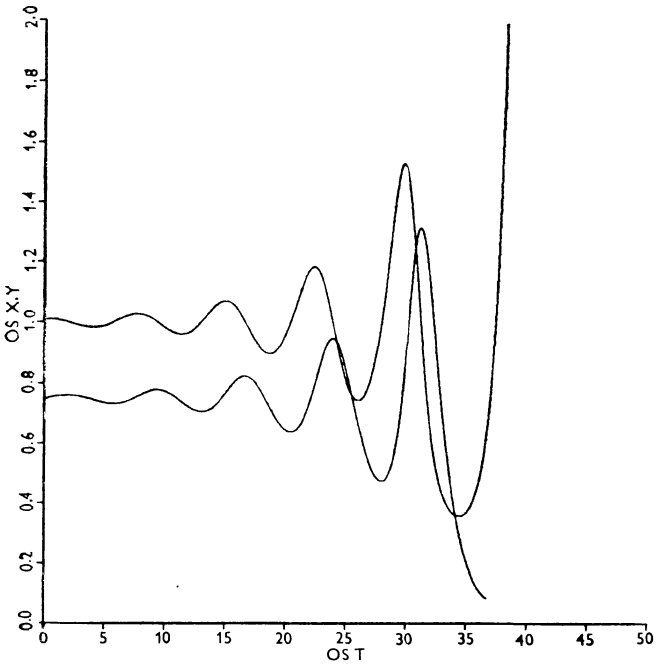
PARAMETRE R = 0.00 S = 0.25

Obr. 2.



PARAMETRE R = -0.25 S = 0.00

Obr. 3.



4.4 Sociologické systémy

Uviedli sme už, že procesy vývoja v sociologických systémoch majú podobné charakteristiky ako vznik nových kvalít v oblasti neživého sveta. Ďalej sme upozornili, že prítomnosť objektívnych i subjektívnych činiteľov v procesoch evolúcie sociologických systémov signalizuje, že by sa tieto procesy mohli dobre modelovať externe riadenými neživými, príp. biologickými systémami. Je známe, že vývoj externe regulovaných systémov možno v entropickom zobrazení opísať rovnicou

$$(14) \quad \frac{dS}{dt} = -\operatorname{div} i_e + \sigma_i + \sigma_e,$$

kde S je entropia, i_e hustoty entropických tokov, σ_i produkcia entropie vnútri systému a σ_e produkcia entropie zodpovedajúca regulácii. Zo všeobecných termodynamických zákonov vyplýva, že vždy je $\sigma_i > 0$, zatiaľ čo veličina σ_e môže byť kladná aj záporná podľa toho, či vonkajší činiteľ vnáša do systému „poriadok“ alebo „chaos“. Všetky veličiny vystupujúce na pravej strane rovnice (14) môžu byť funkciami samotnej entropie. Je nám už známe, že keď sa systém dostane do stavu, v ktorom malá fluktuácia vyvolá (následkom nelineárnosti dynamiky) pokles rastu entropie, systém sa skokom kvalitatívne zmení. Keby sme teda ukázali, že všetky členy vystupujúce v rovnici (14) majú svoje ekvivalenty aj v sociologických systémoch, mohli by sme „fyzikálne“ pochopiť vznik nových kvalít aj pri evolúcii týchto systémov. Pokúsime sa ukázať, že takéto priradenie je možné.

Najdôležitejším pojmom je samotná entropia. Pri jej definícii pre sociologické systémy musíme uvážiť, že tieto systémy sú cieľovo orientované systémy, t.j. činnosť ich členov je podriadená určitým cieľom. Ak odhliadneme od určitých z hľadiska evolúcie systémov nepodstatných anomálií, možno cieľ sociologických systémov definovať ako úsilie o maximálne uspokojenie materiálnych, kultúrnych, nacionálnych, citových a iných potrieb jeho členov. Práve tak, ako zákon, podľa ktorého sa pri spontánnych procesoch v neživom svete hromadí teplo, umožnil definíciu entropie pre neživé systémy, je tento cieľ platformou, ktorá umožňuje zavedenie pojmu entropie aj pre sociologické systémy. Na jeho základe možno totiž jednoznačne rozhodnúť o tom, ktorá konfigurácia sociologického systému je „usporiadanejšia“. (Tá, ktorá zabezpečí lepšie uspokojenie vyššie uvedených potrieb pre všetkých členov sociologického systému.)

Možno sa pokúsiť aj o konkrétnejšiu definíciu entropie určitého sociologického systému. Pre jednoduchosť sa možno obmedziť na systém, v ktorom ide o uspokojovanie len jednej potreby. Členovia sociologického systému sú buď spokojní, alebo nespokojní s „usporiadaním“ daného systému z hľadiska uspokojovania danej potreby. Počet spokojných (resp. nespokojných) možno považovať za „makrofyzikálnu“ veličinu charakterizujúcu systém (makrostav). Je zrejmé, že je mysliteľný väčší počet takých usporiadaní systému, ktoré majú za následok rovnaký makrostav. Takéto usporiadania definujú sociologické „mikrostavy“. Ďalej už možno pokračovať podobne ako v neživom svete – možno definovať entropiu ako veličinu úmernú logaritmu termodynamickej pravdepodobnosti P , t.j. počtu mikrostavov poskytujúcich rovnaký makrostav, resp. veličinu úmernú logaritmu pravdepodobnosti mikrostavu definovanej podielom $1/P$

$$(15) \quad S = - \text{konšt.} \ln p .$$

Kedže sociologický systém má vždy určitú štruktúru, možno používať adekvátnejšiu definíciu v tvare

$$(16) \quad S = - \text{konšt.} \sum p_i \ln p_i .$$

Kedže nie všetci členovia sociologického systému sú rovnako „schopní“ a nadpriemerných býva menej ako priemerných, má takto zavedená pravdepodobnosť sociologického mikrostavu $p = 1/P$ rovnakú vlastnosť ako v neživom svete: pravdepodobnosť vzniku štruktúry s nižšou entropiou je menšia ako pravdepodobnosť vzniku usporiadania s väčšou entropiou. (Počet možností realizácií takých usporiadaní sociologického systému, ktoré vedú k menšiemu počtu nespokojných, je zrejme menší ako počet možností vedúcich ku stavom s väčším počtom nespokojných.) Takto zavedená entropia sociologického systému má teda podobné vlastnosti ako entropia neživých systémov.

Entropické toky v neživých systémoch súvisia s výmenou tepla cez rozhranie systému, čo vedie ku vzrastu alebo ku poklesu entropie systému. Je zrejmé, že podobné fenomény (s rovnakým dopadom) možno pozorovať aj v sociologických systémoch. Realizuje sa „individuálnou“ interakciou členov systémov cez ich rozhrania, napr. výmena špecialistov, príliv diverzantov, špiónov, únik tovaru alebo devíz cez hranice, resp. ich prisun, atď.

Produkcia entropie v neživých systémoch súvisí s gradientom teploty (T), gradientom elektrického potenciálu (V), gradientom chemického potenciálu (μ), prípadne aj s ďalšími zovšeobecnenými tokmi a možno ju vyjadriť vzťahom

$$(17) \quad \sigma_i = - \frac{1}{T^2} i_t \cdot \text{grad } T - \frac{1}{T} i_e \cdot \text{grad } V - \frac{1}{T} i_h \cdot \text{grad } \mu ,$$

kde i_t , i_e a i_h sú hustoty tepelného, elektrického a hmotnostného toku. Jednotlivým zložkám produkcie entropie v tomto vzťahu zodpovedá v sociologických systémoch produkcia entropie následkom „tepelného“ gradientu (rôzny ekonomický štandard zložiek systému), následkom gradientu „elektrického potenciálu“ (napätie medzi vládnucimi a podriadenými, medzi národnostnými skupinami, vlastníkami a nemajetnými a pod.) a následkom gradientu „chemického“ potenciálu (migrácia obyvateľstva). Nie je ťažké dokázať, že podobne ako v neživých systémoch, aj tu je vždy $\sigma_i > 0$. Vyplýva to jednoducho zo skutočnosti, že každý člen sociologického systému (presnejšie prakticky každý) sa snaží uspokojiť predovšetkým svoje potreby, čo často vedie ku vnútorným treniciam a rozporom medzi členmi systému a tým ku spontánnemu rastu jeho entropie. Spontánnu činnosť členov sociologického systému (ak neberieme zreteľ na riadenie) vedie teda systém do stavov s väčšou entropiou, čo je charakteristické aj pre neživé systémy.

Člen σ_e v rovnici (14) súvisí s vplyvom externého činiteľa na vnútornú dynamiku systému. Je jasné, že členovia sociologického systému majú schopnosť a možnosť vnášať priamo do systému poriadok, resp. rozvrat vďaka svojej rozumovej činnosti. Podľa známeho Brillouinovho princípu je takáto činnosť ekvivalentná produkcii negatívnej, resp. pozitívnej entropie. Túto entropiu nemožno nijako odlíšiť od entropie podmienne-

nej tokmi a jej produkciou vnútri systému (σ_i). O vývoji sociologického systému rozhodujú preto všetky tri zložky vystupujúce v uvedenej rovnici. Keďže vzťahy vyjadrujúce dynamiku sociologických systémov sa ľahko môžu stať nelineárnymi a fluktuácie sa v takýchto systémoch vždy vyskytujú, mal by mať aj vývoj sociologických systémov znaky charakteristické pre vývoj neživých systémov ku novým kvalitám s tým rozdielom, že člen σ_α v rovnici (14) procesy buď urýchľuje, spomaľuje, alebo vôbec znemožňuje dosiahnuť stav, za ktorým by mala nevyhnutne nasledovať skoková kvalitatívna zmena. Z pohľadu fyzika je preto pochopiteľné, že v sociologických systémoch vznikajú časové, priestorové i časopriestorové štruktúry a iné kvalitatívne zmeny, ktoré sme spomínali v úvode, a že mechanizmus vzniku týchto „kvalít“ je podobný ako v neživom svete.

Pri konkrétnom skúmaní vzniku nových kvalít, najmä časových a priestorových štruktúr v určitých konkrétnych sociologických systémoch, sa najprv formuluje „master equation“, ktorá vyjadruje dynamiku systému a pre parametre v nej vystupujúce sa navrhuje funkčné vyjadrenie vychádzajúce z pozorovania. Za tým účelom sa definuje tzv. aspektový priestor, t.j. priestor vektorov vyjadrujúcich charakteristiku členov daného sociologického systému z hľadiska ich postojov a príslušnosti. Takými aspektami môžu byť napr. politická príslušnosť, povolanie, šport, ekonomický štandard, príslušnosť ku rozličným klubom atď. Zložky týchto vektorov vyjadrujú zatriedenie jednotlivých členov sociologického systému. Vektory v_i^α charakterizujú zatriedenie jednotlivca do určitej skupiny (i) z hľadiska aspektu (α). Dynamika sociologického systému uvažovaného druhu je určovaná tým, že jednotlivci pod vplyvom rozličných okolností menia svoje postoje v rámci jednotlivých aspektov. Tranzitná pravdepodobnosť w_{ij}^α sa definuje ako pravdepodobnosť, že daný člen subsystému α zmení za jednotku času svoj postoj zo skupiny j do skupiny i . Ak počty členov jednotlivých skupín označíme $m_{\alpha i}$, možno prírastok tohoto počtu za jednotku času vyjadriť rovnicou

$$(18) \quad \frac{dm_{\alpha i}}{dt} = \sum_j m_{\alpha j} w_{ij}^\alpha - \sum_j m_{\alpha i} w_{ji}^\alpha,$$

kde s je počet možných skupín v rámci daného aspektového priestoru. Rovnicu (18) možno považovať za „master equation“ určitého druhu sociologických systémov. Jej riešením možno skúmať napr. problém šírenia názorov [12], problém vzniku priestorových lokalít pri migrácii obyvateľstva [13] a v práci [14] sa ukazuje, ako možno tieto štruktúry ovplyvňovať externou reguláciou. Problém možno aj obrátiť – možno hľadať také regulačné parametre, aby sa dosiahla požadovaná štruktúra v rozložení obyvateľstva a pod.

5. Extremálne princípy aplikovateľné v biológii a sociológii

V nerovnovážnej lineárnej i nelineárnej termodynamike neživých systémov sa dokazujú určité princípy, ktoré, ako sa zdá, prejavujú svoju platnosť aj v biologických a sociologických systémoch. Le Chatelierov princíp charakterizuje skutočnosť, že systém

v okolí termodynamickej rovnováhy sa po poruche vracia spontánne do rovnovážneho stavu. Pre oblasť nerovnovážnej, ale lineárnej termodynamiky platí Prigogineov princíp minimálnej produkcie entropie, ktorý možno matematicky formulovať nerovnosťou

$$(19) \quad \frac{d\sigma}{dt} \leq 0.$$

To značí, že spontánny vývoj systému je charakterizovaný poklesom produkcie entropie a trvá dovtedy, kým sa nedosiahne stav s minimálnou produkciou entropie, ktorý zodpovedá stacionárnemu stavu.

Pre oblasť nerovnovážnej nelineárnej termodynamiky sa podarilo dokázať len platnosť nerovnosti

$$(20) \quad \frac{d\sigma_x}{dt} \leq 0,$$

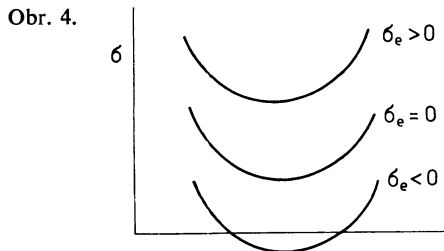
kde $d\sigma_x$ značí zmenu produkcie entropie vyvolanú len zmenou zovšeobecnených síl (nie aj zmenou zovšeobecnených tokov). Táto nerovnosť nesie názov Prigogineov-Glansdorfov princíp.

Seriózna analýza biologických procesov ukázala, že až na nepatrné výjimky (súvisiace s vývojom embrya) sa v nich výrazne uplatňuje Prigogineov princíp minimálnej produkcie entropie. Otázkou je jeho pôsobnosť aj v sociologických systémoch. Videli sme, že evolúcia týchto systémov sa od neživých, resp. biologických líši len tým, že tu pristupuje do evolučnej rovnice člen zodpovedajúci externej regulácii. Je zrejmé, že pri ľubovoľnej (časove premenlivej) externej regulácii sa systém vôbec nemusí vyznačovať aj stacionárnymi stavmi. Pokiaľ však je regulácia „konštantná“, t.j. pokiaľ s parametrami r a s v rovniciach (12) a (13) súvisí konštantná produkcia entropie σ_e , vždy platí rovnica

$$(21) \quad \frac{d\sigma}{dt} = \frac{d(\sigma_i + \sigma_e)}{dt} = \frac{d\sigma_i}{dt}.$$

Preto podmienka (19) je všeobecne splnená aj v takýchto regulovaných systémoch. Aj regulovaný systém teda minimalizuje produkciu svojej entropie v stacionárnom stave, avšak veľkosť tejto produkcie je modifikovaná členom σ_e , t.j.

$$(22) \quad \sigma_{\min} = \sigma_{i\min} + \sigma_e.$$



Kedže σ_e môže byť vo všeobecnosti kladná aj záporná veličina (na rozdiel od σ_i , ktorá

je vždy kladná), môže byť minimálna produkcia entropie v konštantne regulovaných systémoch menšia aj väčšia ako v neregulovaných (obr. 4). Môžeme teda konštatovať, že v regulovaných systémoch v stacionárnom stave dosahuje produkcia celkovej entropie vo všeobecnosti len relatívne minimum. Absolútne minimum tejto produkcie by s ohľadom na význam entropie zodpovedalo najdokonalejšiemu „riadeniu“. Keby teda bolo možné vyjadriť celkovú produkciu entropie ako funkciu nejakého štruktúrneho parametra, bola by daná možnosť matematicky (t.j. objektívne) hľadať optimálne riadenie minimalizáciou tejto funkcie. V práci [14] sa ukazuje, že za určitých zjednodušujúcich podmienok je tento problém riešiteľný a poskytuje tak prakticky významnú aplikáciu extrémálnych princípov z neživého sveta na sociologické systémy.

6. Záver

Je známe, že v súčasnosti neprebíha už len proces diferenciácie vied, ale aj proces ich integrácie. Ukazuje sa, že dôležitou bázou, na ktorej sa môžu súčasné vedy integrovať, je fyzika, pretože jej relatívne dokonalý matematicky podložený formalizmus možno aplikovať v chémii, biológii, a ako sme sa usilovali dokázať, aj vo vedách o sociologických systémoch. Tým sa objavila možnosť podstatne širšej matematizácie aj takých vied, v ktorých sa to donedávna považovalo za iluzórne. Tento proces už v súčasnosti veľmi intenzívne prebieha a v budúcnosti sa bude zrejme ešte viac rozširovať do hĺbky aj do šírky; preto treba byť na to pripravený. Úlohou článku bolo poskytnúť základné informácie o týchto, podľa nášho názoru veľmi progresívnych trendoch vo vede.

Literatúra

- [1] PRIGOGINE I.: *Introduction to Thermodynamics of Irreversible Processes*. Springfield, 1955.
- [2] GLANSDORF P. and PRIGOGINE I.: *Thermodynamic Theory of Structure, Stability and Fluctuations*. London 1971.
- [3] NICOLIS and PRIGOGINE I.: *Self-Organization in Non-equilibrium Systems*, Wiley, New York 1977.
- [4] HAKEN H.: *Synergetics (An Introduction)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1977.
- [5] HAKEN H.: *Synergetics (A Workshop)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1977.
- [6] HAKEN H.: *Synergetics (Far from Equilibrium)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1979.
- [7] HAKEN H.: *Dynamics of Synergetics Systems*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1980.
- [8] EBELING W.: *Strukturbildung bei Irreversiblen Prozessen*. Teubner, Leipzig 1976.
- [9] LOTKA A. J.: *Elements of Mathematical Biology*. New York 1956.
- [10] ŽABOTINSKIĀ A. M.: *Samovozbuždennyje kolebanija koncentracii*. Moskva 1974.
- [11] GOEL N. S., MAITRA S. C. and MONTROLL E. W.: *Rev. Mod. Phys.* 43 (1971), 231.
- [12] WALLS D. F.: *Collective Phenomena 2* (1976), 125.
- [13] WEDLICH W.: *Collective Phenomena 1* (1972), 51.
- [14] KREMPASKÝ J., KVĚTOŇ (bude publikované).