OSNOVE TEORIJE DINAMIČNIH SISTEMOV IN RAZMIŠLJANJE O NJENEM POMENU ZA PSIHOLOŠKO METODOLOGIJO

Matej ČERNIGOJ

Univerza v Ljubljani, Oddelek za psihologijo, Ljubljana

Povzetek: *Pričujoči prispevek želi prikazati ključne pojme teorije dinamičnih sistemov, ki se v naravoslovnih znanostih vse bolj uveljavlja kot osnovna paradigma za obravnavo časovno spreminjajočih se sistemov, v katerih so elementi povezani nelinearno. Čeprav s precejšnjim zamikom prodira osnovni pojmovni aparat te teorije tudi v psihologijo in druge družboslovne znanosti. Za pojme, kot so čudni atraktorji, fraktali ali občutljivost na začetne pogoje, smo že vsi slišali, le malokdo pa ve, kako bi si z njimi pomagal. V prispevku želim te pojme razložiti, predvsem pa izpostaviti njihov pomen v odnosu do prevladujoče psihološke metodologije. Zagovarjam tezo, da je prevladujoča psihološka metodologija, ki temelji na klasični statistiki, v osnovi neprilagojena svojemu predmetu preučevanja. Njeni osnovni predpostavki o linearni povezanosti med spremenljivkami in enosmerni vzročnosti pri obravnavi zapletenejših sistemov, ki so v psihologiji prej pravilo kot izjema, preprosto odpovesta. Teorija dinamičnih sistemov bi lahko predstavljala plodno izhodišče za razvoj uspešnejše psihološke metodologije, ki pa bi morala biti zaradi nekaterih omejitev usmerjena kvalitativno in ne kvantitativno.*

KLJUČNE BESEDE: dinamični sistemi, občutljivost na začetne pogoje, kaotični atraktorji, fraktali, psihološka metodologija

Naslov: asist. Matej Černigoj, Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za psihologijo, Aškerčeva 2, 1000 Ljubljana, Slovenija, e-mail: matej.cernigoj@guest.arnes.si

THE BASICS OF THE DYNAMICAL SYSTEMS THEORY AND A CONTEMPLATION ABOUT ITS RELEVANCE FOR PSYCHOLOGICAL METHODOLOGY

Matej ČERNIGOJ
University of Ljubljana, Department of Psychology, Ljubljana, Slovenia

Abstract: *The article aims to present some key concepts of the dynamical systems theory, which is gaining the status of a basic paradigm in dealing with time-dependent nonlinear systems in the natural sciences, and elaborates on their implications for the funadamentals of psychological methodology. Although with a considerable delay, the "chaotic" conceptual apparatus is now penetrating psychology and other social sciences. Everyone has probably heard about strange attractors, fractals, sensitivity to initial conditions or the like, but few really know what to make out of these notions. My goal here is to explain these concepts, but above all I would like to stress their meaning in relation to the prevailing psychological methodology. I defend the thesis that the traditional statistics-based methodology is essentially ill suited to its object of inquiry. Its basic premises about the linear dependence between phenomena and the "one-way" causality fail when confronted with more complex systems, which are rather a rule in psychology than an exception. Dynamical systems theory could provide a fertile ground on which a more succesfull psychological methodology could be developed. Because of important limitations, though, this methodology should be more qualitatively than quantitatively oriented.*

KEYWORDS: dynamical systems, sensitivity to initial conditions, chaotic attractors, fractals, psychological methodology

Teorija dinamičnih sistemov, popularno imenovana tudi teorija kaosa, je v zadnjih dveh ali treh desetletjih doživela nesluten razcvet. Čeprav segajo njeni začetki že v konec 19. in začetek 20. stoletja, se je zares razmahnila šele v zadnjem času, ko je razvoj računalniške tehnologije omogočil sistematično preučevanje njenih učinkov. Vse večja dostopnost razmeroma hitrih in močnih osebnih računalnikov širšim množicam pa je vplivala nanjo še na dodaten način: čudovite slike fraktalov in »čudnih« atraktorjev so postale že kar del našega vsakdana, temeljni koncepti teorije dinamičnih sistemov, kot je na primer pojem občutljivosti na začetne pogoje, pa vse bolj postajajo tudi nepogrešljiv del našega zdravorazumskega pojmovanja sveta. Brez nadaljnjega lahko rečemo, da je imela teorija dinamičnih sistemov poleg velikega znanstvenega tudi zelo velik kulturni vpliv, zaradi česar je za psihologijo še posebej zanimiva. Preden zares zastavimo problem pričujočega prispevka, je treba vsaj v grobem opredeliti osnovne pojme, s katerimi se bomo ukvarjali. Začnimo kar s tistimi, ki sestavljajo njegov naslov:

Teorija: Predvsem je treba povedati, da gre bolj za metateorijo kot preprosto za teorijo znotraj neke znanstvene discipline. Kaos (v nadaljnjem bom izraz kaos uporabljal za označitev posebne vrste na videz naključnega vedenja, ki lahko nastane v nelinearnih dinamičnih sistemih, besedni zvezi teorija kaosa in teorija dinamičnih sistemov pa bom uporabljal sinonimno) so res najprej opazili v matematiki in fiziki, zdaj pa ga proučujejo še v astronomiji, meteorologiji, geologiji, strojništvu, komunikacijah, kemiji, biologiji, ekologiji, medicini in fiziologiji, vse bolj pa prodira tudi v družboslovne znanosti, kot so ekonomija, sociologija, zgodovina, mednarodni odnosi in celo literarna teorija. Psihologija, na presečišču med obema »svetovoma«, seveda ni nobena izjema. Teorija dinamičnih sistemov so preprosto principi in matematične operacije, ki ležijo v osnovi določenih oblik vedenja sistemov (Williams, 1997), ne glede na to, v katerem področju stvarnosti se pojavijo. Na tem mestu je treba povedati še to, da teorija kaosa ne predstavlja koherentne celote, v kateri bi bila vsaka posamezna ugotovitev deduktivno izpeljana iz osnovnih premis, ampak gre bolj za različne poskuse opisov in odkrivanja globljih zakonitosti vedenja determinističnih, nelinearnih, dinamičnih sistemov.

Dinamika: Pojem dinamike vzbudi asociacije na pojme sile, energije, gibanja in spreminjanja. Teorija dinamičnih sistemov se torej ukvarja predvsem z razvojem, spreminjanjem, gibanjem sistemov v času in ne toliko z njihovo strukturo. Oziroma bolje: na podlagi znane strukture nekega sistema skuša napovedati njegovo dolgoročno vedenje in obratno – na podlagi preučevanja gibanja, spreminjanja in razvoja nekega sistema skuša razvozlati njegovo notranjo strukturo.

Sistem: Sistem je definiran kot skupek medsebojno povezanih elementov (Bertalanffy, 1968). Obravnavati ga moramo kot celoto, saj njegovo vedenje ni odvisno le od značilnosti elementov, ki ga sestavljajo, ampak tudi od narave povezav med njimi. Pravimo, da je »celota več kot preprosta vsota posameznih delov« in da imajo sistemi »emergentne« lastnosti, ki se pojavijo šele takrat, ko stopijo elementi v medsebojno interakcijo. Sprememba stanja kateregakoli elementa v sistemu vpliva na stanja vseh ostalih elementov v njem, kar hkrati pomeni, da vsak element vpliva tudi na samega sebe. To vzvratno samovplivanje lahko po Bertalanffyju (prav tam, str. 163) poteka po principu »povratne zanke« (kot npr. v kibernetičnih sistemih) ali po bolj splošnih in primitivnih principih dinamičnega usklajevanja med vsemi elementi hkrati (npr. v nevronskih mrežah).

Nelinearnost: Zelo pomemben pojem, ki v naslovu sicer ni vsebovan, a je v teoriji dinamičnih sistemov pravzaprav kar samo po sebi umeven, je pojem nelinearnosti. Kaos kot specifična oblika vedenja dinamičnih sistemov se pojavlja le takrat, ko so odnosi med njihovimi elementi nelinearni. Gre preprosto za to, da sta dve spremenljivki med seboj v takem odnosu, da njun graf ne predstavlja ravne črte, če ga narišemo v navadnem, aritmetičnem merilu. Sprememba stanja ene spremenljivke torej ni proporcionalna spremembi stanja druge spremenljivke. Čeprav ima linearna funkcija določene ugodne lastnosti, zaradi katerih predstavlja v nekaterih znanostih (psihologija je zelo dober primer) že kar Prokrustovo posteljo za vse preučevane pojave (enostavna rešitev enačbe, enostavna ekstrapolacija in inerpolacija, enostavna kombinacija več enačb), pa bi po nekaterih znanstvenikih (npr. Morrison, 1988, cit. po Williams, 1997) lahko povzeli, da linearnih odnosov v naravi praktično ni in da je uporaba samega pojma »nelinearna znanost« tako absurdna, kot če bi večino zoologije krstili za »preučevanje neslonjih živali« (prav tam).

Med pojmi, ki se poleg zgoraj obdelanih pogosto pojavljajo v zvezi s teorijo kaosa, so še: determiniranost, naključnost, konzervativnost, disipativnost, samoorganizacija, entropija in drugi. Pomen nekaterih med njimi bo postal jasen spotoma ob razvijanju glavnih idej prispevka, nekaterim se žal ne bom mogel posebej posvetiti. A poskusimo sedaj natančneje določiti problem, ki se ga bomo lotili.

Že na začetku sem omenil dva vidika teorije dinamičnih sistemov, zaradi katerih bi lahko bila zanimiva za psihologijo. Prvi se seveda nanaša na aplikacijo spoznanj te teorije v raziskovanju zakonitosti človekove duševnosti in vedenja. Drugi vidik bi bil zanimiv predvsem za socialno psihologijo, saj bi se spraševal o kulturnem vplivu teorije dinamičnih sistemov. Sistem socialnih reprezentacij, izvirajočih iz nje, je gotovo zelo pomemben za razumevanje »novodobnega« pojmovanja religije, svobode, ekologije itn. Obstaja pa še tretji vidik, ki se mi osebno zdi najpomembnejši, ker zadeva psihologijo na najgloblji možni točki: nanaša se na sama spoznavnoteoretska vprašanja psihološke znanosti.

Menim, da postavljajo temeljna spoznanja teorije dinamičnih sistemov v povsem novo, kritično luč osnovne predpostavke prevladujoče psihološke metodologije, temelječe na klasični statistiki, in da nam kažejo po drugi strani zanimive možnosti za njen razvoj. Da pa bi lahko dojeli pravo vrednost in pomen teh spoznanj za vprašanje znanstvenosti psihologije, si moramo najprej podrobneje predočiti osnovne principe prevladujoče psihološke metodologije in posledice, do katerih nas je pripeljala njena ne vselej kritična uporaba.

KRITIČEN POGLED NA PREVLADUJOČO PSIHOLOŠKO METODOLOGIJO

Nekoliko podrobnejši pogled na psihologijo kot znanost zelo hitro razkrije njeno obupno fragmentiranost. Pod površjem splošno razširjenih pojmov (kot so npr. obrambni mehanizmi, projekcija, potlačevanje, kompleksi, nevrotičnost, ekstravertnost in introvertnost, pogojni refleks in drugi), ki so prodrli v pojmovni aparat bolj ali manj vsakega izobraženejšega človeka in dajejo vtis, da obstaja neko védenje psihologije kot take, se skriva neznanska množica parcialnih »mini« teorij, ki se ukvarjajo s svojim omejenim področjem preučevanja in razvijajo svoje pojmovne sheme in svojo terminologijo brez pravih povezav s tem, kar je že ugotovljeno. Samo na področju socialne psihologije je mogoče (po precej skromni oceni, prim. Černigoj, 1999) našteti kakih 50 različnih teorij. Če naredimo (spet precej skromno) ekstrapolacijo, bi v celotni psihologiji skoraj gotovo lahko našteli kakih 200 ali 300 posameznih teorij! To lahko pomeni samo eno: psihološka znanost kot celota še ni dosegla pravega paradigmatskega obdobja (prim. Kuhn, 1998) in zaradi tega njena spoznanja niso kumulativna. Že pogled na katerikoli psihološki učbenik (z izjemo učbenikov za psihološko metodologijo, kjer pa seveda ne gre v prvi vrsti za psihološke vsebine) nam razkrije, da so ugotovitve in spoznanja v njem pravzaprav nanizana in si ne sledijo v nekem logičnem zaporedju od osnovnih abstraktnih premis do specifičnih ugotovitev, kot je to značilno za učbenike s področja naravoslovja (Vallacher in Nowak, 1994). Človek dobi vtis, da psihologija pojave bolj opisuje kot razlaga in da so tudi njeni opisi večinoma le nekoliko bolj natančne in statistično podkrepljene ugotovitve, do katerih je tako ali tako že zdavnaj prišla ljudska modrost.

Na tej točki se moramo seveda nujno vprašati, kje tiči zajec. Zakaj psihologi nismo sposobni ustvariti enovite znanosti, ki bi omogočala nadgrajevanje pridobljenih spoznanj in njihovega natančnega preverjanja v smislu ovržbe? Večina psiholoških spoznanj ima namreč tisto (ne)hvaležno statistično naravo, zaradi katere veljajo »samo v povprečju« in jih torej izjeme, dokler so dovolj redke, ne morejo ovreči. Predstavljajte si, da bi kamen, ki bi ga vrgli v zrak, preprosto oblebdel in ne bi padel nazaj na tla. En sam tak primer bi zrušil ali vsaj radikalno preobrazil skoraj celotno fiziko. Če pa človek večinoma ravna v skladu z določeno teorijo vedenja, včasih pa tudi ne, nima to zanjo navadno nobene resne posledice (kjer lahko 'večinoma' včasih pomeni tudi le 'v nekaj več kot petdesetih odstotkih primerov').

Odgovor na to vprašanje je seveda večplasten. A tisti njegov del, ki se najbolj neposredno nanaša na teorijo dinamičnih sistemov, bi lahko poimenovali neprilagojenost psihološke metodologije svojemu predmetu preučevanja. Menim, da nam lahko osnovna spoznanja teorije dinamičnih sistemov razjasnijo tako vzroke za to neprilagojenost kot tudi pokažejo pot, na katero bi bilo treba stopiti, če bi hoteli bolje opisovati in razlagati psihološke ter socialnopsihološke pojave. Poglejmo si zdaj dve osnovni predpostavki in iz njiju skoraj naravno sledečo usmerjenost prevladujoče psihološke metodologije, ki se jih moramo nujno zavedati in o vsem skupaj kritično razmisliti.

Linearna povezanost med spremenljivkami: Večina psihološke metodologije temelji na predpostavki o linearni povezanosti med spremenljivkami. Tako večfaktorski eksperimentalni načrti, še posebno pa multivariantne metode brez nje skoraj ne bi bili možni. Čeprav se v zadnjem času večje število avtorjev (npr. Jöreskog, Sörbom, Saris, Bentler, Brown in drugi) ukvarja s simulacijami najrazličnejših vrst nelinearnih strukturnih relacij (Bucik, osebna komunikacija), pa verjetno ne bi bilo pretirano zatrditi, da daleč najpogosteje uporabljane multivariantne metode, s faktorsko analizo na čelu, po pravilu temeljijo na linearnih merah korelacije, njihovi rezultati pa so linearni osnovni faktorji, katerih medsebojna (linearna) kombinacija naj bi bila odgovorna za vso pestrost pojavnih oblik vedenja.

Enosmerna vzročnost: Ta predpostavka je mogoče še pomembnejša in bolj prisotna. V eksperimentalnem raziskovanju vedno operiramo z neodvisnimi in odvisnimi spremenljivkami, v multivariantnem pa smo dobljenim faktorjem največkrat nekritično pripravljeni pripisati substancialnost, jih »reificiramo« (za izvrstno kritično izpostavitev problema reifikacije na področju preučevanja inteligentnosti glej Gould, 1997), kar hkrati pomeni tudi to, da jih pojmujemo kot vzročne dejavnike, odgovorne za variabilnost manifestnih spremenljivk. *Usmerjenost na strukturo in zanemarjanje dinamike:* Posledica obojega skupaj je dejstvo, da se »znanstvene« (beri statistično podkrepljene) psihološke ugotovitve v glavnem ukvarjajo s strukturo psiholoških in socialnopsiholoških pojavov (npr. s strukturo intelekta, osebnosti ali socialne interakcije), zanemarjajo pa njihovo dinamiko. In seveda obratno: področja psihologije, ki se osredotočajo na dinamiko (npr. psihoanaliza), so bila že večkrat označena za »neznanstvena« (prim. Černigoj, 1997).

Zakaj obe temeljni predpostavki skoraj naravno vodita v preučevanje strukture in zanemarjanje dinamike? Predpostavka o linearni povezanosti spremenljivk zaradi svoje enostavnosti: podpira namreč človekovo naravno tendenco poenostavljanja kompleksnega pojavnega sveta na osnovnejše principe in elemente. Le kaj bi namreč lahko bilo za znanstvenika bolj zadovoljivo od možnosti, da svoj svet razstavi na obvladljivo število vzročnih dejavnikov, ki jih lahko potem poljubno kombinira po načelu kuharskega recepta: če hočeš uspešnega učenca, dodaj 0,2 enoti afekcije, 0,5 enot inteligentnosti, 0,3 enote moči jaza, 0,4 enote moči nadjaza ... Če pa hočeš uspešnega prodajalca peciva, dodaj le 0,2 enoti inteligentnosti, pač pa kar 0,4 enote urejenosti ter odvzemi 0,4 enote nezaupljivosti ... (»recept« izvira iz Cattellove strukturne teorije osebnosti, povzeto po Musek, 1993, str. 238-239). Predpostavka o enosmerni vzročnosti pa nas usmerja v preučevanje strukture zaradi svojih metodoloških omejitev. Če hočemo ohraniti našo vero v to, da obstajajo neodvisne in odvisne spremenljivke, moramo pri eksperimentalnem raziskovanju pojav opazovati dovolj kratek čas, da se nam slučajno ne bi zgodilo, da bi »odvisna« spremenljivka začela vplivati nazaj na »neodvisno«. Pri preučevanju povezanosti med podobnostjo v stališčih in medosebno privlačnostjo (kjer naj bi prvo kar po linearnem odnosu vplivalo na drugo – Buunk, 1996) so morali seveda soočati popolne neznance, saj bi upoštevanje zgodovine nekega medosebnega odnosa stvari preveč zakompliciralo (prim. Gergen, 1978). Pri multivariantnem raziskovanju pa tako ali tako uporabljamo vprašalnike, ki sprašujejo o našem »običajnem«, pogostem vedenju, in zato ne morejo zajeti njegove variabilnosti v različnih trenutkih in situacijah.

Vidimo, da sta obe osnovni predpostavki in iz njiju izvirajoča prevladujoča usmerjenost psihološkega raziskovanja v popolnem nasprotju z osnovnimi značilnostmi pojavov, s katerimi se ukvarja teorija dinamičnih sistemov. Poglejmo si zdaj eno najosnovnejših in najpopularnejših enačb, na kateri so intenzivno preučevali zakonitosti kaotičnega vedenja, in videli bomo, zakaj klasično eksperimentalno in multivariantno raziskovanje samo po sebi nikoli ne bo moglo prodreti v skrivnosti vedenja zapletenejših sistemov, ki so v psihologiji (in še posebej v socialni psihologiji) prej pravilo kot izjema.

LOGISTIČNA ENAČBA

Ta enačba, ki se uporablja že od srede prejšnjega stoletja za modeliranje dolgoročnega spreminjanja populacij posameznih živalskih vrst, je postala kar nekakšen poskusni zajček za preučevanje kaotičnega vedenja. V sedemdesetih letih je biolog May (v Gleick, 1997) opazil, da lahko logistična enačba pod določenimi pogoji generira vedenje, ki je popolnoma nepredvidljivo. Enačba sama je zelo preprosta:

$$x_{t+1} = kx_t(1-x_t)$$

Vidimo, da vključuje eno samo spremenljivko in da predstavlja sistem povratne zanke, v katerem je naslednja vrednost spremenljivke v nelinearnem odnosu z njeno predhodno vrednostjo. Enačba torej zadošča vsem prej naštetim kriterijem, ki so značilni za vsak kaotičen sistem: dinamika, obstoj povratne zanke in nelinearnost. Zanimivo vedenje se pojavi, ko se vrednosti spremenljivke x gibljejo v odprtem intervalu Ć0,1Š. Vrednosti kontrolnega parametra k, ki zadoščajo temu pogoju, se gibljejo v intervalu Ć0,4Š (Williams, 1997).

Biološka interpretacija modeliranja obnašanja populacije neke živalske vrste (brez posebnih naravnih sovražnikov) s to enačbo je naslednja: vrednosti spremenljivke x predstavljajo razmerje med aktualnim in maksimalno možnim številom osebkov te vrste na določenem območju (ta količnik bomo tu poimenovali populacijsko razmerje). Kontrolni parameter k predstavlja stopnjo reprodukcije, čas (*t*) pa je merjen diskretno, v letnih intervalih.

Predstavljajmo si, da smo na začetku (leta 0) dali v nek življenjski prostor le nekaj osebkov te vrste (x0 je recimo 0,1) in da je stopnja reprodukcije zmerna (k se giblje v območju med 1 in 3). Dokler bo razmerje med aktualnim in maksimalnim možnim številom osebkov majhno, bo populacija naraščala. Leta 1 bo pri k=2 znašala že 0,18, leta 2 - 0,30, leta 3 - 0,42 in tako naprej. Toda bolj kot bo populacija naraščala, več hrane bo zahtevala, življenjski prostor pa je lahko priskrbi le omejeno količino. Naraščanje se bo upočasnilo in se sčasoma ustavilo pri vrednosti $x_n = 1 - k\text{-}1$. Če nadaljujemo s prejšnjim primerom: leta 4 bo populacija obsegala 0,4859 maksimalne možne, leta 5 - 0,4996, leta 6 bo znašala že 0,5000 in vsa naslednja leta enako (pravzaprav se bo asimptotično približevala vrednosti 0,5).

Igranje z različnimi vrednostmi kontrolnega parametra logistične enačbe (z navadnim žepnim računalnikom se ga lahko loti vsakdo) nam lahko razkrije zanimive stvari. Vidimo lahko na primer, da bi pri vrednostih parametra k, ki so nižje od ena, populacija izumrla. Stopnja reprodukcije je preprosto premajhna, da bi se vrsta lahko ohranila. Pri vrednostih 1 < k < 3, se populacijsko razmerje asimptotično približuje vrednosti 1 – k-1, vendar je treba tu razlikovati dva možna načina takega približevanja. Pri $1 < k < 2$ se populacijsko razmerje približuje asimptotični vrednosti samo iz ene strani. Vsako leto nekoliko naraste, na začetku bolj, kasneje pa vedno manj in manj in asimptotične vrednosti nikoli ne preseže. Pri $2 < k < 3$ pa najprej narašča in asimptotično vrednost celo preseže, nato pa oscilira okoli nje z vedno manjšo amplitudo. Ko parameter k doseže vrednost 3, se zgodi nekaj zanimivega: oscilacije ne konvergirajo več k eni vrednosti, ampak k dvema. Populacijsko razmerje torej niha med dvema vrednostima. Pravimo, da je prišlo do bifurkacije.

Biološka razlaga tega fenomena bi lahko bila naslednja: v letu velikega števila osebkov se zaloge hrane na tem območju tako izčrpajo, da se do naslednjega leta ne morejo popolnoma regenerirati, zato lahko naslednje leto preživi manjše število osebkov. Ker ti seveda manj pojejo, se zaloge hrane spet razbohotijo in cikel se nadaljuje.Tako vedenje se pojavlja, dokler k ne preseže vrednosti 3,45 (Williams, 1997). Zdaj populacijsko razmerje ne alternira več med dvema vrednostima, ampak med štirimi. Prišlo je do podvojitve periode. Take podvojitve (cikli 8, 16, 32, 64, 128 ... vrednosti) se potem vrstijo v vse hitrejšem tempu, razlika med sosednjima podvojitvama je vsakič približno 4,67-krat manjša, dokler se pri vrednosti $k = 3{,}57$ ne »zgodi kaos«. Vrednosti populacijskega razmerja nič več ne konvergirajo k določenim vrednostim, ampak se gibljejo navidez naključno in popolnoma nepredvidljivo po območju, ki pri vrednosti $k = 4$ narase že na cel interval Ć0,1Š. Še ena značilnost je vredna omembe. Znotraj območja kaosa se pojavljajo t.i. okna, v katerih je vedenje spet urejeno in alternira v ciklih z določeno periodo. Te periode pa niso več potence števila 2, ampak potence števila 2, pomnožene s kakšnim drugim praštevilom (npr. 3 ali 7).

V intervalu $3{,}45 < k < 3{,}57$ je bilo še mogoče napovedati, kakšna bo vrednost populacijskega razmerja, npr. v letu 1000. Ni bilo sicer več bližnjice, po kateri bi lahko izračunali vrednosti konvergence, kot smo to lahko naredili pri vrednostih k, manjših od 3, a po dovolj dolgem iteriranju enačbe smo lahko videli, med katerimi vrednostmi enačba alternira, in vedeli smo, da bo to veljalo za vse naslednje vrednosti. V območju kaosa pa ni več možna kakršnakoli napoved. Edini način, da zvemo, kakšna bo vrednost x_{1000} ali x_{10000}, je, da enačbo tolikokrat iteriramo. Mogoče se zdi, da to pravzaprav ni nič hudega, saj lahko z modernimi osebnimi računalniki naredimo zelo veliko število iteracij podobnih enačb v le nekaj sekundah. Toda ta optimizem je preuranjen!

Če namreč v logistično enačbo v kaotičnem režimu (recimo k = 3,9) vstavimo dve vrednosti, ki se razlikujeta šele na 5 decimalnem mestu, se trajektoriji obeh krivulj že po dvajseti iteraciji tako razlikujeta, da nikakor ne bi več mogli sklepati na njun tako bližnji izvor. Večina meritev v realnem svetu pa je ponavadi manj natančna. Da bi se še globlje zavedli občutljivosti na začetne pogoje, naj navedem še en primer (Cruchfield, Farmer, Packard in Shaw, 1986). V idealiziranem bilijardu, kjer bi krogle v medsebojem trkanju in kotaljenju po podlagi praktično ne izgubljale energije, bi bila naša napoved gibanja določene krogle (recimo osmice) neuporabna že po eni minuti, če bi pri natančnosti našega udarca zanemarili še tako majhno napako, kot jo predstavlja gravitacijska sila enega samega elektrona na robu galaksije!

Kaj vse se lahko naučimo iz logistične enačbe?

- Kompleksno, nesistematično gibanje ali vedenje nima nujno kompleksnih vzrokov. Iteracija čisto preproste nelinearne enačbe, v kateri natančno poznamo vsa pravila in vse začetne vrednosti, lahko pod določenimi pogoji generira popolnoma nepredvidljivo, kaotično vedenje.

- Čeprav izgleda tako vedenje popolnoma naključno, ni nastalo na podlagi stohastičnega, ampak popolnoma determinističnega procesa! (Zato kaosu nekateri pravijo tudi deterministični kaos.)

- Kaotično vedenje se je pojavilo že pri eni sami spremenljivki, ki je bila popolnoma izolirana. Naključno vedenje ni bilo posledica kakšne zunanje motnje.

Kaj pa vse to pomeni za znanstveno raziskovanje, še posebno za statistično znanstveno raziskovanje? Če bi se vedenja logistične enačbe lotili s klasično statistiko, bi prav lahko prišli do zaključka, da raziskujemo več različnih sistemov in ne enega samega pod različnimi pogoji. V nekem intervalu bi bila korelacija med vrednostjo parametra k in spremenljivko x pozitivna, v nekem drugem bi bila lahko 0, v nekem tretjem spet negativna (to se zgodi, če opazujemo povprečno vrednost x pri zelo visokih vrednostih k). Za primer, ki bi se podobno vedel, bi lahko vzeli nek socialni sistem v različnih političnih ali ekonomskih okoliščinah (kontrolni parameter). Sistem, ki je v neki demokratični družbi z visokim standardom kar precej predvidljiv, lahko postane v časih gospodarske krize ali političnih napetosti kaotičen. Površno opazovanje bi (in tudi večkrat je) privedlo do zaključka, da se v nenormalnih okoliščinah v ljudeh nekaj spremeni, da postanejo npr. manj racionalni itd. Toda to ni nujno res. Ljudje kot osnovne enote socialnega sistema se mogoče v svojem bistvu čisto nič ne spremenijo, pa je lahko vedenje sistema v novih okoliščinah kljub temu popolnoma neprepoznavno (in nepredvidljivo).

Druga povezava s psihološko metodologijo, ki bi jo rad nakazal, se nanaša na klasično testno teorijo. Ta je v psihometriji sicer v veliki meri že presežena (Bucik, osebna komunikacija), vendar jo bom zaradi njene enostavnosti vseeno uporabil kot primer na dinamiko neobčutljivega pojmovanja, ki bi ga verjetno lahko očital tudi novejšim testnim teorijam. V klasični testni teoriji torej velja, da obstaja nekakšen »pravi odgovor« poskusne osebe na testno postavko in da je dejanski odgovor funkcija pravega odgovora in napake: $X_d = X_p + e$. Ker je napaka popolnoma naključna, se pri večjem številu meritev izniči, tako da imamo lahko povprečje dejanskih odgovorov za nepristransko oceno pravega odgovora. Take predpostavke si seveda lahko privoščimo le pri preučevanju strukture – nekega idealiziranega časovno zamrznjenega stanja. Če bi bil ta odgovor vpet v nek sistem s povratno zanko, bi lahko različne vrednosti tiste »napake« pod določenimi pogoji privedle do popolnoma različnih izidov. O nekakšnem »pravem« odgovoru ne bi mogli več govoriti.

Predstavljajmo si dva študenta s skoraj popolnoma enakim znanjem (enake sposobnosti, enaka preštudirana literatura) na izpitu pri nekoliko neuravnovešenem profesorju. Neuravnovešenem zato, da vpeljemo v sistem določeno nelinearnost: profesorjeva reakcija na študentov odgovor na zastavljeno vprašanje ni premosorazmerna s kvaliteto tega odgovora. Oba študenta dobita isto vprašanje, nanj pravilno odgovorita, vendar z nekoliko drugačnimi besedami. Nekatere mogoče profesorju laskajo, druge ga užalijo. Izid izpita je lahko za oba študenta popolnoma različen. Staro indijsko zgodbico o kralju, ki je dal enega modreca ubiti, ker mu je napovedal, da bo na stara leta zelo nesrečen, ker bo videl smrt vseh svojih dragih, drugega pa bogato nagradil, ker mu je za stara leta napovedal srečo, saj bo živel dlje od vseh svojih bližnjih, bi tudi lahko uvrstili med dobre primere občutljivosti na začetne pogoje.

Vidimo torej, da je uporabnost klasične psihološke metodologije pri raziskovanju dinamičnih psiholoških ali socialnih sistemov precej omejena. Ugotavljanje povprečnih stanj takih sistemov je sicer lahko do neke mere informativno, ne more pa nas pripeljati do razumevanja njihove osnovne strukture in narave povezav med njihovimi elementi. Dinamični sistemi lahko pod različnimi pogoji generirajo tako različna vedenja, da statistična analiza sama po sebi ne more dognati njihovega skupnega jedra. Toda kaj nam potem ostane? V nadaljevanju si bomo pogledali eno od najpogosteje uporabljanih poti, po kateri poskušajo raziskovalci dinamičnih sistemov prodreti naprej od mesta, na katerem se je morala ustaviti statistična analiza.

ISKANJE ČUDNIH ATRAKTORJEV

Kot smo videli že pri logistični enačbi, ima kaos tudi svojo svetlejšo stran. Znotraj na videz popolnoma neurejene strukture se včasih čisto spontano pojavijo območja reda, ki nam lahko marsikaj povedo o naravi sistema, ki jih je ustvaril. Če nič drugega vsaj to, da podatki, ki jih preučujemo, niso nastali na podlagi nekega stohastičnega procesa, ampak so v osnovi determinirani. Tudi kaotični ali »čudni« atraktorji pomenijo isto. Preden pa si lahko v grobem pogledamo, kako tak atraktor opazimo in kako si lahko z njim pomagamo, si moramo razjasniti nekaj osnovnih pojmov.

Fazni in psevdofazni prostor ter vsebnostna dimenzija

Če opravimo več zaporednih meritev ene ali več spremenljivk dinamičnega sistema, imamo opraviti s časovnimi serijami podatkov. V grobem obstajata dva načina za njihov prikaz (Williams, 1997). Prva možnost je, da vnesemo na absciso grafa čas, na ordinato pa vrednost merjene spremenljivke. Druga možnost pa je, da vse osi grafa posvetimo spremenljivkam, ki so nujne za opis dinamičnega sistema, na njegovo časovno evolucijo pa lahko zdaj le sklepamo iz vrstnega reda točk na grafu.

Predstavljajmo si, da hočemo na grafu upodobiti gibanje nihala. Ena možnost je, da na absciso narišemo čas, na ordinato pa bodisi položaj nihala glede na ravnovesno lego (lahko je pozitiven ali pa negativen) bodisi hitrost nihala (tudi ta je lahko pozitivna ali negativna). V obeh primerih dobimo sinusoidno krivuljo. Če bi obe krivulji upodobili na istem grafu, bi videli, da sta med seboj zamaknjeni za 90 stopinj. Ko je položaj nihala 0, je njegova hitrost največja. Ko nihalo doseže najoddaljenejšo točko, je njegova hitrost 0. Obe spremenljivki lahko natančno opišeta vsako stanje nihala, zato ju lahko uporabimo še na drugačen način. Narišemo lahko graf, v katerem ena os opisuje položaj nihala, druga pa njegovo hitrost. Zdaj ne dobimo več sinusoidne krivulje, ampak krog. Gibanje nihala smo upodobili v faznem prostoru, ki ga določata položaj nihala in njegova hitrost. Časovno evolucijo gibanja nihala lahko sedaj razberemo iz vrstnega reda točk na grafu.

Upodabljanje gibanja dinamičnega sistema v faznem prostoru nam nudi precej drugačen pogled na njegov razvoj, ki ima nekatere pomembne prednosti (Williams, 1997). Prvič, časovne serije so lahko zelo dolge in jih je zato težko prikazati na enem samem grafu. Prikaz v faznem prostoru pa "skrči" vse podatke na obvladljivo površino. Drugič, nemalokrat se zgodi, da nam podatki, narisani v faznem prostoru, razkrijejo strukturo, ki je v časovni seriji drugače nikoli ne bi opazili. Zaradi obojega so prikazi podatkov v faznem prostoru na področju raziskovanja kaosa zelo pogosti.

Kaj pa, če smo zaporedoma merili le eno spremenljivko sistema? Smo sedaj omejeni na prikaz rezultatov v obliki časovne serije? Ena pomembnejših ugotovitev na področju raziskovanja kaosa je, da lahko tudi zaporedne podatke ene same spremenljivke s pridom upodobimo v obliki, ki je zelo podobna faznemu prostoru (Gleick, 1997). Naredimo preprosto to, da na absciso nanašamo i – to vrednost merjene spremenljivke, na ordinato pa njeno i+z – to vrednost, kjer z označuje določen (časovni) zamik. Pravimo, da smo časovno serijo narisali v psevdofaznem prostoru. Če si za primer spet vzamemo nihalo: namesto da bi na absciso nanašali položaj nihala in na ordinato njegovo hitrost v vsakem posameznem trenutku, lahko na absciso nanašamo položaj nihala ob času t_i, na ordinato pa njegov položaj ob času t_{i+z}. Ob primerni izbiri zamika (v tem primeru 1/4 nihajnega časa) bomo dobili popolnoma enako sliko kroga, kot smo jo dobili v pravem faznem prostoru.

V zvezi s psevdofaznim prostorom je treba omeniti še pojem vsebnostne dimenzije (embedding dimension). V našem zgornjem primeru smo imeli opraviti z dvodimenzionalnim psevdofaznim prostorom. Tak prostor ima seveda lahko tudi več dimenzij. Namesto da bi koordinate točk predstavljali pari vrednosti merjene spremenljivke, jih predstavljajo trojice, štirice ali desetice. Če nam v dvodimenzionalnem psevdofaznem prostoru koordinate točk predstavljajo vrednosti merjene spremenljivke pri časih t_i in t_{i+z}, potem v trodimenzionalnem psevdofaznem prostoru koordinate točk določamo na podlagi vrednosti pri t_i, t_{i+z} in t_{i+2z}.

Atraktor in čudni atraktor

Pojem atraktorja je verjetno eden najosnovnejših konceptov v teoriji kaosa. Pomeni množico stabilnih stanj dinamičnega sistema (Williams, 1997). Narisan v faznem ali psevdofaznem prostoru, predstavlja množico vseh stanj sistema, h katerim ta s časom konvergira. Ne glede na to, kje v faznem prostoru se je sistem nahajal v začetku, se bo sčasoma vedno bolj približeval svojemu atraktorju, ki pa ga (v idealiziranem matematičnem modelu) nikoli ne bo čisto dosegel.

Najpreprostejši tip atraktorja je točkovni atraktor. Vzemimo spet primer z nihalom. Njegova trajektorija v faznem prostoru bi v idealnih razmerah (nobene izgube energije zaradi trenja) opisovala krog. Ker pa je nihanje v realnosti vedno dušeno, opisuje njegova trajektorija spiralo, ki sčasoma konvergira k centru koordinatnega sistema, s katerim je naš fazni prostor opisan (odmik od ravnovesne lege nič, hitrost nič). Ne glede na to, v katero smer in s kakšno silo smo nihalo na začetku zanihali, bo sčasoma prišlo v stabilno stanje mirovanja v ravnovesni legi. Če bi nihalu sproti dodajali energijo, ki jo izgublja s trenjem (kot npr. pri stenski uri z utežmi), bi njegov atraktor v faznem prostoru ne bila več točka mirovanja, ampak krog. Tudi če bi nihalo zmotili (ga dodatno sunili ali poskušali zaustaviti), bi se sčasoma spet približalo svoji osnovni amplitudi. Takemu atraktorju pravimo ciklični atraktor. Nekoliko drugačen tip cikličnega atraktorja bi lahko predstavljalo nihanje populacij dveh živalskih vrst, kjer se ena prehranjuje z drugo (prim. Williams, 1997, str. 181). Ko je plena dosti, se tudi plenilci razmnožijo in zato pojejo na časovno enoto več plena, kot se ga lahko v tem času namnoži. Plena začne počasi primanjkovati, zato umirajo tudi plenilci. Ko se število slednjih dovolj razredči, se začne plen spet množiti in cikel se nadaljuje.

Obstaja pa še en tip atraktorjev, ki je značilen za dinamične sisteme v kaotičnem režimu,pravimo mu kaotični ali »čudni« atraktor. Tako kot navadni atraktor je tudi kaotični atraktor množica točk v faznem ali psevdofaznem prostoru, h katerim sistem v faznem prostoru konvergira. Zaseda le nekatera območja v tem prostoru in ima določeno obliko. Kaže območja, h katerim se neprestano in periodično vrača, možno ga je reproducirati in ima invariantno verjetnostno distribucijo (nekatera njegova območja so »obiskana« pogosteje kot druga); (Williams, 1997, str. 222). Toda od običajnih atraktorjev se tudi razlikuje (prav tam, str. 226):

- trajektorija, ki jo sistem opisuje, ima po navadi zelo dolgo periodo, pod določenimi pogoji pa se nikoli ne ponovi;
- dve trajektoriji (oziroma bolje, dva dela trajektorije), ki sta na določenem mestu zelo blizu skupaj, sta lahko čez relativno kratek čas že zelo daleč narazen in obratno (občutljivost na začetne pogoje);
- notranja struktura kaotičnih atraktorjev je kompleksna in ima mnogo plasti, njihova dimenzija pa je zelo pogosto fraktalna.

Fraktali in njihova dimenzija

Fraktali niso neposredno povezani s časovno evolucijo dinamičnih sistemov. Omenjam jih le zato, ker imajo kaotičini atraktorji pogosto fraktalno strukturo in jim lahko zato tudi izračunamo fraktalno dimenzijo, ki nam o naravi atraktorja kar precej pove. Če odkrijemo, da ima nek atraktor fraktalno strukturo, smo lahko prepričani, da gre za kaotičen atraktor (obratno pa ne velja vedno).

Fraktali so geometrične strukture, ki ponavljajo en in isti vzorec na različnih velikostnih stopnjah. Naravni primeri fraktalov so vse okoli nas. Vse razvejane strukture (npr. praprotni list; drevo s svojimi vejami; krvni obtok, ki se cepi na vse manjše in manjše žilice; pljuča ...), vse grobe in razbrazdane površine (gorovja, razpoke v izsušeni zemlji ...), vsi objekti, ki rasejo naključno (snežinke, ledene rože ...), vzorci tekočinskih tokov (vrtinci ...) so fraktali. Zanje je značilno, da jih ne moremo opisati kot eno-, dvo- ali trodimenzionalne objekte, ampak se jim bolj prilegajo dimenzije, ki so nekje vmes. Zakaj in kaj to sploh pomeni?

Če hočemo izmeriti nek enodimenzionalni objekt, npr. dolžino ravne ceste, je popolnoma vseeno, s kako velikim ravnilom se dela lotimo. Če zaporedoma polagamo na cesto metersko palico, jo bomo na dolžini enega kilometra položili tisočkrat. Dvometersko palico bi položili petstokrat, decimetersko palčko pa desettisočkrat. Izmerjena dolžina bo vedno enaka: dolžina palice krat število zaporednih položitev. Povedano drugače: število zaporednih položitev bo naraščalo obratno sorazmerno z manjšanjem dolžine palice (enote). Dimenzijo naše ceste bi lahko izračunali takole: dim = –log(faktor prirastka števila ponovitev)/log(faktor prirastka dolžine enote). Recimo, da smo cesto merili najprej z desetmeterskimi trakovi in nato z meterskimi trakovi. Število zaporednih položitev traka na cesto je bilo v prvem primeru sto, v drugem pa tisoč. Faktor prirastka števila položitev je 10, faktor prirastka dolžine enote pa 1/10. Izračunana dimenzija je seveda 1.

Poskusimo sedaj na enak način izračunati dimenzijo nogometnega igrišča. Razlika bo le v tem, da bomo sedaj gledali faktor prirastka števila ploščinskih enot. Če bo stranica ploščinske enote dolga 10 m, bo število takih enot, ki bodo zapolnile celo igrišče, verjetno nekje okoli 50. Če pa stranico pomanjšamo na 1 meter, bo število enot, s katerimi bi pokrili celo igrišče, naraslo na 5000. Dimenzija igrišča je torej –log(100)/log(1/10) = 2.

Kaj pa, če bi hoteli izmeriti kos obale? Recimo, da bi jo najprej merili z desetmetersko vrvico, nato s šiviljskim metrom, nazadnje pa s polovico šolskega ravnila (10 cm). V prvem primeru bi vrvico večkrat položili kar preko manjših zalivčkov in številnih skal, ki štrlijo v morje. Recimo, da bi morali vrvico položiti stokrat, da bi prišli do konca. V drugem primeru bi morali iti okoli vseh skal, ki smo jih prej kar »presekali«, in slediti bi morali vsem zavojem obale. Desetkrat manjše merske enote ne bi položili samo tisočkrat (torej desetkrat več), kot bi to naredili pri ravni cesti, ampak recimo 1500-krat. Če bi merili z 10 cm dolgim ravnilom, bi morali slediti obliki vsakega kamna, ki leži na pol na suhem in na pol v vodi, vsem vdolbinam v skalah itd. Recimo, da bi morali zdaj ravnilce položiti približno 22.500-krat, da bi izmerili cel kos obale. Faktor prirastka števila položitev merila je bil v obeh primerih 15, faktor prirastka dolžinske enote pa 1/10. Dimenzija našega dela obale torej znaša približno 1,20.

Metaforično bi lahko dimenzijo fraktala imeli za označitev njegove »sposobnosti«, da zapolni nek prostor. Ravna enodimenzionalna črta lahko zapolni le enodimenzionalni prostor, list papirja pa dvodimenzionalnega. Zelo zgubana črta na nek način zapolni več površine kot njena popolnoma ravna dvojnica, zato ima dimenzijo, ki se nahaja nekje vmes med 1 in 2. Pri vsem skupaj si je zaradi nadaljnje obravnave pomembno zapomniti to, da dimenzijo fraktalnih struktur vedno računamo tako, da opazujemo, kako se neka njihova lastnost (npr. dolžina, ploščina, število točk v faznem prostoru...) spreminja, če jih opazujemo pod različnimi povečavami.

Rekonstrukcija kaotičnega atraktorja in iskanje njegove vsebnostne dimenzije

Prišli smo do točke, ko lahko razumemo, kako bi izgledala raziskava, ki bi bila usmerjena na časovno evolucijo dinamičnega sistema. Začnimo pri koncu: kaj nas pravzaprav zanima? Kaj bi lahko bil cilj naše raziskave? Radi bi seveda odkrili, katere spremenljivke določajo preučevani sistem in kakšne so povezave med njimi. V idealnem primeru bi hoteli spremenljivke in njihove medsebojne povezave določiti tako natančno, da bi lahko preučevani sistem natančno opisali s sistemom diferencialnih enačb.

Preden gremo naprej, pa si moramo razjasniti še nekaj. Kriterij vrednosti rezultata, ki bi ga dobili, ne bi bila več njegova sposobnost napovedovanja, kot je to privzeto v klasičnih »linearnih in enosmerno vzročnih« pojmovanjih znanosti. Tudi če bi natančno poznali vse elemente sistema in povezave med njimi, še vedno velja, da so vse naše meritve nujno le bolj ali manj natančni približki resničnih stanj sistema. Že zgoraj pa smo videli, kaj se s takimi majhnimi napakami lahko zgodi, če je sistem v kaotičnem režimu. Vrednost našega rezultata bi bila v določanju možnih in nemožnih ter bolj ali manj verjetnih stanj sistema, v analizi stabilnih stanj sistema in razumevanju dejavnikov, ki odločajo o njegovi stabilnosti ali nestabilnosti. Ta spoznanja o sistemu bi nam lahko pomagala pri načrtovanju naših poskusov vplivanja na sistem, nikoli pa nam ne bi omogočila natančnega napovedovanja in kontroliranja njegovega vedenja. Po Kayeu (1993) bi lahko povzeli, da predstavlja dinamično sistemski pristop strateški umik od predstave o popolnem determinizmu (oziroma od zahteve po popolnem napovedovanju), zato da bi lahko napovedovali dogodke vsaj okvirno.

Torej, soočeni smo z nekim sistemom in radi bi ugotovili, katere spremenljivke pomembno določajo njegovo dinamiko ter kako so med seboj povezane. Prva težava je seveda v tem, da v začetku še ne vemo, kaj naj sploh opazujemo, katere spremenljivke naj merimo, in da bi bila stvar še hujša, ne vemo niti tega, ali tisto, kar je možno opazovati, v resnici predstavlja del tistega, s čimer je sistem v bistvu določen. Samo opazovanje in zbiranje podatkov nam nikoli ne more enoznačno povedati, kako je sistem v resnici definiran. Vedno je potrebna kreativna sinteza opažanj, ki vsebuje več kot samo podatke. Klasičen primer v zgodovini znanosti je t.i. kopernikanski obrat, kjer je jasno razvidno, da lahko isti podatki privedejo do zelo različnih zaključkov (Ptolemejev in Kopernikov planetarni sistem). Vendar imamo, kar pač imamo in s tem si moramo pomagati. Teorija dinamičnih sistemov nam ponuja zanimivo možnost, da na podlagi ene same merjene spremenljivke ugotovimo, ali gre dejansko za sistem, v katerem je možno odkriti neke zakonitosti, in celo to, koliko spremenljivk bi potrebovali, da bi ga natančno opisali.

Ključ leži v možnosti upodabljanja dinamike preučevanega sistema v psevdofaznem prostoru. Kot smo že videli, lahko na podlagi ene same spremenljivke narišemo poljubno dimenzionalni psevdofazni prostor. Koordinate vsake posamezne točke v n-dimenzonalnem psevdofaznem prostoru predstavlja n zaporednih vrednosti merjene spremenljivke. Videli smo tudi, da tak graf pogosto razkrije nekatere lastnosti dinamike sistema, ki iz običajne časovne serije niso razvidne. Predvsem je tu seveda mišljena možnost obstoja kaotičnega atraktorja, ki mu lahko izračunamo fraktalno dimenzijo.

Najobičajnejša strategija iskanja kaotičnega atraktorja in njegove fraktalne dimenzije je naslednja: časovno serijo ene merjene spremenljivke narišemo v psevdofaznih prostorih različnih dimenzij. Najprej v dvodimezionalnem, nato v tro-, štiri-, pet-... dimenzionalnem prostoru. V vsakem primeru izračunamo dimenzijo nastale množice točk. Glede na uporabljen postopek ima ta dimenzija lahko različna imena (npr. informacijska, korelacijska, podobnostna, Hausdorffova dimenzija), vendar se v osnovi ne razlikuje od navadne fraktalne dimenzije. Pri vseh omenjenih postopkih gre namreč za to, da opazujemo nastali graf pod različnimi resolucijami in pri tem ugotavljamo spremembe v zapolnjenosti psevdofaznega prostora. Če je bila merjena časovna serija generirana naključno, bodo izračunane dimenzije naraščale premosorazmerno z vsebnostno dimenzijo psevdofaznega prostora. Če pa je naša časovna serija odraz dinamike kaotičnega sistema, se bodo fraktalne dimeznije prej ali slej ustalile pri neki vrednosti, ki bo ostala enaka pri vseh nadaljnjih vsebnostnih dimenzijah. To dejstvo si lahko razložimo z enostavnim primerom. Predstavljajmo si, da smo list papirja stistnili v majhno kroglico, ki jo lahko obravnavamo kot nič dimenzionalni objekt. Če bi sedaj imeli na razpolago eno dimenzijo, bi kroglico lahko raztegnili v podolgovat svitek. Naš kos papirja bi zavzemal sedaj eno dimenzijo, prav tako kot prostor, v katerem ga opazujemo. Predstavljajmo si sedaj, da bi dobili na razpolago še eno dimenzijo, v katero bi lahko raztegnili naš kos papirja. S tem seveda ne bi imeli težav. Dobili bi pač list papirja. Povečanje dimenzije prostora, ki smo ga imeli na razpolago, je povečalo tudi dimenzijo objekta v tem prostoru. Kaj pa, če bi povečali naš prostor na tri dimenzije? List papirja bi še vedno ostal dvodimenzionalen objekt. Od tu naprej povečanje vsebnostne dimenzije prostora ne bi več imelo za posledico povečanja dimenzije opazovanega objekta. Nekaj takega se zgodi tudi s preučevanim atraktorjem. Ko se njegova izračunana dimenzija neha povečevati skladno s povečevanjem vsebnostne dimenzije, vemo, da imamo opraviti s kaotičnim atraktorjem, katerega dimenzijo poznamo.

To pa pri vsem skupaj še ni najlepše. Še pomembnejše je to, da nam prvo celo število nad izračunano fraktalno dimenzijo atraktorja predstavlja kar število spremenljivk, ki so potrebne za natančen opis sistema. To zagotavlja tako imenovani Takensov teorem (Nowak in Lewenstein, 1994). Ko poznamo število spremenljivk, ki na sistem vplivajo, jih moramo le (!) še poiskati in teoretično utemeljiti ter s pomočjo simulacij preveriti, ali se naš na novo dobljeni sistem obnaša podobno, kot se je merjena časovna serija. V idealnem primeru smo dobili mnogo več, kot bi nam lahko dala statistična analiza. Preučevani sistem natančno poznamo in čeprav nikoli ne bomo mogli dolgoročno napovedovati njegovega vedenja, lahko s spreminjanjem vrednosti posameznih spremenljivk ugotavljamo njegova področja stabilnosti in nestabilnosti ter preučujemo režime njegove dinamike.

Vse to seveda v idealnem primeru. Na žalost pa se je temu idealnemu primeru zelo težko približati. Williams (1997) navaja kar nekaj pogojev, ki morajo biti izpolnjeni, če naj bo uporaba omenjenega načina analize časovnih serij smiselna. Prvič mora biti število podatkov, ki jih imamo na razpolago, zelo veliko. Zaradi narave računanja fraktalne dimenzije (opazovanje zapolnjenosti psevdofaznega prostora pod vedno večjimi resolucijami) imamo lahko časovno serijo desettisočih podatkov za kratko. Upoštevati moramo namreč dejstvo, da število opazovanih enot psevdofaznega prostora narašča eksponentno z vsebnostno dimenzijo! Pri kratkih časovnih serijah tako postane računanje fraktalne dimenzije v psevdofaznem prostoru z več kot tremi dimenzijami popolnoma nesmiselno. Vemo, kaj to pomeni za psihologijo. Dobiti časovno serijo z nekaj tisoč podatki je tako za raziskovalca kot za poskusne osebe že prava muka. Drugič morajo biti podatki na zelo visokem merskem nivoju. Najraje na razmernostnem, pogojno tudi na intervalnem. Vsekakor pa mora biti merjena spremenljivka merjena kontinuirano in ne diskretno. Tudi ta zahteva izhaja iz načina računanja fraktalne dimenzije (povečevanje resolucije) in tudi ta zahteva je za psihologijo praktično nedosegljiva. Tretjič pa morajo biti podatki zelo čisti, vsebovati ne smejo skoraj nič napake, saj se lahko meja med kaotično in naključno časovno serijo hitro zabriše. Zgodi se lahko namreč to, da se naraščanje fraktalne dimenzije z naraščanjem vsebnostne dimenzije sicer upočasni, vendar nikoli tako zelo, da bi lahko natančno določili število spremenljivk, ki določajo preučevani sistem. Problem je analogen problemu določanja števila faktorjev pri faktorski analizi. Tudi tu ni vedno jasno, pri katerem faktorju se zmanjševanje odstotka pojasnjene variance ustali. No, verjetno ni treba posebej poudarjati, da je za psihologijo tudi ta zadnja zahteva previsoka.

Pa vse troje ni samo težava psihologije. Williams (1997) celo navaja mnenja nekaterih avtorjev, ki pravijo, da so kaotično vedenje sistemov nedvoumno odkrili le pri računalniško simuliranih podatkih. Za vse resnične podatke na kateremkoli področju stvarnosti naj bi bile zgoraj omenjene zahteve pretežko dosegljive.

Zdi se, da smo zašli v slepo ulico. Najprej smo ugotovili, da statistični pristop ni najbolj primeren za preučevanje vedenja dinamičnih sistemov, potem smo nakazali možnost, ki bi bila sicer idealna, a je praktično nedosegljiva. A kljub temu še ni vse izgubljeno. Sprijazniti se pač moramo z dejstvom, da je izdelava natančnih kvantitativnih modelov preučevanih pojavov za psihologijo preprosto preveč ambiciozna naloga. Čeprav ti še vedno predstavljajo ideal znanstvenega raziskovanja, pa so lahko zelo koristni tudi kvalitativni modeli, ki so mnogo bolj dosegljivi (Nowak, Lewenstein in Vallacher, 1994). Namesto da bi si prizadevali doseči izomorfne odnose med našimi modeli in opazovanimi pojavi, se lahko zadovoljimo tudi s homomorfnimi odnosi, ki so mnogo manj restriktivni (Selz in Mandell, 1994). Oboji so bijektivne preslikave med modeli in pojavi, le da so prvi definirani v metričnem prostoru in zahtevajo numerično ekvivalentnost v vseh točkah preslikave, drugi pa ohranjajo le ločenost elementov (možno jih je prešteti), kompaktnost prostora (elementi iz njega ne morejo uiti) in povezanost (ohranjen je vrstni red elementov). Taki modeli nam nudijo osnovo za razumevanje preučevanih pojavov, do določene mere pa omogočajo tudi napovedovanje (Nowak in dr., 1994). Razvijanje kvalitativnih metod raziskovanja v smer preučevanja dinamičnih sistemov je že v teku (prim. Krippendorff, 1986).

ZAKLJUČEK

Osnovni namen tega prispevka je bil kritično razmisliti o nekaterih značilnostih prevladujoče psihološke metodologije z vidika porajajoče se teorije dinamičnih sistemov. Pokazati sem poskušal predvsem to, da je večina psiholoških in socilanopsiholoških sistemov dinamične in nelinearne narave. Zaradi tega jih prevladujoča psihološka metodologija, ki temelji na predpostavkah o linearni povezanosti med spremenljivkami in enosmerni vzročnosti, največkrat ne more adekvatno opisati in še manj razložiti. Posledica tega je velika fragmentiranost psihološke teorije, ki nastaja večinoma induktivno na podlagi empiričnih raziskav.

Poleg tega sem hotel predstaviti še osnovne pojme teorije dinamičnih sistemov, kot so občutljivost na začetne pogoje, kaotični atraktor in njegova rekonstrukcija v psevdofaznem prostoru, fraktalna dimenzija, iskanje primerne vsebnostne dimenzije atraktorja in podobno. V naravoslovnih znanostih je raziskovanje, ki gradi na teh pojmih že v polnem razamahu in tudi v psihologiji se pojavlja vedno več poskusov modeliranja preučevanih pojavov iz vidika teorije dinamičnih sistemov (prim. Abraham in Gilgen, 1995). Pri tem pa se je treba zavedati omejitev, pred katere nas postavljajo specifičnost psiholoških pojavov in možnosti njihovega merjenja. Podatki, s katerimi operiramo v psihologiji, so največkrat premalo natančni in na prenizkem merskem nivoju, da bi bili uporabni za resno kvantitativno analizo z vidika teorije dinamičnih sistemov. Kljub temu vse ni izgubljeno, saj lahko osnovne principe te teorije uporabimo za izdelavo plodnih kvalitativnih modelov. To možnost sem na žalost lahko le nakazal, saj zahteva nedvomno precej temeljitejšo obravnavo. Poleg tega sem v zgornjem prikazu teorije dinamičnih sistemov popolnoma izpustil še zelo zanimivi področji, ki spadata pod njeno okrilje. To sta t.i. teorija katastrof (glej npr. Tesser in Achee, 1994) in teorija samoorganizacije (glej npr. Prigogine, 1997). Obe imata zanimive implikacije za psihologijo, vendar bi njuna korektna obravnava zahtevala precej obsežnejšo razpravo.

Za konec moram povedati še nekaj. Statistična metodologija seveda ni povsem neuporabna, čeprav ji v tem prispevku nisem namenil še nobene dobre besede. Prva »otipavanja« kaotičnih atraktorjev so navadno statistične narave (preučevanje njihovih verjetnostnih distribucij, računanje avtokorelacij časovnih serij) in tako dobljene ugotovitve nam lahko precej pomagajo pri načrtovanju in izvajanju nadaljnje analize. Poleg tega izkazuje večina dinamičnih sistemov kaotično vedenje le pod določenimi pogoji (odvisno od vrednosti kontrolnih parametrov). V bolj linearnih režimih je statistično preučevanje lahko popolnoma smiselno in plodno. Poleg tega je smiselnost statistične metodologije odvisna tudi od ravni abstrakcije, iz katere preučevani pojav obravnavamo. Družba kot velik dinamični sistem ima recimo veliko značilnosti, ki se pojavljajo z osupljivo pravilnostjo. Take značilnosti lahko dobro opišemo statistično in na podlagi teh opisov so možna tudi zelo kvalitetna napovedovanja. Zavedati pa se moramo, da so to kljub vsemu še vedno opisi, da je to še vedno t.i. aristotelovski pristop k znanosti v nasprotju z galilejanskim, ki si prizadeva dejansko razložiti pojave v njihovi konkretni individualnosti z upoštevanjem njihove dinamike (prim. Lewin, 1935).

LITERATURA

Abraham, F. D. in Gilgen, A. R. (1995). Chaos Theory in Psychology. London: Praeger.

Bertalanffy, L. von (1968). General System Theory. New York: George Braziller.

Buunk, B. P. (1996). Affiliation, Attraction and Close Relationships. V M. Hewstone, W. Stroebe in G. M. Stephenson (Ur.), Introduction to Social Psychology. Oxford: Blackwell publishers.

Cruchfield, J. P., Farmer, J. D., Packard, N. H. in Shaw, R. S. (1986). Chaos. Scientific American, 255 (6), 46-57.

Černigoj, M. (1997). Pogovor z dr. Petrom Praperjem [An interview with dr. Peter Praper]. *Panika, 2 (3)*, 43-47.

Černigoj, M. (1999). Osnovne značilnosti biološke organizacije kot temelj za razumevanje človekovega vedenja [Fundamental characteristics of biological organisation as a basis for understanding human behaviour]. Anthropos, 4-6, 37-48.

Gergen, K. J. (1978). Experimentation in social psychology: A reappraisal. European Journal of Social Psychology, 8, 507-527.

Gleick, J. (1997). Chaos. London: Random House.

Gould, S. J. (1997). The Mismeasure of Man. London: Penguin Books.

Kaye, B. (1993). Chaos and Complexity: Discovering the Surprising Patterns of Science and Technology. New York: VCH Publishers.

Krippendorff, K. (1986). Information Theory: Structural Models for Qualitative Data. London: Sage.

Kuhn, T. S. (1998). Struktura znanstvenih revolucij [The structure of scientific revolutions]. Ljubljana: Krtina.

Lewin, K. (1935). A Dynamic Theory of Personality. New York, London: McGraw-Hill.

Musek, J. (1993). Znanstvena podoba osebnosti [A scientific image of personality]. Ljubljana: Educy.

Nowak, A. in Lewenstein, M. (1994). Dynamical Systems: A Tool for Social Psychology? V R. R. Vallacher in A. Nowak (Ur.), Dynamical Systems in Social Psychology. San Diego: Academic Press.

Nowak, A., Lewenstein, M. in Vallacher, R. R. (1994). Toward a Dynamical Social Psychology. V R. R. Vallacher in A. Nowak (Ur.), Dynamical Systems in Social Psychology. San Diego: Academic Press.

Prigogine, I. (1996). The End of Certainity. New York: The Free Press.

Selz, K. A. in Mandell, A. J. (1994). A Family of Autocorrelation Graph Equivalence Classes on Symbolic Dynamics as Models of Individual Differences in Human Behavioral Style. V R. R. Vallacher in A. Nowak (Ur.), Dynamical Systems in Social Psychology. San Diego: Academic Press.

Tesser, A. in Achee, J. (1994). Aggression, Love, Conformity, and Other Social Psychological Catastrophes. V R. R. Vallacher in A. Nowak (Ur.), Dynamical Systems in Social Psychology. San Diego: Academic Press.

Vallacher, R. R. in Nowak, A. (1994). The Chaos in Social Psychology. V R. R. Vallacher in A. Nowak (Ur.), Dynamical Systems in Social Psychology. San Diego: Academic Press.

Williams, G. P. (1997). Chaos Theory Tamed. London: Taylor & Francis.