Co je ta věc nazvaná „chaos“?

Harmke Kamminga

> Pro kvalifikované vědce je obtížné, mnohem méně však pro všeobecnou veřejnost, rozlišovat nadměrnou medializaci od opravdového vědeckého úspěchu. Chaos nám poskytuje obojí.
>
> John Franks (1)

V současné době se velmi živě diskutuje o představě chaosu. Kniha spisovatele odborné vědecké literatury Jamese Gleicka na toto téma se stala bestsellerem (2); bylo uveřejněno mnoho článků v denním tisku a pořadů v televizi a New Scientist uveřejnil rozsáhlou sérii každotýdenních článků o významnosti teorie chaosu pro řadu vědeckých disciplín.(3) Terminologie teorie chaosu, jako například „efekt motýlích křídel“ a „podivný atraktor“, vstoupila do běžné slovní zásoby, ačkoli není vždy používána velmi přesně. I když to není výjimkou, je to neobvyklá situace pro téma, které se nejdříve a především týkalo výzkumů v matematice; z nichž některé se popravdě vyvinuly v úplnou špičku. A co víc, spojení mezi matematickým formalismem teorie chaosu a událostmi reálného světa je podstatně problematičtější, než je často naznačováno v obecných interpretacích. Gleickova kniha například popisuje takové spojení příliš povrchně, komentuje složité vztahy mezi teorií, modelem a opravdovým systémem. Jeho tvrzení, že teorie chaosu je novým paradigmatem pro vědu by mělo být, přinejmenším na tomto místě, viděno se značnou opatrností. V jeho zpracování, řekněme při nejmenším, se hranice mezi matematickými a pravými systémy rozmazává, zatímco matematický obsah nových výzkumů zůstává poněkud nejasný. Co Gleick uvádí, je příběh objevení, zdůrazňující individuální úspěchy, a po této stránce je jeho kniha velmi dobře čtena. Matematicky mnohem závažnější pojednání o tomto předmětu je představeno Ianem Stewartem v jeho studii „Hraje Bůh v kostky?“(*Does God Play Dice?*)(4)

Nové povědomí o chaosu je jen jedním z výsledků, který se objevil z nedávných výzkumů v nelineárních dynamických systémových teoriích. Základní myšlenka je docela jednoduchá: že dobrý poměr jednoduchých determinovaných systémů je, alespoň teoreticky, schopný produkovat extrémně komplexní a ve všech záměrech a účelech nepředvídatelné chování. Chaos v tomto smyslu je zmatek. Navíc, je jisté, že podobné formy chování se vyskytují v široké paletě reálných systémů. Překvapením bylo zjištění, že komplexní a nepravidelné chování v reálných systémech nemusí odrážet podobnou složitost v samotné povaze systému.

Tento článek se snaží představit intuitivní obraz toho, jak jednoduché systémy mohou vyvolat chaotické chování, stručným probráním některých nových výzkumů v nelineárních dynamických systémových teoriích, zahrnujících jejich pozadí a možné důsledky. Abychom si udrželi jasnou a nespornou ideu, zaměříme pojednání prvotně na přesnou vědu. V zásadě však, mohou mít tyto výzkumy důležitý vliv na mnoho odvětví, kde je studován původ komplexního chování – obzvláště, kde povědomí toho, co je vědecké, vychází z výzkumů ve fyzice.

Definice, principy a metody

Nyní si myslíme, že příklady nelineárních dynamických systémů jsou všude kolem nás: vodopády, biologické orgány, ekosystémy, biosféra jako celek, socio-ekonomické systémy, zemský klimatický systém, solární systém, atd. Nelineární dynamická systémová teorie je

odpovědná za sestavení matematických modelů takových systémů a za výzkum vlastností těchto modelů. Tyto vlastnosti jsou zkoumány, aby poskytly vhled do chování reálných systémů reprezentovaných matematickými modely. Abychom chápali rozdíl mezi reálným systémem a matematickým modelem, je nezbytné prověřit definice určitých termínů užívaných v nelineární dynamické systémové teorii. Co víc, zaměření na omezující předpoklady ležící za těmito definicemi by měli osvětlit omezení v platnosti oboru těchto nových výzkumů.

Obecně, termín „systém“ je brán, že znamená cokoli, co má části a může být v jeden čas zkoumáno jako samostatný celek. V dynamické systémové teorii, však, je tento termín také používán v užším smyslu, odkazující na sadu (systém) matematických korekcí užívaných pro popis (reálného) systému. Jinými slovy, matematický model sám o sobě je obecně nazýván (dynamickým) systémem. Tento bod si zaslouží, aby byl zdůrazněn, protože je zdrojem mnoha zmatků.

O systému se říká, že je „dynamický“, jestliže se jeho stav (nebo styl chování) mění v čase. Stav systému může být reprezentován počtem veličin, které, v dynamickém systému, variují v čase. Minimální počet takových veličin (nazývaných „proměnné“) nutných pro charakterizování systému je nazýván „dimenze“ systému. Uvažujme, například, o izolovaném prostředí, kde interagují populace 3 různých druhů organismů. Dynamický systém složený ze 3 populací (předpokládáme, že jsou uzavřené) by byl reprezentován sadou právě tří rovnic. Každá z těchto rovnic by se vztahovala k míře změn v jedné variující proměnné (což je, úroveň jedné z populací) až k některým kombinacím jiných proměnných. V tomto příkladu, jsou zapojené tři vzájemně závislé proměnné, takže dimenzí systému je trojka. Všeobecně platí, že se o systémech reprezentovaných v termínech „n“ vzájemně závislých proměnných říká, že mají dimenzi „n“, kde „n“ je jakékoli číslo.

Dynamický systém je nazýván „jednoduchým“, jestliže jeho dimenze „n“ je malá. Samozřejmě „malá“ je vágní termín, a co se počítá jako malé, závisí na teoretickém kontextu. Pro dnešní účel, stačí říct, že trojka je dost malá: tří-dimenzionální nelineární systém je jak jednoduchý, tak schopný vytvářet chaotické chování, jak bude probráno později.

Míra změn každé proměnné systému je vyjádřena v (cremes) v prolínání, v propojení matematické rovnice, která může být lineární nebo nelineární. Jestliže dokonce jedna z rovnic, která vyjadřuje vzájemný vztah mezi proměnnými systému je nelineární, pak systém sám je nazýván nelineárním. Lineární rovnice má tu vlastnost, že jakékoli řešení přidané k dalšímu řešení vytváří třetí řešení; sada lineárních rovnic nám umožňuje vytvořit řešení jako součet jednodušších řešení. Historicky byly lineární rovnice dominantním tématem v teoretické a aplikované matematice. Lineární rovnice nejsou jen lehce ovladatelné matematicky, jejich aplikace ve fyzice také vyplodily enormní přínos. Například velmi složité vlnové pohyby, takové jako ty, které jsou tvořeny ve fenoménu interference, mohou být analyzovány jako součet vrstvených jednoduchých vlnových pohybů. Proto, matematická teorie fyziky, od Newtoniánů po kvantovou mechaniku, byla do nedávna, vyvíjena téměř výlučně v termínech lineárních rovnic.

S nelineárními rovnicemi, na druhou stranu, se mnohem obtížněji zachází. Nemají jednoduché sčítací vlastnosti, které by dovolovaly, aby řešení bylo tvořeno obecnou cestou. V případě nelineárních rovnic vyjadřujících míru změny, neexistuje obecná formulace pro dosažení řešení po sobě jdoucích bodů v čase. Využití výkonných počítačů bylo neocenitelnou pomůckou pro matematické zacházení s nelineárními rovnicemi. Řešení musí být stále

přepočítáváno v malých krocích, ale alespoň je tato práce o hodně rychlejší; následkem kvantitativních a kvalitativních vlastností mohou být celé řady řešení vyzkoumány mnohem jednodušeji. Co víc, výsledek může být ukázán graficky. V tomto ohledu, dluží nynější výzkum nelineárních matematických mnoho počítačové revoluci.

A nakonec pár slov o determinismu. Vzpomeňme si, že dynamické systémy mohou být reprezentovány jako sada rovnic, týkající se míry změn každé proměnné, až některých kombinací jiných proměnných. Takové systémy jsou nazývány deterministické (ve smyslu Laplaceanova determinismu protože, udávaje přesné počáteční podmínky, mají důležitou vlastnost zajišťující existenci jedinečných řešení jako jejich výsledky). Nicméně, mělo by být zmíněno, že tento determinismus je jak vlastností matematických systémů, stejně tak modelů. (Jestliže by Newtonská mechanika byla jak pravdivá, tak univerzální, jak se Laplace domníval, pak by byl svět sám deterministický.)

Modelování reálných systémů

Než půjdeme dále, měli bychom vědět, že konstrukce matematických modelů reálných systémů zahrnuje důležité zjednodušení, které mohou mít velké důsledky pro porozumění reálným systémům. Všeobecně, modely jsou teoretické konstrukty, které jsou na jedné straně určené k zachycení klíčových vlastností reálných systémů a na druhé straně reprezentují zvláštní skloubení všeobecných teorií. Matematický zápis modelů je vybírán ne náhodným výběrem, ale pod vedením teorie. Konstrukce modelu zakotvená na pozadí teorie typicky zahrnuje různé přibližnosti a zjednodušení teorie. Například, Newtonovy zákony pohybů nemohou být přesně počítány pro systémy obsahující více než dvě tělesa; modely takových systémů proto zahrnují v teorii přibližnosti.

Aby model vysvětlil cokoli ohledně reálného světa, vyžaduje také fyzikální interpretaci, která je znovu provázena v pozadí teorií. Tato interpretace může být velmi idealizovaná – fyzika dělá velké kroky užíváním konceptů jako například ukažme na lidové masy, přátelská média, ideální palivo, atd. Systematické výzkumy efektů rušivých faktorů jako tření mohou dovolit takovým faktorům, aby byly začleněny jako termíny do rovnic modelů, tudíž dovolují vytváření více realistických modelů. Co je důležité, je to, že jakákoli změna v rovnicích by měla mít teoretické ospravedlnění. Může být plodné vytvořit nelineární modely rozšíření chřipkové epidemie, ale rovnice by měla vyjadřovat naše chápání výchozích mechanismů, a termíny v rovnici by měly reprezentovat faktory, o kterých máme dobré důvody si myslet, že jsou zahrnuty v těchto mechanismech. Tvorba dobrých realistických modelů není v žádném případě triviální otázkou.

V praxi, když se modelují reálné systémy, je obvykle jednoduché říci, zda je systém dynamický nebo ne, ale aby bylo řečeno přesně, co systém obsahuje, není tak často jednoznačné. Potíže nastávají (v nejmenším) ve dvou formách. Za prvé, reálné systémy jsou vždy pro některé prostory otevřené, ve smyslu, že jejich hranice nejsou dobře definované. Vezměme například klimatický systém. Měly by být za vnější hranice systému brány horní hranice atmosféry a dno oceánů? Nebo by měli být sečnou, abychom tak zahrnuli interakce slunečního a zemského systému nebo dokonce galaktické vlivy na jednu stranu, nebo faktory jako sopečné aktivity na straně druhé? Je také důležité vědět, které změny vytvořené zevnitř systému musí být brány v úvahu – třeba, takové změny vyplývající z lidské aktivity. Přírůstky oxidu uhličitého v obsahu atmosféry, ochuzení ozonové vrstvy a lokální vytváření přemíry tepla ve větších městech, to všechno může mít vliv na klima. Samozřejmě naše chápání budoucího (a minulého) klimatického chování může být skutečně nedostatečné, pokud systém

není charakterizován tak, že zahrnuje všechny faktory, které mají významný vliv na jejich chování. Druhá obtíž v definování dynamického systému je, že systém může být vnitřně komplikovaný, jen když vzdoruje přesnému popisu. Důležité, ale vysoce problematické příklady tohoto typu jsou vývojový biologický systém a lidský sociální systém. (Je samozřejmě otevřenou otázkou, zda se člověk může dokonce pokusit upravovat sociální systémy, což je v první řadě předmětem práce zákonů přírody, a tímto ignorovat nejen úmyslnost v lidském chování , ale také stupeň, kterým jsou sociální zákony předmětem lidské kontroly.)
Teorie dynamických systémů se pokoušejí překonat tyto potíže upravením jakéhokoli systém jako uzavřeného – který je, jak dobře definovaný, samostatný celek – a také dost jednoduše dovoluje, aby byl modelován. Použité modely jsou systémy rovnic typů uvedených dříve, s libovolným počtem dimenzí. Cílem teorií nelineárních dynamických systémů je studovat obecné vlastnosti typických výsledků takových systémů. Teď, když jsme uvedli výše zmíněná omezení, se teorie mohou zdát přehnaně limitující a z toho důvodu irelevantní pro studium reálných systémů. Ale popravdě to není tento případ. Když uvedeme příslušné konkrétní interpretace, řada použitých formálních vlastností matematických modelů zdá se, napodobují určité vlastnosti týkající se chování široké palety reálných systémů.

Teorie ve vývoji

Před diskutováním některých nových výzkumů, stojí za to upozornit, že popravdě, nejsou všechny tak nové. Dávno před přelomem století, Henri Poincaré měl jednu myšlenku o možnosti nepravidelného pohybu v případě deterministických systémů, vyplývající z jeho studií zaměřený na stabilitu slunečního systému. A téměř před 30 lety Edward Lorenz (5) v MIT vytvořil velmi jednoduchý počítačový model zákonitostí počasí, který vykazuje chaotické chování. A propracovaná definitivní teorie byla v podstatě kompletní kolem půlky 60. let 20. století. Historici budou muset zvážit, proč chaos neměl donedávna širší působení.

Stručný přehled výzkumů v teoriích nelineárních dynamických systémů by proto měl začít s průkopnickým vlivem Poincarého. Dříve se kladl důraz na studie jednoduše řešených dynamických systémů (v matematickém smyslu) vytvářených vzhledem k jednoduchému setu počátečních podmínek. Poincaré, však, studoval celou soustavu výsledků systému s cílem porozumět typickým systémovým formám chování pro řadu počátečních podmínek. Tato iniciativa vedla k důležité nové cestě náhledu na kvalitativní chování dynamických systémů. Další důležité výzkumy dotáhly studie Birkhoffa a dalších ve Spojených Státech, a Pontyagina, Andronova a dalších v Sovětském Svazu. Je zajímavé, že vlivné abstraktní matematické koncepty jako například ty, co se týkají strukturální stability (které zpřesnily myšlenku, že kvalitativní chování dynamických systémů, by i přes malé rozvíření, mělo zůstat nezměněno.) jsou výsledkem blízké spolupráce mezi matematiky (v tomto případě Pontryagin) a inženýry.

Původní cíle před tímto výzkumem takových myšlenek byly daleko vzdálené od zajímání se o chaos. Ve skutečnosti, hlavním zájmem byla studie dvou-dimenzionálních systémů (ve smyslu definovaném výše). Jedním důležitým výsledkem těchto dřívějších výzkumů bylo zjištění, že dynamické systémy s dvěma a méně dimenzemi, jestliže mají mít konečné řešení, jsou jediné způsobilé k produkování buď stavu rovnováhy anebo kmitavého (pravidelného) typu chování. Toto jsou příklady jednoduchých forem chování. Pak se předpokládalo – nesprávně, jako se ukázalo – že systémy vyšších dimenzí by vykazovaly podobně jednoduché typy chování. Jako následek, nepravidelné formy pohybů byly chápány jako existence výsledků kombinace velké sady jednoduchých, pravidelných pohybů. Popravdě, takový

pohled byl obhajován, při nejmenším u fyziků, jako způsob pochopení původu rozvíření (turbulenci), třeba v kapalné dynamice. Změna v tekutině (nebo plynu), při rozvíření (perturbaci), od hladkých proudů po ty vysoce nepravidelné turbulentní, byla šířeji viděna jako výsledek soupeřících rytmů pohybů zobrazovaných velkým – nekonečným – počtem součástí. Podle tohoto pohledu, každá součást systému se chová jednoduchým, pravidelným způsobem, ale složitost systému vytváří zmatečné, v praxi nepředvídatelné chování. Možnost, že jednoduché systémy mohou vytvářet jednoduché nepravidelné chování, byla zvažována až mnohem později.

Zajímavé je, že tyto samé myšlenky, vyvinuté pro studii dvou – dimenzionálních systémů s jednoduchými režimy chování, se neúmyslně staly pomocnými v porozumění komplexnímu, nepravidelnému chování, v dnešní době odkazujícímu na chaos. Zásadní pokroky – vyvrcholení velké části dřívější práce – se objevili v počátcích 1950 s prací Kolmogorova v Moskvě a později, Smaleho a ostatních ve Spojených Státech. Jedna důležitá nová myšlenka předpokládala, že chaotické, zřídka pravděpodobné chování se stává možným v momentu, kdy zvažujeme nelineární systémy tří a více dimenzí. Abychom rozuměli této myšlence, alespoň intuitivně, je poučné podívat se nejprve na ne- chaotické pravidelné systémy.

Bude zmíněno, že podle definice, budoucí výsledky deterministických systémů závisí jedinečně na jejich počátečních podmínkách. Na první pohled se zdá, že to znamená, že výsledky takových systémů, nezáleží jak jsou komplikované, by byly zcela předvídatelné a z toho důvodu ne – náhodné. Problém je, že v praxi nemohou být počáteční podmínky nikdy přesně specifikovány, protože odchylky („šum“) a chyby měření jsou nevyhnutelnými faktory v řešení v reálných systémech. Tento nedostatek přesných znalostí o počátečním stavu systému ukazuje, že to moc nevadí u systémů o třech a méně dimenzích, protože z jejich přirozenosti nemohou exponenciálně zvětšovat chyby utvořené ve specifikaci jejich počátečních podmínek a v ten samý čas má konečné řešení. Následkem toho, můžeme říct, že malé počáteční chyby vedou k malým konečným chybám (klasická Laplaceanova situace) a z toho důvodu takové chyby nejsou kriticky důležité ve studii těchto systémů. Jejich chování zůstává, alespoň přibližně předpověditelné.

Citlivá závislost na počátečních podmínkách

Důležitým aspektem průlomu je prokázání, že systémy tří a více dimenzí mohou mít vlastnost citlivé závislosti na počátečních podmínkách. Totiž, že malé chyby vytvořené ve specifitě počátečního stavu takového systému jsou exponencionálně zvětšované. (To je obecně uvedeno metaforicky jako „efekt motýlích křídel“, po Lorenzově návrhu, že motýlí mávnutí jeho křídly a mírné rozrušení vzduchu v Brazílii může, řetězovou reakcí, vyvolat tornádo v Texasu pár týdnů později.) Následkem toho, chyby, nezáleží jak malé budou rapidně růst a ovládat budoucí chování systému. Následně, mohou takové systémy, říká se „zapomenout“ jejich minulosti, ve smyslu, že jejich následné chování není určeno jejich minulostí jak to bylo původně specifikováno. Z toho důvodu, nejmírnější neznalost stavu systému v jakýkoli čas, učiní předpověď jeho budoucího chování nemožným.

Mohlo by být namítnuto, že určitá forma citlivé závislosti na počátečních podmínkách je dlouho známa jako vlastnost reálných systémů jakýchkoli dimenzí. U určitých kritických bodu měnících se v kvantitě je možné, aby se měnily také v kvalitě – to je stěží nový pohled (dokonce i ve fyzice!) Postupné zvyšování nákladu na drátu učiní drát napnutý postupně, dokud náhle nepraskne. Zase, v klasickém Maltézkém (*) scénáři neomezeného růstu dané populace ve stálé rychlosti, zde bude chyba v původním odhadu rychlosti růstu populace

exponencionálně růst, následně se jakékoli předpovědi populační velikosti pro následující čas budou odchylovat dále a dále od aktuální populační velikosti.

Jde o to, že v tomto druhu situací jakékoli odchylky, které exponenciálně rostou, budou zesíleny na trvalo ve stejném směru, buď než se systém vyčerpá a „umře“ (jako v případě drátu), nebo bude nekonečný (jako v Maltézkém případě). Co je jiné v nelineárních systémech tří a více dimenzí je že tento typ chování může zůstat ohraničený. Zpětnovazební mechanismus může přinutit následky rozvíření tak, že se nenafouknou do nekonečnosti. Metaforicky řečeno, systém se otočí zpět do sebe, což ho natáhne a přehne jako pekař těsto. Přitom, systém může projít extrémně komplikovaným chováním.

Návnada atraktoru

Alternativní cestou k nazírání na tyto nové výsledky je v termínech takzvaných „ atraktorů“. Zhruba řečeno, na atraktory se můžeme dívat jako na dynamické stavy ve směru, do kterého systém inklinuje, bez ohledu na jeho výchozí bod, od kterého měl určitý čas na utišení. Velmi jednoduchým příkladem by byla mísa s vodou stojící stále na horizontálním povrchu. Když ji necháme samotnou, tento systém zůstane v rovnováze. Jednou je mísa rozrušena (což je dáno jinými počátečními podmínkami), voda se stane rozčeřenou, ale za čas se uklidní („zpřitahuje se“) do původní rovnováhy tím, že ztratí energii vyvolanou rozrušením. Atraktor pro tento systém koresponduje s rovnovážným stavem.

Obecně, jsou tři hlavní druhy chování, které dynamický systém mohou směřovat k: (1) neměnnému (rovnovážnému) stavu, (2) jakékoli formě chování, která se pravidelně opakuje, a (3)chování, které nepatří do žádného z předchozích druhů a jsou uváděny jako nepravidelné, komplexní nebo chaotické. Užitečná cesta, jak charakterizovat tyto typy chování matematicky, je skrze pojem atraktoru. Základní myšlenkou je spolu-reprezentující stav systému, který je v každém okamžiku jako bod v abstraktním geometrickém prostoru a je nazýván „*stavový prostor*“. Změny ve stavu korespondují s jinými body ve stavovém prostoru. Zjevně, „dynamika“ systému v rovnováze koresponduje s jediným bodem ve stavovém prostoru. Řekněme, že takový systém má *atraktor pevných bodů*, což znamená, že bez ohledu na tom, kde je systém spuštěn na začátku, bude mít sklon k rovnovážnému stavu, který koresponduje se stálým bodem ve stavovém prostoru. Stejně tak, v systému s opakujícím se chováním, je jednoduché si představit, že body reprezentující postupné stavy systému ve stavovém prostoru, budou vytvářet uzavřenou křivku: protože systém se opakuje pravidelně, bude „navštěvovat“ stejné body ve stavovém systému stále a stále znovu. Říká se, že systém má *atraktor periodických bodů*, pokud, bez ohledu na jeho počáteční podmínky, se nakonec vyrovná do opakujícího se (pravidelného) stylu chování. Systémy dvou a méně dimenzí mohou mít pouze atraktory pevných bodů nebo atraktory periodických bodů. Takové jsou nazývané *jednoduchými atraktory*.

Nelineární systémy vyšších dimenzí mohou mít více komplexních atraktorů. Považme systém s nepravidelným nebo chaotickým chováním. Tady může být znovu předesláno, že tyto dráhy chování odpovídají řadě bodů ve stavovém prostoru. (V tomto případě, stavový prostor má více než 2 dimenze, takže body nezůstanou v ploché rovině.) Protože se systém nechová pravidelným způsobem, sada vystopovaných bodů je velmi komplikovaná, a je nazývána *podivným atraktorem*. Tady znova, termín „atraktor“ je užíván k vyjádření faktu, že je vytvořen nezávisle na počátečních podmínkách, a charakteristickém typu nepravidelného chování, odkazujícímu na body atraktoru. To se stává dokonce i když počáteční podmínky neleží na podivném atraktoru. (Mimochodem, není v žádném případě lehké poznat podivný

atraktor reálného systému, který vykazuje chaotické chování.) Navzdory jejich složitosti podivné atraktory nejsou libovolné: každý atraktor je charakteristický systémem, který leží v pozadí. A co víc, podivné atraktory jsou označovány jako chaotické, když trajektorie ve stavovém prostoru, z dvou bodů velmi blízko na atraktoru, exponencionálně rozbíhají. To je ta vlastnost, která reflektuje systémovou citlivou závislost na počátečních podmínkách.

V souvislosti je tady jiný výsledek z teorie nelineárních dynamických systémů, díky Smaleovi. Poneseme-li si v mysli dřívější výsledky ukazující, že dvou dimenzionální dynamické systémy, které by měly zůstat ohraničeny, jsou obecně strukturálně stabilní, Smale se domníval a pokusil se prokázat, že to samé by platilo pro (chaotický) systém tří a více dimenzí. Popravdě prokázal opak předvedením, že takové systémy, které mění své řídící parametry (jako otevírání vodovodního kohoutku o něco víc), a ne jen své počáteční podmínky, mohou mít za následek kvalitativně odlišný styl chování. Takový systém může, například, přeskočit najednou z jednoho atraktoru na jiný, s potencionálně katastrofickými důsledky v reálném systému jako je klima.

Ve shrnutí, nový výzkum ukazuje, že chaotické chování (s přiřazeným podivným atraktorem), ta existence, která je spojována s citlivou závislostí na počátečních podmínkách, se stává možnou stejně tak, jako zvažujeme deterministický systém tří a více dimenzí. Toto má důležité následky, které dovolují, aby bylo jak pravidelné, tak i zdánlivě nepravidelné chování, chápáno, a aby s nimi bylo zacházeno, ve stejném teoretickém rámci.

Implikace a námitky

Jaké následky mohou tyto myšlenky v teorii nelineárních dynamických systémů mít pro naše pochopení reálných systémů? Limity studovaných matematických modelů jsou už zdůrazněny. Matematicky, docela jednoduché nelineární deterministické systémy mohou být ukázány, aby předvedly chaotické chování, takže malé změny v počátečních podmínkách mohou produkovat nepředvídatelné změny v budoucím chování. Od doby, kdy je nelinearita brána jako obecná vlastnost reálných systémů, měl by být tento typ citlivosti obecný také v reálném světě. Popravdě, nedávná práce přinesla svědectví, že chaos spolu s citlivou závislostí na počátečních podmínkách, se opravdu vyskytuje v široké paletě reálných systémů. Tyto se rozprostírají, od počasí a systémů vykazujících zmatek, po systémy vystavené změnám v solárně-energetickém výdaji, populačnímu součtu různých druhů, srdečním rytmům, míře určitých chemických reakcí, a další. Zdá se, že řada dobře prostudovaných přístupů k chaosu se v těchto systémech vyskytuje. Co je problematické, v několika těchto případech, je vysvětlit odkud tento chaos přichází; jinými slovy, porozumět mechanismům stojícím v pozadí v konkrétním případě. Nicméně, je při nejmenším jasné, že citlivá závislost na počátečních podmínkách je v reálných systémech mnohem více obecná než se předpokládalo.

Z toho plyne, že zatímco starý směr přemýšlení zastával názor, že malé změny vytváří malé následky, tyto nové výsledky ukazují opačným směrem – s potencionálně ničícími důsledky. Vezměme například globální oteplování. Nyní se všeobecně chápe, že jemná odchylka v klimatickém režimu může mít katastrofální a dalekosáhlé, nepředvídatelné důsledky pro lidstvo. Přidejme k tomu zjištění, že klimatický systém může být křehký a je jasné, jakými důsledky mohou být i malé, jedincem – utvořené, změny v systému, tak jako zvýšení atmosférického oxidu uhličitého v rámci bezmyšlenkovitých energetických strategií a odlesňovacích schémat. Všeobecně, pak, nás tyto nové vhledy upozorňují na možnost citlivosti a křehkosti světa, nezbytné změny ve způsobu uvažování a (schopností) s ním

zacházet. Více pozitivně, teď chápeme, že chaotické chování v jednoduchých nelineárních systémech může působit jako kreativní proces: generuje složitost, produkující bohatě organizované vzory chování, sahající od stabilních po nestabilní.

Epistemiologicky, přímý závěrem teorie nelineárních dynamických systémů je zjištění, že chaotické chování může mít jednoduché a deterministické základy. Jestliže chceme uchopit nepravidelné, náhodně-pravděpodobné chování, není nezbytné buď konstruovat extrémně komplexní modely nebo předpokládat neurčitost. Následkem toho, je paradoxně prokázáno, že „jednoduchý“ Laplaceanový determinismus je schopný produkce enormního bohatství. Toto může být důležitým následkem pro naše porozumění mnoha fenoménům: které jsme prezentovali s alternativním teoretickým rámcem, ve kterém jak jednoduché tak i komplexní deterministické chování může být pochopeno v jednoduchém uspořádání. Současně, musel být opuštěn starý ideál masivního epistemiologického spojení mezi determinismem a předvídatelností. Chaotické deterministické systémy dovolují předpověď celkových zákonitostí – například jestliže můžeme identifikovat jejich podivné atraktory – ale detailní předpověď už není. Jsou zde implikace pro všechny formy determinismu.

Popravdě, odkaz těchto výzkumů přinesl to, že přinejmenším v epistemiologickém úrovni, dichotomie mezi deterministickými a indeterministickými (neurčitými) systémy není absolutní. V 19. století se rozšířil překvapující objev, že statistická analýza může přinést předpověditelné výsledky, například v termínech určitých frekvencí rozdělování výdajů. (Patrně se toto překvapení nedotklo pojišťovacích společností, které po určitý čas počítaly své prémie na základě, například, průměrné míry úmrtnosti.) Nyní víme, že deterministické modely mohou mít výsledky rozloženy v jak náhodném tvaru, jako bychom si házeli korunou. Takže jsme došli k plnému kruhu: problematické modely mohou přinášet pravidelnost a deterministické modely mohou přinášet nepravidelnosti.

Nakonec, varování: chaos a nelinearita může být nebezpečná v tom, že je viděna jako výsledek všeho. Nekritické používání znalosti „efektu motýlích křídel“, suše jednoduché uplatňování jako „život je podivný atraktor“, hrozí obrácením teorie chaosu v nový mysticismus. Může to být užitečné metodologické pravidlo, hledat podivný atraktor, když se zdá, že se Příroda (nebo, řekněme burza cenných papírů) chová náhodně (čas ukáže), ale odvolávat se obecně na znalost „atraktoru“ není všeosvětlující. Nelineární teorie dynamických systémů se řeší matematickými modely. Zda a do jaké míry mají tyto modely podstatnou vysvětlovací hodnotu mimo matematiku, záleží zásadně na konkrétní interpretaci proměnných a jejich vzájemných vztazích, v cremes v promísení, v propojení v jakých jsou modely nabídnuty.(6)

* Mal•thusian /m l ' ju z n/ příd. jm. - odkazuje na teorii Thomase Malthuse která říká, že od té doby, co populace přirozeně rostou rychleji než zásoby jídla, nedostatek kontroly nad jejich růstem povede k pohromě

1. citováno z recenze knihy Jamese Gleicka, kterou napsal John Frank. (podívejte se na bod 2). Recenze se objevila spolu s odezvou Gleika a zpětnou odezvou v The Mathematical Intelligencer, vol. 11, 1989, pp. 65-69.
2. James Gleik, Chaos: Making a New Science, New York 1987.
3. Řady začaly s článkem Iana Percivala nadepsaným 'Chaos: A Science for the Real World', New Scientist, vol. 124, 1989, pp. 42-47. (Tvrzení titulu se zdá být jaksi

předčasné.) Následující články řeší matematické aspekty chaosu a dynamiku kapalin, počasí, solárního systému, chemických reakcí a živých systémů.

4. Ian Stewart, Does God Play Dice?, Oxford 1989. Ačkoli ne odporně technická, tato kniha není pro ty, kteří jsou na matematiku hákliví. Čtenáři by také měli být připraveni na autorovy spíše dráždící odbočení do nuceného „veselého“ stylu.
5. Lorenz ukazuje zjednodušený model atmosférického proudění skládajícího se z tří odlišných rovnic. Prozkoumáním tohoto modelu na jeho počítači, vypozoroval všechny známky chaosu. Lorenz publikoval své výsledky v Journal of the Atmospheric Science, vol. 20, 1963, pp. 130-41.
6. Tento článek byl napsán v konzultaci s řadou expertů na tomto poli. Jsem vděčný za jejich trpělivost ve vysvětlování mnoha technických aspektů (stále a stále dokola) a ve zbavování mě mých nedorozumění. Jakékoli chyby, které zůstaly beru na svou vlastní odpovědnost.

Děkuji za překlad Bc. Janě Stehlíkové.