

Synergetika – univerzálna teória vývoja

Július Krempaský

1. Úvod

Ľudské poznanie často dospieva k záverom, ktoré majú povahu univerzálne platných princípov, o platnosti ktorých sa už nepochybuje. Jedným z nich je aj poznatok, podľa ktorého sa náš vesmír postupne formoval a stále ešte formuje vývojom. Toto stanovisko si už osvojila aj súčasná kresťanská teológia, ktorá ústami pápeža Jána Pavla II. prehlásila, že evolúcia už nie je len vedecká hypotéza, ale vedecký fakt. O tom, kde všade sa táto evolúcia prejavuje, najvýstižnejšie hovorí známy kresťanský mysliteľ Pierre Teilhard de Chardin slovami: „Nejestvuje nič až po najvyššie nám známy psychický fenomén, ľudskú dušu, čo by nepodliehalo univerzálnemu zákonu vývoja.“ Tento výrok by sme mohli voľne parafrázovať aj slovami, že evolúcia je univerzálna božská „technológia“, ktorú Boh použil pri kreovaní tohto sveta. Akými prostriedkami sa táto „technológia“ uskutočňuje?

Na túto otázku fundovane odpovedá známy súčasný fyzik S. Hawking slovami: „Ja nepotrebujem Boha ako kreátora, ale ako autora univerzálnych zákonov.“ Keby sme teda tieto zákony poznali a vypracovali si univerzálny formalizmus narábania s nimi, mali by sme k dispozícii univerzálnu teóriu vývoja, ktorá by nám nielen kvalitatívne ale aj kvantitatívne objasňovala všetky evolučné procesy. Práve takéto ambície si kladie vedecká disciplína, ktorá sa nazýva synergetika. Jej zakladateľ nemecký fyzik H. Haken ju definuje ako vedu o vzniku nových kvalít v systémoch bez prihliadnutia na skutočnú podstatu ich subsystémov. Takto formulovaná teória by sa mohla aplikovať nielen na anorganické, ale aj na biologické a sociálne systémy, takže by mohla nájsť uplatnenie vo všetkých odvetviach ľudskej duševnej aktivity.

Zmysel a cieľ tohto príspevku je demonštrovať, že takýto záver je opodstatnený a že synergetika v súčasnosti naozaj prináša veľmi užitočné informácie do všetkých oblastí ľudskej aktivity. Prinesieme v ňom nielen vysvetlenie stručných základov metodiky synergetiky, ale aj viacero konkrétnych výstupov preukazujúcich jej užitočnosť.

2. Matematický formalizmus synergetiky

Sprostredkovateľom informácií v kvantitatívnych vedách je matematika. Synergetika má ambície byť aj kvantitatívnou vedou, preto si musela osvojiť adekvátny matematický formalizmus na realizáciu svojich zámerov. Jeho kostru tvorí formulácia tzv. evolučných rovníc a ich analýza. Základnými pojmami v týchto procedúrach sú kvantifikované charakteristiky, čiže charakteristické veličiny. Sú to charakteristiky,

ktorými opisujeme stav skúmaného systému, napr. jeho veľkosť, počet subsystémov, koncentrácia častíc, hustota, teplota, poloha atď. Keďže základným cieľom synergetiky je skúmanie a opis zmien základných charakteristík, jej pozornosť nie je sústredená na absolútne veľkosti týchto veličín, ale na ich zmeny. Je rozumné vzťahovať tieto zmeny na zvolené časové jednotky, preto ak samotnú veličinu označíme všeobecne symbolom „ q “, jej zmenu za časový interval Δt znakom Δq , potom príslušná zmena za jednotku času je zrejme určená podielom $\partial q/\partial t$ (v matematike sa tomu hovorí „parciálna derivácia“ q podľa t).

Základom každej synergetickej analýzy je formulácia vzťahu medzi takto definovanou zmenou a faktormi, ktoré ju zapríčiňujú. Ak ich zahrnieme do patričnej matematickej funkcie označenej znakom „ F “, potom fundamentálnu evolučnú rovnicu synergetiky možno napísať v tvare

$$\frac{\partial q}{\partial t} = F \quad (1)$$

Funkcia F môže mať najrozličnejší tvar, ale všeobecná analýza ukazuje, že ku vzniku nových kvalít, t. j. ku skokovej zmene charakteristických veličín môže dôjsť len vtedy, keď funkcia F

1. je nelineárna v premennej q (obsahuje aj vyššie mocniny q ako prvú), alebo keď
2. obsahuje vyššie derivácie podľa času, resp. podľa súradníc určujúcich polohu, ako len prvé.

Tretím prípadom možnosti vzniku nových kvalít je prípad viacparametrických systémov, keď na opis stavu systému je potrebných viac rovníc ako len jedna. So všetkými uvedenými prípadmi sa v ďalšom texte stretneme.

Samotná analýza evolučných rovníc sa zvyčajne uskutočňuje dvomi cestami: 1. buď sa nájde analytické riešenie, čo sa podarí len v relatívne málo jednoduchých prípadoch, alebo sa 2. použije zjednodušená tzv. kvalitatívna analýza. Tá spočíva v dvoch krokoch:

1. určia sa ustálené (stacionárne) stavy, a to riešením rovníc $\partial q/\partial t = 0$, čiže rovníc $F = 0$ a
2. takto získané stavy sa podrobia vplyvu malej poruchy (fluktuácie) y , čiže sa uplatní vzťah $q = q_s + y$.

Ak sa zistí, že porucha y sa s časom znižuje, takže systém sa za určitý čas vráti do pôvodného ustáleného stavu, hovoríme, že príslušné stacionárne riešenie je stabilné. Ak sa táto porucha s časom (exponenciálne) zväčšuje nad všetky medze, je príslušný stacionárny stav nestabilný a v takom prípade systému hrozí aj pri nepatrnej poruche kvalitatívna zmena. Tá môže byť buď nežiaduca (často potom hovoríme o katastrofe), alebo žiaduca, a vtedy hovoríme o samoskvalitnení či samoorganizácii systému. Tento druhý prípad vysvetľuje, ako sa môže príroda spontánnou evolúciou dostávať do stavov s vyššou usporiadenosťou, teda vyššou kvalitou. Úlohu „generátora“ týchto kvalitatívnych

zmien tu zohrávajú univerzálne prírodné zákony a úlohu Kreátora (a jeho imanentnú prítomnosť vo stvorení) možno vidieť v ovplyvňovaní spomínaných fluktuácií, čo sa podľa niektorých známych mysliteľov odohráva v informačnej úrovni.

Žiada sa ešte pripomenúť, ako sa v synergetike získavajú potrebné evolučné rovnice. V tejto súvislosti možno celú históriu nášho sveta rozdeliť na dve epochy. Míľnikom je zlom, ktorý nastal pri vzniku samoreflexie u človeka. Predtým sa odohrávali len procesy, ktoré vyplývali z platnosti neskôr človekom postupne objavovaných zákonov, z ktorých možno evolučné rovnice priamo odvodiť. Systémy, v ktorých je takáto procedúra možná, sa nazývajú gradientné systémy. Zložitejšie biologické systémy a systémy, v ktorých figuruje už aj mysliaca bytosť, sú negradientné systémy a v nich možno evolučné rovnice zostaviť len pozorovaním a filtrovaním získaných údajov vhodnými matematickými funkciami. Ukazuje sa, že aj v tejto kategórii javov vládnu určité univerzality a analógie, preto sa synergetika stala významným pomocníkom aj pre túto oblasť kvantitatívneho skúmania.

Najzaujímavejšie výstupy synergetiky

Doteraz sa už podarilo preskúmať nespočetné množstvo procesov predstavujúcich vznik nových kvalít. Na ilustráciu teraz predstavíme niekoľko najzaujímavejších z nich.

3.1 Fázové prechody

Fázové prechody sú kvalitatívne zmeny, pri ktorých celý systém prejde skokom z jedného stavu do iného v dôsledku zmeny vonkajších podmienok. V praxi sa často stretávame s tzv. skupenskými premenami, pri ktorých sa napr. mení ľad na kvapalinu, kvapalina na paru a pod. Je však aj množstvo iných náhlych kvalitatívnych zmien, ktoré nie vždy možno pozorovať zmyslami. Veľmi ilustratívnym príkladom fázovej premeny je skoková premena magnetu na nemagnet pri určitej kritickej teplote. Ak si za charakteristickú veličinu zvolíme tzv. magnetizáciu látky M ($q = M$), potom príslušná evolučná rovnica má tvar

$$\frac{\partial M}{\partial t} = a(T - T_c)M - bM^3 \quad (2)$$

kde T resp. T_c sú teplota a jej kritická hodnota, „ a “ a „ b “ sú konštanty. Výsledky analýzy tejto rovnice poskytujú krivky, z ktorých vidno, že pre $T > T_c$ je stabilné len riešenie $M = 0$ (dolinka na krivkách), kým pre $T < T_c$ sa objavujú dva nové stabilné stavy pre $M \neq 0$, ktoré zodpovedajú zmagnetovaniu látky v jednom alebo v opačnom smere.

- 54 - 3.2 Technické katastrofy

Jednou z možných nových kvalít systému môže byť jeho rozkmitanie. Ak amplitúda príslušných kmitov prekročí kritickú (ešte dovo-

nú) hodnotu, systém sa zrúti. To sa naozaj stalo – most Tacoma Narrows sa zrútil v roku 1934 krátko po svojom inštalovaní pri vetre ani nie 60 km/hod. Evolučná rovnica opisujúca tento proces je však veľmi zložitá, preto ju a ani jej analýzu nebudeme tu uvádzať.

3.3 Prírodné katastrofy

Keď sa v dôsledku nejakého zásahu (napr. podmorského zemetrasenia) začne dynamika vody riadiť tzv. Corteweg de Vriesovou rovnicou, ktorá má tvar

$$\frac{\partial y}{\partial t} = a \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + b \frac{\partial^3 y}{\partial x^3} \quad (3)$$

kde y je výška vzdutia, môže sa vygenerovať veľmi zvláštny útvar. Nazývame ho solitárna vlna. Táto vlna predstavuje vzdutie, ktoré ani pri premiestňovaní do veľmi veľkých vzdialeností neprejavuje náznaky dissipácie a pri výstupe na breh môže narobiť obrovské škody. Nazýva sa vlna „cunami“.

3.4 Vznik galaxií a hviezd

Z hľadiska vývoja vesmíru s prihliadnutím na vznik života a človeka mala podstatný význam kvalitatívna zmena, ktorá sa začala uskutočňovať asi miliardu rokov po tzv. Veľkom tresku. Vtedy sa homogénny systém obsahujúci len častice (atómy vodíka a hélia) voľne sa pohybujúce v mori žiarenia začal štrukturalizovať, čím sa v ňom vytvorili galaxie a hviezdy. Za určitých veľmi zjednodušujúcich podmienok možno pre tento proces odvodiť evolučnú rovnicu tvaru

$$\frac{\partial n}{\partial t} = (A - H)n + D \frac{\partial^2 n}{\partial x^2} \quad (4)$$

kde n je koncentrácia častíc, A konštanta závislá od teploty, H Hubblova konštanta (charakterizuje rozpínanie vesmíru) a D koeficient difúzie. Analýza tejto rovnice vedie k výsledkom, ktoré možno interpretovať nasledovne: Na začiatku sa v našom vesmíre udržiavala platnosť nerovnosti $A < H$, čo viedlo len k určitému plynulému znehomogénniu vesmírnej „prapoličky“, avšak od určitého kritického bodu určeného podmienkou $H = A$, keď sa už začala napínať nerovnosť $A > H$, koncentrácia častíc začala vykazovať zhlukovanie, výsledkom čoho bol vznik galaxií a hviezd. Numerická analýza dokáže približne stanoviť aj ich veľkosti, a to čo do objemu tak i do hmotnostného obsahu.

3.5 Biologické systémy

Dostupné skomplexňovanie našej reality po Veľkom tresku súvisiace s objavením sa chemických prvkov, chemických a biochemických zlúčenín prinieslo do vývoja nový fenomén, ktorý sa nazýva autokatalýza. Jej podstatou je to, že keď sa v nejakom systéme generuje nová lát-

ka za prítomnosti autokatalýzy, potom rýchlosť jej pribúdania je tým väčšia, čím viac už jej je. Matematicky sa to vyjadruje rovnicou

$$\frac{\partial n}{\partial t} = An \quad (5)$$

kde A je kladná konštanta. Autokatalýzu možno pozorovať už aj v anorganickom svete (vidíme, že podobný člen sa vyskytuje aj v rovnici opisujúcej štrukturalizáciu vesmíru), veľmi častá je v biologickej ríši, kde sa odohráva tak na molekulárnej ako aj na druhej úrovni (čím viac rodičov, tým viac potomstva) a samozrejme aj v sociálnej sfére (deti zvyčajne preberajú afinity svojich rodičov). Keďže v biologickom svete (pri nehomogénnom rozložení častíc) prakticky vždy prebieha aj tzv. difúzia (spontánny prechod častíc z miest s vyššou koncentráciou do miest s jej nižšou hodnotou), príslušná evolučná rovnica obsahuje aj difúzny člen a má preto tvar

$$\frac{\partial n}{\partial t} = An + D \frac{\partial^2 n}{\partial z^2} \quad (6)$$

Podrobnejšou analýzou takýchto rovníc zistíme, že produktmi evolúcie v takýchto podmienkach môžu byť

- a) časové oscilácie systémov,
- b) priestorová štrukturalizácia (kompartimentizácia a i.) a
- c) selekcia (už aj na molekulárnej úrovni).

Všetky tieto poznatky sú nevyhnutné pri objasňovaní záhad spontánneho vzniku života z neživej hmoty.

3.6 Sociálne systémy

Niet už pochybností o tom, že synergetika prináša zaujímavé výstupy aj do tzv. kvantitatívnej sociológie. Zvyčajne sa opierajú o formulovanie tzv. „master equation“ pre sociálne systémy, ktorej analýzou sa získavajú cenné prognózy v oblasti sociálnej dynamiky. Možno však postupovať čisto na základe analógie, ktorá sa pozoruje v správaní sociálnych systémov v porovnaní s biologickými, či dokonca aj s anorganickými systémami, a aj v takomto prístupe možno nájsť zaujímavé výsledky. Na ilustráciu možno uviesť výsledky, ktoré sa týkajú skúmania perspektív „socialistického“ a „kapitalistického“ systému. V prvom prípade možno pre vývoj určitej miery ekonomického štandardu (q) naformulovať evolučnú rovnicu v tvare

$$\frac{\partial q}{\partial t} = (A - B)q + D \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (7)$$

– 56 – kde konštanta A charakterizuje (v priemere konštantný) zárobok, konštanta B výdavky na živobytie a odvody štátu, súradnica z charakterizuje rozvrstvenie spoločnosti a posledný člen v rovnici zodpovedá „egoistickému“ správaniu sa jednotlivcov. V rovnostárskej „socialistickej“

spoločnosti (bez výraznej motivácie obyvateľov z hľadiska ich príjmov) je veľmi približne A-B. V takom prípade riešenia rovnice predstavujú postupnú degradáciu systému.

Keď sa však do systému zavedie „súkromné“ vlastníctvo, ktoré ľudí motivuje tak, že sa usilujú vyprodukovať tým viac, čím viac už majú, potom sa rovnica (7) zmení na tvar

$$\frac{\partial q}{\partial t} = (A - B)q + D \frac{\partial^2 q}{\partial z^2} \quad (8)$$

Je to analógia rovnice (4) a tá poskytuje riešenie, ktoré značí vznik stabilnej „štrukturalizácie“, v tomto prípade spoločnosti typickej pre prosperujúci systém.

Veľmi intenzívny trend smerom k aplikácii synergetických metód sa v súčasnosti pozoruje v ekonómii. Vysvetľujú sa tým rôzne ekonomické „vlny“ a iné špecifiká ekonomického rozvoja. Na tejto pôde sa v podstate rodí nová vedecká disciplína s názvom „ekonofyzika“.

3.7 Lorenzove systémy

Aplikácia synergetických metód v klimatológii priviedla E. N. Lorenza k rovniciam

$$\begin{aligned} \frac{\partial q_1}{\partial t} &= \sigma (q_2 - q_1) \\ \frac{\partial q_2}{\partial t} &= r q_1 - q_1 q_3 - q_2 \\ \frac{\partial q_3}{\partial t} &= q_1 q_2 - b q_3 \end{aligned} \quad (9)$$

v ktorých q_1 , q_2 a q_3 sú špeciálne definované charakteristiky klimatických systémov, σ , r , b sú charakteristické konštanty. Ich analýza ukázala, že pre určité zoskupenie riadiacich konštánt (σ , r , b) sa časové poruchy jednotlivých charakteristík riadia funkciou $y = y_0 e^{\lambda t}$, pričom exponenty λ majú pri určitom zoskupení riadiacich konštánt hodnoty -23 , 0 , $+2$. To značí, že v prípade ľubovoľne malej poruchy v tretej charakteristike rastie táto porucha s časom exponenciálne podľa funkcie $y = y_0 e^{2t}$, takže za časový interval $t = 10$ s vzrastie 10 milión-krát. Z toho vyplýva, že takýto systém sa stáva extrémne citlivý na malé fluktuácie, ktoré mu „vnucujú“ špecifické makroskopické správanie. Keďže možných fluktuácií je nespočetne mnoho, správanie systému sa stáva nepredikovateľným, čo vyjadrujeme konštatovaním, že sa začína správať chaoticky (odtiaľ pramení známa fráza: „Stačí, keď nad oceánom zamáva motýlik krídelkom a zmení sa počasie v celej Európe“.)

Ukázalo sa, že uvedený fenomén postihuje nielen klimatické, ale aj všetky ostatné reálne systémy, takže vo vývoji vesmíru sa celkom záko-

nite objavil nový fenomén – deterministický chaos. To spôsobilo, že synergetika rozšírila svoje pôsobenie aj na filozofiu a teológiu.

4. Niektoré filozofické a teologické výstupy synergetiky

Pre filozofiu a teológiu vyplýva zo synergetiky možnosť lepšie pochopiť niektoré detaily evolučného procesu, ktorý prebehol a stále prebieha vo vesmíre. Nejedná sa len o zdôvodnenie, ako a prečo sa uskutočňujú konkrétne zmeny v evolúcii, ale aj o pochopenie úžasnej variability produktov vývoja. Na tom má zásluhu najmä už spomínaný deterministický chaos. Okrem pozitívnych aspektov tohto fenoménu, ktorý je veľmi významný pri skúmaní takých problémov, akými sú napr. problém dobra a zla, problém komunikácie Boha s človekom a i., sa na tejto pôde vygeneroval aj problém, či možno v evolúcii postrehnúť určitú cieľenosť (aktívnu prítomnosť Boha v stvorení), keď synergetika tvrdí, že všetky reálne procesy nesú v sebe znaky absolútnej náhodnosti.

V tejto súvislosti si možno pripomenúť citát z diela známeho popularizátora R. Dawkinsa: „Vesmír, ktorý pozorujeme, má presne také vlastnosti, aké by sme očakávali, keby nebolo Dizajnéra, nijaký cieľ, dobro ani zlo, teda nič, len slepá nezávislosť.“ Ako má na toto tvrdenie reagovať teológ? Strohá odpoveď by mohla byť: synergeticky! (Laicky povedané nepriateľa je najlepšie poraziť jeho vlastnou zbraňou.)

Zo synergetiky vieme, že príroda vo svojom vývoji generuje nielen chaos (a teda náhodnosť), ale disponuje aj prostriedkami, pomocou ktorých likviduje obrovské množstvo z náhodných produktov ako neúžitocný balast. Spomenúť možno najmä a) fázové prechody a b) selekciu. Je síce pravda, že v stave nestability má v podstate každá fluktuácia šancu vnútiť systému svoj vlastný „kód“ na správanie, ale zďaleka nie všetky sa môžu ukázať ako úspešné. Krásne to možno demonštrovať na príklade struny hudobného nástroja. Keď ju sláčikom privedieme do stavu nestability, objaví sa nespočetné množstvo fluktuácií, ktoré sa usilujú vnútiť strune kmitanie vo svojom vlastnom rytme. Tie sa šíria po strune k bodom jej upevnenia, odtiaľ sa odrážajú späť a interagujú s pôvodnou vlnou. Touto „interferenciou“ sa všetky vlny samé zlikvidujú okrem tej, pre ktorú platí podmienka, že celočíselný násobok polovičnej vlnovej dĺžky sa presne rovná dĺžke struny. Všetko to prebehne za kratší čas, ako je rozlišovacia schopnosť ľudského ucha, a preto ono zaregistruje len existenciu „vítazného módu“. Fázové prechody takto vyberajú z nespočetného množstva možností len „životaschopné módy“.

Čosi podobné sa deje aj pri selekcii už na molekulárnej úrovni. Aj matematicky možno dokázať, že keď má systém vykazujúci autokatalýzu možnosť pracovať v n-režimoch, len jeden z nich sa vyznačuje stabilitou, a to ten, ktorý je najlepšie adaptovaný na vonkajšie podmienky.

Tieto dva mechanizmy spôsobili, že život na zemeguli sa mohol vygenerovať za nepomerne kratší čas, aký by si tento proces vyžadoval,

keby príroda musela „odskúšať“ každý variant vyplývajúci z faktu, že evolúcia je absolútne náhodný proces.

Je tu však ešte jeden problém – čo s náhodami, ktoré sú do systému vnášané zvonku, napr. zrážka zemegule s meteoritom, výbuch mohutných sopiek atď. Aj na to jestvuje rozumná odpoveď. Dostatočná veľkosť systému môže zaručiť, že aj veľmi málo pravdepodobný fenomén sa môže s určitou istotou očakávať. (Spomeňme si v tejto súvislosti na lotérie.) Možno že práve v tomto argumente treba hľadať odpoveď aj na často kladenú otázku, prečo Boh stvoril taký obrovský svet, keď pre ľudstvo by úplne stačila jediná slnečná sústava.

Nie je teda možné tvrdiť, že evolúciu úplne determinuje náhodnosť. Už spomínaný Teilhard de Chardin predpokladá, že vo vývoji existuje určitá „radiálna energia“, ktorá vývoj smeruje do určitého vopred stanoveného cieľa. Zdá sa, že moderná fyzika nachádza zmysel a reálne pozadie tejto záhadnej energie.

5. Záver

Náš stručný výklad základov synergetiky a prezentáciu jej niekoľkých zaujímavých výstupov možno výstižne zakončiť citátom jednej z početných hlbokých myšlienok A. Einsteina: „Najnepochopiteľnejšie na našom vesmíre je to, že je pochopiteľný“. Prostriedkom tohto pochopenia v nezanedbateľnej miere je práve synergetika, ktorá využíva znalosť základných zákonov vložených do hmoty na to, aby objasnila procesy, ktoré v našom svete prebiehali a stále prebiehajú. Tým, že objavila aj určité limity v našom poznávaní, napr. nemožnosť predikcie v procesoch poznačených deterministickým chaosom, nás upozorňuje, že náš vesmír je poznateľný, ale nikdy nebude človekom absolútne poznaný. To implikuje záver, ktorý opäť veľmi dobre vystihol spomínaný A. Einstein, keď napísal: „Nie je možné, aby za tým všetkým nebola nejaká nekonečná Inteligencia“.

Literatúra

- [1] HAKEN, H.: Synergetics - An Introduction. Berlin-Heidelberg-New York, Springer V. 1978.
- [2] MIKHAILOV, A. S.: Foundations of Synergetics I. Berlin-Barcelona, Springer. 1990.
- [3] MIKHAILOV, A. S. and LOSKUTOV, A. T.: Foundations of Synergetics II. Berlin-Budapest, Springer. 1991.
- [4] EBELING, W. and FEISTEL, H.: Physik der Selbstorganisation und Evolution. Berlin, Akademie. 1982.
- [5] WEIDLICH, W. and HAAG, G.: Concepts and Models of a Quantitative Sociology. Berlin, Springer. 1983.
- [6] LORENZ, S. N., Atmosph. Sci. 20 (1963), 130.
- [7] KREMPASKÝ, J.: Synergetika. Skriptum, Bratislava, STU 1994.

- [8] KREMPASKÝ, J. a kol.: Synergetika. Bratislava, VEDA 1988.
- [9] KREMPASKÝ, J.: Veda verzus viera. Bratislava, VEDA 2006.
- [10] KREMPASKÝ, J.: Evolúcia vesmíru a prírodné vedy. Bratislava, SPN 1992.

Prof. RNDr. Július Krempaský, DrSc., pracuje na FEI STU v Bratislave a na PF TU v Trnave. Zaoberá sa fyzikou tuhých látok, synergetikou a popularizáciou vedeckých poznatkov modernej prírodovedy.