

SINERGETICA – O NOUĂ METAȘTIINȚĂ A AUTOORGANIZĂRII SISTEMELOR COMPLEXE

Anatol ROTARU *, Rodica CUJBĂ **,

Lilia FLOREA-DONICA ***, Viorica STICI **

*Universitatea de Stat din Moldova, **Institutul de Economie,
Finanțe și Statistică, ***Institutul Patrimoniului Cultural

Una din particularitățile dezvoltării științei la sfârșitul secolului XX este, pe de o parte frontul foarte larg al cunoașterii lumii înconjurătoare, iar pe de altă parte adâncirea și profunzimea cercetărilor.

Suntem martorii existenței a zeci și chiar sute de fizici, matematici, chimii, biologii, economii etc., astfel încât specialiștii care activează în domeniul foarte apropiate sau chiar în același domeniu se înțeleg cu greu între ei, nemaivorbind de specialiștii din diferite domenii. Această situație este cauzată și dezvoltării în regim de șoc a informației științifice, a metodelor și metodelor specifice fiecărui domeniu de cercetare.

Referitor la aceasta, renumitul cibernetician englez S. Bir, încă acum 30 de ani în urmă a menționat că informația a devenit o tumoare canceroasă, cea mai nouă specie de poluare a mediului ambiant.

În aceste condiții, a apărut o necesitate stringentă de sinteză a științei contemporane, de restabilire a concepției unitare despre lume, de găsire a analogiilor între diverse grupe de fenomene, de găsire a izomorfismelor și legităților din diverse domenii ale cunoașterii.

O altă problemă a cercetării contemporane ține de complexitatea fenomenelor și necesitatea studierii lor interdisciplinare. Pe prim plan apăruse problema creării unei noi metaștiințe, principiile cărei ar fi putut să fie aplicate științelor particulare. Această metaștiință se numește SINERGETICA.

Fondatorul Sinergeticii este ilustrul om de știință german, Herman Haken. În anul 1973, la conferința internațională consacrată problemelor de autoorganizare a sistemelor complexe, H. Haken a expus ideile principale ale Sinergeticii, care ulterior au fost generalizate în lucrarea „Fenomene cooperative în sisteme departe de echilibru și nefizice”, publicată în anul 1975, în revista „Review of Modern Physics”. Ulterior problemelor Sinergeticii le-au fost consacrate sute de monografii și ma-

nuale, mii și mii de articole științifice în cele mai prestigioase reviste de specialitate, capul de afiș fiind cele de peste o sută de volume ale seriei Synergetics apărute în prestigioasa editură Springer.

„Am numit noua disciplină „Sinergetica” nu doar pentru că are ca obiect de studiu activitatea comună a multor elemente ale sistemelor, dar și pentru faptul că întru determinarea principiilor generale ale autoorganizării, este necesară cooperarea multor domenii de cercetare”.

Denumirea SINERGETICA își are originea de la grecescul „sin” ceea ce înseamnă „împreună cu” și „ergon” – acțiune. Prin urmare, Sinergetica studiază acțiunea în comun a elementelor sistemelor de diversă natură ce conduc la autoorganizarea acestora. Autoorganizarea se produce spontan, brusc, la depășirea unui prag critic al unuia sau mai multor parametri de control al sistemului, ultimul fiind departe de echilibru și deschis, făcând schimbul de substanță, energie și informație cu mediul înconjurător. Datorită cooperării neliniare ale micro-componentelor sistemului la scară microscopică, ia naștere o structură periodică spațială, temporară sau funcțională. Pentru autoorganizarea sistemelor complexe sunt necesare cinci criterii:

- 1) Mișcarea neliniară a micro-componentelor;
- 2) Sistemul participă la schimbul de energie, substanță și informație cu mediul înconjurător, prin urmare este deschis;
- 3) Cooperarea proceselor ce au loc în sistem;
- 4) Strarea departe de echilibru a sistemului;
- 5) Depășirea valorilor critice ale parametrilor de control.

Prin urmare, SINERGETICA este metaștiința despre autoorganizarea sistemelor complexe, condițiile de apariție a structurilor noi, trecerea unor structuri în altele.

Paralel și independent de H. Haken, procesele de autoorganizare a sistemelor complexe erau studiate de un colectiv de savanți din Bruxelles, în frunte cu laureatul premiului Nobel, Ilya Prigojine. Împreună au elaborat teoria generală a termodinamicii departe de echilibru, în baza căreia Prigojine a făcut generalizări filosofice revoluționare despre autoorganizare în Natură ca o proprietate fundamentală a materiei. Structurile apărute în rezultatul procesului de autoorganizare au fost numite de Prigojine – structuri *dissipative*.

Pe parcursul dezvoltării Sinergetica și-a format atât limbajul specific, cât și aparatul matematic inconfundabil. Aceasta din urmă conține: teoria ecuațiilor diferențiale neliniare; teoria sistemelor dinamice; teoria stabilității și bifurcațiilor; teoria probabilităților și ecuațiilor diferențiale

stohastice; teoria haosului dinamic; teoria catastrofelor; teoria fractalelor ș. a., ce denotă principiul de complementaritate a metodelor și teoriilor matematice în descrierea fenomenelor de autoorganizare.

Apărută inițial în domeniul fizicii și chimiei, creându-și aparatul respectiv conceptual și matematic, fundamentată cu preponderență pe termodinamica neliniară departe de echilibru, chimia evoluționistă, teoria evoluției prebiologice, teoria informației ș.a. *sinergetica* a depășit de curând perimetrul acestor științe, fiind implementată în biologie, ecologie, medicină etc. Drept exemple de sisteme cu compartiment sinergic vom menționa:

1. *în fizică* – laserul, maserul, convenția Bernard, fenomenul de supraconductibilitate, optica neliniară cuantică și semiclassicală, feromagnetii, termodinamica proceselor ireversibile, plasma, fizica materiei condensate ș.a.;

2. *în chimie* – procese autoondulatorii în reacțiile chimice, reacția Belousov-Jabotinski;

3. *în medicină* – activitatea inimii, metabolismul celular, halucinații vizuale, epidemiile;

4. *ecologie* – geneza și dinamica neliniară a populațiilor;

5. *fiziologie* – mecanisme de transmitere a excitațiilor în țesuturile nervoase și musculare ș.a.

La etapa actuală sinergetica pătrunde vertiginos în diverse domenii ale științelor sociale și umanitare: economie, istorie, sociologie, politologie, semantică, psihologie, pedagogie ș.a.

Deci, sinergetica studiază natura unitară a diferitelor fenomene, examinându-le ca un proces de tranziție de la dezordine în ordine și invers, evoluția sistemelor de la simplu la complex.

Condiția necesară pentru autoorganizarea sistemelor complexe este ca sistemul să fie dechis și să se afle departe de echilibru. Această stare poate fi obținută atât în urma unei acțiuni externe cât și a uneia interne.

În cazul când sistemul se află aproape de echilibru el tinde să-și păstreze această stare, tinzând spre echilibru. În asemenea condiții evoluția sistemului se descrie în termeni liniari, acesta tinzând către singura stare stabilă de echilibru unde dezordinea microscopică este maximală.

Când sistemul este departe de echilibru, evoluția lui se descrie în termeni neliniari, starea de echilibru devine instabilă, iar la depășirea unui prag critic al sistemului acesta trece într-o stare calitativ nouă cu formarea unei structuri macroscopice. Astfel din dezordinea microscop-

pică apare ordinea macroscopică. Astfel sinergetica a răspuns la una din cele mai importante contradicții în teoria evoluției. Potrivit legii a doua a termodinamicii un sistem închis evoluează ireversibil către starea de echilibru în care entropia devine maximă, iar sistemul își distruge ordinea devenind omogen. Pe de altă parte teoria evoluționistă a lui Darwin remarcă formarea și complexitatea continuă a formelor, structurilor și sistemelor vii. Anume datorită faptului că teoria evoluționistă a lui Darwin considera sistemele vii deschise, acestea fiind departe de echilibru, au posibilitatea de a forma structuri macroscopice regulate, care în teoria autoorganizării poartă numele de structuri disipative.

Sinergetica, actualmente a devenit o nouă direcție de dezvoltare în știința contemporană și reprezintă de fapt o nouă concepție despre lume.

Unul dintre principiile de bază ale sinergeticii este noțiunea de cooperare a elementelor sistemului. Apariția noilor structuri la scara macroscopică sunt determinate de cooperarea componentelor constituante ale sistemului la depășirea unui prag critic în condițiile când sistemul se găsește în stare departe de echilibru. În asemenea circumstanțe, datorită interacțiunii neliniare la nivel microscopic, componentele sistemului cooperând acționează într-un singur sens spre un același țel final. Astfel la scara macroscopică apare o nouă stare a sistemului, o nouă structură calitativ deosebită de cea precedentă. Are loc stabilizarea parametrilor ce caracterizează sistemul, producându-se astfel fenomenul de autoorganizare. Prin urmare autoorganizarea este un proces spontan care decurge de la părți componente independente, dispersate, necorelate, neordonate la părți corelate ce generează o ordine nouă.

În cazul când sistemul studiat se află în stare de echilibru elementele sale se comportă independent unul față de celălalt. Astfel de elemente Prigojine le-a numit *hipnoni*, adică elemente ce se află în stare de hibernare. În această stare fiecare element nu observă și nu este sensibil la prezența celorlalte. În momentul în care sistemul trece într-o stare departe de echilibru, hipnonii devin activi și astfel între ei se stabilește o legătură coerentă, care nu este caracteristică comportamentului lor în stare de echilibru. În aceste condiții elementele sistemului nu mai sunt independente, ci cooperând între ele conduc în cele din urmă la apariția unei structuri.

Sinergetica, având un caracter de universalitate, are tangențe cu termodinamica, cibernetica modernă, precum și cu teoria modernă a informației.

Din punct de vedere al ciberneticii autoorganizarea este condiționată de stabilitatea sistemelor, aceasta fiind asigurată de mecanismele informaționale de autostabilizare. Trecerea sistemului în stare de dezechilibru este o stare cu care sistemul cibernetic luptă, conducând la distrugerea stabilității și integrității lui. O situație tocmai inversă este în sistemele sinergetice. Starea de dezechilibru este izvorul formării structurilor, este cauza structurogenezei spontane.

Dacă cibernetica poate fi asociată cu termodinamica liniară în stare de echilibru, atunci sinergetica poate fi asociată cu termodinamica neliniară departe de echilibru.

O particularitate fundamentală a sistemelor sinergetice este reacția rezonantă la acțiunile externe. Comportamentul lor este determinat neunivoc de istoria evoluției. Acesta apare datorită neliniarității sistemelor sinergetice. În general, sinergetica ca o nouă paradigmă conține în sine trei idei fundamentale: neliniaritatea, caracterul deschis al sistemului și disipativitatea.

Neliniaritatea este o reacție neobișnuită a sistemelor sinergetice la acțiunile externe, când o acțiune corect organizată exercită o influență mai mare asupra evoluției sistemului, decât o acțiune mai puternică, dar neadecvat prezentată în conformitate cu tendințele proprii de dezvoltare.

Caracterul deschis al sistemului asigură prezența surselor și scurgerilor externe, condiție indispensabilă pentru schimbul de energie, substanță și informație cu mediul înconjurător și existența stărilor de dezechilibru stabile (atractorii sistemului).

În sfârșit, disipativitatea rezidă din caracterul aleator, haotic al proceselor elementare inerente ale sistemelor sinergetice și care apare drept factor de selecție naturală, care înlătură tot ce nu corespunde tendinței de dezvoltare a sistemelor.

Spațiul fazelor. Bifurcații și fluctuații

Sistemele sinergetice de regulă sunt compuse dintr-un număr mare de elemente care interacționează între ele neliniar și care conduc la formarea unor structuri elementare a subsistemelor și a structurii sistemului propriu zis.

Pentru caracterizarea stării sistemelor se introduc parametri macroscopici, mărimea cărora este formată din multitudinea proceselor care se petrec la nivelul microscopic. Acești parametri caracterizează evoluția sistemului sinergetic.

Dacă sistemul conține n componente distincte, evoluția sa în caz general, poate fi descrisă de un sistem cu n ecuații diferențiale neliniare în derivate parțiale.

În cazul în care sistemul este omogen, evoluția acestuia este descrisă de un sistem de ecuații diferențiale neliniare ordinare, soluțiile cărora $P1(t), P2(t), P3(t), \dots, Pn(t)$, caracterizează starea sistemului în orice moment al timpului. Spre regret până în prezent nu este cunoscut algoritmul rezolvării ecuațiilor diferențiale neliniare, soluțiile analitice fiind găsite doar pentru un grup foarte restrâns de ecuații. De regulă, ecuațiile diferențiale neliniare se rezolvă cu ajutorul calculatorului electronic prin simulări numerice, precum și cu ajutorul teoriei calitative a ecuațiilor diferențiale. Aceasta permite prezicerea caracterului comportamentului sistemului dinamic.

Potrivit acestei teorii starea sistemului este caracterizată de mărimile valorilor $P1(t), P2(t), P3(t), \dots, Pn(t)$. În cazul când se consideră un sistem de coordonate dreptunghiular în spațiul $n - dimensional$ pe axele cărora se depun respectiv valorile $P1(t), P2(t), P3(t), \dots, Pn(t)$, starea sistemului sinergetic într-un moment dat al timpului, se determină cu un punct, care poartă denumirea de punct de reflecție. Schimbarea stării sistemului este comparată cu deplasarea punctului de reflecție în spațiul $n - dimensional$. Spațiul cu coordonatele $P1(t), P2(t), P3(t), \dots, Pn(t)$ se numește spațiu fazic al sistemului, iar curba pe care o descrie punctul de reflecție poartă denumirea de traiectorie de fază.

Una din proprietățile de bază ale sistemelor sinergetice o constituie posibilitatea existenței așa numitor stări staționare, pentru care variabilele ce caracterizează sistemul nu depind explicit de timp. În acest caz traiectoria de fază corespunzătoare este un punct. Pentru fenomenele periodice, care se repetă peste o perioadă de timp, traiectoria de fază este o curbă închisă, care pentru sistemele sinergetice se numește *ciclu limită*. Totalitatea traiectoriilor ale unui sistem dinamic se numește *portret de fază*.

O caracteristică importantă a soluțiilor ecuațiilor diferențiale neliniare ce descriu sistemele sinergetice este stabilirea lor și deci stabilirea sistemului.

Sistemele sinergetice sunt determinate de parametrii de control. Acestea reprezintă mulțimea tuturor parametrilor ce caracterizează un proces. În rezultatul acțiunii diverselor mecanisme parametrii de control își schimbă valoarea și în anumite condiții sistemul sinergetic poate să-și modifice substanțial comportarea macroscopică, deci devine in-

stabil. Este importantă studierea stabilității sistemelor sinergetice sub acțiunea perturbațiilor atât interne cât și externe, deterministe sau stohastice. Dacă în rezultatul acestor acțiuni sistemul trece să evolueze pe o altă traiectorie de fază, se spune că el este instabil și viceversa, dacă rămâne pe aceeași traiectorie, atunci el este stabil. Prin urmare, stabilitatea este o proprietate de menținere a proceselor în sistemele sinergetice sub acțiunea perturbațiilor interne și externe.

Mulțimea spre care tind traiectoriile de fază se numește *atractor*. Atractorul poate fi atât atractiv cât și repulsiv. În cazul general atractorul este format dintr-o infinitate de orbite de parte fiind atractive altele repulsive. Dacă atractorul captează toate traiectoriile de fază, atunci el se numește *atractorul global*. Atractorul global poate fi format dintr-un punct, o singură, mai multe sau un număr infinit de orbite în spațiul fazelor.

Schimbarea parametrilor de control conduce la modificarea caracterului soluțiilor, al traiectoriilor de fază și al atractoriilor. Dacă la o schimbare mică a parametrului de control tabloul calitativ al traiectoriilor de fază nu se modifică, atunci se spune că sistemul sinergetic este structural stabil. Valorile parametrilor de control, pentru care are loc modificarea calitativă a traiectoriilor de fază se numesc *valori critice* sau *bifurcaționale*. Pentru aceste valori starea sistemului sinergetic poate să se bifurce astfel încât el poate trece în una dintre două stări noi posibile distincte. Punctul în care are loc această bifurcare, se numește *punct de bifurcație*. Există puncte de bifurcație primară, secundară, terțială etc. Punctele de bifurcație se studiază în teoria bifurcațiilor.

Un rol deosebit în sistemele sinergetice le revine fluctuațiilor. *Fluctuația* este o abatere mică, întâmplătoare și temporară față de o anumită stare. Din punct de vedere al statisticii fluctuația este schimbarea bruscă de la valoarea medie statistică a unei mărimi.

Vom menționa că pentru stările de echilibru sau aproape de echilibru fluctuațiile sunt neesențiale și slab pronunțate. În sistemele sinergetice în condițiile când acestea se află departe de echilibru rolul fluctuațiilor devine decisiv. Mai mult ca atât, în punctele critice de bifurcare când sistemul își modifică substanțial starea microscopică rolul lor devine fundamental, ele atingând valori macroscopice. Anume fluctuațiile în punctele de bifurcație determină pe ce traiectorie va evalua mai departe sistemul sinergetic.

Faza bifurcațională de dezvoltare a sistemului sinergetic se caracterizează prin dispariția calității anterioare.

În punctele de bifurcare apare o întregă hartă a posibilităților de

dezvoltare a sistemului, se deschid căi potențiale noi, stări cu proprietăți distincte de cele precedente. Sistemul sinergetic „alege” o cale sau alta de dezvoltare sub acțiunea fluctuațiilor, fiind foarte sensibil în raport cu ele.

Prin urmare în punctele de bifurcație există o alternativă de dezvoltare a sistemului sinergetic. Aceasta conduce la aceea că dezvoltarea sistemelor complexe neliniare în principiu nu poate fi planificată datorită faptului că starea anterioară este modificată ireversibil.

Cicluri, unde, fractali, catastrofe

Ciclu (de la greaca veche *kyklos* – cerc) este o succesiune de fenomene, stări, manifestări etc. ce se realizează într-un interval anumit. Intervalul de timp după care se repetă actul sau fenomenul respectiv se numește *perioadă*.

Pe parcursul istoriei civilizației problema ciclurilor în materia vie și cea moartă a fost în centrul atenției gândirii filozofice, științifice și sociologice. Noțiunea de ciclu se regăsește acum o mie de ani până la era noastră în filozofia veche chineză, în care procesul mondial nu este altceva decât o succesiune de situații, care apare datorită interacțiunii forțelor lumii și beznei, tensiunii și maleabilității. Potrivit paradigmei filozofiei chineze vechi, viața individului și a societății reprezintă în general un cerc pe care, mișcându-te ajungi la poziția inițială. Analizând procesele lumii înconjurătoare, inclusiv a dezvoltării societății, o importanță deosebită i se acordă ciclurilor în lucrările filozofilor antici (Hipocrat, Herodot, Polibiu, Platon, Aristotel), în filozofia nouă (Vico, Herder, Danilevski, Leontiev, Kondratiev, Sorokin, Spengler, Toynbee, Vernadsky, Cijevski).

Un val nou în abordarea ritmului ciclic al dezvoltării societății s-a început în jumătatea anilor 70 ale secolului XX sub acțiunea crizei de trecere de la epoca industrială la cea postindustrială a civilizației.

De o atenție deosebită se bucură teoria undelor lungi în economie (Kondratiev, Mensch, Dane), ciclurilor istorice seculare și milenare (Braudel, Toffler, Iakovets, Gumilev) dinamicii ciclice a dezvoltării științei, tehnicii, inovațiilor, culturii, învățământului, sferei social-politice (Kuhn) ș. a.

În conformitate cu paradigma sinergetică, ciclul dinamicii proceselor este caracteristic atât societății în întregime, cât și elementelor constituante. Ciclurile au un caracter universal. Se disting următoarele cicluri: cicluri demografice, cicluri ecologice, cicluri tehnologice, cicluri

de activitate, inovațională, etc. interacțiunea acestor cicluri stă la baza formării ritmicii complexe a procesului istoric. Procesele ciclice sunt caracteristice tuturor fenomenelor.

Spre deosebire de viziunile filozofilor antici, potrivit cărora dinamica ciclică are loc pe un cerc închis, sinergetica presupune că traiectoria dinamicii ciclice are forma de spirală ondulatorie care îmbină atât procese reversibile cât și ireversibile. Fiecare nou ciclu este irepetabil, inconfundabil și specific.

Undele reprezintă o proprietate universală a mișcării și dezvoltării lumii înconjurătoare, și este un proces de propagare din aproape în aproape a unei oscilații într-un anumit mediu cu o viteză finită. Procesul ondulatoriu se caracterizează cu lungimea de undă care este distanța dintre două puncte succesive ale unei unde, în care oscilația are aceeași fază.

Toate obiectele și fenomenele au proprietatea de a se schimba în timp și spațiu. Pe parcursul schimbării unele caracteristici cresc până la un anumit nivel după care scad, prin urmare oscilează. Oscilațiile se caracterizează cu astfel de caracteristici ca: *amplitudinea, frecvența și faza*.

La fel ca și în fenomenele naturale, celor sociale le sunt caracteristice procesele ondulatorii, oscilatorii și ritmice. Problemele de socioritmologie se studiază în sinergetica socială. Spre deosebire de oscilațiile din lumea nevie ritmurile în sistemele sociale sunt mai stohastice și prin urmare amplitudinea, faza și perioadele se caracterizează cu un grad mai mare de variabilitate. Perioada fluctuantă a fenomenelor sociale și este *ciclul social*.

Printre oscilațiile sociale vom menționa astfel de oscilații: economice, politice, culturale, ideologice, științifice ș. a. Toate aceste oscilații sunt studiate intens de știința contemporană inclusiv de sinergetică. Fără a intra în detalii vom menționa că studierea fenomenelor oscilatorii a sistemelor sociale este o problemă extrem de complicată. Aici se studiază cauzele apariției undelor sociale precum și mecanismele de funcționare ale lor, fazele de creștere și descreștere, schimbările structurale în aceste faze, interacțiunea dintre diferite tipuri de unde sociale (economice, tehnologice, inovaționale, politice etc.).

Procesele sociale ondulatorii se caracterizează prin diferite valori ale amplitudinilor și frecvențelor. Amplitudinile proceselor sociale pot fi: mari, mici, medii și optimale. Dacă amplitudinea oscilației se află în limitele „secțiunii de aur”, adică nu depășesc mai mult de 62% , valoarea

medie (numărul Fibonacci de 1,618 ori) atunci starea sistemului social se află în armonie. Orice abatere bruscă care depășește aceste valori conduce la catastrofe sau la stagnarea dezvoltării sistemelor sociale. În aceste situații un loc deosebit de important îl ocupă dirijarea optimală cu procesele sociale, prin atenuarea variațiilor bruște a amplitudinilor oscilațiilor.

Problema frecvenței de aur, a simetriei și dezvoltării uniforme a proceselor sociale este mai complicată datorită faptului că fiecare sistem social are ritmul său de viață, tempoul său de dezvoltare sub acțiunea multiplilor factori interni și externi, determinați și stohastici, mici și mari, rezonanți și nerezonanți etc. Aceste probleme abia acum încep a fi studiate la exigențele științei contemporane și au o importanță deosebită pentru dezvoltarea și pronosticarea proceselor sociale de diferită natură.

După cum am menționat dezvoltarea ciclică, ondulatorie este o formă generală a mișcării în natură și societate.

Știința modernă, însă, se dezvoltă mai departe. Strâns legată de acestea se introduce o nouă noțiune - *fractalii* sau asemănări la diferite niveluri de organizare a materiei și pe diferite intervale de timp.

Termenul „fractal” derivă de la latinul *fractus* - neregulat, fragmentat. În știința modernă acesta a fost utilizat pentru prima dată de B. Mandelbrot în 1975, analizând diferite forme geometrice care aveau proprietatea de a fi „rugoase și autosimilare”. Intenția lui Mandelbrot era de a găsi „o posibilitate de caracterizare sistemică geometrică”, intermediară între formele perfect ordonate și netede din geometria euclidiană și formele complexe și rugozitate.

Lumea în care noi trăim, din punct de vedere a geometriei euclidiene, este tridimensională. Obiectele în acest spațiu par a fi tridimensionale, bidimensionale, unidimensionale și nuldimensionale – dimensiunea unui punct. Însă lumea reală percepută de vederea noastră este mult mai variată. Meritul lui Mandelbrot constă în faptul că a propus pentru descrierea lumii reale de a utiliza nu dimensiuni întregi ci dimensiuni fracționare, deoarece descrierea lumii înconjurătoare în metricile geometrice tradiționale conduce la simplificarea percepției lumii reale. Potrivit lui Mandelbrot în natură în general nu există suprafețe perfecte.

Lumea reală poate fi concepută prin introducerea noțiunii de dimensiune fractală, care spre deosebire de dimensiunile idealizate întregi este fracționară.

În această ordine de idei Mandelbrot menționează: „Să luăm o bilă cu diametrul de zece centimetri ce reprezintă un ghem de ață cu grosimea de un milimetru. Așa o bilă (în formă ascunsă) are câteva mărimi efective diferite. Pentru un observator, care se găsește destul de departe, așa o bilă este un corp cu dimensiuni nule: un punct. (Amintim că B. Pascal și filozofii din evul mediu afirmă că în limitele cosmosului lumea este doar un punct). Dacă privești bila cu o rezoluție de ordinul zecilor de centimetri, ea se transformă într-un ghem tridimensional. De la zece centimetri ne apare un amestec încâlcit de ațe unidimensionale, iar de la o distanță de zeci de centimetri fiecare ață se va prezenta ca o coloană tridimensională. De la distanța de o sută de milimetri vom vedea că fiecare coloană se descompune în fibre și din nou obiectul devine unidimensional. Se poate de continuat și mai departe, și de fiecare dată dimensiunea va trece de la o valoare la alta. Când bila va putea fi văzută ca un număr infinit de puncte asemenea atomilor, el din nou va deveni obiect cu dimensiune nulă. Cu o consecutivitate analogică a dimensiunilor și tranzițiilor vom lua cunoștință și în cazul când vom cerceta o foaie de hârtie obișnuită.

Împrejurarea în care valoarea numerică a dimensiunii efective depinde de raportul dintre obiect și observator este pe deplin în spiritul fizicii veacului nostru și poate servi ca un exemplu al acestui spirit. Multe obiecte examinate în acest studiu, ne amintesc de ghemul de ață: ele demonstrează consecutivitatea diferitor dimensiuni efective. Însă aici apare un element substanțial nou: unele tranziții care nu sunt bine determinate între zonele dimensionale bine determinate. Aceste zone le interpretez ca zone fractale în interiorul cărora dimensiunea efectivă este mai mare decât dimensiunea topologică.”

Prin urmare, la diferite scări în sistemele complexe, putem observa autosimilaritatea și repetabilitatea de forme. Trecerea de la o dimensiune întregă la alta se caracterizează cu dimensiuni fracționare. Măsurile obiectelor și fenomenelor regulate cum ar fi: curba, suprafața, domeniile tridimensionale sunt respectiv: lungimea, aria, volumul. În cazul mulțimilor neregulate (turbulențe în natură și sistemele sociale, sisteme biologice, formele lanțurilor de munți, formele norilor etc.) nu se mai poate opera cu măsuri regulate.

Structurile complexe studiate în diferită dimensiune conțin unele și aceleași elemente fundamentale și asemănări. Aceste legități, ce se repetă, determină dimensiunea fracționară sau fractală a structurii.

Vom menționa că invariabilitatea în raport cu scara de observații, are legături strânse cu teoria contemporană a haosului dinamic. Fenomenele haotice au legități asemănătoare la variațiile în diferite dimensiuni temporale.

Fractalii descriu: caracteristicile intermediare dintre formele ordonate, netede, și formele complexe, neregulate; tranziția de la ordine la dezordine, haos și turbulență.

Teoria fractalelor găsește autosimilaritatea și repetabilitatea de forme a obiectelor, proceselor și fenomenelor de diversă natură la diferite scări dimensionale. Cu ajutorul ei pot fi explicate cele mai complexe fenomene din lumea înconjurătoare.

O altă teorie pe care e fundamentată sinergetica este teoria catastrofelor, conexă organic cu teoria ciclurilor și fractalelor. Ea este una dintre domeniile de vârf ale științei în general și a matematicii în special. Dacă știința clasică și neclasică operează cu structuri netede și continue, teoria catastrofelor modelează fenomene tranzitorii calitative prin salt. Tranziția discontinuă, prin salt apare brusc, drept reacție neliniară a sistemului când are loc modificarea lentă a condițiilor exogene sau a fluctuațiilor endogene. Ea constă fie în apariția ordinii într-un sistem cu elemente dezordonate, fie în trecerea într-o altă ordine calitativ nouă față de cea anterioară, fie în tranziția de la o ordine spațială, temporală, temporal-spațială sau funcțională la dezordine. Tranzițiile discontinuă (catastrofele) corespund bifurcațiilor.

Teoria catastrofelor a fost fondată de R. Thom în 1966, care actualmente se utilizează pe larg în studiul sistemelor complexe, ce depind de un număr finit de parametri. Thom a propus de a utiliza teoria topologică a sistemelor dinamice, pentru modelarea schimbărilor discontinuă în diverse fenomene ale naturii. Cerințele față de stabilitatea structurilor, inclusiv a celor sociale, constituie una dintre problemele importante ale acestei teorii.

Bineînțeles că utilizarea potențialului de idei a teoriei catastrofelor în sfera fenomenelor sociale nu poate explica și răspunde deplin la toate problemele actuale, totuși teoria dată în mare măsură permite conștientizarea și descrierea adecvată a evoluției proceselor complexe, care determină mișcarea reală a evenimentelor. Teoria catastrofelor este o modalitate foarte efectivă de a scoate la lumină soluționarea multiplelor probleme de dezvoltare a sistemelor neliniare complexe. Ea reprezintă o metodă universală de studiere a tranzițiilor discontinuă, a modificării instantanee a proprietăților calitative a sistemelor complexe și este uti-

lizată masiv în diverse domenii ale științei moderne: medicina (bătăile inimii), fizică, embrionologie, lingvistică, psihologia experimentală, economie, hidrodinamică, sociologie, în modelarea activității creierului și a maladiilor psihice etc.

Ordinea, dezordinea și entropia

Orice sistem este construit din elemente care sunt ordonate într-un fel sau altul și legate între ele prin anumite relații. În acest caz general prin structură se înțelege modalitatea de organizare a elementelor și caracterul de conexiune între ele indiferent de natura lor. Structura sistemului este determinată de totalitatea relațiilor dintre elementele constante.

În sistemele atât naturale, cât și sociale, există structuri spațiale, temporale, temporal-spațiale și funcționale.

Drept cea mai simplă structură spațială poate fi considerată structura cristalină, elementele căreia sunt atomi sau molecule situate în nodurile rețelei cristaline.

Structura temporală este determinată de dinamica sistemului și legitățile mișcării.

Structurile temporal-spațiale sunt realmente proprietăți fundamentale ale materiei în general, iar cele funcționale sunt determinate de relațiile funcționale ale elementelor.

Structura e caracterizată printr-o stabilitate și rigiditate care în anumite limite se împotrivesc acțiunilor exogene și endogene, rămânând invariantă. În cazul când structura își pierde invarianța survine distrugerea ei.

Sistemele pot fi simple și complexe. Sistemele complexe la rândul lor pot fi ierarhice, acestea din urmă constituind un ansamblu de părți componente ce interacționează între ele și care constau dintr-o consecutivitate de subunități (elemente) plasate una în alta. Evoluția mulțimii componentelor ce interacționează și formează un nivel ierarhic distinct poate fi descrisă cu variabilele și parametri caracteristici nivelului dat. Între diversele niveluri ierarhice există interacțiuni și schimb de informație. Nivelul ierarhic superior recepționează informația de la alte niveluri și datorită legăturilor inverse (feed back) dirijează cu acestea.

Pe parcursul dezvoltării științei s-au cristalizat două teorii fundamentale contradictorii despre structuri, teoria evoluționistă a lui Darwin și termodinamica fenomenologică.

Teoria lui Darwin a fundamentat dezvoltarea materiei vii de la for-

mele inferioare la cele superioare. Prin urmare în lumea vie are loc procesul de creștere a complexității sistemelor în procesul evoluției.

Pe de altă parte, în conformitate cu teoria termodinamicii fenomenologice toate structurile în sistemele închise tind spre dezorganizare, haotizare și distrugere în procesul evoluției spre echilibru.

Prin urmare, teoria evoluției materiei conține două forme contradictorii: una dintre ele duce la formarea structurilor, iar cealaltă – la distrugerea lor. E de remarcat faptul că ambele teorii se bazează pe un număr imens de factori experimentali.

Termodinamica are la bază conceptele de sistem și proces. Procesele pot fi reversibile și ireversibile. Dacă sistemul trece în ordine inversă prin aceleași stări ca și transformarea directă, atunci procesul este reversibil. Procesele reale se desfășoară într-un interval finit de timp și sunt ireversibile, ceea ce înseamnă că atunci când în sistem intervine o modificare, el nu mai poate reveni la starea lui inițială.

La baza termodinamicii stau două principii fundamentale:

- 1) principiul conservării energiei;
- 2) principiul evoluției sistemelor termodinamice.

Se disting două tipuri de sisteme:

- 1) *sistemele omogene* – ale căror proprietăți sunt invariante (aceleași) în fiecare punct;
- 2) *sistemele neomogene* compuse din diferite faze despărțite de interfețe.

Starea sistemului este determinată de ansamblul tuturor proprietăților lui și se caracterizează prin funcțiile de stare.

Primul principiu, al termodinamicii, arată că în rezultatul transformărilor sistemului, energia acestuia se conservă, deci este constantă. Însă, acest principiu nu ne oferă informații despre sensul de evoluție al sistemului.

Acest neajuns este înlăturat de-al doilea principiu al termodinamicii. Trecând peste detalii, vom menționa că starea unui sistem este caracterizată printre altele de o funcție numită *entropie*. Termenul de *entropie* a fost propus de Clausius și provine de la grecescul „întoarce”, „transformare”.

În conformitate cu principiul al doilea al termodinamicii, pentru orice proces real sau ireversibil într-un sistem izolat, entropia crește, sistemul tinzând astfel spre starea de echilibru. Un sistem este în echilibru atunci, când nu-și schimbă starea. Starea de echilibru este starea de cea mai mare probabilitate pentru care entropia atinge valoarea

maximă. Entropia deci, poate fi caracteristica abaterii de la starea de echilibru. Într-un sistem închis care se află în stare de dezechilibru, procesele decurg astfel, încât entropia crește atunci, când sistemul tinde spre echilibru.

Astfel, entropia este o reprezentare a ordinii. Legea a doua a termodinamicii postulează că în cadrul unui proces care se desfășoară într-un sistem izolat, dezordinea crește neconținut până când sistemul ajunge la echilibru. Prin urmare, entropia este măsura ordinii sau a dezordinii. Cu cât este mai mare ordinea, cu atât e mai mică entropia și invers cu cât e mai mare dezordinea cu atât e mai mare entropia.

În sistemele vii care au proprietatea să se autoorganizeze și să formeze noi structuri, entropia descrește, iar în natura neorganică, are loc un proces de regres care duce spre creșterea dezordinii, dezorganizării, distrugerii structurilor și sistemelor, contribuind la creșterea entropiei. Mai mult ca atât, Clausius și Thomson au generalizat aceste concluzii asupra întregului Univers. Presupunând că Universul este un sistem închis, ei i-au prezis acestuia moartea termică. Însă, ultimele descoperiri în știința nevie ne demonstrează formarea de noi structuri în general și în Univers în special.

În fața științei moderne a apărut problema de a explica aceste fenomene contradictorii, devenind una dintre problemele fundamentale ale științei. Răspunsul a fost găsit în cadrul noii paradigme despre dezvoltarea naturii – sinergetica, bazată pe ideile de dezechilibru, nelinearitate și neizolare. În sistemele în stare de dezechilibru entropia este mai mică, prin urmare, aceste sisteme sunt mai ordonate decât cele ce se află în stare de echilibru. În sistemele deschise (neizolate) procesele pot avea loc concomitent cu micșorarea entropiei, deci creșterea ordinii. Într-adevăr, variația entropiei unui sistem deschis poate fi prezentată ca suma variației cauzată de factorii externi și a variației entropiei datorită proceselor ce decurg în interiorul sistemului. Pentru acesta din urmă variația entropiei este pozitivă și conduce la mărirea dezordinii. În schimb variația entropiei cauzată de interacțiunea cu mediul înconjurător poate fi atât pozitivă, cât și negativă, în dependență de caracterul interacțiunii. Dacă variația aceasta este negativă și mai mare ca variația entropiei interne, atunci variația totală a entropiei sistemului este negativă, ceea ce înseamnă că sistemul își micșorează entropia. Prin urmare, sistemul devine mai ordonat. Dacă sistemul deschis se află departe de echilibru atunci în el pot apărea spontan structuri noi, mai organizate.

Haosul dinamic și atractori stranii

Pe parcursul evoluției civilizației, noțiunea de haos se asocia cu o dezordine totală, lipsită de orice structură. Într-un sistem compus dintr-un număr de elemente haosul poate fi generat fie de acțiunea zgomotului extern, fie de fluctuațiile aliatoare interne. Intuitiv putem presupune că haosul poate apărea și într-un sistem complicat, constituit dintr-un număr foarte mare de elemente și care are multe grade de libertate. În acest caz impredictibilitatea este determinată de imposibilitatea reală de a determina exact condițiile inițiale a tuturor elementelor necesare pentru a descrie evoluția sistemului. În aceste condiții, se purcede la descrierea statistică, probalistică a sistemului respectiv. Prin urmare, haosul în sensul clasic al cuvântului apare în sisteme care se descriu cu ajutorul teoriei probabilităților.

Un nou tip de haos a fost descoperit în anul 1964 de Lorentz și care poartă denumirea de haos dinamic sau haos determinist. Această descoperire este considerată drept una dintre cele mai senzaționale și importante descoperiri în a doua jumătate a secolului XX.

Haosul dinamic s-a cristalizat într-un domeniu distinct și actualmente putem vorbi despre nașterea unei noi științe – știința haosului dinamic sau haosologia.

Senzaționalitatea acestei descoperiri constă în faptul că acest tip de haos apare în sisteme dinamice simple cu puține grade de libertate și care nu sunt supuse nici acțiunii zgomotului extern, nici fluctuațiilor interne. În conformitate cu teoria clasică a sistemelor dinamice, există un algoritm care determină în mod univoc comportamentul acestora, dacă sunt date condițiile inițiale. Acest principiu poartă denumirea de determinism laplasiian și care nu admite un comportament haotic al sistemelor dinamice.

În conformitate cu teoria ergodică evoluția sistemelor dinamice este descrisă de sisteme de ecuații diferențiale neliniare deterministe, care nu conțin termeni aliatori. A apărut problema fundamentală: care sunt cauzale și condițiile ca un sistem dinamic determinist să manifeste comportament și legități statistice, probalistiche. La început se considera că apariția legităților statistice în sistemele dinamice, este determinată de creșterea numărului de grade de libertate, care permitea medierea peste aceste grade și trecerea la descrierea probalistică a sistemelor. Însă după cum s-a constatat această cerință nu este necesară. Mai mult ca atât, s-a găsit o clasă întreagă de sisteme dinamice

cu grade de libertate mai mari ca doi, pentru care dinamica determinată conduce la legități statistice. În ultimii 30-35 ani a fost elaborată teoria care explică comportamentul haotic al sistemelor dinamice. Potrivit acestei teorii, haosul dinamic este determinat de interacțiunea neliniară a elementelor sau subsistemele ce alcătuiesc sistemul și instabilitatea acestuia.

Ideea despre legătura dintre instabilitate și statistică aparține renumitului om de știință Poincare. Ea a fost dezvoltată de Kolmogorov, Sinai ș. a.

Una dintre prioritățile de bază ale mișcărilor instabile constă în sensibilitatea condițiilor inițiale, adică orice mică varietate a condițiilor inițiale duce la creșterea deosebirii traiectoriilor de fază. În cazul când sistemul dinamic este complet instabil, traiectoriile de fază se îndepărtează una față de cealaltă în conformitate cu legea exponențială. E de menționat faptul că haosul dinamic apare atât în sisteme hamiltoniene, cât și în acele disipative. Actualmente teoria haosului dinamic în diverse sisteme fizice, chimice, biologice, ecologice, economice, sociale ș. a. îi sunt consacrate un număr impresionant de lucrări științifice.

Mișcarea haotică determinată este condiționată de faptul că, traiectoriile de fază fiind instabile, au forme extrem de complicate, întortocheate care conduc la mișcări impredictibile, când volumul spațiului de fază rămâne invariant pentru sistemele hamiltoniene sau tinde către zero pentru cele disipative.

Spre deosebire de haosul clasic, haosul dinamic poate fi descris strict matematic, acesta având o ordine interioară și o anumită structură. Aceasta din urmă a condus la regândirea noțiunilor de ordine și structură. S-a constatat că, sens are nu ordinea și haosul în general, ci și gradul sau norma de ordine sau dezordine.

Lorentz, studiind dinamica unui sistem disipativ care poate fi descrisă în numai trei ecuații diferențiale neliniare ordinare, a demonstrat că pentru anumite valori ale parametrilor sistemului, traiectoriile în spațiul de fază trec dintr-o parte a acestuia în alta complet imprevizibilă, deși până în momentul salturilor mișcarea are un caracter determinist. În spațiul de fază, acestor mișcări haotice îi corespunde o mulțime care poartă denumirea de atractor straniu. Prin urmare, atractorul straniu este imaginea în spațiul fazelor a mișcării haotice, precum ciclul limită este imaginea regulată a mișcării periodice.

Atractorul lui Lorentz are o structură complicată, care din punct de vedere matematic se descrie cu ajutorul teoriei fractalelor a lui Mandel-

brot. S-a constatat că dimensiunea atractorului straniu este fracționară, spre deosebire de dimensiunile atractorilor clasici, care sunt numere întregi: punctul de echilibru – dimensiunea zero, ciclul limită – dimensiunea unu, torurile – dimensiunea n . Datorită acestui fapt atractorii stranii se numesc și atractori fractali.

Haosul se compară cu un spectru continuu al frecvențelor. Aceasta înseamnă că mișcarea haotică nu poate fi prezentată în formă de sumă a mișcărilor periodice, care se caracterizează la rândul său cu valori directe ale frecvențelor. În limbajul geometric mișcarea periodică stabilă, este determinată de existența în spațiul fazelor de o curbă închisă, către care tind toate celelalte traiectorii de fază. În cazul când mișcarea este instabilă, o parte sau toate traiectoriile de fază se îndepărtează de curba respectivă.

În cazul când în spațiul fazic există mai mulți atractori periodici, atunci în dependență de condițiile inițiale în sistem se realizează o mișcare care corespunde unuia din acești atractori.

Dacă atractorii staționari sau periodici sunt instabili, atunci ei devin repulsivi. În acest caz în sistemele disipative orice volum al spațiului de fază tinde către zero. Datorită faptului că atractorii sunt instabili, toate traiectoriile umplu spațiul de fază în mod complicat astfel încât, comportamentul sistemului devine impredictibil, în spațiul fazelor ia naștere atractorul straniu care are o anumită structură deși complicată. Bunăoară, în cazul când atractorul straniu conține o mulțime mare sau infinită de cicluri limită cu perioade apropiate, mișcarea pe atractor nu este destul de haotică, datorită faptului că diversitatea mișcărilor nu este prea mare. Deși spectrul mișcării este continuu, ceea ce denotă complexitatea mișcării, el totuși, conține un punct maxim distinct al frecvenței.

Dacă însă perioadele ciclurilor limită sunt diferite, atunci diversitatea mișcării este tot mai mare, iar spectrul nu mai conține maximul anterior. Prin urmare, haosul dinamic poate fi mai ordonat și mai puțin ordonat. Pentru caracteristica gradului de ordine al haosului dinamic se introduce noțiunea de entropie topologică. În cazul când traiectoriile de fază sunt stabile, entropia topologică este nulă. Însă, dacă ea este pozitivă, atunci mișcarea este impredictibilă.

O problemă importantă a haosologiei este cea a senzațiilor de apariție a haosului dinamic și nodul de formare a atractorului straniu. Printre ele vom menționa: scenariul dublării consecutive a perioadei de mișcare, după care apare atractorul straniu și mișcarea haotică; apari-

ția bruscă, rigidă a haosului dinamic și a atractorului straniu; dispariția traiectoriilor periodice stabile prin contopirea lor cu cele instabile – scenariul numit *interminență*.

La rândul său, însuși atractorii haotici pot deveni instabili. Micile variații ale parametrilor sistemelor dinamice pot produce schimbări topologice calitative ale atractorului straniu. Aceste schimbări sunt cauzate de ciocnirea atractorului haotic fie cu orbită instabilă, fie cu o varietate a ei stabilă. Aceste fenomene poartă denumirea de *crize*.

Atractorul haotic poate fi distrus și sub acțiunea unei forțe externe periodice. Prin urmare, haosul dinamic poate fi controlat, adică poate fi îndepărtat sau evitat.

Însă, în unele cazuri este necesară inducerea haosului dinamic într-un sistem. El este important pentru creierul uman, la regulatoarele cardiace, procesarea informației, amestecul lichidelor, securitatea informației, transmiterea informației pe purtătoare haotice ș. a. Prin urmare, declanșarea haosului dinamic în unele sisteme este pur și simplu necesară. Acest fenomen se numește *anticontrolul haosului*.

Un alt fenomen al sistemelor dinamice constă în susceptibilitatea lor de a se sincroniza: dacă două sau mai multe sisteme sunt cuplate, atunci în anumite condiții, tind către o mișcare identică. Bunăoară, dacă o mișcare este haotică, iar alta este periodică, atunci poate avea loc o sincronizare de mișcare periodică cu modificarea perioadei respective, sincronizarea a două mișcări mai haotice în una mai puțin haotică etc.

Vom menționa, în mod special, că haosul dinamic care apare în sistemele sinergetice în condițiile departe de echilibru, nu trebuie confundat cu haosul clasic care se manifestă în stare de echilibru sau aproape de echilibru. Pentru haosul dinamic numărul microscopic al dimensiunilor spațiale și temporale este atât de mare, încât comportamentul sistemului apare drept haotic. În haosul clasic, când sistemele se află în stare de echilibru, toate dimensiunile spațiale și temporale sunt de ordin microscopic. Prin urmare, haosul dinamic este mișcarea extrem de complicată a componentelor sistemului, dar corelate la nivel microscopic, pe când haosul clasic este mișcarea dezordonată a componentelor necorelate. Deci, haosul dinamic este mai ordonat decât haosul clasic și are valoarea entropiei mai mică. Haosul dinamic este un proces de autoorganizare, în comparație cu haosul clasic care este o mișcare dezordonată la nivel microscopic a elementelor necorelate.