

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Karel Vacek
Život a symetrie

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 38 (1993), No. 1, 1--6

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138711>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1993

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>

Život a symetrie

Karel Vacek, Praha

Úvod

Se symetrií se setkáváme v našem každodenním životě. Obdivujeme ji v přírodě a také u nejrůznějších předmětů (například u koule), nacházíme ji u hvězd, vodních kapek či v krystalech. Stejně i svět živočichů a rostlin nás obklopující má svoje symetrie, i když například symetrie květu či motýla již není tak dokonalá, jako je tomu například u krystalu. Ovšem v této stati nechceme jen hovořit o symetrii předmětů, ale o mnohem fundamentálnější symetrii — o symetrii těch základních zákonů, které pronikají všemi pochody živé přírody nás obklopující.

Známý filozof Baruch Spinoza suo tempore (1666) napsal: „Nepřipisuji přírodě ani krásu, ošklivost, pořádek ani zmatek. Je to dáno jen zorným úhlem našich představ, že říkáme, že věci jsou krásné či nevzhledné, uspořádané či chaotické.“ Myslím, že to i výstižně charakterizuje problémy našeho současného poznání přírody.

Příroda a symetrie

Většinou se vždy díváme na symetrii jako na dokonalost určitého druhu. Vlastně to připomíná starou ideu Řeků o dokonalosti kruhů. Pro ně bylo přímo strašlivé si představit, že orbity planet nejsou kruhovitě.

Avšak co je vlastně symetrie? Problém určení symetrie je jedním ze základních problémů fyziky. Použijeme-li přibližně definice Weilovy [1], můžeme říci, že předmět je symetrický, jestliže s ním můžeme udělat něco, po čemž bude vypadat přesně tak, jako vypadal předtím. Položme si otázku: Co lze udělat s fyzikálním jevem či situací, která vznikne při pokusu, aby se získal tentýž výsledek?

Stručně shrnuto, soubor operací symetrie, následkem kterých zůstanou různé fyzikální jevy nezměněnými, je tento:

přenos v prostoru,
přemístění v čase,
otočení o určitý úhel,
pohyb po přímce s konstantní rychlostí,
inverze času,
optické zobrazení odrazem,

Akademik RNDr. KAREL VACEK, DrSc. (1930), em. profesor MFF UK, Ke Karlovu 3, 121 16 Praha 2

přeskupení stejných atomů či stejných částic,
záměna hmoty antihmotou.

Všimněme si nejprve otázky, zda fyzikální zákony jsou symetrické při „optickém“ zobrazení odrazem. Předpokládejme proto, že jsme vyrobili dvoje přesně stejné hodiny, které jsou ve vzájemném vztahu jako předmět a jeho obraz v zrcadle. Vznikne otázka: Půjdou hodiny, které jsou předmětem, přesně stejně jako druhé hodiny, které jsou jejich obrazem? Naše intuice a znalost fyzikálních zákonů nám napoví, že ano. Jinými slovy záměnou předmětu za jeho zrcadlový obraz platí pro oba stejné fyzikální zákony, a proto např. v tomto případě nelze rozhodnout, kde je levá a kde pravá strana.*)

Vezměme si další příklady [1]. Je známo, že rovina polarizovaného světla po průchodu roztokem cukru se stáčí, a to napravo. Tím se může zdát, že to by byl způsob, jak určit pravou stranu. Ovšem cukr se získává ze živých organismů, a jestliže ho vyrobíme uměle, pak dostáváme inaktivní racemát. Jestliže do tohoto uměle vyrobeného roztoku cukru dáme bakterie, zjistíme, že po určité době cukerný roztok začne stáčet rovinu polarizovaného světla, ale nyní nalevo. Tento zdánlivě překvapivý fakt lze snadno vysvětlit. Kdysi dávno se u cukrů vše změnilo na „pravostranné“, všechny molekuly v živých organismech, všechny bakterie, atd. Jestliže lze zjednodušeně život vysvětlit jen na základě fyzikálně chemických jevů, potom skutečnost, že u cukrů převládají molekuly jen „pravostranných“ látek se dá pochopit jen tak, že od samého začátku vzniku života náhodně převládl jakýsi druh molekul. Kdysi dávno se organická molekula přesmykla a pravá strana se stala u cukrů převládající. Jakýkoli nový druh živých organismů, který by vznikl v budoucnosti, může přežít jedině tehdy, bude-li schopen se žít pravostrannými cukry. Přitom pro pravostranné molekuly neexistuje zákon zachování jejich počtu — život vede jen k jejich zvětšování. Podstata je totiž v tom, že živé jevy nám nehovoří o nepřítomnosti symetrie fyzikálních zákonů, ale naopak, o univerzalitě přírody a obecnosti začátku všech živých organismů na Zemi.

Vznik života a symetrie

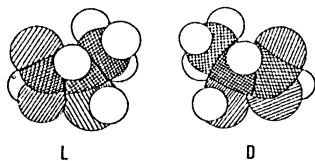
Přistupme nyní k roli uspořádaného stavu v živém světě. Biologické systémy jsou ovšem mnohoúrovňové hierarchické organizace. Primární fyzikálně chemická úroveň se řídí zákony fyziky a chemie, je kontrolována omezeními, vloženými následnými úrovněmi organizace. Biochemická úroveň je vytvořena sérií enzymů, které omezují (limitují) skutečné reakce na sérii těch, které jsou enzymy katalyzovány. Biochemická úroveň je pak kontrolována a organizována omezeními vtělenými do strukturální hierarchie vzrůstající velikosti: organelové, buněčné, mnohobuněčné, a tak dále, což adaptuje systém na jeho okolí a zajišťuje přísun energie a jeho materiálové potřeby. Omezení, která specifikují konstrukci a údržbu této organizace a která byla získána během evoluce systému, jsou „genetickými“ molekulami (DNA či RNA) vložena do zděděné uskladené informace o světě.

*) Dnes již známe metodu, jíž můžeme jednoznačně určit pravou stranu od levé — je to pokus s β -rozpadem atomů Co v silném magnetickém poli.

Fundamentální problém biologie se tedy týká zdroje, přenosu a akumulace této informace. Informace (know-how data) je uložena v systému uspořádanými strukturami či konfiguracemi.

Na první pohled nukleové kyseliny a bílkoviny, které jsou základem života, nijak nevybočují mezi všemi možnými polymerními strukturami. Jestliže se však podíváme na jejich funkce, všimneme si jejich jedinečné vlastnosti — samoreplikace, charakteristické vlastnosti živých systémů [2]. Vyřešení problému původu života je tak uloženo v rozluštění paradoxu — jak polymery s poměrně obecnou strukturou mohou vykazovat tak rozdílnou funkci. Přístupme k tomuto zapeklitému problému z hlediska fyzika. Nechť počáteční „mateřská“ struktura se skládá z k typů monomerů a má délku N . Počet možných druhů různých polymerních struktur, které se dají potom složit, je $p = k^N$. Toto číslo se katastroficky zvětší, je-li $N > 1$. Tak např. pro bílkoviny, které se skládají z 20 druhů aminokyselin a jsou tvořeny asi 100 jednotkami, je $p = 20^{100}$; pro DNA, hlavní nosič dědičné informace, $k = 4$, $N = 10^6$, takže $p = 4^{10^6}$. A tak se problém sebereplikace redukuje na jednoduchý fyzikální problém: Jak může jeden požadovaný druh struktury vzniknout z fantasticky velkého počtu možných struktur? Podle statistiky takováto pravděpodobnost je zanedbatelně malá. Avšak v biologii se takovéto pochody realizují s pravděpodobností rovnou prakticky jedné. Tato vyšší pravděpodobnost je výsledkem biokatalyzátorů či enzymů, které hrají významnou roli v biochemických reakcích a které potlačí stochasticitu v normálních chemických transformacích a tak zajistí jedinečnost biomolekulárních pochodů.

Ukazuje se, že biologické makromolekuly mají jednu specifickou vlastnost, která je fyzikálně odlišuje od ostatních polymerních struktur. Uprostřed minulého století již L. Pasteur objevil, že zrcadlová symetrie je porušena v živých systémech. Bílkoviny (kategorie, která zahrnuje enzymy) jsou zhotovovány jen z „levotočivých“ (označení L) aminokyselin, kdežto nukleové kyseliny (DNA a RNA) obsahují jen „pravotočivé“ (D) cukry. Například obr. 1 zachycuje enantioméry aminokyseliny alaninu — to jest dva izoméry, které jsou navzájem zrcadlovými obrazy. Polymerní struktury obsahující buď je n L izoméry, nebo jen D izoméry se nazývají homochirální.



Obr. 1. Enantioméry alaninu.

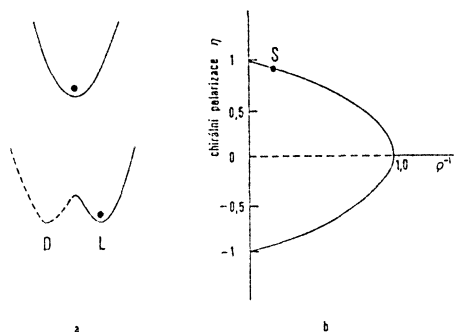
Alanin je jednou z aminokyselin (podobně jako všechny aminokyseliny v bílkovinách — s výjimkou glycinu), která v přírodě existuje jen v levotočivé (L) formě (na obrázku vlevo).

Homochiralita je právě tak významná jako existence samoreplikujícího se systému. Pravděpodobnost tvorby homochirálních polymerních řetězců o délce N je úměrná 2^{-N} a je zanedbatelně malá, když $N \geq 100$. Konečně vedle strukturální vlastnosti homochiralitativy mají biologické polyméry jedinečnou funkční vlastnost, která podmiňuje sebereplikaci, jmenovitě specifickou aktivitu (vysoce selektivní pochod, jímž enzymy upřednostňují jednu reakci před ostatními možnými). Enzymy se stereospecifickou aktivitou upřednostňují reakce, které vedou k molekulám s konkrétním prostorovým

uspořádáním, jako je chiralita. Pokud stereospecifická katalytická aktivita přišla před homochiralitou, pak vývoj mohl postupovat tvorbou heterochirálních prekursorů biopolymérů. Jestliže naopak homochiralita se objevila jako první, jak mohly vzniknout homochirální polymerní struktury v nepřítomnosti stereospecifických katalyzátorů? Odpovíme-li na tuto otázku, dostaneme se na stopu konstrukce scénáře prebiologické evoluce.

Pokud budeme sdílet přesvědčení chemiků o univerzální tendenci k racemizaci, pak Pasteur byl doveden k hypotéze populární do dnešních dnů, že deracemizace prebiotické „počáteční polévky“ se objevila vlivem vnějšího asymetrického činitele fyzikální či chemické podstaty: nazveme ho faktorem zvýhodnění. Faktory zvýhodnění lze rozdělit do dvou skupin na lokální a globální. Lokálními faktory rozumíme ty, které mohly existovat v určité oblasti na povrchu Země, ale měnily se od oblasti k oblasti, nebo pokud působily během určité časové periody. Globální faktory jsou způsobeny nezachováním parity ve slabých interakcích. Přitom mnohé z lokálních faktorů zvýhodnění nemohou vést k porušení symetrie (např. gravitační pole) a v principu nemohou tudíž vést k narušení symetrie v chemických pochodech. Kinetiky racemizujících pochodů se charakterizují relaxační dobou τ_r chirální polarizace systému η . Dají se charakterizovat tzv. racemizačním faktorem K_R , což je bezrozměrná veličina rovná $K_R = \tau_0 \cdot \tau_r^{-1}$, kde τ_0 je charakteristický čas chemické reakce v systému. Působení obou druhů faktorů zvýhodnění vede k rozdílu v rychlostních konstantách k^L a k^D pro zrcadlově spřažené reakce a tím míra faktoru zvýhodnění se dá definovat jako relativní rozdíl $g = \left| \frac{k^L - k^D}{k^L + k^D} \right|$. Pokud faktor zvýhodnění působí v racemizačních pochodech, chirální polarizace systému nadále nesměřuje k nule, ale k určité hodnotě, která závisí na poměru mezi faktorem zvýhodnění a racemizačním faktorem. Silné porušení zrcadlové symetrie je možné jedině tehdy, když $g/K_R \gg 1$.

Pokusy ukázaly, že pochody, u nichž porušení symetrie závisí jen na působení faktoru zvýhodnění — bez ohledu jak silného — a u nichž se projevuje postupným hromaděním asymetrie, nejsou schopné silné deracemizace organického prostředí v prebiotické evoluci. Proto je zapotřebí fundamentálně rozdílných pochodů, které mohou způsobit silné narušení symetrie bez faktoru zvýhodnění a které mohou vyvinout stereoselektivní tlak, vedoucí ke vzniku specifické aktivity. Pochody „bifurkačního“ typu, dobře známé fyzikům z teorie rovnovážných a nerovnovážných fázových přechodů, mají tyto požadované vlastnosti. Deracemizační pochody tohoto typu jsou založeny na kooperativních (nelineárních) interakcích enantiomérů a vedou k samoorganizaci chiralit v systému: Porušení zrcadlové symetrie se objeví spontánně, jakmile jsou dosaženy kritické podmínky. Tyto kritické podmínky závisí složitě na všech parametrech, které charakterizují fyzikálně-chemické transformace enantiomérů. Tato závislost je popsána tak zvaným řídicím parametrem systému a spontánní deracemizace nastane, jakmile parametr dosáhne kritické hodnoty, známé jako bifurkační bod. První matematický model spontánního porušení zrcadlové symetrie v biologické evoluci byl v roce 1953 navržen Frankem [3] a zobecněn Morozovem aj. [4]. Znázorníme si závislost stacionárních hodnot chirální polarizace systému na jeho řídicím parametru. V nepřítomnosti



Obr. 2. Bifurkační diagram (obr. 2b) pro hodnoty parametru ρ menší než 1. Systém S má jen jeden stabilní stav ($\eta = 0$). V tomto případě je systém znázorněn černou kuličkou v diagramu potenciální energie (obr. 2a nahore). Pro hodnoty ρ větší než 1 má systém dva stabilní stavy ($\eta > 0$ a $\eta < 0$), které odpovídají chirálním polarizovaným roztokům D či L -monomerů. Na obr. 2a dole je systém ve stavu L .

jakýchkoli transformací výhodných pro některý z enantiomérů má bifurkační diagram dobře známý tvar „vidličky“ (viz obr. 2).

Bifurkační rovnice odpovídající tomuto diagramu má tvar

$$(1 - 1/\rho)\eta - \eta^3 = 0,$$

kde ρ je řídicí parametr ($0 < \rho < \infty$). Při $\rho < 1$ je stálý jen stacionární-racemický stav v systému. Když se překročí kritická hodnota $\rho = 1$, tento stav ztrácí stabilitu a systém může přejít do jednoho z obou chirálních polarizovaných stavů. Silné porušení zrcadlové symetrie se dostane při $\rho \gg 1$.

Položme si nyní otázku. Je to náhoda, že proteiny a nukleové kyseliny jsou složeny z L aminokyselin a D cukrů a ne z opačných enantiomérů? Pokud elektromagnetické interakce, které jsou podstatou chemických reakcí, jsou zrcadlově symetrické, nemá tato otázka základní důležitost pro vznik života. Ale po objevení nezachování parity ve slabých interakcích elementárních částic, vznikl přirozený zájem, zda porušená zrcadlová symetrie mikrosvěta nemohla být přenesena i na makromolekulární úroveň. Mísení slabé interakce s elektromagnetickou (díky slabým neutrálním proudům) skutečně totiž dává menší výhodu L -izomérům aminokyselin a D -izomérům cukrů. Přesto však výpočty ukazují, že faktor zvýhodnění realizovaný nezachováním parity je extrémně malý ($g \geq 10^{-17}$). Z tohoto hlediska se tedy zdá, že neexistuje vážný důvod pro faktor zvýhodnění předurčující výběr znaménka vhodnosti ve studiu zrcadlové symetrie. Pak tedy za jakých okolností může faktor zvýhodnění určovat znaménko vhodnosti? Kondepudi a Nelson [5] navrhli myšlenku o anomálně silném zesílení faktoru zvýhodnění jeho „pomalým průchodem“ bifurkačním bodem. Ovšem požadavky „zesílení“ faktoru zvýhodnění v blízkosti kritického bodu jsou do jisté míry protiřecí. Na jedné straně tato oblast musí být proniknuta dostatečně pomalu, aby se symetrie „akumulovala“. Na druhé straně tato oblast musí být proniknuta dost rychle, aby se vyloučila možnost přesmyknutí systému do opačného enantiomerního stavu. Mechanismus pomalého proniknutí může být účinný jen ve velmi těsné blízkosti bifurkačního bodu. Potřebná vzdálenost, která se nazývá v pracích o fázových přechodech „doména vysokého pole“, má charakteristickou škálu $|1/\rho - 1| \approx g^{2/3}$ (přibližně 10^{-12} pro $g = 10^{-17}$). Pro efektivní vynásobení extrémně slabých faktorů zvýhodnění by systém

musel setrvat v této oblasti dlouhou dobu (přibližně 10^5 let pro $g \approx 10^{-17}$). Avšak při tak nízké rychlosti změny řídicího parametru by trvalo velmi dlouho dosažení hodnot $g \approx 1$, které odpovídají silnému porušení zrcadlové symetrie, takže tento mechanismus zřejmě by nemohl hrát významnou roli i v prebiologické evoluci.

Závěr

Vlastnosti živých systémů, které jsou jedinečné z hlediska fyziky, totiž sebereplikace a homochiralita, mohou posloužit jako Ariadnina nit v labyrintu hypotéz, které se týkají tohoto problému. Život založený na sebereplikaci organických homochirálních polymerů, mohl vzniknout jen, pokud prebiologické organické prostředí bylo schopné přechodu bifurkačního typu do chirálně čistého stavu. Avšak vraťme se k naší úvodní otázce, odkud se vzala symetrie? Proč je příroda tak blízká k symetrii? Na tuto otázku nenajdeme u nikoho rozumné vysvětlení. Jediné, co lze říci, je staré japonské rčení. V japonském městě Nikko je brána, kterou Japonci nazývají nejkrásnější branou země. Byla vyrobena v období velkého vlivu čínského umění uprostřed 17. století. Je to neobyčejně složitá brána s množstvím výstupků, uměleckou řezbou a velkým množstvím kolón, na nichž jsou vyřezány dračí hlavy božstva, atd. Ale při podrobné prohlídce lze zjistit, že ve složitém a uměleckém obraze jsou na jedné z kolón některé jeho jemné detaily vyřezány obráceně vzhůru nohama. Zbytek obrázku je zcela symetrický. Otázka zní, proč to bylo uděláno? Říká se, že to bylo uděláno proto, aby bohové nepodezřívali člověka z dokonalosti. Chyba byla vyrobena záměrně, aby nevyvolala závist a hněv bohů (Feynman).

Proto na závěr je možno si položit otázku: A co se zákony, které jsou jen přibližně symetrické? Nejpodivuhodnější je snad, že v široké oblasti nejdůležitějších jevů, které spadají do silných jaderných interakcí, do elektromagnetických interakcí a taktéž některé jevy spadající do gravitačních interakcí, jsou všechny fyzikální zákony symetrické. A tím je možno uzavřít: živá příroda je též symetrická, ale není absolutně symetrická.

L i t e r a t u r a

- [1] R. FEYNMAN: *The character of physical law*. The M. I. T. Press, Cambridge, Massachusetts and London, 1967, str. 84 a 100 (Paperback Edition).
- [2] V. A. AVETISOV, V. I. GOLDANSKIJ a V. KUZMIN: *Physics Today*, July, 1991, 33.
- [3] F. FRANK: *BBA* 11 (1953), 459.
- [4] L. MOROZOV, V. V. KUZMIN, V. I. GOLDANSKIJ: *Orig. Life* 13 (1983), 119.
- [5] D. K. KONDEPUDI, G.W. NELSON: *Phys. Rev Lett.* 50 (1983), 1023; *Nature* 314, 438.