

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Július Krempaský

Prvých desať miliard rokov...

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 30 (1985), No. 2, 69--81

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/138448>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1985

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>

# Prvých desať miliard rokov...

Výňatok z prednášky „Svet očami fyziky“, prednesenej pri oslavách 25. výročia Fyzikálnej olympiády v Nitre\*)

*Július Krempaský, Bratislava*

## 1. Úvod

Ak nadpis článku vyvoláva asociácie na známu Weinbergovu knihu *Prvé tri minuty* [1], musím sa priznať, že podobnosť nie je náhodná. Táto kniha zanechala vo mne, a zrejme nielen vo mne, silný dojem a stimulovala myšlienky na tému, ako to bolo ďalej? To nie je len otázka historiografická – rôzne vedecké disciplíny sú už dnes schopné poskytnúť nám celý rad faktografických informácií o jednotlivých etapách vývoja nášho vesmíru a špeciálne našej Zeme. Dnešný človek si však kladie otázku, či tieto informácie o histórii vesmíru získané z rôznych vied vytvárajú už určitú vnútorne konzistentnú mozaiku, alebo si na takýto jednotný obraz o vesmíre budeme ešte musieť počkať.

Vedy v súčasnosti sa už nielen diferencujú, ale aj integrujú a to by mohlo signalizovať, že už dozrela doba na to, aby sa človek pokúsil syntetizovať všetky vedecké poznatky o svete do jednej „unitárnej“ teórie, ktorá by logicky a bez veľkých vnútorných skokov poskytovala výklad všetkého diania, ktoré doviedlo vesmír do dnešnej podoby so všetkým, čo v ňom je. Základnou formou pohybu hmoty je fyzikálny pohyb, preto sa dá logicky očakávať, že by základy takejto unitárnej teórie mali vzniknúť na pôde fyziky. V nasledujúcich riadkoch sa pokúsime ukázať, ako k takému pohľadu na svet môže prispieť fyzika. Pozrieme sa teda na svet „očami fyziky“.

Zdá sa, že tri okolnosti poskytujú fyzike predpoklady pre tvorbu jednotného pohľadu na vesmír z hľadiska jeho vývoja do dnešnej podoby:

1. Viac menej spoľahlivo sa podarilo identifikovať „pevný bod“ v histórii vesmíru. Pred asi 10 miliardami rokov sa zrodil náš vesmír do dnešnej podoby „horúcim začiatkom“ alebo tzv. Veľkým výbuchom (Big Bangom). (Máme samozrejme na mysli začiatok fyzikálnej formy hmoty – otázka o začiatku hmoty ponímanej vo filozofickej rovine nemá zmyslu.) V súčasnosti je o Veľkom výbuchu (ďalej len VV) už pomerne dostatok literatúry, napr. [2–6].

2. Fyzika disponuje v súčasnosti pomerne dokonalými teóriami, ktoré adekvátne odrážajú fyzikálne vlastnosti hmoty a jej pohyb.

---

\*) Ospravedlňujem sa čitateľom Pokrokov, že v relatívne krátkom čase znovu predstupujem pred nich s referátom. Zavinila to dr. M. CHYTILOVÁ, CSc., ktorá mi po mojej prednáške v Nitre povedala, že by prednesená problematika bola veľmi zaujímavá a potrebná najmä pre stredoškolských učiteľov a že by bolo vhodné ju publikovať. Podujala sa na sprostredkovanie článku do redakcie Pokrokov. Nanešťastie sa jej to podarilo, a to i napriek uisteniu, že približne za rok by mala výjsť vo vydavateľstve SMENA odbornou-populárna kniha s podobnou tematikou. Nezostáva mi teda nič iné, len jej touto cestou za úprimný záujem poďakovať. *Autor.*

3. Na pôde fyziky a ďalších prírodných vied sa sformulovala nová vedecká disciplína (synergetika), ktorá si kladie za cieľ objasňovať vznik nových štruktúr v lone predchádzajúcich menej usporiadaných systémov. Uvedomujeme si, že práve táto disciplína môže byť veľmi užitočná pri úsilí objasniť, ako sa z beztvárnej a na fenomény veľmi chudobnej prahmoty mohli vytvoriť také dokonalé, obdivuhodné a mnohoraké štruktúry, aké okolo seba pozorujeme. Aj o synergetickú literatúru nie je už v súčasnosti núdza – odporučiť možno napr. publikácie [7–14].

Zďaleka ešte nie je všetko jasné a v histórii vesmíru ešte vždy jestvujú tmavé miesta, ale aj to, čo vieme, umožnilo vytvoriť film, ktorý obyvateľom tejto planéty poskytuje nevšedný zážitok a ktorý si s ničím nezadá s vymyslenými najnapínavejšími detektívkami. Je pozoruhodné, že aj dejiny vesmíru možno rozložiť podľa schémy, ktorú si dnešný človek osvojil pri skúmaní reálnych procesov a pri skúmaní ľudských dejín. Najprv prebehne akýsi prechodný jav, potom sa pomery ustália a vznikne stacionárny stav. Prechodný jav vesmíru trval asi stovku sekúnd, potom sa situácia stabilizovala na asi 700 000 rokov, počas ktorých dominovalo žiarenie. Preto je priliehavé označiť túto epochu ako éru žiarenia (vesmírny starovek). Potom začala vládu preberať látka a vznikla éra látky (vesmírny stredovek). Po asi 8 miliardach rokov vznikol v jednej inakšie absolútnej bezvýznamnej lokalite (na Zemi – a možno, že aj inde, ale o tom zatiaľ nevieme) život a to je dôvod pre označenie rodiacej sa epochy ako éry života (vesmírny novovek). Na konci tejto epochy sa vo vesmíre objavil mysliaci subjekt – homo sapiens. Táto éra trvá zatiaľ len jednu „geologickú“ sekundu, napriek tomu sa v tejto „súčasnosti“ stihlo toho udiť už nesmierne veľa.

Taká je veľmi hrubá štruktúra oných  $10^{17}$  sekúnd, ktoré od VV doteraz uplynuli. Pozrime sa teraz na jednotlivé etapy trochu podrobnejšie.

## 2. Prechodné javy

Uviedli sme, že prechodné javy na začiatku existencie nášho vesmíru zabrali asi 100 sekúnd. Ak si uvedomíme, že elementárne procesy, ktoré vtedy prebiehali, mali trvanie určené „atómovými“ sekundami (asi  $10^{-16}$  s), „elementárnymi“ sekundami (asi  $10^{-24}$  s), resp. až Planckovými kvantami času (asi  $10^{-43}$  s), ľahko pochopíme, že aj v priebehu niekoľkých desiatok sekúnd sa mohlo uskutočniť nesmierne veľa kvantitatívnych i kvalitatívnych zmien. A skutočne sa aj uskutočnilo. Tie prvé (do času asi  $10^{-5}$  s) sú ešte v polohe hypotéz, avšak od tohoto okamihu sa už dostávame na pevnú pôdu zásluhou vynikajúcich objavov a experimentov.

Skôr, ako sa pokúsime nastíniť priebeh prechodných javov, treba zodpovedať najpálčivejšiu a súčasne aj najdôležitejšiu (hamletovskú) otázku: Bol či nebol VV? Máme na to spoľahlivých svedkov? Možno povedať, že troch dôveryhodných svedkov už máme, štvrtý je na obzore a piaty ešte v nedohľadnu.

Prvým svedkom VV sú fotóny elektromagnetického žiarenia, ktoré k nám prichádzajú zo vzdialených galaxií. Ich červený posuv dokazuje, že všetky galaxie sa navzájom vzdialujú, a to tým väčšou rýchlosťou, čím sú vzdialenejšie. Potvrdzujú tým slávny Hubblov zákon z r. 1928, ktorý, zdá sa, pripúšťa len jednu rozumnú interpretáciu, a to,

že v určitom čase rovnom prevrátenej hodnote Hubblovej konštanty (meranom „dozadu“) sa vesmír začal rozpínať zo singulárneho stavu. Súčasná experimentálna technika nedovoľuje ešte zmerať Hubblovu konštantu s dostatočnou presnosťou, preto údaje o hodine „H“ sa rozchádzajú od asi 10 do 18 miliard rokov.

Hubblou svedok, aj keď je bezosporu veľmi zaujímavý, nie je až tak spoľahlivý, aby presvedčil všetkých fyzikov a ostatných obyvateľov našej planéty o reálnosti VV, pretože príslušné fotóny vznikli až niekoľko miliard rokov po predpokladanom VV v sekundárnych zdrojoch. O mnoho väčší význam by mal preto svedok, ktorý by bol na mieste činu vtedy, keď ešte aspoň „telo, aj keď už nehorelo“. Takýto svedok sa zásluhou A. A. Penziasa a R. W. Wilsona prihlásil na jar r. 1965. Boli to fotóny zbytkového žiarenia, ktoré vznikli v období prechodných javov, asi 700 000 rokov družne nažívali s elektrónmi (v termodynamickvej rovnováhe) a na konci tohoto obdobia sa osamostatnili, pretože elektróny boli uväznené jadrami vodíka a hélia. Od tejto chvíle jestvovali vo vesmíre ako samostatný izolovaný fenomén a jediná zmena, ktorú doznávali, súvisela s rozpínaním vesmíru. Lahko možno ukázať (pozri nasledujúci odsek), že ich rovnovážna teplota klesala nepriamo úmerne lineárnym dimenziám „komory“, a pretože od onoho okamihu vyslobodenia, keď teplota vesmíru bola asi 3000 K, sa lineárne dimenzie vesmíru zväčšili asi 1000krát, mala teplota fotónov zbytkového žiarenia predstavovať asi 3 K. Presne v okolí tejto hodnoty ich Penzias a Wilson našli. Treba dodať, že dnes je nezvratne dokázaná existencia reliktovej žiarenia, ktorá zodpovedá 3 K v celom pásme frekvencií zodpovedajúcich Planckovmu zákonu žiarenia absolútne čierneho telesa.

Tretí svedok siaha ešte bližšie k začiatku. Sú to vesmírne protóny a neutróny. V čase asi  $10^{-5}$  s po VV klesla teplota vesmíru pod prahovú hodnotu tvorby protónov a neutrónov a od tohoto okamihu pokračoval už len ich vzájomný rozpad. Neutróny sa vďaka oniečo väčšej hmotnosti premieňali na protóny intenzívnejšie, ako protóny na neutróny a to zapríčinilo, že neutrónov začalo ubývať na úkor protónov. V čase okolo 13 s po VV už ich bolo len asi 8% oproti 92% protónov a boli by všetky vyhynuli (nebolo by chemických prvkov ani nás!), keby teplota vesmíru nebola v tejto chvíli klesla natoľko, že sa protóny a neutróny mohli začať zlučovať do stabilných jadier hélia. Tak sa podarilo zbytok neutrónov „zakonzervovať“ v jadrách hélia a tým vytvoriť podmienky pre ďalší priaznivý vývoj vesmíru. Z toho súčasne vyplýva, že do etapy tvorby prvých hviezd vstupovala pralátka v pomere 8% He a 92% H. Takýto pomer by teda mali vykazovať najstaršie hviezdy. Merania tento záver veľmi dobre potvrdzujú.

Štvrtý svedok, po ktorom – tak sa zdá – už hádzeme laso, sú neutrína. Uvoľnili sa v obrovskom množstve v čase asi 0,3 s po VV a odvtedy vyplňujú náš vesmír podobne ako reliktovej žiarenie. Naša experimentálna technika však zatiaľ neumožňuje ich detekciu, aj keď by sme s veľkým napätím chceli vypočítať ich svedectvo. Ešte podstatne menej nádejné je to s gravitačnými vlnami, ktoré sa mali uvoľniť hneď po uplynutí prvého kvanta času po VV. Tie by teda mohli svedčiť priamo o samotnom VV (vznikli v čase asi  $0,6 \cdot 10^{-43}$  s po VV), ale zrejme uplynie ešte hodne času (meraného v rokoch a nie v „kvantových“ sekundách), kým budeme môcť vypočítať aj tohoto svedka. Aj bez neho je však situácia v súčasnosti taká, že „horúci“ začiatok vesmíru prešiel z polohy hypotézy do polohy experimentálne veľmi dobre doloženej udalosti.

Tak teda môžeme „pevný bod“ v histórii vesmíru považovať za spoľahlivo dokázaný

a môžeme sa pokúsiť premietnúť miestami ešte neúplný a hypotetický film nasledujúcich udalostí. Kvôli lepšiemu prehľadu sú usporiadané do tab. 1.

Uviedli sme už, že prvá kvalitatívna zmena po opustení singulárneho stavu sa odohrala už v čase  $0,6 \cdot 10^{-43}$  s. Z jednotnej „prainterakcie“ sa vydělili gravitačné interakcie a do vesmíru sa vyžiarilo obrovské množstvo gravitačných vln. V čase asi  $10^{-35}$  s po VV sa náš vesmír znovu otriasol vo svojich základoch. Od pozostalej jednotnej interakcie sa vyčlenili samostatné silné interakcie, čo podľa teórie malo mať známky fázového prechodu I. druhu. V odbornej formulácii by sme túto kvalitatívnu zmenu mohli charakterizovať tak, že svet sa v tomto okamihu stal nestabilným voči vytvoreniu Boseho

Tabuľka 1

Čas [s]	$T$ [K]	$s$ [ $\text{KM}^{-3}$ ]	Udalosť
0			Veľký výbuch
$0,6 \cdot 10^{-43}$	$10^{32}$	$4 \cdot 10^{96}$	Oddelenie gravitačných interakcií — emisia gravitačných vln
$1 \cdot 10^{-35}$	$10^{28}$	$1,5 \cdot 10^{80}$	1. fázový prechod (I. druhu) — oddelenie silných interakcií
$10^{-35}$ — $10^{-33}$			Inflačná explózia
$1 \cdot 10^{-10}$	$10^{15}$	$1,5 \cdot 10^{30}$	2. fázový prechod (II. druhu) — oddelenie slabšej a elm. interakcie
$1,2 \cdot 10^{-5}$	$10^{13}$	$1,2 \cdot 10^{20}$	Prahová teplota tvorby protónov a neutrónov
$1,5 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{12}$	$7 \cdot 10^{15}$	Prahová teplota tvorby mezónov
0,3	$3 \cdot 10^{10}$	$1 \cdot 10^{10}$	Uvoľnenie neutrín
10	$5 \cdot 10^9$	$1,5 \cdot 10^8$	Prahová teplota tvorby elektrónov a pozitronov
13	$3 \cdot 10^9$	$1,0 \cdot 10^7$	Tvorba jadier hélia
$7 \cdot 10^5$ r	$3 \cdot 10^3$	$10^{-19}$	Oddelenie zbytkového žiarenia
0 — 700 000 rokov			éra žiarenia (vesmírny starovek)
$700\,000$ r — $3 \cdot 10^9$ r			éra látky (vesmírny stredovek)
$3 \cdot 10^9$ r —			éra života (vesmírny novovek)
Posledná „geol.“ sekunda			éra sociálnych systémov
<b>Budúcnosť (pre otvorený vesmír)</b>			
$10^{14}$ rokov — degenerácia hviezd na trpaslíky, neutrónové hviezdy a čierne diery			
$10^{15}$ rokov — rozpad planetárnych systémov			
$10^{20}$ rokov — rozpad galaktických systémov			
$10^{64}$ rokov — „dožívania“ čiernych dier			
$10^{1500}$ rokov — železný popol			

kondenzátu hypotetických Higgsových častíc, ktorý zapríčiniť, že silné interakcie sa odtienili na diaľku podobne, ako sa ďaleké pôsobenie elektrického náboja v reálnom médiu odtieni na vzdialenosti väčšie, ako je Debyeova-Hückelova dĺžka. Usudzuje sa, že tento dej bol sprevádzaný preliatím obrovskej energie z vákua do reálneho prostredia, čo malo za následok ohromne intenzívne (tzv. inflačné) rozpínanie vesmíru. Táto inflácia trvajúca len od  $10^{-35}$  do  $10^{-33}$  s mala — zdá sa — blahodárny vplyv na ďalší vývoj nášho vesmíru.

Lahko ukážeme, že pred inflačným rozpínaním mohli vďaka nesmierne vysokej strednej energii „superfonónov“ (rádu  $10^{24}$  eV) vznikáť časticové ozruty s hmotnosťou  $m = E/c^2 \approx 10^{15}$  hmôt protónu (magnetické monopóly?). Keby hmota nášho vesmíru zostala distribuovaná v takýchto obrovských zhlukoch, mala by tak vysokú hustotu, že by celý cyklus rozpínania — zmršťovania trval len niekoľko desiatok tisícov rokov. Za ten čas by sa samozrejme nemohli vytvoriť ani hviezdy, ani by nemohol vzniknúť život. Predpokladá sa, že inflačná explózia urobila koniec týmto príznakom a hmota sa začala distribuovať na útvary, aké poznáme doteraz.

V čase  $10^{-10}$  s, keď teplota vesmíru bola asi  $10^{15}$  K a hustota asi  $10^{30}$  kg/m<sup>3</sup>, sa vo vesmíre odohral druhý fázový prechod (II. druhu), pri ktorom sa od elektromagnetickej interakcie oddelila slabá interakcia. V tejto chvíli už vstupujeme na pevnejšiu pôdu, pretože analógy fotónov (ako nosičov elm. interakcie), tzv. *W* bozóny (ako nosiče slabej interakcie), boli nedávno experimentálne potvrdené.

Ďalšie zaujímavé udalosti spadajúce do prechodných javov sú uvedené v tab. 1 a nevyžadujú zvláštny komentár. V nej sú pre zaujímavosť stručne zaznačené aj ďalšie udalosti, ako aj udalosti, ktoré nás ešte len čakajú, a to za predpokladu, že náš vesmír je otvorený.

Na záver prechodných javov treba okrem už spomínaných kvalitatívnych zmien synergetickej povahy spomenúť ešte jednu dôležitú zmenu, bez ktorej by vývoj vesmíru do dnešnej podoby nebol možný. Ide o zmiznutie antilátky. Aj keď v synergetike je známy mechanizmus zániku jedného z dvoch „rovnoprávných“ následkom malých porúch v procese vývoja, predsa len otázka, prečo antikvarky zmizli a zostali len kvarky, čaká ešte na svoje vyriešenie.

### 3. Vesmírny starovek — éra žiarenia

Uvedli sme už, že po uplynutí prechodného štádia od času rovnajúceho sa niekoľkým desiatkam sekúnd po VV nastúpila éra žiarenia a trvala asi 700 000 rokov. Ako to tak presne vieme?

Základným zákonom charakterizujúcim dynamiku vesmíru je Hubblov zákon

$$(1) \quad v = \frac{dr}{dt} = Hr,$$

kde *v* je rýchlosť, *H* Hubblova konštanta a *r* vzdialenosť, preto sa zdá logické, že by aj chronológia udalosti vo vesmíre mala z neho vychádzať. Nezávisle premennou by tu bola lineárna dimenzia vesmíru. Praktickú realizáciu tejto idey však sťažujú dve okolnosti:

1. Hubblova konštanta nie je konštantou, ale funkciou  $r$ . 2. Ak je vesmír nekonečný, potom bol nekonečný aj na začiatku pri VV, preto vzdialenosť  $r$  (chápaná často ako vzdialenosť galaxií od hypotetického bodového počiatku) by nebola vhodnou nezávisle premennou.

Uvedené ťažkosti možno prekonať tým, že ako nezávislé premennú zvolíme hustotu vesmíru ( $s$ ) a pokúsime sa nájsť závislosť Hubblovej konštanty od nej. Kritická hustota vesmíru ( $s_k$ ) je definovaná podmienkou rovnosti kinetickej a potenciálnej energie nejakej vzdialenej galaxie, t.j. podmienkou

$$(2) \quad \frac{1}{2}mv^2 = \kappa \frac{mM}{r},$$

kde  $m$  je hmotnosť galaxie,  $M$  hmotnosť prítomná v hypotetickej guli polomeru  $r$  a  $\kappa$  gravitačná konštanta. Ak do nej dosadíme vyjadrenie  $v = Hr$ , dostaneme podmienku pre kritickú hustotu  $s_k$ . Aj keď to meranie zatiaľ nie celkom potvrdzuje, všeobecne sa usudzuje, že hustota vesmíru je blízka kritickej, preto môžeme predpokladať, že uvedená podmienka platí aj pre skutočnú hustotu vesmíru. V takom prípade ju možno použiť na vyjadrenie Hubblovej konštanty ako funkcie  $s$ . Vychádza:

$$(3) \quad H = \left( \frac{8\pi\kappa s}{3} \right)^{1/2}.$$

Hustota látky homogénne vyplňujúcej guľu o polomere  $r$  je nepriamo úmerná  $r^3$ , hustota žiarenia je podľa Stefanovho-Boltzmannovho zákona úmerná  $T^4$ , a pretože si neskôr ukážeme, že teplota  $T$  je nepriamo úmerná lineárnej dimenzii  $r$ , môžeme tvrdiť, že hustota žiarenia je priamo úmerná  $r^{-4}$ . Všeobecne teda platí vzťah

$$(4) \quad s = br^{-n}$$

kde  $n = 4$  pre žiarenie a  $n = 3$  pre látku. Dosadením vzťahov (3) a (4) do rovnice (1) dostaneme rovnicu

$$(5) \quad \frac{dr}{dt} = \left( \frac{8\pi\kappa b}{3} \right)^{1/2} r^{1-n/2},$$

ktorej riešením ( $s$  ohľadom na vzťah 4 a na podmienky  $t(s_1) = t_1$  a  $t(s_2) = t_2$  je funkcia

$$(6) \quad t_2 - t_1 = \frac{2}{n} \sqrt{\left( \frac{3}{8\pi\kappa} \right) \left( \frac{1}{\sqrt{s_2}} - \frac{1}{\sqrt{s_1}} \right)}.$$

Týmto vzťahom možno zhodnocovať aj udalosti v prechodnom období, ak sú známe hustoty, ktoré podmieniajú daný proces. Pre neskoršie udalosti možno položiť  $s_1 \rightarrow \infty$  a  $t_1 \rightarrow 0$ . Keď potom uvážime, že tvorba hélia vyžaduje teploty okolo  $3 \cdot 10^9$  K, čomu podľa Stefanovho-Boltzmannovho zákona zodpovedá hustota  $s \approx 10^7$  kg/m<sup>3</sup>, ľahko nájdeme „chemický“ čas  $t_{ch} \approx 10$  s. Podobne keď vieme, že éra žiarenia skončila pri teplote  $T \approx 3000$  K (začiatok deionizácie hélia a vodíka), čomu zodpovedá hustota  $s \approx 10^{-19}$  kg/m<sup>3</sup>, nájdeme pre éru žiarenia približne  $t \approx 680\,000$  rokov.

Pomerne ľahko možno ukázať, že reliktové žiarenie má mať v súčasnosti teplotu okolo 3 K. Od okamihu, keď sa žiarenie oslobodilo od látky, dozrávalo už len jednu

zmenu — zmenu súvisiacu s rozpínaním vesmíru. Táto zmena je analogická zmene rovnovážneho žiarenia absolútne čierneho telesa súvisiacej so zväčšovaním jeho rozmerov. Bez újmy na všeobecnosti môžeme si predstaviť absolútne čierne teleso v tvare gule o polomere  $R$ . Keď sa tento polomer zväčší z hodnoty  $R_1$  na hodnotu  $R_2$ , vlnová dĺžka fotónov sa zväčší  $p = R_2/R_1$ -krát, frekvencia klesne  $p$ -krát (preto aj energia žiarenia klesne  $p$ -krát), takže jediné, čo sa nemení, je skladba žiarenia a počet fotónov. Môžeme preto napísať rovnicu

$$(7) \quad \frac{8\pi v_1^2 dv_1}{c^3(e^{hv_1/kT_1} - 1)} \cdot \frac{4\pi R_1^3}{3} = \frac{8\pi v_2^2 dv_2}{c^3(e^{hv_2/kT_2} - 1)} \cdot \frac{4\pi R_2^3}{3}.$$

Po dosadení  $R_2 = pR_1$ ,  $v_2 = v_1/p$  a  $dv_2 = dv_1/p$  dostaneme rovnicu, z ktorej vyplýva podmienka

$$(8) \quad T_2 = \frac{T_1}{p}.$$

Keďže rozmery nášho vesmíru sa od konca éry žiarenia zväčšili asi 1000krát, musí byť  $T_2 = 3000/1000 = 3$  K, čo sa až nečakane dobre potvrdilo.

Nie je presne známe, koľko fotónov žiarenia sa vytvorilo na každú hmotnú časticu látky. Všeobecne sa však akceptuje predpoklad, že tento pomer je asi  $(2-3) \cdot 10^9$ . Stredná energia fotónov pri teplote 3000 K (t.j. na konci éry žiarenia) je asi 0,3 eV, takže celková energia fotónov pripadajúca na jednu časticu bola asi 1 GeV. Práve takáto energia je však ekvivalentná približne hmotnosti protónu, resp. neutrónu, takže na konci éry žiarenia bola energia vesmíru „bratsky“ rozdelená medzi látku a pole rovnakým dielom. Od tejto chvíle energia poľa klesala a ťažisko nosičov energie sa začalo presúvať na látku. V súčasnosti predstavuje látka asi tisíckrát mohutnejšiu zásobáreň energie vo vesmíre ako pole. Plným právom sa teda epocha so začiatkom asi 700 000 rokov po VV nazýva éra látky.

Ak sme pri bilancii prechodného obdobia konštatovali, že súčasná fyzika poskytuje už pomerne logické vysvetlenie jednotlivých po sebe nasledujúcich udalostí, potom pri bilancii éry žiarenia je konštatovanie ešte priaznivejšie — táto éra nepredkladá súčasnej fyzike neriešiteľné problémy.

#### 4. Vesmírny stredovek — éra látky

Stredovek ľudských dejín má obyčajne nelichotivý epitetón „tmný“. Podobný prívlastok, avšak z iných príčin, môžeme prisúdiť aj vesmírnemu stredoveku. Diali sa v ňom prevratné procesy a my dnes nie sme ešte v stave týmto procesom dokonale porozumieť a adekvátne ich opísať. Najväčším problémom vesmírneho stredoveku je problém, ako sa z pôvodne homogénnej látky nachádzajúcej sa v plynnom stave a obsahujúcej atómy vodíka a hélia (a zrejme aj trošku deutéria) začala štrukturalizácia, t.j. zhlukovanie do útvarov nie celkom ľubovoľných veľkostí. Ďalší vážny problém je, ako a akým mechanizmom sa začali vo vesmíre tvoriť ďalšie chemické prvky okrem vodíka a hélia. Nie menej zaujímavé a dôležité sú otázky, ako sa pôvodné zhluky mohli premeniť na slnká, ktoré sú sekundárnym zdrojom žiarenia, a aký osud ich očakáva.



V oblasti vzniku a vzniku hviezd jestvujú dva zdanlivo protichodné názory: hviezdy vznikali zhusťovaním riedkych mračien prahmoty, resp. naopak výbuchom, a teda zriedovaním superhustej hmoty. Je celkom dobre možné, že sa tieto názory nevyklučujú. V začiatkových etapách budovania vesmíru mohli hviezdy vznikáť prvým mechanizmom (pričom východiskovými surovinami boli vodík a hélium), v neskorších etapách mohli a môžu hviezdy vznikáť druhým mechanizmom, pričom vstupná surovina obsahuje už aj ostatné chemické prvky.

Prvý, kto sa začal vedecky zaoberať možnosťami zhlukovania častíc do väčších celkov, bol J. H. Jeans. Odvodil vzťah pre kritickú veľkosť hmoty, v ktorej sa môže začať proces zhusťovania. Má tvar [15]

$$(9) \quad M_{\text{krit}} = 5 \frac{p^{3/2}}{\kappa S^2},$$

kde  $p$  je tlak. Ak do tohoto vzťahu dosadíme charakteristické hodnoty z konca éry žiarenia, dostaneme výsledok  $M_{\text{krit}} \approx 5 \cdot 10^{49}$  kg. Keďže hmotnosť nášho Slnka je „len“ rádu  $10^{30}$  kg, vidíme, že za týchto okolností mohli vznikáť len kolosy s nie menšou hmotnosťou, akú má asi  $10^{19}$  našich slnk. Skutočnosť je však taká, že náš vesmír obsahuje približne  $10^{10}$  galaxií a v každej je v priemere asi  $10^{10}$  hviezd o hmotnosti veľmi približne rovnakej hmotnosti nášho Slnka. Ako to, že sa mohli začať zhusťovať podstatne menšie útvary, ako pripúšťa Jeansova kritická hmotnosť?

Situácia sa radikálne zmenila po skončení epochy žiarenia. V termodynamicknej rovnováhe počas éry žiarenia bol každý fotón z hľadiska tlaku približne ekvivalentný jednej hmotnej častici. Tlak žiarenia bol teda s ohľadom na už uvedený pomer medzi počtom fotónov a častíc asi  $10^9$ -krát väčší ako tlak reprezentovaný časticami. Po rekombinácii elektrónov s jadrami hélia a vodíka na konci éry žiarenia sa však látka pozostávajúca už teraz len z elektricky neutrálnych častíc stala pre fotóny prakticky priehľadnou a vnútorný tlak látky tak zrazu poklesol približne o 9 rádov. Kritická Jeansova hmotnosť sa preto zmenšila asi o 13 rádov a predstavovala hmotnosť asi  $10^5 - 10^6$  našich slnk. Existujú dôkazy, že takéto tzv. hviezdne kopy v raných etapách vesmíru skutočne vznikali.

Aj keď sa už zdá všetko jasné, predsa len je tu rad nezodpovedaných otázok. Prečo spontánne nevznikli väčšie útvary ako hviezdne kopy, resp. v neskorších etapách väčšie ako naše Slnko, keď Jeansova hmotnosť značí len minimálnu hmotnosť, pri ktorej sa už môže začať zhusťovanie? A ďalej, prečo sú všetky slnká (v našom pozorovateľnom svete je ich približne  $10^{20}$ ) čo do hmotnosti prakticky rovnaké? Zdá sa, že odpoveď na tieto otázky by sa mohla hľadať v synergetike. Tá totiž dokáže celkom prirodzene vysvetliť spontánny vznik štruktúrnych jednotiek rovnakej veľkosti v pôvodne homogénnom systéme následkom vhodnej (nelineárnej) dynamiky a prítomnosti vhodných fluktuácií. Skutočne sa už podarilo odvodiť takú evolučnú rovnicu látky v epoche po rekombinácii, ktorá vykazuje dva „bifurkačné“ body. Jeden z nich zodpovedá tvorbe galaxií, druhý tvorbe hviezd vnútri galaxií.

Po prekonaní bariéry súvisiacej so štrukturalizáciou hmoty vo vesmíre sa „temný“ vesmírny stredovek začína postupne meniť na epochu, v ktorej sa už problémy dajú uspokojivo riešiť. Vcelku má už dnes fyzika prebádaný „detský“, „dospelý“ i „starec-

ký“ vek hviezd, vie sa vysvetliť, prečo sa hviezdy stali intenzívnymi zdrojmi žiarenia (následkom zapálenia termojadrových reakcií), ako mohli vzniknúť chemické prvky i nad héliovou bariérou, ako mohla vzniknúť medzihviezdna plyno-prachová hmota obsahujúca nielen vodík a hélium (explóziou hviezd následkom gravitačných kolapsov) a už celkom dobre vieme predpovedať hviezdám ich zánik do podoby bielych či červých trpaslíkov, neutrónových hviezd, resp. čiernych dier.

Nie je zatiaľ všetko jasné s takými — pre vesmír absolútne nevýznamnými objektami —, ako je naša Zem. Nie je ešte vyjasnené, či vznikla naraz nejakou deštrukturalizáciou väčších objektov, alebo postupným „nalepovaním“ úlomkov (na túto tému pozri napr. článok [16]). Rovnako nie sú ešte celkom objasnené búrlive procesy v jadrách protogalaxií, v kvazaroch a pod., ale to nič nemení na konštatovaní, že aj „temný“ vesmírny stredovek sa zásluhou fyziky a z nej vytvorených disciplín (astrofyziky, kozmológie a pod.) postupne mení na mapu bez bielych miest.

## 5. Vesmírny novovek — éra života

Predovšetkým je tu otázka, či uvedené priradenie a pomenovanie nie je príliš násilné. Život predsa nedominuje celému vesmíru. Zatiaľ spoľahlivo vieme, že existuje len na našej Zemi. Na ospravedlnenie možno uviesť, že aj v prípade delenia ľudských dejín na starovek, stredovek a novovek sa toto delenie vzťahuje len na časť našej Zeme. (Niektoré izolované kmene žijú doteraz v staroveku.) Okrem toho vo vedeckých a ešte viac vo vedeckopopularizačných kruhoch existujú silno propagované predstavy o tom, že život je vo vesmíre hodne rozšírený, a ak aj nie, tak čím ďalej tým viac sa črtá intenzívna expanzia života zo Zeme do kozmu, takže napokon môže vzniknúť situácia, že život bude naozaj dominujúcim faktorom vo vesmíre. Zatiaľ je podstatné to, že život je tak jedinečný fenomén v porovnaní s ostatnými javmi prebiehajúcimi v mŕtvej prírode, že si zasluhuje, aby sa stal symbolom celej jednej etapy vývoja vesmíru.

Z pohľadu fyzika je tu však ešte dôležitejšia otázka: Ako sa s týmto fenoménom vysporiada (a či sa vôbec môže vysporiadať) fyzika? Život je oblasť pôsobenia predovšetkým biologickej formy pohybu a akýkoľvek pokus o fyzikálne vysvetľovanie tohoto fenoménu mohol by sa kvalifikovať ako neprípustný redukcionizmus. K tomu možno poznamenať, že redukcionizmus nemusí byť nevyhnutne nevedecký, práve naopak, redukcia počtu postulátov a princípov jednotlivých vied potrebných na adekvátny opis a vysvetlenie pozorovaných javov na minimum je pozitívna tendencia a je vlastne jedným z hlavných cieľov každej vedy. V súčasnom období integrácie vied sa stáva, že postuláty jednej vedy sa dajú vyvodiť z fundamentálnejších postulátov inej vedy, napr. postuláty o chemických väzbách sa podarilo vysvetliť na pôde fyziky. Vyššie položenú otázku možno teda preformulovať aj takto: Ktoré základné biologické princípy a postuláty možno pochopiť už na úrovni fyzikálnych poznatkov? Možno aj sám život vyvodiť z fyzikálnych princípov? Prevažná časť čitateľov včítane príslušníkov biológie a filozofie asi na túto poslednú otázku bez rozmýšľania odpovie: Nie!

Inej mienky je však nositeľ Nobelovej ceny za chémiu I. Prigogine, ktorý v článku v časopise *La Recherche* (pozri jeho preklad [17]) vyslovil smelú vetu: „Zo zavedenia disipatívnych štruktúr a postupnosti nestabilít vyplýva, že hľadám môžeme dúfať, že

život je možné v podstate vyvodíť z prvých princípov.“ Trošku miernejšie to formuluje komentátor citovaného článku (a ďalších Prigoginových publikácií) R. Piper: „Teória disipatívnych štruktúr obsahuje dôkaz, že biologická evolúcia je možný fyzikálny proces.“ V obidvoch prípadoch sa pripúšťa, že by oživenie mŕtvej hmoty mohlo byť výsledkom spontánnych procesov fyzikálnej povahy. Čo nás oprávňuje k takému záveru? Možno povedať, že za úspechy v tejto oblasti jednoznačne „zodpovedá“ synergetika (chápaná ako všeobecná teória vzniku nových kvalít, zahrňujúca aj termodynamiku nerovnovážnych procesov), ktorej hlavným cieľom je skúmať vznik nových kvalít v systémoch vyznačujúcich sa určitou (nelineárnou) dynamikou.

Vznik života z pohľadu synergetiky sa rozpadá na štyri etapy [18]: 1. Vznik organických látok z neorganických. 2. Vznik bielkovinovo-nukleotidných komplexov spôsobilých k samoreprodukcií. 3. Vznik biologickej informácie a jednotného genetického kódu. 4. Vznik bunky.

Bariéru medzi organickým a neorganickým svetom zlomil Wöhler, keď ako prvý pripravil v laboratóriu močovinu z anorganických látok. V akom laboratóriu však vznikali organické makromolekuly pred niekoľkými miliardami rokov? Na túto otázku dal odpoveď americký biológ S. L. Miller, ktorý zmes látok, ktoré mohli byť vtedy k dispozícii (vodu, vodnú paru, metán, amoniak a vodík), uzavrel do baňky a vystavil na niekoľko dní pôsobeniu elektrického výboja. Po týždni zistil, že sa v baňke objavila desiatka rôznych aminokyselín. Z pohľadu fyziky (a synergetiky) by sme povedali, že Miller (podvedome) splnil najdôležitejšiu synergetickú podmienku vzniku novej kvality – vybudil systém do stavov veľmi vzdialených od rovnováhy (zásluhou elektrického výboja). Tak sa aj na pôde čisto fyzikálnych interakcií podarilo objasniť možnosť spontánneho vzniku organických látok z anorganických.

Zdá sa, že synergetika by sa mohla stať bázou aj pri riešení druhej etapy vznikania života. O tom, ako sa mohli z jednotlivých makromolekúl voľne plávajúcich v moriach a oceánoch alebo v malých zátokách vytvárať bielkovinovo-nukleotidné komplexy, jestvuje viacero hypotéz. Je však veľmi pravdepodobné, že štrukturalizácia organických makromolekúl do komplexov mohla mať podobný priebeh (a pôvod) ako už spomínaná štrukturalizácia prahmoty pri tvorbe hviezd. Dnes už dokážeme dosť jednoducho zabezpečiť podmienky, aby sa vo vhodnom systéme začala spontánna štrukturalizácia. Samotný proces tvorby týchto štruktúr vieme už adekvátne teoreticky opísať.

Pomerne veľmi ťažkým problémom je vysvetlenie možnosti spontánneho vzniku genetického kódu. Veľký kus práce na tomto poli odviedol M. Eigen [19], ktorý zaviedol predstavu tzv. hypercyklov. Matematicky dokázal, že hypercyklus, t.j. určitý v priestore uzavretý reťazec autokatalytických procesov, má už celý rad veľmi zaujímavých vlastností:

- a) zabezpečuje koexistenciu všetkých zložiek,
- b) umožňuje koordinovaný rast všetkých svojich členov,
- c) umožňuje vývoj ku optimálnej funkčioschopnosti a
- d) predstavuje úschovu určitej biologickej informácie.

Hypercyklus sa preto môže považovať za predchodcu súčasného jednotného genetického kódu, ku ktorému dospel život sériou nestabilít a vznikania nových kvalít za prítomnosti konkurenčných vzťahov (na molekulárnej úrovni).

Podobne na základe synergetiky môže byť už dostatočne uspokojivo riešený aj problém vzniku samotnej bunky. Ide o štrukturalizáciu na vyššej úrovni, ktorá sa v konkurencii s nebunkovou formou života ukázala ako podstatne dokonalejšia (z hľadiska možnosti „prežiť“).

Súčasná situácia v biofyzike umožňuje kvantitatívne formulovať aj problémy vzniku tvarov a druhov (t.j. problémy morfogénny) a tým objasniť – a ako sa ukázalo, aj doplniť a spresniť – aj samotný Darwinov princíp prirodzeného výberu. O týchto problémoch, ako aj o niektorých ďalších zaujímavých problémoch biológie, bolo na pôde tohoto časopisu už podrobnejšie pojednané (pozri článok [20]), preto sa o tom ďalej už nebudeme rozširovať. Upozorníme len, že napriek určitému optimizmu v otázke vzniku a vysvetlenia podstaty života a jeho vzniku, ktorý sme sa usilovali aspoň čiastočne podporiť, existujú aj skeptické názory. Za všetky uvedieme len známy citát N. Bohra: „... minimálna sloboda, ktorú musíme živému organizmu pri skúmaní ponechať, je možno natoľko veľká, že mu dovoľuje takpovediac ukryť pred nami jeho posledné tajomstvo. Existenciu života je preto z tohoto hľadiska treba chápať ako elementárnu skutočnosť, ktorú nemožno vysvetliť, ktorú však treba brať v biológii ako východiskový bod.“

Na záver našich poznámok o vesmírnom novoveku ešte dodajme, že fyzike sa zásluhou Prigogina a jeho školy podarilo prekonať rozpor medzi fyzikálnym (degradačným) trendom a biologickým (progresívnym) princípom evolúcie systémov a to umožnilo pomerne širokú aplikáciu fyzikálneho formalizmu na skúmanie evolúcie aj živých systémov, najmä v súvislosti s ekologickými problémami. Tak teda môžeme konštatovať, že fyzik so svojimi teóriami nie je až tak nemožný ani v ére života, ako by sa na prvý pohľad zdalo a ako sa to často v odbornej i laickej verejnosti posudzuje.

## 6. Posledná „geologická“ sekunda — éra sociálnych systémov

V poslednej „geologickej“ sekunde sa na našej Zemi (zatiaľ nie je známe, či aj inde) objavil mysliaci subjekt – homo sapiens. Živý systém si začal sám seba uvedomovať a vedome riadiť svoje počínanie. Ak sme pri skúmaní života a jeho vzniku došli k záveru, že je v silách fyziky mnoho závažného k tomu povedať, potom v prípade vzniku vedomia a jeho ďalšieho vývoja si musíme priznať, že fyzika je tu úplne bezmocná. Fenomén vedomia, logického uvažovania a slobodného konania je natoľko cudzí a vzdialený fyzikálnej forme pohybu, že si nemôžeme robiť ilúzie, že by sme ho mohli „dedukovať z prvých fyzikálnych princípov“. Je to vlastnosť vysokoorganizovanej hmoty a jej skúmanie prináleží humánnym vedám a filozofii.

Nemusíme však kapitulovať úplne. Aj v prípade systémov zložených z veľkého počtu častíc (napr. v prípade plynu, elektrónov a atómov v tuhých látkach a pod.) tiež nedokážeme povedať, čo robí každý subsystém zvlášť, avšak vieme veľmi dobre stanoviť, ako sa bude systém vyvíjať ako celok. Možno preto, že keby sme sa zamerali nie na jednotlivcov, ale na dostatočne veľké kolektívy, že by sa vyskytla šanca aplikovať niektoré vo fyzike rozpracované metódy aj pri skúmaní sociálnych systémov. Sám Prigogine na to upozorňuje, keď si kladie otázku, čo vlastne determinuje termodynamický systém. Prichádza k záveru, že hlavným znakom termodynamického systému je, že

pozostáva z veľkého počtu subsystémov interagujúcich navzájom krátkodosahovými silami. (Ukázalo sa, že systémy, v ktorých existujú len ďalekodosahové sily, napr. gravitačné, nejavia tendenciu k samovoľnej degradácii). Z toho vyplýva, že podobné vlastnosti by mohli prejavíť aj iné (nefyzikálne) systémy, v ktorých vládnu krátkodosahové interakcie. Takými sú napr. biologické systémy na molekulárnej úrovni (kde pôsobia hlavne Van der Waalove sily) a nadmolekulárnej úrovni (kde existujú interakcie typu symbiózy, konkurencie alebo interakcie typu dravec – korisť), ktoré tiež majú povahu krátkodosahových interakcií. To umožnilo doteraz veľmi úspešne aplikovať fyzikálne teórie na biologické a ekologické systémy ([21–24]).

Aj sociálne systémy vykazujú interakciu krátkodosahovej povahy – je to vzájomný individuálny styk jednotlivcov sociálneho systému. Je tu však navyše aj analógia s ďalekodosahovými interakciami, ktoré zodpovedajú vedomému riadeniu sociálnych systémov. Prvú stránku procesov možno opísať metódami analogickými metódam používaným v neživých, príp. biologických systémoch, druhú napr. zavedením pojmu produkcie negatívnej (v prípade vedomej diverzie aj pozitívnej) entropie súvisiacej s vedomým zasahovaním človeka do vývoja sociálnych systémov. Aj o týchto a ďalších problémoch tohoto druhu je už pomerne dosť literatúry (pozri napr. [25–27]), a preto ich tu už nebudeme ďalej rozvíjať.

Chceli sme len poukázať na to, že fyzika sa nemusí celkom vytrátiť z vedeckého poľa ani v období sociálnych systémov. Práve naopak, hlavne prostredníctvom synergetiky pomáha vytvárať most k onej jednej Marxovej vede, v ktorej zmiznú rozdiely medzi jednotlivými vedami a medzi vedami a filozofiou a ktorej predmetom skúmania bude celý vesmír bez ohľadu na to, či ide o neživé, živé alebo mysliace objekty.

## 7. Záver

Na záver sa celkom prirodzene vnucuje otázka, ako to bude v nasledujúcej desiatke miliard rokov, príp. ešte ďalej. Všetko závisí od toho, či náš vesmír je uzavretý alebo otvorený. V prvom prípade by sa mal ešte niekoľko desiatok miliard rokov rozpínať, potom by nastala kulminácia geometrických rozmerov vesmíru a začalo by sa pozvoľné zmršťovanie. Pri tomto procese by postupne zaniklo všetko to, čo sa vo vesmíre dlhým vývojom vytvorilo, až nakoniec – v blízkosti singulárneho stavu – by zmizli všetky štruktúry a zostala by len hmota v podobe superhustej beztvárnej suroviny.

Optimistickejšie – ale len na prvý pohľad – vyzerá situácia v prípade otvoreného vesmíru. Jednotlivé udalosti schematicky vyznačené v tab. 1 (zostavenej čiastočne na základe práce [28]), svedčia o tom, že i v takom prípade hrozí nevyhnutný koniec životu i väčšine vzniklých štruktúr. Na rozdiel od prípadu uzavretého vesmíru, kde všetko zanikne v nepredstaviteľnej žiare, v otvorenom vesmíre hrozí zánik všetkého živého následkom absolútneho ochladenia. Treba dodať, že je celkom možné, že absolútna deštrukcia nastane ešte podstatne skôr, ako ukazujú čísla v tab. 1, ak sa ukáže, že protón je naozaj nestabilný a že sa rozpadá s polčasom rádu  $10^{32}$  rokov.

Pokiaľ ide o samotný život, treba poznamenať, že všetky vyššie uvedené úvahy sa môžu ukázať ako iluzórne a bezpredmetné. Čím ďalej tým viac sa presadzuje názor, že život vznikol vďaka dlhej reťazi takmer neveriteľne šťastlivých náhod a že je veľmi

málo pravdepodobne, že by sa takáto reťaz mohla niekde inde vo vesmíre teraz alebo neskôr zopakovať. Preto sa nemožno diviť L. A. Bljumenfeldovi, keď v závere svojej známej knihy *Problemy biologičeskoj fiziki* píše: „... život v takej forme, v akej jestvuje na Zemi, je pravdepodobne jedinečný fenomén...“. Ironiou je, že najviac v doterajšej evólúcii je život ohrozený teraz, a to svojim najdokonalejším výtvorom – človekom. Stačí neopatrné stlačenie osudného gombíka a môže sa šmahom zničiť to, čo takmer už nemá nádej na znovuoopakovanie sa vo vesmíre. Tento moment by mal byť nesmierne vážnou výstrahou celému ľudskému pokoleniu.

## Literatúra

- [1] WEINBERG S.: *The first three minutes*. Basic Books, New York 1977. Český preklad: *Prvé tri minúty*.
- [2] GRYGAR J., HORSKÝ Z., MAYER P.: *Vesmír*. Mladá Fronta, Praha 1979.
- [3] ZELDOVIČ J. B., NOVIKOV J. D.: *Strojenije i evolucija vselennoj*. Nauka, Moskva 1975.
- [4] KLIMŠIN J. A.: *Relativistskaja astronomia*. Nauka, Moskva 1983.
- [5] GINZBURG V. L.: *Astrofizika*. Nauka, Moskva 1970. Slov. preklad: *Astrofyzika*, Alfa, Bratislava 1979.
- [6] BRONŠTEN V. A.: *Gipotezy o zvezdach i vselennoj*. Nauka, Moskva 1974.
- [7] HAKEN H.: *Synergetics (An introduction)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1977.
- [8] HAKEN H.: *Synergetics (A workshop)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1978.
- [9] HAKEN H.: *Synergetics (Far from equilibrium)*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1979.
- [10] HAKEN H.: *Dynamics of synergetics systems*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1980.
- [11] EBELING W.: *Strukturbildung bei irreversiblen Prozessen*. Teubner, Leipzig 1976.
- [12] HUDEC L.: *Synergetika a teorie stability*. Academia, Praha 1983.
- [13] NICOLIS L., PRIGOGINE I.: *Self organisation in nonequilibrium systems*. J. Wiley, New York 1977.
- [14] GLANSDORF P., PRIGOGINE I.: *Thermodynamic theory of structure, stability and fluctuations*. London 1971.
- [15] VANÝSEK V.: *Základy astronomie a astrofyziky*. Academia, Praha 1981.
- [16] POKORNÝ Z.: *Vznik sluneční soustavy*. Pokroky mat., fyz. a astronómie, 29 (1984), 80.
- [17] PRIGOGINE I.: *Termodynamika života*. Čs. čas. fys. A23, (1973), 345.
- [18] SEGAL J.: *Das Leben — Ein Rätsel?* Neues Leben, Berlin 1972. Český preklad: *Je život záhadou?* Academia, Praha 1981.
- [19] EIGEN M., SCHUSTER P.: *The hypercycle*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1979.
- [20] KREMPASKÝ J.: *Vznik nových kvalit očami fyzika*. Pokroky mat., fyz. a astronómie, 27 (1982), 181.
- [21] ALEKSEJEV V. V.: *Biofizika soobščestva živých organizmov*. UFN 120 (1976), 647.
- [22] ALEKSEJEV V. V., KOSTIN I. L.: *Biologičeskije sistemy v zemedelii i lesovodstve*. Zb., Nauka, Moskva 1974.
- [23] MAY R. M., OSTER G. F.: *Bifurcations and dynamic complexity in simple ecological models*. The American Naturalist 110 (1976), 573.
- [24] ROMANOVSKIJ J. M., STEPANOVA N. V., ČERŇAVSKIJ D. C.: *Matematičeskoje modelirovanije v biofizike*. Nauka, Moskva 1975.
- [25] KREMPASKÝ J.: *Fyzika v sociológii*. Čs. čas. fys. A32 (1982), 604.
- [26] BARTOLOMEW D. J.: *Stochastic models for social processes*. J. Wiley, London 1967.
- [27] WEIDLICH W., HAAG G.: *Quantitative sociology*. Springer Verlag, Berlin—Heidelberg—New York 1982.
- [28] DYSON F. J.: *Physics and biology in an open universe*. Review of Mod. Physics 51 (1979), 447.
- [29] BLJUMENFELD L. A.: *Problemy biologičeskoj fiziki*. Nauka, Moskva 1977.