

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Hermann Haken

Synergetika - procesy samoorganizácie vo fyzike, chémii a biológii

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 32 (1987), No. 3, 123--137

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139894>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1987

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>

# Synergetika — procesy samoorganizácie vo fyzike, chémii a biológii

*Hermann Haken, Stuttgart, NSR*



*Autor (nar. 1927) získal titul doktora matematiky na univerzite v Erlangene, kde sa stal v r. 1956 docentom teoretickej fyziky. Od r. 1960 je profesorom teoretickej fyziky na univerzite v Stuttgarte a od r. 1967 čestným profesorom univerzity v Hohenheime. Ako hosť bol činný vo Spojených štátoch, Anglicku, Francúzsku, Japonsku a Sovietskom zväze. Je autorom mnohých prác z oblasti teórie grúp, fyziky pevných látok, fyziky laserov a nelineárnej optiky, štatistickej fyziky a fyziky plazmy. Rovnako sa venoval modelom chemických reakcií a modelom morfogénézy.*

*V r. 1976 bol prof. Haken vyznamenaný Britským inštitútom pre fyziku a Nemeckou fyzikálnou spoločnosťou cenou a medailou Maxa Borna. V r. 1981 bol odmenený Franklinovým inštitútom vo*

*Philadelphii Michelsonovou medailou za základné práce v oblasti synergetiky. V roku 1982 mu univerzita v Essene udelila čestný doktorát. Prof. Haken je členom Nemeckej spoločnosti prírodovedcov Leopoldina a členom korešpondentom Bavorskej akadémie vied.*

## 1. Odporujú biologické štruktúry základným fyzikálnym zákonom?

Svet, v ktorom žijeme, sa skladá z rôznych štruktúr, napr. domov, áut, obrazov. Tieto štruktúry sa zrodili v ľudskom mozgu a boli vytvorené ľudskými rukami. Mimo nich existuje mnoho štruktúr, na vzniku ktorých sa človek vôbec nepodieľal. Ak obrátime naše teleskopy do hĺbok kozmu, nájdeme špirálové hmloviny s ich jemnou štruktúrou vo forme špirálovitých ramien. Aj v našej dimenzii existujú veľmi výrazné, prírodou vytvorené štruktúry ako napríklad kryštáliky snehových vločiek s pravidelnou šesťuholníkovou štruktúrou. Živá príroda nás stále nanovo prekvapuje bohatstvom a možno aj bláznivosťou jej foriem. Na obr. 1 vidíte ako príklad guľové oko tropickej

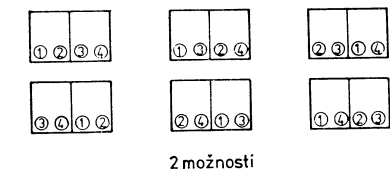
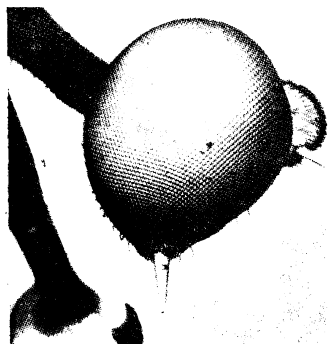
---

HERMANN HAKEN: *Synergetik — Selbstorganisationsvorgänge in Physik, Chemie und Biologie*. Alexander v. Humboldt — Stiftung Mitteilungen 1984, No. 43, pp. 12—23. Přeložil Igor Jex. Obrázky převzaty z originálu, kopie zhotovil Antonín Nový.

muchy. Toto guľové oko zaručuje tomuto živočíchovi prakticky všesmerný rozhľad. Okrem toho je nápadná jemná štruktúra vo forme šesťuholníkov.

Keby ste sa však boli opýtali pred dvadsiatimi rokmi fyzika, či je v stave aspoň principiálne vysvetlíť túto štruktúru, bol by zrejme musel odpovedať záporne. Je to divné, pretože všetky tieto štruktúry sú hmotné, teda popísateľné zákonmi fyziky. Napriek tomu vznikol rozpor a tento rozpor pozorujeme už v každodennej praxi. Namiesto vzniku štruktúr pozorujeme veľmi často zničenie usporiadaných stavov. K tomu vám pripomeniem niekoľko veľmi jednoduchých skúseností. Ak dáme do kontaktu teplé a studené teleso, začne prebiehať výmena tepla a vznikne rovnomerne teplé teleso. Opačný pochod, to jest, že sa teplé teleso spontánne rozdelí na teplú a studenú časť, sa v prírode nepozoruje. Rovnako je to s nasledujúcim príkladom. Ak spojíme nádobu s plynom s prázdnu nádobou a odstránime deliacu prepážku, začne plyn prúdiť do nevyplnenej časti, kým sa celý objem rovnomerne nevyplní. Opačný proces, že sa atómy plynu spontánne oddelia, nie je v prírode pozorovaný. Procesy prebiehajú len jedným smerom a nie sú obrátiteľné, sú ireverzibilné.

Obr. 1. Guľové oko tropickej muchy.



Obr. 2. Možnosti umiestnenia štyroch guľiek v dvoch krabiciach. Existuje jedna možnosť, ako umiestniť všetky guľičky v jednej krabici, ale existuje šesť možností rovnomerného rozdelenia guľičiek.

V minulom storočí Clausius dokázal tieto procesy jednotne popísať tým, že zaviedol značne abstraktný pojem entropie. Podľa Clausia smeruje entropia všeobecne v systéme ponechanom sebe samému (tj. uzavretom) do stavu s maximom tejto veličiny. Geniálny rakúsky fyzik Boltzmann potom stanovil súvis medzi entropiou a mikroskopickým poriadkom alebo lepšie povedané neporiadkom, a to slávnym vzorcom

$$S = k \ln W.$$

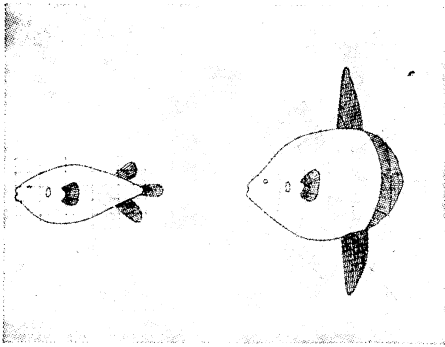
Sľubujem, že toto je jediný vzorec v celej prednáške. Tiež sa už k nemu nebudem vracaf. Aby sme však vysledovali to najpodstatnejšie, pozastavme sa nad ním ešte chvíľu. Entropia  $S$  je rovná Boltzmannovej konštante  $k$  krát prirodzený logaritmus  $W$ . Toto  $W$  je počet možností, ktoré možno realizovať, a to chcem demonštrovať na jednoduchom príklade na obr. 2. Ak uvažujeme plyn v nádobe, máme jednu možnosť, ako umiestniť 4 molekuly plynu v ľavej nádobe. Naproti tomu môžete okamžite pre-

počítať, že existuje úhrne šesť možností, ako tieto štyri molekuly rovnomerne rozdeliť do dvoch nádob. Boltzmannov princíp teda nehovorí nič iné ako to, že príroda uprednostňuje vždy najväčší počet možností, teda smeruje k tomuto stavu. To znamená, ako vidieť z tohto jednoduchého prípadu najväčšiu možnú bezštruktúrnosť. Je zaujímavé konštatovať, že dvaja veľkí muži minulého storočia, a to na jednej strane Boltzmann a na druhej Darwin, dospeli k dvom úplne rozdielnym chápaniam sveta. Na jednej strane Darwin s jeho teóriami vývoja stále vyšších, stále komplikovanejších druhov a tým stále viac vyvinutých živočíchov, na druhej strane Boltzmann, podľa ktorého by mal smerovať svet k stále väčšej bezštruktúrnosti, a ako sa v minulom storočí diskutovalo, nakoniec zomrieť tepelnou smrťou. Ak môžeme tieto dva názory zjednotiť, zvlášť ako možno chápať vznik štruktúr v rámci fyzikálnych zákonov a tým vytvoriť most medzi fyzikou a darwinizmom živej prírody?

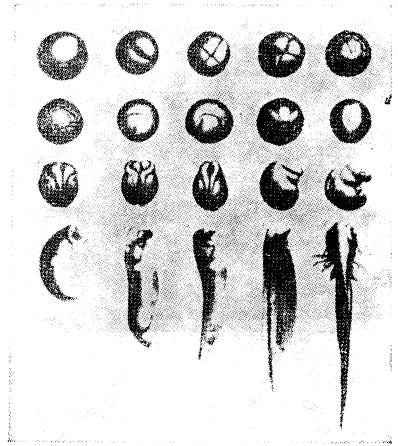
## 2. Stanovenie cieľa synergetiky

Na tomto mieste začína formulácia problémov synergetiky. Slovo synergetika je vzaté z gréčtiny (ako konečne mnohé vedecké pojmy) a znamená asi toľko ako „náuka o spolupôsobení“. Ako vieme skladajú sa všetky systémy, ktoré vo vede skúmame, z mnohých jednotlivých podsystémov, mnohých jednotlivých častí. My chceme pochopiť, ako tieto časti sú schopné spolupôsobiť a tak tvoriť usporiadaný celok. Tento celok sa javí často ako regulovaný, samoorganizovaný. K tomuto pojmu sa vrátíme zvlášť v spojení s živou prírodou. V tomto prípade sa nám totiž to spolupôsobenie často javí ako výhodné. Možno povedať, že celok je viac ako suma častí. V synergetike sme si položili otázku, či existujú všeobecné princípy, ktoré regulujú spolupôsobenie takýchto jednotlivých častí. Pritom myslíme na atómy, molekuly, svetelné kvantá, ale aj bunky, zvieratá alebo dokonca celé skupiny ľudí. Keď chápeme problém takto všeobecne, či existujú všeobecne platné princípy, ktoré regulujú spolupôsobenie tak rozdielných častí, povie sa, že ide o bláznivú alebo nezmyselnú otázku. Čo môže mať spoločné správanie skupiny atómov so správaním ľudských skupín? V tejto všeobecnej forme je postavenie otázky pravdepodobne nezmyselné. Avšak pošťastilo sa nám zúžiť oblasť problémov. Obmedzili sme sa na také situácie, v ktorých sa správanie systému dramaticky mení, v ktorých náhle vznikajú štruktúry nového typu. Čo však znamená dramaticky meniť, náhle vznikáť? Namiesto dlhej diskusie sa budem snažiť objasniť problém na príklade z biológie. Na obr. 3 sú zobrazené dve ryby. Jednou je slnečnica pestrá a druhá je mesačník svietivý. Slávny škótsky biológ D'Arcy Wentworth Thompson už na začiatku storočia dospel k zaujímavému výsledku: Ak si zvolíme súradný systém a pomocou neho určíme všetky body jednej z rýb, pak body druhej ryby získame spojitou deformáciou nášho súradného systému. Štruktúra však ostane zachovaná. Oko prejde na oko, žiabro na žiabro, plutva na odpovedajúcu plutvu. Pretože štruktúra ostáva zachovaná, hovoríme o štruktúrnej stabilite a matematik by povedal, že obidva druhy rýb náležia k jednej triede. Tým sa však v synergetike nechceme zaoberať. Chcem sa skôr zaoberať otázkou, či existujú štruktúrne zmeny a obr. 4, ktorý ukazuje vývoj mloka od embrya až k dospelému jedincovi, nám ozrejmuje, čo chceme chápať pod pojmom štruktúrna zmena. Pri prechode z jednej

fázy do nasledujúcej vidíte stále nanovo tvorenie novej štruktúry, vznik jedného zárezu, dvoch zárezov až vytvorenie nového zvieraťa.



Obr. 3. Slnčnica a mesačnik sú prevediteľné na seba jednoduchou transformáciou súradníc.



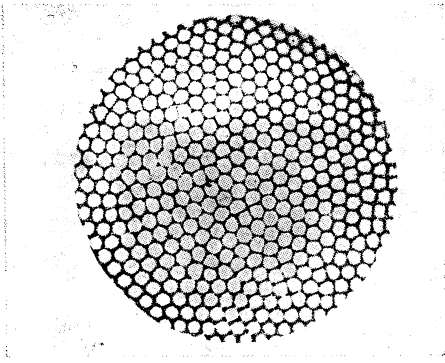
Obr. 4. Vývojové štádiá mloka.

Opäť by však nebolo múdre začať najťažšou otázkou, t. j. vznikom štruktúr v biológii. Ak existujú všeobecné princípy, potom sa musia prejavovať na jednoduchej úrovni. Najprv chcem uviesť niekoľko príkladov z neživej prírody, aby som potom mohol vytvoriť most k živej prírode. Príkladom je tvorba určitých oblačných ciest, ktoré sú ľahko pozorovateľné na oblohe. Piloti vetroňov určite potvrdia, že vzdušné masy nie sú v klude. Stále sa hýbu – vzduch jednou cestou stúpa a druhou cestou klesá. V konečnom dôsledku máme pred sebou dynamickú štruktúru. Tvorbu tejto štruktúry možno rekonštruovať v laboratóriu, možno tu tiež nájsť nielen válcovité, ale aj komplikovanejšie štruktúry. Na obr. 5 je ďalší príklad – slávna Bénardova nestabilita v kvapalinách. Kvapalina v kruhovej nádobe sa zdola ohrieva. Keď bude ohrev dostatočne silný, vytvoria sa šesťuholníkové bunky. V strede každej bunky stúpa kvapalina nahor a na okrajoch klesá. Pomocou obr. 6 chcem naznačiť, že snáď predsa len existujú všeobecné princípy, ktorými sa tvorba štruktúr riadi. Vidíme guľu tvorenú tenkou kovovou stenou. Ak v guľi vytvoríme podtlak, vzniká náhle hexagonálny, t. j. šesťuholníkový vzor. To môže na tomto mieste pôsobiť ako náhoda. Chcem sa ale pokúsiť v rámci tejto prednášky presvedčiť vás o tom, že vznik takýchto vzorov nie je náhodný, že tu pôsobia hlbokosiahajúce princípy, ktoré vyvolávajú tieto vzory.

V ďalšom príklade prejdem k chémii, a to slávnej reakcii Belousove-Žabotinského, jednej pomerne komplikovanej chemickej reakcii, s podrobnosťami ktorej sa nechcem zaoberať. Možno konštatovať nasledujúce: Spontánne sa tvoria špirály (obr. 7). Rastú smerom von, narážajú na seba a nakoniec sa navzájom zničia.

Tu chcem opätovne poukázať, že tvorba špirálovitých vzorov sa vôbec neobmedzuje na túto špecifickú reakciu. Možno ich nájsť aj v živej prírode. Preto pripomeniem príklad z biológie. Ide o vznik hlienky, len niekoľko milimetrov veľkej huby. Normálne táto huba

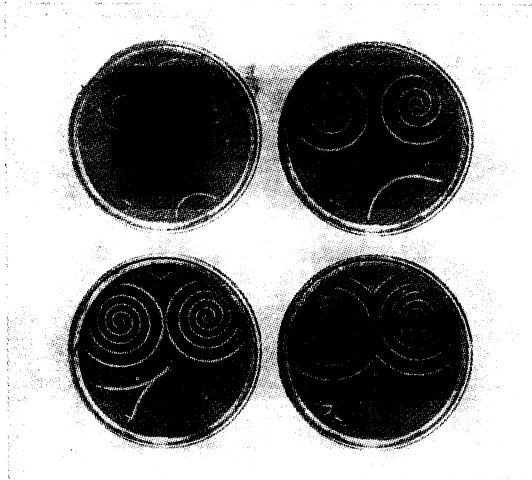
žije vo forme rozložených amóbovitých buniek na živnej pôde. Ak však na určitom mieste vznikne nedostatok potravy, bunky sa nahromadia na jednom mieste, začnú sa diferencovať na telo a nositeľov spór a nakoniec vzniká táto huba. Mimochodom sa môže táto huba zdeformovať ako had a kúsok sa odplaziť. Nás tu zaujíma otázka:



Obr. 5. Bénardova nestabilita. V kruhovej nádobe s ohrevom zdola kvapalina vytvára spontánne šesťuholníkový vzor včelích plástov, ktorý vzniká trvalým pohybom kvapaliny nahor a nadol.



Obr. 6. Guľa s tenkou kovovou stenou tvorí spontánne šesťuholníkový vzor včelích plástov, ak v dutine nastane dostatočný podtlak.

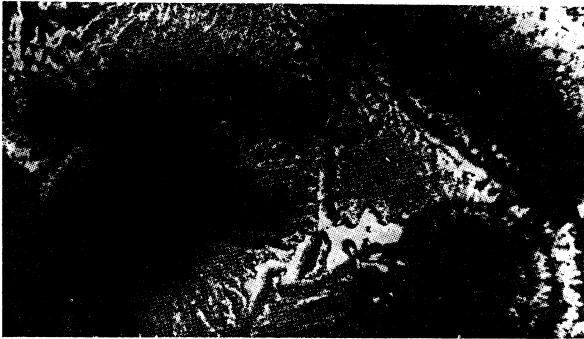


Obr. 7. Tvorba špirál pri reakcii Belousova-Žabotinského. Špirály vybiehajú smerom von, pri strete sa na hraničných plochách navzájom rušia.

Odkiaľ vôbec vedia jednotlivé amóbovité bunky, že sa musia zhromaždiť na určitom mieste? Čo zistili biochemici a biológovia, zobrazuje obr. 8. Opäť možno vidieť špirály. Sú to zhluky buniek, ktoré sú vyvolávané chemickou látkou – cyklickým adenosinmonofosfátom (cAMP). Keď vznikne nedostatok potravy, začnú bunky produkovať viac cAMP, ktorý sa vylučuje na podklad, tu difunduje a pri kontakte s inými bunkami ich stimuluje k zvýšenej produkcii cAMP. Touto súhrou difúzie a produkcie cAMP vznikajú špirálovité vlny, ako ich môžete zreteľne vidieť na obr. 8. Teda aj tu máme príklady

z dvoch úplne rozdielnych oblastí: tu anorganický svet chémie, tam organický svet: v oboch prípadoch tvorba rovnakých vzorov. Odkiaľ pochádza táto udivujúca analógia?

Najprv sme skúmali túto otázku na príklade lasera. Z historických dôvodov sa chceme laserom v krátkosti bližšie zaoberať, lebo nám pomohol nájsť hľadané všeobecné prin-



Obr. 8. Špirálovitý vzor cAMP pri-agregácii buniek hlienky.

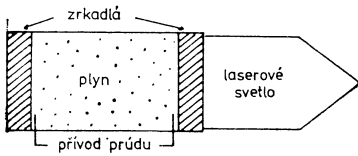
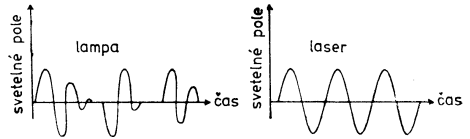
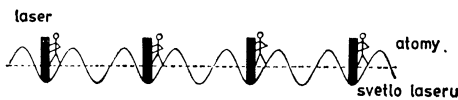
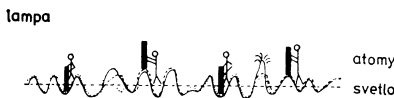


Schéma lasera

Obr. 9. Typická schéma lasera.



Obr. 10. Rozdiel medzi svetlom lampy (vľavo) a lasera (vpravo). Dole sú symbolicky znázornené pohyby elektrónov na kruhových dráhach okolo jadra (v strede).



Obr. 11. Analógia k znázorneniu rozdielu medzi lampou a laserom (viď text).

cípy. Obr. 9 v krátkosti pripomína laser. Laser je relatívne nový zdroj svetla, o ktorom skoro denne čítame v novinách. Laser sa skladá z aktívneho materiálu, napríklad krásneho kryštálu rubínu, ktorý je veľmi obľúbený ako šperk. Na koncových plochách je ohraničený zrkadlami. Atómy rubínového kryštálu sa zvonku vybudia svetelnými impulzmi a celý kryštál začne svietiť. Ale to svietenie môže mať dve úplne rozdielne vlastnosti. Vyžarované svetlo je úplne iné podľa toho, či sa jedná o svetlo normálnej lampy, alebo laserové svetlo. U lampy vzniká svetlo následujúco. V jednotlivých atómov, na obr. 10 dole symbolicky znázornené, obieha elektrón okolo atómového jadra tak, ako poznáme z Bohrovho modelu. Naraz zoskočí energeticky vybudovaný elektrón na vnú-

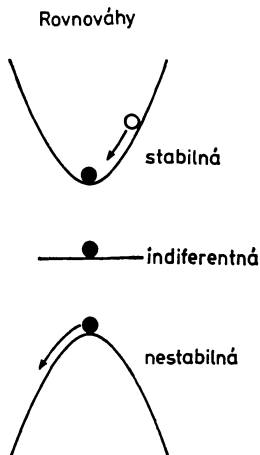
tornú dráhu a vyšle pritom svetelnú vlnu, viď obr. 10 hore. Táto svetelná vlna vzniká rovnako, ako keď hodíme kameň do vody, pričom vzniká rozbiehavá vlna. Druhý elektrón urobí to isté, ako keď druhý kameň vytvorí ďalšiu vlnu. Keď všetky atómy vyžarujú, je to to isté, ako keby sme hrsť kameňov hodili do vody, t. j. vznikne nepokojná vodná hladina. Pri lasere je to ináč (pravá časť obr. 10). Laserové svetlo je pekná rovnomerná vlna, ako to dokazujú experimenty. Táto pekná rovnomerná vlna môže vzniknúť len tak, že všetky elektróny rovnomerne, t. j. súčasne v určitom fázovom vzťahu preskočia na vnútorné dráhy. Chcem vám ukázať, ako pekne nás tento jednoduchý príklad privedie na stopu otázky samoorganizácie, pričom však tento proces budem trochu ináč interpretovať. Na obr. 11 identifikujem jednotlivé atómy ako malých trpaslíkov a svetelné pole s vodou v kanály. V hornej polovici naznačujem, čo sa deje v lampe. Trpaslíci vrážajú svoje trámičky do vody nezávisle – takto vzniká nepokojná hladina. V lasere je to ináč. Tu udierajú trpaslíci, ktorí symbolizujú atómy, úplne závisle, úplne korelované. Týmto vzniká krásna rovnomerná vlna. Ale v ľudskom živote vieme, ako to chodí. Za týmto trpaslíkmi stojí kápo alebo šéf a tento šéf stále kričí: teraz, teraz, teraz, teraz! Takto vedia trpaslíci kedy musia vraziť svoj trámik do vody. V lasere je rozhodujúce, že neexistuje žiaden šéf alebo kápo, ktoré by udeľovalo laserovým atómom povel: teraz, teraz, teraz! Preto laserové atómy musia sami od seba nájsť, ako sa musia zorganizovať, t. j. musia sa inými slovami sami zorganizovať.

### 3. Všeobecné princípy samoorganizácie

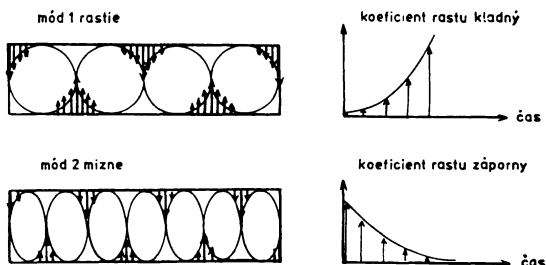
Stojíme pred otázkou túto samoorganizáciu, ktorá očividne prebieha už v neživej prírode, bližšie preskúmať a nakoniec pochopiť. Ukázalo sa, že je dosť ťažké vysvetliť tieto princípy na príklade laserov. Chcel by som preto prejsť na jednoduchý systém. Predtým vám chcem pripomenúť niekoľko základných pojmov zo školských čias. Pomocou obr. 12 pripomeniem pojmy rovnováhy. V hornej časti obrázku máme guľičku v šálke. Tu je rovnováha stabilná. Aj keď guľičku trochu vychýlim, opäť sa vráti do rovnovážnej polohy. Ináč to je v prípade, keď šálku otočíme (obr. 12 dole). Tu stačí malé postrčenie a vyvážená guľička, ktorá je sprvu v rovnováhe, sa začne stále viac z tejto polohy vzdalovať. Táto rovnováha je nestabilná. Otázka stability alebo nestability hrá v synergetike základnú úlohu.

Vráťme sa k príkladu s kvapalinou v pravouhlej nádobe ohrievanej zdola. Keď kvapalinu ohrievame, začne sa rozpínať, znižuje sa jej špecifická hustota a začne sa pohybovať nahor. Hore sú ale stále chladné vrstvy kvapaliny, ktoré sú teraz tlačené nadol. Zrejme tu máme do činenia s nestabilnou rovnováhou: Kvapalina dole sa chce dostať nahor a kvapalina hore nadol. Stav kvapaliny je teda nestabilný. Tu sa s kvapalinou stane niečo zaujímavé. Keby boli častice kvapaliny ľudia, vedeli by sme, čo sa bude diať. Jedna časť by sa bezhlavo drala nahor a druhá naopak nadol. Vznikol by takto nepredstaviteľný neporiadok. Rovnako ako keď ľudia v jednom sále chcú súčasne dnu i von. Nikdy som nezažil, že by sa to dialo usporiadaným spôsobom. Príroda v tejto situácii vládne prezieravejšie. Neustále skúša. Nepretržite existujú malé fluktuácie rýchlosti a kvapalina skúša stále rôzne konfigurácie prúdenia. Je to zobrazené na obr. 13. Vybrali sme dve





Obr. 12. Ilustrácia rovnováh rôznych typov.



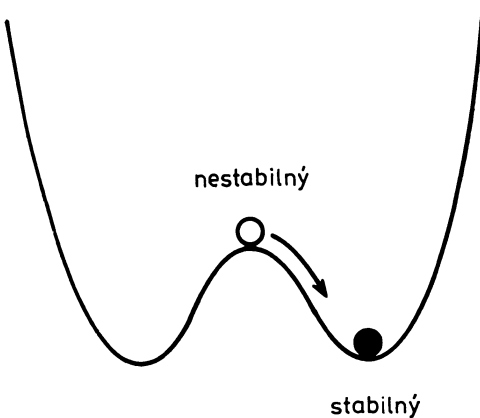
Obr. 13. Ľavá časť obrázku zobrazuje dve rôzne rýchlostné rozdelenia v kvapaline. Pravá časť zobrazuje, ako jedna rýchlosť stále narastá, kým druhá je tlmená.

konfigurácie, ktoré sú náhodou usporiadané. Stane sa nasledovné, čo ovšem možno matematicky i experimentálne detailne overiť: jeden typ pohybu sa bude stále zosilňovať, kým druhý postupne doznieva. V grafoch v pravej časti obrázku je vodorovne nanesený čas a kolmo rýchlosť v určitom bode. Táto rýchlosť stále rastie pri jednej konfigurácii a súčasne v druhej konfigurácii sa utlmuje. Tým sme sa dopracovali k ústrednému pojmu synergetiky.

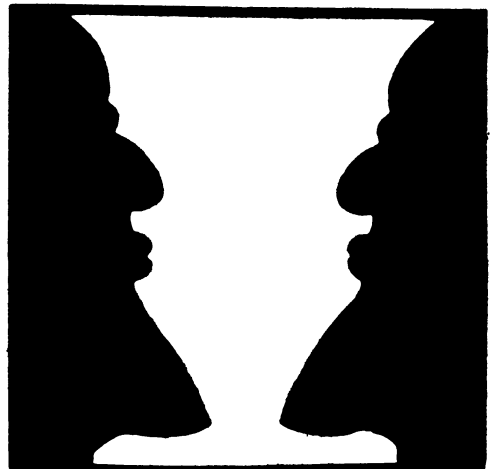
Na počiatku máme starý stav – kvapalina je v klude. Potom zmeníme vonkajšie podmienky – napríklad prívod tepla. Tým sa stáva starý stav nestabilným. Sústava sa dostáva do nového stavu. V mnohých prípadoch sa tento nový stav vyznačuje vyššou usporiadanosťou. V synergetike sme si položili otázku, ako dochádza k tomuto novému usporiadanému stavu. Analýza dáva nasledujúcu odpoveď, ako to ilustruje príklad. Existujú určité kolektívne typy pohybu, ktoré nazývame tiež módy. Niektoré módy (typy pohybu) sú zosilňované, druhé sú utlmované. Tie módy, ktoré sa zosilňujú, dávajú systému typ usporiadania. Nazývame ich parametre poriadku. Parametre poriadku zotročujú v odborných termínoch synergetiky všetky druhé podsystemy alebo tlmené módy. To jasne ukázal príklad s kvapalinou. Ak vstrekneme do kvapaliny trochu atramentu, budú jej molekuly vtiahnuté do kolektívneho pohybu. V tomto zmysle atrament bude zotročovaný pohybom kvapaliny. Musím dôrazne pripomenúť, že pojem „zotročovanie“ tu nemá etickú interpretáciu, ide čisto o terminus technicus. Ozrejmím to na príklade. Keď sa narodí človečik, vystaví sa najprv vplyvu reči národa, resp. svojich rodičov. V zmysle synergetiky je reč parameter poriadku a človečik je zotročovaný systém. Je vystavený tejto reči, naučí sa ju a je potom aj nositeľom tohto špecifického parametra poriadku do budúcnosti. Sprvu som tento príklad uvádzal skôr na obveselenie a spestrenie, medzitým však už viem, že v Paríži existuje škola, ktorá sa filozoficky zaoberá otázkou zotročovania človeka rečou. Slovo mód je mimochodom značne úskočne zvolené. Ľudská móda, nielen pohybová forma kvapaliny, je parameter poriadku. Keď sa ustáli jedna móda, strhne mnoho súčasníkov, a tak sa zotročia. Týmto príkladom chcem len upozorniť na to, že pojmy, ktoré vznikli, sú použiteľné na mnohé pro-

cesy v hospodárstve a sociológii. Chcem sa však uskromniť a venovať sa len prírodným vedám.

Zistili sme, že je možné, aby vznikli organizované stavy, ktoré možno detailne matematicky popísať. V našom prípade vzniknú stabilné rotačné stavy, podobné ako v prípade oblačných ciest. V predchádzajúcom sme hovorili o nestabilite. Tu môžeme situáciu zobrazíť nasledovne (obr. 14). Vertikálnu rýchlosť kvapaliny v určitom mieste (porovnaj obr. 13) nanášajme vpravo a označme jej hodnotu polohou guľičky. Pri  $v = 0$  je kvapalina v kľude, ale jej poloha je nestabilná. Malé posunutie, malý výkyv stačí, aby sa guľička skotúľala dolu potenciálnym valom. Vertikálna rýchlosť kvapaliny narastá. V dôsledku vnútorného trenia nemôže rýchlosť ľubovoľne narastať, skôr či neskôr sa stabilizuje na bode  $v = v_1$ . To sa môže zobrazíť stabilnou polohou v potenciálnej jame. Máme pred sebou prechod z nestabilnej do stabilnej polohy. Vidíme aj jednu zvláštnosť. Malá zmena



Obr. 14. Znázornenie prechodu z nestabilnej do stabilnej rovnovážnej polohy. Môžeme si myslieť, že doprava je nanášaná rýchlosť z obrázku 13 v určitom mieste kvapaliny. Z obrázku 14 plynie, že rýchlosť môže narastať len po určitú hodnotu.



Obr. 15. Lom symetrie pri vizuálnom vneme medzi dvomi stavmi: váza — tvár.

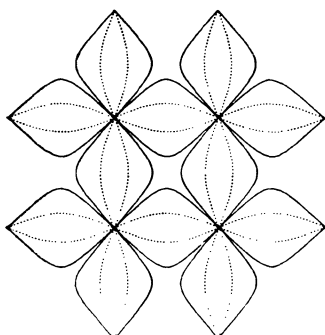
stačí na to, aby dostala guľičku rovnako dobre naľavo i napravo. Je to jav dobre známy fyzikom i chemikom, ktorí sa zaoberajú fázovými prechodmi. Fázové prechody (anglicky Phase Transitions) lámu symetriu. Pretože je priebeh potenciálu symetrický, môže prebiehať zmena rovnako dobre doľava i doprava. Musí sa však „rozhodnúť“ skotúľať sa napríklad doprava. V prípade kvapaliny to znamená, že prúdenie môže prebiehať rovnako dobre doprava i doľava, ale v každom prípade môže realizovať len jeden smer.

Teraz chcem urobiť veľký skok. Chcem na vás demonštrovať, že aj najkomplikovanejší systém, ktorý vôbec poznáme — ľudský mozog — je schopný pri vnímaní vykazovať takéto lámanie symetrie. Z tohto dôvodu vám na obr. 15 ukazujem určitú figúru, ktorú trochu objasním. Poviem vám, pozorujte strednú bielu časť ako popredie. Vidíte vázu.

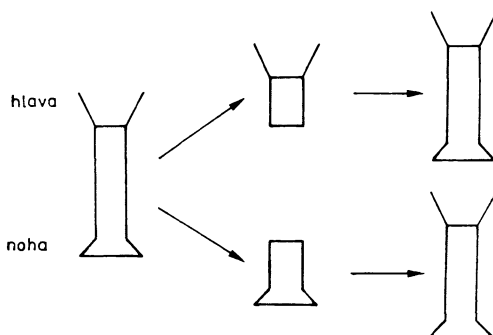
Keď ale poviem, hľadte na bočné časti ako popredie, vidíte samozrejme hneď dve tváre. Dodatočnou informáciou možno zlomiť symetriu. Môžem vám povedzme predpísať, čo máte vidieť. Predtým som o tom rozprával ako o žarte, ale medzitým viem, že psychológovia chápu lámanie symetrie ako dôležitý testovací prostriedok. Psychológ, ktorý prevádza test s osobou, použije napríklad obrázok s mladou a starou dávou. Ak sa pozrieme dôkladne alebo keď sme nezaujatí, konštatujeme, že sú obe tvare viacmenej rovnako bezvýrazné. Psychológ však vychádza z toho, že vo vnútri človeka existuje určitá charakteristika, ktorá pri určitej testovacej osobe danú neutrálnu polohu zlomí tým, že do obrazu naprojektuje určitú predpojatosť. Napríklad povie, že jedna zo žien vyzerá ustarane, nedôverčivo atď. Teda aj tu lom symetrie, použitie zlomenia symetrie v testoch psychológie.

#### 4. Príklady

Samozrejme že môže padnúť otázka: „Toto sú všetko kvalitatívne vysvetlenia; možno tieto poznatky použiť aj kvantitatívne? Možno skutočne vypočítať štruktúry?“ Chcem preto uviesť niekoľko príkladov. Obr. 16 ukazuje graf spočítaný pre plazmu. Ako viete



Obr. 16. Príklad rýchlostného poľa plazmy ohrievanej zdola a vloženej do konštantného zvislého magnetického poľa. Zobrazené sú línie rovnakej zvislej složky rýchlosti.



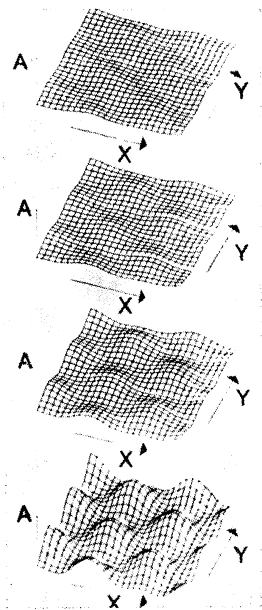
Obr. 17. Schematické znázornenie experimentu s hydrou (viď text).

je plazma ionizovaný plyn. Tento plyn v našom prípade je zdola ohrievaný a okrem toho sa nachádza v kolmom magnetickom poli. Pohybové procesy v plazme sme analyzovali pomocou metód, ktoré sme vyvinuli v rámci synergetiky. Vypočítali sme a zobrazili sme línie konštantnej vodorovnej rýchlosti. Tam, kde sú línie vytiahnuté, má plazma vždy rovnakú vodorovnú rýchlosť. Tieto metódy sme použili aj v biológii.

Obr. 17 ukazuje biologický experiment. Jedná sa o hydru, niekoľko milimetrov veľkého sladkovodného polypa. Skladá sa z hlavy a nohy. Pre biológov je mimoriadne zaujímavé vedieť, ako jednotlivé bunky pri vývoji zistia, kde bude hlava a kde noha. Ako sa vyvinie z pôvodnej bunky? Existujú dva názory. Jeden hovorí, že gény, dedičný materiál, dajú

bunke správu: „Ty budeš neskôr hlava“ alebo „Ty budeš neskôr noha“. Druhý názor hovorí, že bunky sprvu nevedia nič a až neskôr v priebehu bunecného života sa to dozvedia. Aby sa rozhodlo medzi názormi, prevedie sa experiment. Hydra sa rozreže v polovici. Tu sa nachádzajú rovnaké druhy buniek. Hydra sa regeneruje, t. j. tam, kde je len hlava samotná, vznikne noha a tam, kde bola noha, vznikne hlava.

Zrejme však vyrastie hlava i noha z rovnakých buniek z oblasti bývalého bruška, a teda bunky nemôžu vopred vedieť, čo z nich bude neskôr. Najprv sú brušné bunky a neskôr sa diferenciáciou premenia na bunky nohy alebo hlavy. To, čo sa s nimi má stať, sa môžu dozvedieť len na základe toho, kde sa nachádzajú podľa ich polohy. Ako je to možné? Zrejme musí existovať evidentne prenos informácie od hlavy do brušnej oblasti alebo od nohy do brušnej oblasti. Hlava signalizuje „Tu sedí hlava, potrebujem nohu“ a noha signalizuje „Som noha, potrebujem ešte hlavu“. Ako to môže prebiehať? Postuluje sa a existujú aj dôvody preto, že túto úlohu preberajú chemické signály. Chemické signály vyprodukované v tele hovoria jednotlivým bunkám: „Ak si tu, musíš byť hlava, a ak si tam, musíš byť noha.“ To je koncepcia, ktorú navrhol zhruba pred tridsiatimi rokmi anglický matematik Turing. Neskôr boli navrhnuté ďalšími autormi iné matematické modely. Vybrali sme typický matematický model, aby sme ho spracovali metódami matematiky. Uvediem tu príklad, ktorý ukáže, že aj relatívne zložité štruktúry možno synergetickými metódami spočítať. Na obr. 18 je zobrazené: Analyzujeme bun-



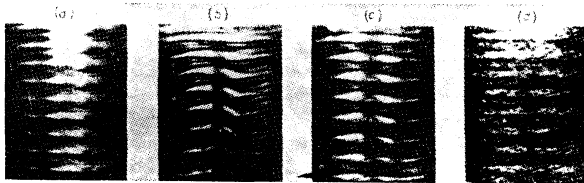
Obr. 18. Modelový výpočet tvorby vzoru v dvojdimenzionálnom zhluku buniek. Nahor sa nanáša koncentrácia  $A$  molekúl aktivátora. Napravo a dozadu sú nanášané súradnice súboru buniek. Sled obrázkov ukazuje nárast koncentrácie.

kovú skupinu uloženú v rovine  $x, y$ . Nahor je vynášaná koncentrácia chemickej látky, ktorá aktivuje diferenciáciu buniek. Udáme vopred malú poruchu, fluktuáciu a vyvinie sa nám, ako jasne vidieť, štruktúra. Kde sú vrcholy, tam sa nachádza vysoká koncentrácia aktivátora, naproti tomu v údoliach je koncentrácia nízka. Myšlienka je tá, že len tam,

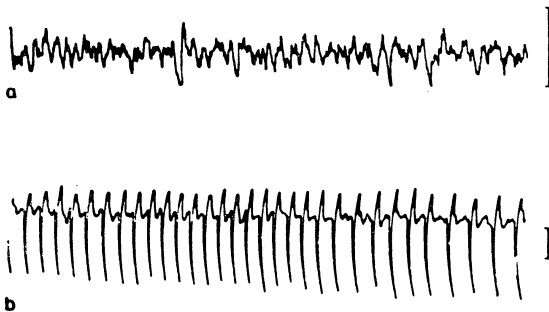
kde je koncentrácia vysoká, začnú bunky pracovať a vznikne tak určitá štruktúra. Ak sa prizrieme lepšie, možno spozorovať hexagonálnu štruktúru. To by už bol model napríklad pre vznik farieb v prírode.

## 5. Chaos a poriadok

Doteraz som hovoril o procesoch organizácie. Samozrejme nemáme v prírode len poriadok, ale aj veľmi veľa neporiadku a chaosu. Prechod od poriadku ku chaosu možno sledovať na niekoľkých pekných modeloch z matematiky, fyziky a chémie. Na obr. 19 je zachytený nasledujúci experiment. Kvapalina medzi dvoma koaxiálnymi válcami. Keď rotuje vnútorný valec strháva kvapalinu a vytvára v nej vrstvy. Tieto vrstvy ležia povedzme ako klobásky dokola vnútorného válc. Keď necháme vnútorný valec rýchlejšie rotovať, vznikajú oscilácie: klobásky začnú oscilovať sem a tam. Ak budeme zvyšovať rýchlosť, začnú vrstvy ešte rýchlejšie oscilovať, až nakoniec vznikne pohyb, ktorý sa bude zdať úplne nepravidelný. Hovoríme o turbulencii alebo novšie o chaose. Vidíme aj voľným okom, že pohyb je úplne nepravidelný, úplne chaotický. Ak by sme merali rýchlosť v určitom bode a vyniesli túto časovú závislosť do grafu, získali by sme úplne nepravidelnú krivku. V predloženom príklade môžeme jednotlivé fázy detailne prepočítať.



Obr. 19. Hierarchia vzorov v kvapaline nachádzajúcej sa medzi dvoma válcami, z ktorých vnútorný rotuje.

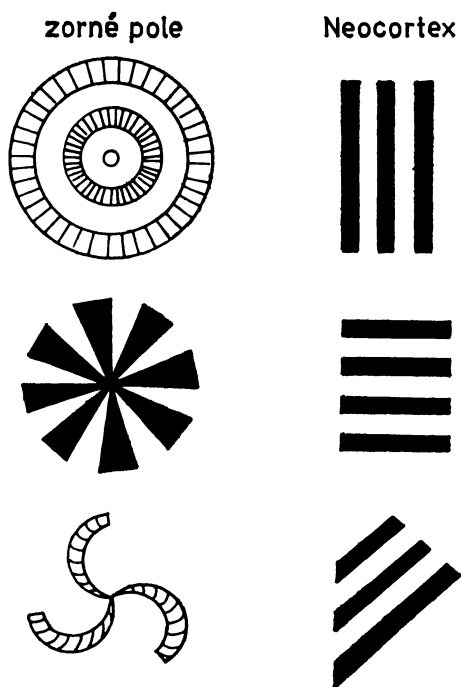


Obr. 20. Vzory EEG: a) normálna mozgová funkcia, b) prípad epileptického záchvatu.

V posledných rokoch sa v mnohých prípadoch aspoň kvalitatívne podarilo pochopiť základné princípy tohto chaotického pohybu. Pohybovú rovnicu možno interpretovať veľmi jednoduchým mechanickým modelom. Necháme padať kovovú guľičku na žiletku. Podľa toho či sa guľička vychýli trochu doľava alebo doprava, dostaneme úplne rozdielne dráhy. Ak bude stroj túto guľičku znovu a znovu spúšťať nadol, získame úplne

nepravidelný pohyb vľavo/vpravo, vľavo/vľavo atď. Vznikne úplne nepravidelný pohyb napriek tomu, že vystačíme s rovnicami mechaniky, ktoré sú úplne deterministické.

Teraz vám chcem dokázať, že otázka „čo je chaos“ a „čo je poriadok“ je značne problematická a komplikovaná. Na obr. 20 sú dve krivky. Predstavme si, že napravo sa nanáša čas a zvisle amplitúda určitej veličiny. Horný graf je úplne nepravidelný. Povedali by sme, že to môže byť rýchlostné pole kvapaliny, teda chaos. Dolný graf naproti tomu ukazuje vyslovene usporiadaný pohyb, úplne rovnomerný, presne periodický. Hneď by sme povedali, že dolný pohyb je oveľa vyššie zavedený ako horný. Teraz vám poviem, čo tu vlastne ukazujem. Horná krivka je elektroencefalogram (EEG) normálneho človeka, t. j. registrujeme mozgové prúdy, ktoré dávajú signály pri normálnom procese myslenia. Experti tvrdia, čím je človek inteligentnejší, čím intenzívnejšie myslí, tým nepravidelnejším a chaotickejším sa EEG zdá byť. Druhý riadok ukazuje EEG pri epileptickom záchvate. Epileptik sa práve týmto poriadkom dostáva do kľčovitého stavu. Všetky neuróny sú zapnuté rovnako, čo dáva veľmi usporiadaný, ale nezmyselný stav. Na tomto príklade vidíte, že otázka poriadku a chaosu je veľmi hlboká. Pretože sa v svete vyskytuje mnoho chaotického, možno sa občas pýtať, či prinajmenšom niektoré chaotické procesy nepodliehajú nejakým fundamentálnym zákonitostiam.



Obr. 21. Príklady vzorov vnímaných pri halucinácii (vľavo), hypotetické praobrazy v neocortexe (vpravo).

Synergetika dala výzkumu mozgu nové impulzy. Obr. 21 pochádza z práce Jacka Cowana. Skúmal, ako sa sietnica zobrazuje na neocortex (časť mozgu). Našiel zobrazovaciu funkciu, pričom nervové dráhy kruhovitú sietnicu zobrazujú na pravouhlú oblasť mozgu. Pritom vystala nasledujúca zaujímavá otázka. Keď sú Iudia pod vplyvom drog, majú halucinácie určitej formy: napr. vidia koncentrické kruhy, vybiehajúce lúče alebo

špirály s viacerými ramenami. Ak aplikujeme zobrazovaciu funkciu siete na cortex na tieto obrazy, zisťujeme udivujúcu vec. Obrazy, ktoré v priebehu halucinácie vidia, zodpovedajú pásikovým vzorom v neocortexe. Rozdiel je len v orientácii pásov. Nechcem zamlčať, že to, čo tu prednášam na tomto mieste, je stále len hypotéza. Hypotéza by tvrdila, že droga destabilizuje nervové bunky alebo synapsie. My potom nájdeme presne to, čo pozorujeme pri mnohých synergetických systémoch – jednoduché vzory. Jedným takýmto základným vzorom sú pásy. Ide o hypotézu, ale v súčasnosti je možné skúmať nervové bunky súčasne pomocou mnohých elektród. Takto môže dať synergetika podnety výzkumu mozgu, totiž overenie tvorby takýchto vzorov v mozgu. Mimochodom existujú poznatky z EEG, že v priebehu epileptických záchvatov existujú v mozgu (rovnako ako v chémii) pohybujúce sa špirály (porovnaj obr. 7).

Tým by som rád ukončil prírodovednú časť a na záver by som rád chcel zhrnúť, ktorý rozhodujúci princíp odlišuje synergetiku od termodynamiky včítanie Boltzmannovej teórie. Termodynamika je štatistická teória. Zakladá sa na tom, ako sme explicitne ukázali, že spočíta maximálny počet stavov. Entropia je daná logaritmom maximálneho počtu stavov. V uzavretej sústave procesy prebiehajú v smere maximalizácie entropie. Táto maximálna hodnota, ak odhliadneme od určitých vedľajších podmienok, prislúcha úplnej bezštruktúrnosti. Je to teda štatistický princíp. Synergetika, ako sme ukázali na príklade kvapaliny, má za základ úplne iný princíp – rýchlosť prírastku. Existujú určité kolektívne typy pohybu (valcový pohyb kvapaliny), ktoré stále narastajú a nakoniec dominujú v celom systéme. Na druhej strane existujú kolektívne typy pohybu, ktoré nenarastajú tak silne alebo sú dokonca tlmené. Tie prehrávajú preteky a nakoniec ich ztročí pohyb s najväčším rastom. Týmto spôsobom možno preklenúť aj rozdiely svetov živej a neživej prírody. Práve spomenutá súťaž jednotlivých kolektívnych foriem pohybu o dominantnú úlohu v sústave silne pripomína darwinovský princíp prežitia najzdatnejšieho. Na rozdiel od Darwinovej teórie sme prinajmenšom v neživej prírode schopní exaktne vopred vypočítať vznikajúce módy pohybu, a tak určiť typ usporiadania stavu. Tým skončím a budem sa zaoberať úplne novým výhľadom.

## 6. Použitie synergetiky v mimoprírodovedných oblastiach – príklad

Už skôr som spomenul, že metódy vyvinuté a používané v oblasti prírodných vied možno teraz aplikovať na rad pochodov v ekonómii a sociálnych vedách. Na to sú ovšem nutné experimentálne fakty; chcem tu uviesť jeden príklad, ako by mohol pokračovať vývoj v tejto oblasti. Som si vedomý toho, že tieto otázky sú ešte predmetom sporov samotných sociológov. Napriek tomu však možno dať aj v kontraverzných oblastiach popud k diskusii. Spomeniem experimenty, ktoré prevádzal viac než pred tridsiatimi rokmi americký sociológ Solomon Ash. Experimentu sa zúčastnilo zhruba desať osôb. V skutočnosti bola testovanou osobou vlastne len jedna, kým deväť ostatných plnilo úlohu fingovaných skúšobných osôb. Test prebiehal nasledovne. Skúšané osoby, najprv deväť pomocníkov a potom vlastná skúšobná osoba, ktorá nevedela, že ostatných deväť osôb sú pomocníci, sedeli v jednom rade. Profesor ukázal tri rôzne dlhé porovnávacie línie a jednu vzorovú. Potom sa opýtal, ktorá z troch línií sa zhoduje so vzorovou.

V prvom kole dali všetky osoby správnu odpoveď. Potom sa proces zmenil. V druhom kole povedali pomocníci, že so vzorovou sa zhoduje iná línia ako predtým. V šesťdesiatich percentách prípadov zmenila aj testovaná osoba názor a tiež povedala: „Áno, táto línia sa zhoduje so vzorovou.“ Ak uznáme tento experiment, potom musíme povedať, že existuje určité ovplyvnenie tvorby úsudkov. Výsledky možno okamžite spracovať metódami synergetiky a týmto spôsobom možno vyšetrovať tvorbu verejnej mienky. Som si vedomý toho, že existujú spory, ktoré sa neobracajú voči matematike synergetiky, ale voči jej interpretácii. Je otázne, či možno tento test s líniami rozšíriť napríklad na tvorbu politických názorov. Nechcem vstupovať do tejto diskusie, chcem však prinajmenšom dať podnety k tomu, že je možné aplikovať pojmy synergetiky aj na pojmy sociológie.

Nakoniec zhrniem. V synergetike vyšetrojeme, ako časti systému samoorganizáciou vytvárajú makroskopické vzory. Vyšetrovali sme princípy, ktoré sú podstatou týchto procesov. Pritom sme narazili na základné pojmy – parameter poriadku, nestabilita, zotročovanie a zistili sme, ako vznikajú vzory alebo štruktúry. Pritom sa zvlášť ukázalo, že sa nám niekedy vzory javia ako chaotické napriek tomu, že majú veľmi hlboký význam.

#### Literatúra

- [1] HAKEN H.: *Synergetik. Eine Einführung*. 2. vydanie, Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1983 (existuje anglický, japonský, ruský a čínsky preklad).
- [2] HAKEN H.: *Advanced Synergetics*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1983.
- [3] HAKEN H.: *Erfolgsgesheimnisse der Natur*. DVA, Stuttgart 1981.

---

A keďže znalosť mechaniky predpokladá znalosť čistej matematiky, pak ten, kto sa chce hlbšie učiť chemii, musí byť zbýhly i v matematike. Jaké světlo dovede rozžhnout v chemii matematika, může tušit ten, kdo je zasvěcen v její taje a zná takové kapitoly přírodních věd, zdařile matematicky zpracované, jako je hydraulika, aerometrie, optika aj.; všechno, co předtím v těchto vědách bylo temné, pochybné a nehodnověrné, matematika učinila jasným, hodnověrným a zřejmým. Pravda, mnozí popírají, že by bylo možno učinit základem chemie principy mechaniky a zařadit ji mezi vědy, ale popírají to, protože zabloudili v temnotách utajených vlastností a nevědí, že ve změnách smíšených těles lze vždy pozorovat zákony mechaniky, a také

že zakoušejí nedůvěru k prázdným a falešným spekulacím, které vnucují učenému světu bez nějaké dřívější zkušenosti jiní teoretikové, zneužívající svého volného času. Kdyby ti ..., v jejichž mozku vládne chaos, ... neštíteli se poučení o posvátných zákonech geometrií, jež kdysi přesně stanovil Eukleides a v současné době zdokonalil znamenitý Wolff, pak by bezpochyby mohli hlouběji proniknout v tajemství přírody, za jejíž vykladače se prohlašují. Opravdu, jestliže matematikové vyvozují ze vzájemné polohy několika čar velmi mnohé pravdy, pak ani pro chemiky nevidím žádné jiné příčiny kromě neznalosti matematiky, proč by nemohli vyvoditi více zákonitostí z takového množství výzkumů.

M. V. Lomonosov