

Pořádek, nepořádek, chaos a turbulence

Ing. Václav Uruba, CSc

uruba@it.cas.cz, tel.: 286 588 547

*1957, autor pracuje v Ústavu termomechaniky AV ČR, zabývá se experimentálním výzkumem v oblasti mechaniky tekutin se zaměřením na turbulenci, přednáší na ČVUT.

Souhrn

Článek se zabývá vysvětlením moderního pojetí turbulence, která je chápána jakožto přirozený projev rozlehlého nelineárního dynamického systému, při kterém dochází k jeho samouspořádávání. Tento přístup je konfrontován s pohledem prvních atomistů – epikurejců. Nakonec je turbulentní chování dynamického systému založené na koherentních strukturách zobecněno v kosmologický princip.

Klíčová slova

chaos, turbulence, dynamický systém, koherentní struktura

Proudění vody v řece, mraky na obloze, hořící plamen, hvězdný vesmír – to jsou některé příklady jevů, které můžeme často označit za turbulentní. Turbulence byla vždy fascinující podívanou pro člověka přesto (nebo právě proto) že těžko uchopitelná pro svou variabilitu a složitost. Již od starověku se pokoušeli myslitelé s existencí turbulence vyrovnat, tato snaha pokračuje dodnes, proces poznávání zákonů turbulence nebyl ukončen. Je doprovázen objevy s nečekanými důsledky pro všechny oblasti vědy.

Jedny z prvních známých poznatků o struktuře turbulence v moderní době jsou pozorování proudění tekutin Leonardem da Vincim – viz obr. 1. Leonardo znázornil proudění vody jako „momentku“, kdy turbulentní proudové pole je složeno z mnoha struktur různých velikostí. Působí tak velmi uspořádaně se složitou, zjevně zákonitou strukturou. Dalším historickým příkladem pozorování pravidelné struktury v turbulentním proudu je známá „rudá skvrna“ na Jupiteru na obr. 2. Jedná se vlastně o obrovskou bouři – turbulentní vír, která pravděpodobně trvá již více než 350 let (v roce 1655 byla poprvé pozorována francouzským hvězdářem Cassinim). Jedná se o více-méně stabilní útvar, který však poměrně rychle mění svoji polohu a strukturu v čase. Existence této pravidelné struktury ve vyvinutém turbulentním proudění zaujala nejen hvězdáře, ale i odborníky v oblasti mechaniky tekutin. Inicializovala diskusi na téma pravidelnosti struktury turbulentního proudění.

Snaha o exaktní, matematické uchopení přírodních dějů, která je typická pro moderní vědu, vedla u tak složitých a komplexních dějů, jakou je turbulence, k použití statistických nástrojů. V době, kdy nebyly k dispozici výkonné nástroje typu počítačů, to byla prakticky jediná možnost. Myšlenka použití kovariancí a vzájemných korelací pro popis rozlehlého dynamického systému s fluktuacemi parametrů pochází od A. Einsteina z roku 1914. Tím byl umožněn exaktní výzkum turbulence v tekutinách pro následující období. Bohužel, došlo také k určitému nepochopení a přecenění statistického přístupu v tom smyslu, že samotná podstata turbulence byla ztotožněna s tímto nedokonalým nástrojem poplatným své době. Turbulence začala být považována za synonymum nepořádku, tedy za čistě náhodný proces. Tento názor byl podpořen některými pozorováními, kdy vlivem pohledu zdeformovaného antropomorfními měřítky¹, se proudové pole opravdu jeví jako náhodné. Příkladem mohou být oblaka, která z určité vzdálenosti vypadají chaoticky – obr. 3. Podíváme-li se však na ně

¹ Antropomorfní měřítka jsou taková, která může člověk bez použití speciální techniky vnímat svými smysly.

z větší vzdálenosti, mohou vykazovat pravidelnou strukturu – obr. 4 (snímek z družice). Podobně, při detailním pohledu můžeme objevit skryté pravidelné struktury, např. sněhové vločky, obr. 5.

Známý filosof 17. století B. Spinoza se zabýval pojmy „pořádek“ a „nepořádek“ a došel k názoru, že tyto pojmy nelze považovat za objektivní vlastnosti nějakého objektu, ale za výraz vztahu mezi pozorovatelem a objektem pozorování. Obecně platí, že to, čemu pozorovatel rozumí, označuje jako „pořádek“, čemu nerozumí, to považuje za „nepořádek“. Lehce se tak stane, že velmi složité organizované struktury, které pozorovatel není schopen pochopit nebo pouze sledovat v celé šíři a do všech detailů, potom ohodnotí jako „zmatečné“ a „náhodně se chovající“.

Definitivní zvrat v názorech na turbulenci v mechanice tekutin nastal až v 60. letech minulého století, kdy výpočetní technika vyspěla natolik, že bylo možno provést první přímé numerické simulace proudící tekutiny. Jaké bylo všeobecné překvapení, když se při zadání zcela náhodných počátečních podmínek začaly z proudu postupně vynořovat podivné vírové struktury různých velikostí a tvarů, zjevně zákonitě uspořádané. Tyto první výsledky byly nazývány „bedna červů“ – viz obr. 6. „Červi“ jsou vírové čáry (koncentrovaná vířivost).

Pojem „nepořádek“ lze ve smyslu statistické termodynamiky spojit s pojmem „entropie“ systému. Předpokládá se, že podle druhého zákona termodynamiky je izolovanému systému, který se vyvíjí od jednoho rovnovážného stavu k jinému, vlastní tendence k maximalizaci entropie, dochází v čase ke zvětšování nepořádku a tedy k vývoji systému od stavu pořádku směrem k nepořádku. Problémem je, že pro makroskopická měřítka neexistuje uspokojivá definice entropie, kterou by bylo možno aplikovat na mechanické systémy. Pro prostorově uspořádané struktury, jako jsou například víry ve smykových vrstvách, se zpravidla používá termín „koherence“.

Existence vysoce organizovaných a uspořádaných struktur v turbulentním proudu může být pro někoho překvapením, někdo může zcela odmítnout věřit v jejich existenci, jiní je mohou považovat za něco nezávislého na proudovém poli bez jakékoli souvislosti s turbulencí. Ukazuje se však nade vše pochybnost, že tyto struktury jsou součástí turbulence samé a co víc, jsou jejími základními stavebními kameny. Chování a parametry těchto struktur jsou obecně nepředpověditelné ve smyslu deterministického chaosu (viz např. [3]), každá jednotlivě však vykazuje významnou prostorovou koherenci – uspořádanost. Je omylem spojovat nepředpověditelnost s prostorovou neuspořádaností, při té totiž nelze očekávat existenci dobře definovaných prostorových struktur. Pokud se podíváme na nějaký okamžitý stav turbulentního pole, vidíme soustavu turbulentních vírových struktur, které jsou nepředpověditelné, co se týče jejich fáze (tedy polohy v prostoru), udržují si však svůj geometrický tvar během doby značně delší, než je typická doba ztráty předpověditelného chování. Za těchto podmínek lze při analýze takového proudového pole s úspěchem aplikovat klasický pravděpodobnostní přístup.

Nyní již není obtížná představa turbulence jako synonyma pro pořádek, pokud pořádek chápeme jako existenci v prostoru organizovaných, tedy koherentních struktur. Tradičně byl pojem turbulence často ztotožňován s nepořádkem, laminární proudění bylo synonymem uspořádaného pohybu. Podíváme-li se na tento problém z makroskopického hlediska – antropomorfních měřítek, potom se skutečně turbulentní pohyb může jevit jako náhodný, zvláště pokud vezmeme v úvahu velmi rychlý, dynamický vývoj proudového pole. V mikroskopickém měřítku je tomu však právě naopak – chaotickým se jeví pohyb laminární, který charakterizuje tepelný pohyb částic a turbulence je vysoce organizovaná. Vírové struktury obsažené v turbulenci odpovídají řízenému, synchronizovanému pohybu obrovského množství molekul. Při tomto pohledu je přechod laminárního proudění k turbulentnímu procesem samouspořádávání proudící tekutiny.

Toto pojetí turbulence není zcela nové, je jen znovu objevené. Již v prvním století před naším letopočtem vyslovil podobný názor římský básník a filosof Titus Lucretius Carrus. První atomisté – epikurejci byli posedlí problémem turbulentního proudění, v Lucretiově době byla turbulence hlavním inspiračním zdrojem při zkoumání přírody. V Epikurově pojetí atomismu se předpokládá, že se pohyb atomů děje podle zákonů determinismu, podle nutnosti, atomy se však mohou od této nutnosti samovolně odchylovat. Odchylka clinamen² je podle Epikura projevem „svobodné vůle“ atomů, tím je oslabena absolutnost determinismu. Lucretius pokládá právě clinamen za mechanismus vzniku vírových útvarů v turbulentně proudící tekutině, tyto víry v nejrůznější podobě jsou potom základními kameny, ze kterých je vytvořen náš svět. Clinamen zavedený Lucretiem ad hoc byl často kritizován jako jakýsi umělý prvek. V dnešním pojetí matematické teorie stability se běžně používá pojem „infinitesimální porucha“, která má náhodnou povahu. Jedná se v podstatě o obdobu clinamen.

Atomům je podle Lucretia vlastní pohyb, v kombinaci s clinamen se potom stává mechanismem vzniku těles:

Jestliže atomy klesají v prostoru kolmo
svou vlastní vahou, tu na místě neurčitém
a za neurčito se vychýlí maličko z dráhy –
jen tolik, aby ten směr byl trochu jiný.
Jinak by padalo všecko, té odchylky nebýt,
hlubinou prázdna dolů jak dešťové kapky,
vrážet a strkat by do sebe nemohly prvky
a příroda nikdy by nebyla stvořila pranic.

Lucretius, T.C., 1. stol. př. n. l., [1].

Lucretius považoval vesmír za „turbulentní pořádek“, který vznikl z počátečního chaosu pomocí mechanismu založeném na působení clinamen.

Počáteční, chaotický stav lze potom ztotožnit s tím, co nyní nazýváme laminární stav proudící tekutiny. Všeobecně přijímané tvrzení:

„Z laminárního proudění vzniká turbulence“

můžeme tedy přeformulovat do tvrzení (poněkud provokativního):

„Pořádek (tj. turbulence) vzniká z chaosu (tj. z laminárního stavu)“.

Toto tvrzení můžeme ještě dále zpřesnit a konkretizovat:

„Působením vnějších vlivů se z chaosu vynořují koherentní struktury“.

Tato věta popisuje termodynamický mechanismus vzniku a vývoje vesmíru, života v něm a třeba i vývoje lidské společnosti.

Teorii koherentních struktur z hlediska termodynamiky rozpracoval Prigogin [2].

Mechanismus procesu vzniku koherentních struktur je obecně založen na nestabilitě nelineárního rozlehlého systému, kterým je v našem případě tekutina (může jím však být i celý vesmír). Chaotický tepelný pohyb molekul můžeme charakterizovat velmi širokým spektrem frekvencí fluktuací parametrů. V dynamickém systému jsou však zesilovány pouze určité frekvence, jejich konkrétní hodnota je dána vlastnostmi systému a jeho stavem. Ten je

² také parenklinis

určen působením vnějších vlivů – okrajovými a počátečními podmínkami a množstvím energie i způsobem, kterým je do systému dodávána. Zesilováním vybraných všudypřítomných poruch mikroskopických rozměrů tyto útvary pronikají do makrosvěta a berou na sebe podobu koherentních struktur v tom nejširším slova smyslu. Nutnou podmínkou tohoto procesu je přebytek volné energie, která musí být v systému přítomna nebo do něj dodávána. Tak je systém udržován v stavu vzdáleném od rovnovážného, tím je umožněn jeho dynamický vývoj.

Proces vzniku koherentních struktur se opakuje na mnoha různých úrovních. Vznikající struktury mohou být velmi složité a komplexní, typicky mají fraktální charakter – koherentní struktury na určité úrovni jsou složeny z koherentních struktur na úrovni nižší jakožto prvků. Prvky tekutinového dynamického systému jsou molekuly tekutiny. Všechny molekuly dané tekutiny jsou v principu identické, vzájemně záměnné. Systém, který se skládá z přesně definovaných, stejných prvků se chová v definovaných situacích opakovatelným způsobem, alespoň ze statistického hlediska. Poněkud jiná situace nastává, když prvky systému jsou složitější subsystémy. Ty již nemusí být nutně všechny stejné, u složitých systémů, např. biologických, je rozdílnost prvků prakticky jistotou. Tato variabilita vnáší do chování systému další nejistoty, které však nemusí nutně představovat další prvky chaosu, v konečném efektu mohou mít naopak stabilizační účinek.

Při dostatečném množství prvků systému lze aplikovat teorii pravděpodobnosti. Variabilita prvků systému a jejich konkrétní vzájemná konfigurace může vyústit v nové vlastnosti systému. Ty jsou obecně ovlivněny jeho počátečním stavem a okrajovými podmínkami. Do počátečního stavu můžeme zahrnout i vlastnosti všech prvků tvořících systém v nějakém okamžiku, okrajové podmínky obsahují informace o komunikaci a interakcích zkoumaného systému s okolím.

Stavebními prvky našeho světa jsou „koherentní struktury“ na různých úrovních. Za „koherentní struktury“ můžeme považovat jednotlivé atomy, molekuly ale také jakákoli tělesa, planety, galaxie. „Koherentními strukturami“ v tomto obecném smyslu jsou tedy i živoucí bytosti. Měřítkem složitosti koherentních struktur je jejich „komplexita“, je však obtížně kvantifikovatelná.

Daní za vzrůstající komplexitu koherentních struktur jsou prvky náhodnosti. Náhoda vstupuje do procesu tvorby koherentní struktury jen v přesně definovaných momentech – v bifurkačních bodech (tj. v bodech „rozdvojení“ či „větvení“). V bifurkačním bodě se na základě náhodného, velmi slabého a za jiných okolností nevýznamného impulzu rozhoduje o dalším osudu dynamického systému, nebo jeho části. Další vývoj se děje podle některého z předem daných scénářů. Tato danost souvisí s okrajovými a počátečními podmínkami jakož i se skladbou systému. Možné cesty z daného bifurkačního bodu jsou zpravidla dvě, může jich však být i více, jejich počet se může blížit i nekonečnu. Jedná se o „jednosměrnou cestu“ na jejímž konci je dříve nebo později další bifurkační bod. U dynamického systému vycházíme z určitého přesně definovaného počátečního stavu konkrétního systému, který si „vybírá“ svou budoucnost. Tu může ovlivnit svým chováním v blízkosti bifurkačního bodu. Otázkou však je, zda je schopen analyzovat situaci natolik, aby mohl vědomě ovlivnit vývoj žádaným směrem.

Situaci v bifurkačním bodě můžeme demonstrovat na známé scéně z pohádky „Císařovy nové šaty“, kdy se císař prochází městem nahý, ale nikdo to nechce vidět. Tato situace je nestabilní, je bifurkačním bodem chování dynamického systému – království. Náhodný, za jiných okolností bezvýznamný impulz, výkřik dítěte „císař je nahý“, radikálně změní chování celého systému.

Takto pojatý proces dynamického vývoje turbulence lze povýšit na obecně platný termodynamický mechanismus vývoje libovolného dynamického systému, i vesmíru, tedy na kosmologický princip.

Hypotetický okamžik vzniku vesmíru – „velký třesk“ je charakterizován množstvím elementárních částic (tj. skutečně elementárních – snad kvarky?) a energie, vše koncentrované v zárodku prostoru a „dokonale“ uspořádané, homogenní, komplexita systému je v této chvíli minimální. Za těchto silně nerovnovážných podmínek vesmír začal expandovat, vytvářely se první koherentní struktury, kterými byly „elementární částice“ jak je všeobecně chápeme – elektron, proton, neutron, ... – ty můžeme považovat za koherentní struktury na nejnižší úrovni. Proces vytváření koherentních struktur pokračoval na vyšších úrovních – vznikaly postupně molekuly, krystaly, shluky hmoty, planety, galaxie, až vznikl nám známý vysoce strukturovaný vesmír. Proces vývoje a strukturování pokračuje neustále na všech úrovních.

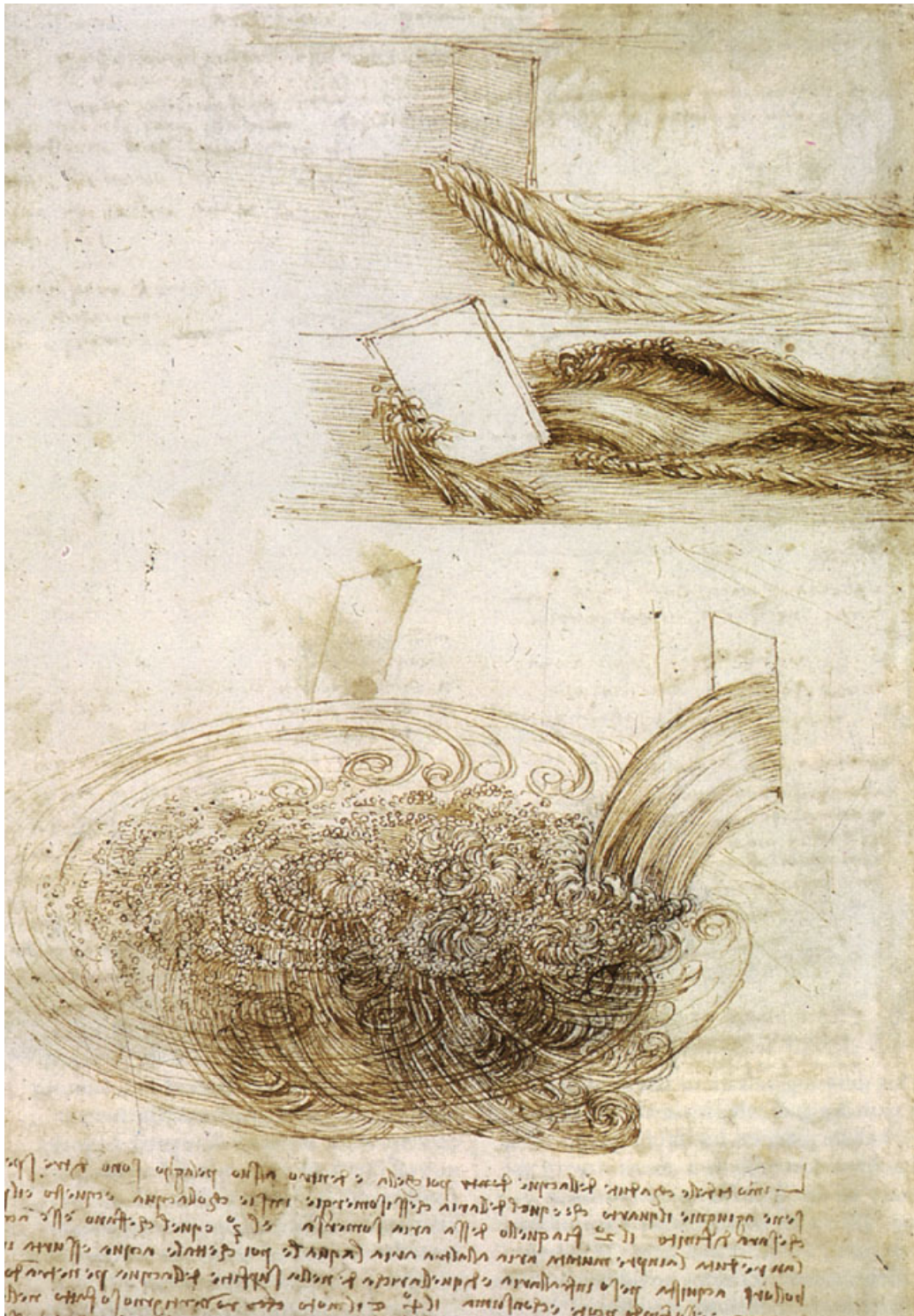
Stav na počátku v době „velkého třesku“ lze charakterizovat jako absolutní chaos – vysoká koncentrace elementárních částic bez zjevné struktury, „téměř“ homogenní. Postupně, se vznikem koherentních struktur, se vytváří pořádek. Roste složitost, komplexita a mnohaúrovňovost vesmíru. Každá z úrovní se vyvíjí, komplexita vzrůstá na každé úrovni, zároveň se jednotlivé úrovně vzájemně ovlivňují, dochází k interakcím mezi jednotlivými koherentními strukturami na jedné úrovni i mezi úrovněmi.

Součástí systému koherentních struktur ve vesmíru je i člověk jako bytost. Lidský mozek (obr. 7) můžeme považovat podle současných znalostí za nejkomplexnější a nejlépe organizovanou strukturu ve vesmíru. Je strukturovaný na mnoha úrovních, má fraktální charakter, velmi složitou, komplexní vnitřní strukturu, obsahuje však také prvky náhodnosti – každý mozek je jiný. Vykazuje tedy všechny znaky „turbulentní koherentní struktury“.

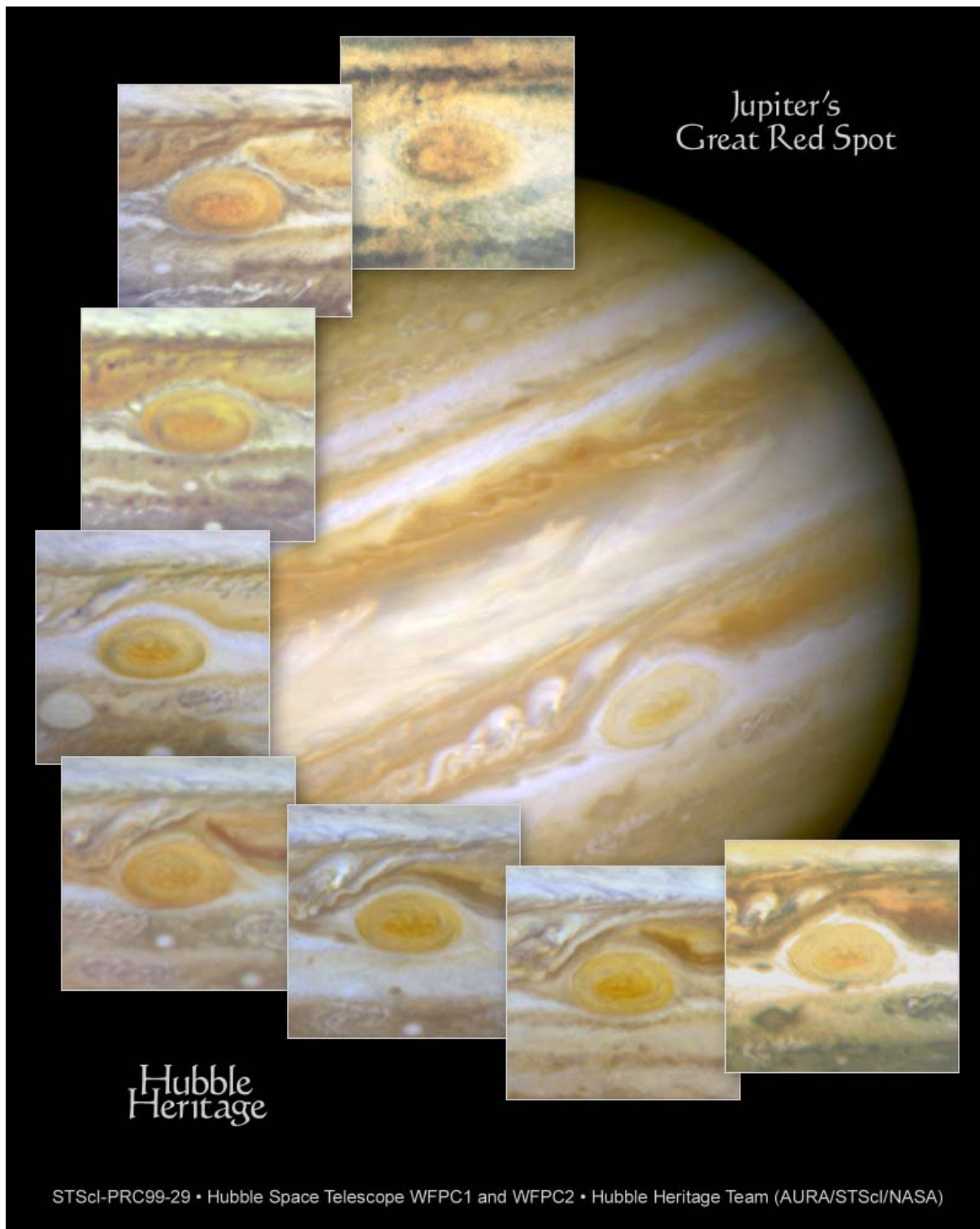
[1] Lucretius, T.C., 1. stol. př. n. l., „De Rerum Natura“ (O povaze světa)

[2] Prigogin I., Stengers I., 1984, „Order out of chaos: Man's new dialogue with nature“, London, Heinemann.

[3] Uruba, V., 2005, „Náhoda v exaktní vědě“, Essentia, <http://www.essentia.cz>.



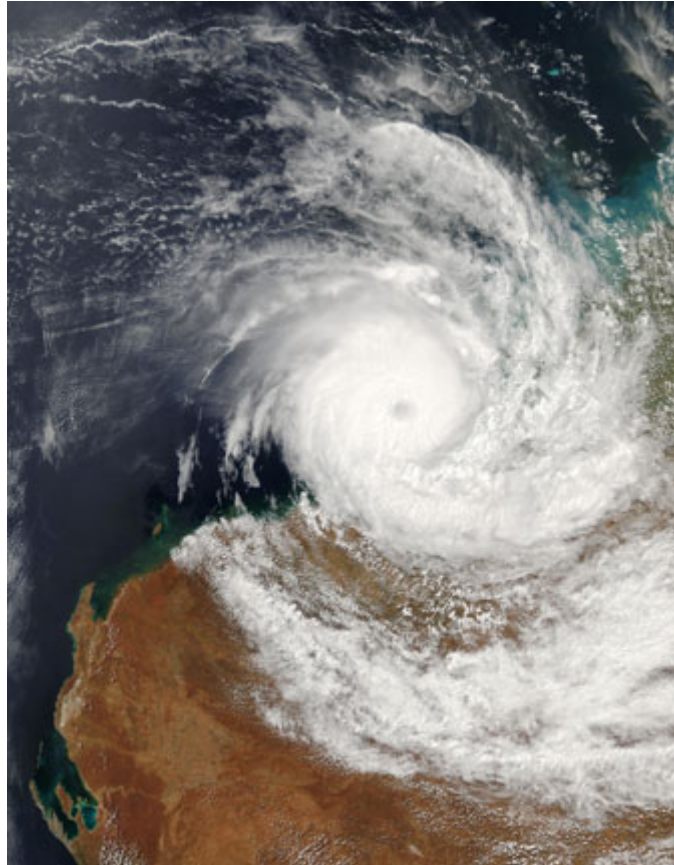
Obr. 1 – Zobrazení turbulentního proudění včetně koherentních vírů
(Leonardo da Vinci, 15. století)



Obr. 2 – „Rudá skvrna“ na Jupiteru, její stabilita a proměnlivost
(zdroj: <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/>)



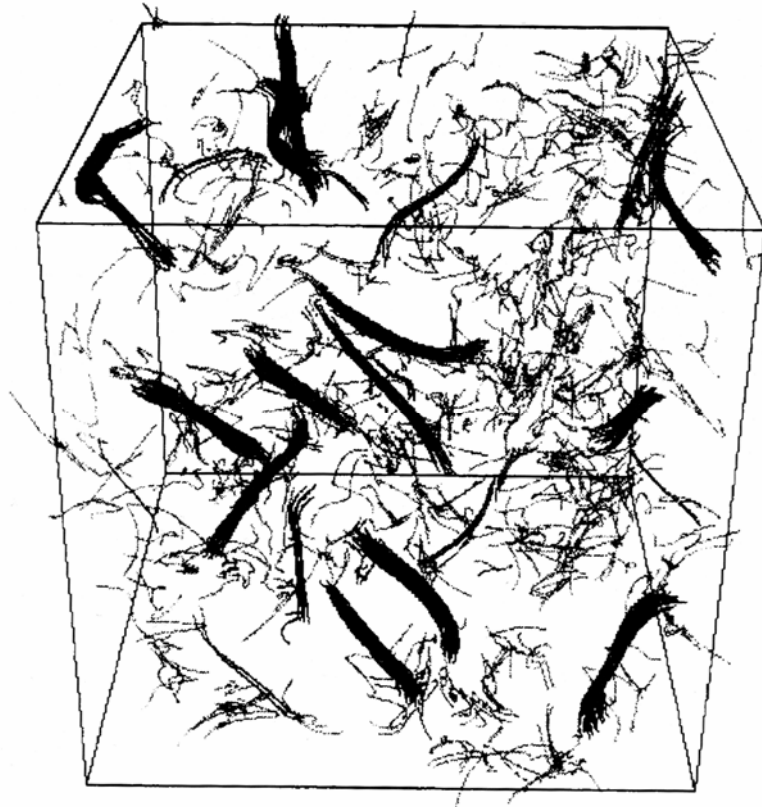
Obr. 3 – Typická fraktální „chaotická“ struktura koherentních struktur v atmosféře na „středních“, antropomorfních měřítkách
(zdroj: <http://user.cs.tu-berlin.de/~bertramp/>)



Obr. 4 – Cyklonální proudění v atmosféře – typická koherentní struktura na planetárním měřítku
(zdroj: <http://antwarp.gsfc.nasa.gov/>)



Obr. 5 – Sněhové vločky – typické koherentní struktury v atmosféře na mikroskopické úrovni
(zdroj: <http://www.its.caltech.edu/~atomic/snowcrystals/>)



Obr. 6 – Koherentní víry v homogenní, isotropní, stacionární turbulenci – „bedna červů“
(zdroj: Frish, U., 1995, „Turbulence“, Cambridge University Press)



Obr. 7 – Nejkomplexnější známá „koherentní struktura“ – lidský mozek
(zdroj: <http://lbc.nimh.nih.gov>)