Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Leszek Wojtczak

Chaos a fantazie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 39 (1994), No. 2, 108--112

Persistent URL: http://dml.cz/dmlcz/138063

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1994

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.

This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* http://project.dml.cz

Chaos a fantazie

Leszek Wojtczak, Lodž

Prof. Dr. habil. Leszek Wojtczak, čestný doktor univerzit v Yorku a Lyonu, profesor teoretické fyziky a vedoucí katedry fyziky pevných látek Lodžské Univerzity (Uniwersytet Łódzki), t. č. též profesor Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne, přednesl jako rektor Lodžské univerzity na zahájení akademického roku 1991/92 inaugurační projev, určený široké akademické veřejnosti. Odráží se v něm jeho zkušenosti ze širokého záběru jeho vlastní vědecké práce (teorie pevných látek, teorie atomů a molekul, kvantová chemie, biofyzika, fyzikální chemie, teorie elementárních částic, matematická fyzika). Je autorem, resp. spoluautorem 2 knih o kritických jevech [1], [2] a více než sta původních prací v mezinárodních fyzikálních časopisech.

Jeho osobitý pohled na vývoj fyziky může být i pro českého čtenáře zajímavý a podnětný k úvahám i diskusím na nadhozená témata.

Současná fyzika si občas vypomáhá termíny vzatými z obecného života, jako např. vůně, barvy apod. Nejinak je tomu i v tomto článku, kde si autor definuje pojmy „chaos" a „fantazie", což umožní výroky, které by jinak mohly v běžné mluvě znít problematicky. Autor tyto pojmy definuje takto: „... chaosem nazývám takové řešení v uvažované teorii, které na určité úrovni parametrizace je formou hierarchie struktury dynamického uspořádání. Fantazie, to je pro mne taková struktura geometrie, která odpovídá fyzikální realitě, avšak zůstává podřízena zákonům lineárních operací." Blíže viz text článku.

Poznamenejme ještě, že prof. Wojtczak má úzký vztah k české fyzice — již po 30 let spolupracuje a publikuje společné práce s českými kolegy.

Původní znění autorova projevu bylo otištěno v časopise Lodžské Univerzity Kronika U. L., Nr. 6, listopad 1991. Poznámky překladatele byly konzultovány s autorem.

Přeložila Olga Valentová.

[1] Kociński J., Wojtczak L.: *Zjawiska krytyczne*. Uniwersytet Łódzki, 1978. Skrypt dla studentów IV i V roku fizyki.

[2] Kociński J., Wojtczak L.: *Critical Scattering Theory. An Introduction*. PWN–Polish Scientific Publishers, Warszawa, Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam–Oxford–New York, 1978.

Úkolem vědy je podle běžně přijatého názoru odkrývání přirozeného řádu věcí. Silnou tendenci k filozofickému přesvědčení o speciální roli symetrie jako odrazu krásy a dokonalosti v geometrické harmonii podpořila fyzika objevy univerzálních přírodních zákonů a zformulováním teorií, které umožňují předpovědět podmínky pro pozorování nových vlastností a jejich využití.

Fyzika takové názory ovšem nepodporuje zcela bez výhrad, tzn. nelze mluvit o výlučné nadřazenosti symetrie. Řada jevů se totiž realizuje v podmínkách, kdy právě je symetrie alespoň částečně narušena a realitě tedy odpovídají teprve stavy se zlomenou symetrií. Objev chaosu, který vlastně není v rozporu s pořádkem, ale představuje, dá

Prof. Dr. habil. Leszek Wojtczak (1939), Uniwersytet Łódzki, Katedra Fizyki Ciała Stałego, ul. Pomorska 149/153, 90-236, Łódź, Polska.

se říci, jeho bohatší, pozoruhodnější formu, dovoluje fyzice zkorigovat některé zakořeněné interpretace a přesvědčit se, ne poprvé v historii vědy, že Ten Který Jest dává prostřednictvím fyziků nahlédnout do stále nových hlubších aspektů svého záměru stvoření. Fantazie není v rozporu s realitou, ale jako svérázná struktura geometrie, v níž se realita obráží, zdůrazňuje přirozenou snahu o transcendentní dokonalost.

Na základě klasické mechaniky jsme si zvykli vidět věci tak, že trajektorie tělesa je přesně popsána v daném okamžiku řešením pohybových rovnic, pokud známe přesně počáteční podmínky v prostoru souřadnic a v prostoru rychlostí. Relativistická mechanika sice naše představy o prostoru změnila a změnila též tvar pohybových rovnic, avšak jejich deterministický charakter zůstal nezměněn.

Zdálo se tedy, že popis chování těles v budoucnu závisí pouze na naší znalosti jejich minulosti, tj. na zadání počátečních podmínek. Donedávna se zdálo, že přesnost numerických výpočtů potřebných k řešení je dána pouze možností výpočetní techniky, a výsledky se proto musí dostavit spolu s rozvojem nových generací počítačů. Je proto pikantním faktem, že to vlastně byly počítače, které nám poskytly empirické zdůvodnění chaosu.*) Místo potvrzení deterministického chování ukázaly, že existuje hranice numerické přesnosti, pod kterou se projevuje subtilní povaha věcí, nový to zvrat ve vnitřní struktuře teorie — fyzikální realita se jeví tak, že se její stav nedá předvídat, a to ani na základě deterministických pohybových rovnic.**)

Bylo též nutno počkat si až na éru počítačů, aby se teprve před 13 lety odkryla univerzální vlastnost iteračních rovnic spočívající v tom, že výskyt souboru hodnot parametrů rovnic, pro něž postupné iterace nekonvergují k očekávané hodnotě, ale chaoticky oscilují v určitých mezích, nejenže nezáleží na přesnosti výpočtů, ale ani na tvaru rovnice. Jev má proto charakter dynamického stavu rovnováhy a zjištěná univerzálnost pak vede k hlubšímu zamyšlení.

Pohyb planet, komet a jiných nebeských těles ve sluneční soustavě je ideálním příkladem jevu, který je možno popsat deterministickými pohybovými rovnicemi s dobře popsanou gravitační interakcí a současně jevu, s nímž se ve fyzice zřídka setkáváme, že je totiž přinejmenším přibližně možno zanedbat tlumení, tření a jiné formy energetických ztrát. Energie záleží na poloze a rychlosti těles a vystupuje v pohybových rovnicích jako parametr. Tato parametrizace tu má speciální úlohu. Sám parametr rovnice závisí na počátečních podmínkách a v závislosti na hodnotě tohoto parametru je zase možno dostat různé typy řešení.

V případě nebeské mechaniky se dostávají eliptická řešení (se zápornou energií) popisující pohyb planet po uzavřených drahách. Parabolická řešení (s nulovou energií) a hyperbolická řešení (s kladnou energií) popisují neuzavřené trajektorie. Komety, které přijdou z Vesmíru do sluneční soustavy, se do něho vracejí. Fascinujícím jevem jsou změny trajektorie, spočívající v uvolnění se z uzavřené dráhy a v přechodu tělesa

*) To znamená, že obrátily pozornost k otázce, zda některé potíže, na něž se při numerických výpočtech narazilo, nemají hlubší příčiny, o nichž je řeč hned v následujícím textu. Pozn. překl.

**) Autor zde a v dalším odstavci opírá své vývody o výsledky některých matematických studií, signalizujících možnost takových prognóz. Rozpracování této problematiky je teprve v začátcích. Pozn. překl.

na dráhu otevřenou. Má to prosté vysvětlení za předpokladu, že těleso bylo v oboru možných změn typu dráhy, jež mohou nastat vlivem nevelké poruchy počátečních podmínek vyvolaných fluktuacemi okolního vesmíru. Změna trajektorie poruší lokální rovnováhu a její nové ustálení je zjevně novou, i když sotva znatelnou fluktuací, dostatečnou pro způsobení změn v jiné části vesmíru. Uvedený jev je příkladem vyvolání velkých, často nevratných, silně rozrůzněných výsledků zanedbatelně malými změnami výchozích parametrů.

V časové škále lidského života se pohyb nebeských těles zdá být dokonale regulární. Ale pozorovaný pořádek kosmu se ukazuje být pouze zdánlivým z hlediska velké časové škály (již miliony let). Ukazuje se, že tehdy pohyb komet a dokonce i planet, je pohybem chaotickým. Objevy z posledních let ukazují na chaotické fluktuace orbitů Země a Marsu způsobené rezonancí období jejich precese. Podobná situace nastává s Merkurem, Venuší i Jupiterem. Fakt, že pohyb ve sluneční soustavě je chaotický, nám nedovoluje předvídat jeho vývoj na více než 100 milionů let, takže chování vesmíru v makroměřítku se nedá předvídat.

Existence chaosu se projevuje v mnoha různorodých jevech. Meteorologie zná modelové soustavy diferenciálních rovnic, které popisují cirkulaci atmosféry okolo zeměkoule. Určení trajektorie vzdušné hmoty v budoucnu, tj. prognóza počasí, se opírá o úplnou znalost situace v počátečním čase.

Znamenitým objektem výzkumů v oblasti nelineární dynamiky je laser, neboť může být lehce uveden do stavu chaosu v rámci kontrolovaného experimentu. Nejfyzikálnějším příkladem jsou fázové přechody, jinak změna skupenského stavu, bifurkace, obrazně řečeno, s níž se lze často setkat v denním životě. Teorie chaosu mohou být rovněž aplikovány na ekonomické jevy. Dávají informaci o řešení makléřských rovnic čili o fungování bankovní burzy. Je totiž možno přijmout, že cena akcie podniku je určena pomocí nelineárních rovnic vzhledem k jistým tržním proměnným s parametrem charakterizujícím stav podniku. Pro jisté hodnoty toho parametru jsou řešení stabilní, čili ceny jsou stálé. Existují ale takové meze jeho hodnoty (takový stav podniku), kdy řešení jsou chaotická, tzn. cena akcie chaoticky fluktuuje v krátkém časovém úseku. To je příklad krachu na burze. Hypotéza objasňující tento jev byla předložena fyziky po krachu v r. 1987, který zaskočil newyorskou burzu.

Vzpomínaná nelinearita rovnic má v mnoha fyzikálních teoriích fundamentální význam. Pro problém chaosu je podstatná speciálně vzhledem k druhému aspektu úvah o pojmu chaosu a fantazie v souvislosti s hierarchií uspořádávání jako popření redukcionizmu.

V minulém desetiletí se rozvinula oblast výzkumů nazvaná synergetikou, která věnuje systematickou pozornost vzájemné interakci částí systému, vedoucí k samovolnému uspořádání vlivem kolektivní interakce. Objektem synergetických výzkumů jsou jevy popsané nelineárními rovnicemi, které se v systémech mnoha částic projevují dvojím způsobem: jednak vzájemnou interakcí, která nerespektuje korelační efekty mezi částicemi a zachovává individualitu částic, jednak interakcí, která nutí částice ke kolektivnímu chování, což umožní samoorganizaci a částice tak ztrácejí svou individualitu a začínají se uspořádávat tak, že celek je něčím víc než jen pouhým součtem svých částí. Tato okolnost má velký význam, speciálně vzhledem k dříve zmíněnému

redukcionizmu. Ten je totiž jejím výrazným popřením, redukcionistické rozložení celku na části se v jejím světle stane nemístným.

Jev kolektivní organizace, při níž uspořádaná struktura vzniká z beztvárného útvaru, je výsledkem subtilní souhry částí synergetického systému. Při ustálených okrajových podmínkách částice směřují ke stavu dynamické rovnováhy, kterou je možno popsat pomocí parametrů uspořádání. Změna parametrizace vede k nestabilnosti řešení a ustavení systému s ohledem na volbu bifurkačních cest, vedoucích k novým rovnovážným stavům. Tak se tedy cestou postupných bifurkací realizuje stav chaosu, daný jako jistá forma uspořádání. Tak tedy volba jedné ze dvou od sebe různých možností hraje určitou roli při přechodu k chaosu.

Příkladem zdůrazňujícím roli nelineárních rovnic v procesu samoorganizace je model popisující jev srdečního tepu. Biologie nás učí, že existují dva vnější činitele, které jsou nutné a postačující k vyvolání srdečního tepu: vhodné elektrické impulzy, přiváděné do vláken srdečního svalu nervy sympatického systému, a přiměřený tlak krve v cévách, který je regulován napětím svalu, činností ledvin a především samotnou prací srdce, kterou je možno charakterizovat na čase závisejícím elektrochemickým potenciálem na buněčné bláně (elektrokardiogramem). Krevní tlak vystupuje v rovnicích jako parametr, a tedy v závislosti na jeho velikosti mohou být řešení různého typu. Pro příliš nízký nebo vysoký tlak ukazují řešení na periodické kmity okolo rovnovážné polohy, odpovídající chvění srdce. V jistém rozsahu tlaků popisují řešení srdeční tep jako kmity okolo dvou rovnovážných poloh s relaxačními přeskoky mezi nimi, stažení a roztažení současně s oscilacemi okolo těch dvou konfigurací odpovídajícího napětí srdečního svalu a jeho uvolnění.

Tlak, který je v teorii parametrem, je zároveň výsledkem řešení, podle typu řešení dochází pak k jeho realizaci, a tedy samouspořádání či samoorganizaci procesu uspořádání s hysterezí stavu svalového vlákna v závislosti na potenciálu srdeční buněčné blány. Rytmický přeskok od stažení do roztažení srdce je efektem, který ilustruje onu bohatší strukturu celku ve srovnání s prostou sumou jeho částí dvou monostabilních stavů složených v jeden stav bistabilní. Třeba též brát v úvahu, že při skládání se právě zdůrazní smysl nelinearity. Možno též krátce říci: lineární fyzika znamená prosté sčítání (superpozici), nelineární fyzika dává logické operaci skládání docela jiný charakter, operace prostého sčítání přenáší jakoby do jiného prostoru.

Uvedený příklad ukazuje na rozdíl mezi srdečním tepem a chvěním srdce. Biologicky je to zásadní rozdíl, a to tak velký jako rozdíl mezi životem a smrtí. Pro fyzika naproti tomu je to pouze rozdíl mezi stavem monostabilním a bistabilním, ale ve skutečnosti jde o něco hlubšího. Je to totiž rozdíl mezi fyzikou lineární a nelineární, což odpovídá jakoby dvěma epochám v rozvoji fyziky. Z hlediska úvah v této přednášce se tu chaos jeví jako hierarchicky uspořádaná struktura tepu srdce v samoorganizujícím se funkčním cyklu.

Hledání přemostění mezi lineární a nelineární fyzikou je vlastně doménou fantazie. Dosahuje se toho budováním geometrických struktur, ve kterých je nelinearita reprezentována deformací časoprostoru, chápanou jako průmět metriky s fluktuující jednotkou míry v geometrii uspořádaných úseků. Experimentální verifikace je zde ještě

obtížná, a tedy je před námi ještě jakoby zakryta harmonie geometrických vztahů lineární reality.

Myslím, že se nyní mohu pokusit o přesnou definici základních pojmů uvedených v názvu přednášky. Tak tedy chaosem nazývám takové řešení v uvažované teorii, které na určité úrovni parametrizace je formou hierarchie struktury dynamického uspořádání. Fantazie, to je dnes pro mne taková struktura geometrie, která odpovídá fyzikální realitě, avšak zůstává podřízena zákonům lineárních operací.

Chaos nadřazený fantazii vzniká díky spontánní evoluci stochastického časoprostoru. Děje se to ale po nemnoha cestách, nazývaných scénáři, které se řídí jakýmisi atraktory, tj. stavy dynamické rovnováhy, které se vztahují k jistým oblastem fantazie nezávisle na fyzikálním obsahu, daném parametrizací: stanou se cestou do chaosu vedoucí často přes chaos. Jedním ze známých scénářů je bifurkační sekvence čili spojitě se opakující volby, kterou je těžko nebo přímo nemožné předvídat.

Ještě odbočení jazykové. Názvy „chaos" a „uspořádání" nebo „hierarchie uspořádání", jakož i „fantazie" a „reálnost" se jeví jako antonyma. Může být, že tak byly vybrány úmyslně. Ale neztrácí smysl slovní hříčka, že filozofická „tendence k uspořádání" zůstává „fantazií", pokud nepřistoupí na „realitu", která je „chaotickou" deformací vysublimovaných představ.

Na závěr bych se chtěl vrátit na počátek. Ke Knize Stvoření. K velkému třesku, jemuž člověk připsal počáteční hodnoty kosmologických modelů na počátku našeho věku v naději, že nalezl klíč k záhadám vesmíru. Avšak koncem našeho století odkryl dosti závažný fakt, že osud vesmíru nelze předvídat na základě obecně známých teorií. Zjistil navíc, pochopil, že neumí skládat části v celek, že celek je jiný, bohatší než součet částí, z nichž se skládá, a že dokonce věci, a co teprve člověka, není možné zredukovat na jiné věci.

Na prahu nového tisíciletí stojí fyzik před novou epochou fyziky, ale potkává se na své cestě též s velmi speciální bifurkací týkající se vlastního „já": scénářem pýchy a pokory. Uvedené problémy ukazují, jak je možné potkat ony bifurkace náhle, v teorii rozvíjející se podle svých pravidel, když si uvědomíme určitý moment, vlastnost která změní očekávání teorie, přestože do ní i nadále patří a objevila se v rámci její vlastní metodologie.

Současné objevy nás učí fundamentálním zásadám volby. Morální volba se tedy uskutečňuje jaksi za účasti fyziky, anebo právě fyziky. V kontextu fyziky konce dvacátého století stojí člověk před scénářem pokory, v pokoře před Tajemstvím.