

# Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

---

Jan Kalvoda

Vývoj vesmíru ve vztahu k historii Země

*Pokroky matematiky, fyziky a astronomie*, Vol. 26 (1981), No. 4, 181--192

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139011>

## Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1981

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>

# Vývoj vesmíru ve vztahu k historii Země

*Jan Kalvoda, Praha*

Kosmologické hypotézy před vytvořením obecné teorie relativity a jejím použitím k vyšetřování dynamiky vesmíru Einsteinem, De Sitterem, Friedmannem a dalšími byly založeny převážně na intuitivních fyzikálních a filozofických úvahách podepřených pozorováními na úrovni své doby. Einsteinovy rovnice gravitačního pole a jejich nestatická řešení vedly spolu s Hubbleovým objevem expanze vesmíru ke vzniku a rozvoji kosmologie jako vědního oboru s bohatým matematicko-fyzikálním aparátem a se stále většími observačními možnostmi. Současná kosmologie již prokázala, že vesmír je dynamický objekt nejen v jednotlivých částech, ale především jako celek.

Strhující představa vyvíjejícího se vesmíru vede přírodovědce k otázce, do jaké míry mohou vědy o Zemi přispět k testování kosmologických modelů a tím i k ověřování fyzikálních zákonů v největších měřítkách. V této práci se zabýváme změnami geometrie prostoročasu během vývoje vesmíru a jejich vztahem ke geologickým událostem v historii Země. Zkoumáme především, jakým způsobem mohou být v planetě jako celku např. v horninách a stavbě zemské kůry, zachována svědectví o měnících se celkových fyzikálních podmínkách ve vesmíru. Popisujeme reálné kosmologické modely,<sup>\*)</sup> které nejsou v rozporu s pozorováním a zkoumáme jejich soulad s poznatky geologie a geofyziky.

## Standardní kosmologické modely

Obecná relativita zůstává i po řadě nových pozorování nejúspěšnější teorií gravitace. Uplatňuje se zejména při studiu silných gravitačních polí, která vytvářejí například suprahusté neutronové hvězdy (pulsary), extrémně svítivé zárodky galaxií (kvazary) či černé díry, lze jí však konzistentně užít i k popisu dynamiky vesmíru jako celku. Prostoročas je v obecné relativitě modelován jako diferencovatelná varieta, představující čtyřrozměrné kontinuum s určitou metrickou strukturou (Riemannovou geometrií), jejíž vlastnosti závisejí na rozdělení hmoty a energie. Gravitační pole je v obecné teorii

<sup>\*)</sup> Podrobně jsou standardní kosmologické modely rozebírány např. v [1] a [2], česky v [3].

relativity plně geometrizováno, přičemž míra zakřivení prostoročasu je podle Einsteinových rovnic pole určena rozložením hmoty a energie všech fyzikálních polí a částic s výjimkou samotné gravitace.

Astronomická pozorování naznačují, že hmota tvoří ve vesmíru lokální nehomogenity s maximálními charakteristickými rozměry  $10^8$  světelných let. Země, Slunce, naše Galaxie, ani místní skupina a kupa galaxií nejsou na speciálním místě v prostoru. Při porovnávání prostorových buněk s charakteristickým rozměrem  $10^8$  až  $10^9$  světelných let lze uplatnit kosmologický princip, který postuluje izotropii a homogenitu vesmíru ve velkém měřítku. Pro pozorovatele, jemuž se vesmír jeví izotropní, kalibrují jeho ideální hodiny univerzální kosmický čas  $t$ . Každou událostí ve vesmíru prochází trojrozměrná nadplocha homogenity (prostor v „daném okamžiku“), v jejímž každém místě jsou všechny fyzikální charakteristiky v průměru stejné. Robertson a Walker ukázali, že geometrie těchto nadploch je charakterizována indexem křivosti  $k$ , který je roven  $+1$  pro prostor sférický,  $-1$  pro hyperbolický a  $0$  pro plochý. Poloměr zakřivení třírozměrného prostoru  $a$  se ovšem může měnit s univerzálním kosmickým časem  $t$  – vesmír může expandovat nebo kontrahovat.

Pozorovaný vztah mezi rudým posuvem spekter galaxií (který je interpretován jako kosmologický rudý posuv) a jejich vzdáleností indikuje, že vesmír expanduje. Vztah je vyjádřen Hubbleovým expanzním poměrem

$$(1) \quad H = \frac{\dot{a}(t)}{a(t)},$$

přičemž dnešní hodnota  $H_0$  – tzv. Hubbleova konstanta – je asi  $55 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  (viz dále). Expanzní faktor  $a(t)$ , charakterizující poloměr zakřivení vesmíru, je určen dynamickými rovnicemi – Einsteinovým gravitačním zákonem.

Z něho plyne

$$(2) \quad \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} - \frac{\Lambda c^2}{3} = \frac{8\pi G\rho}{3},$$

$$(3) \quad \frac{2\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} - \Lambda c^2 = -\frac{8\pi Gp}{c^2},$$

kde  $c$  je rychlost světla ve vakuu,  $G$  gravitační konstanta,  $\Lambda$  tzv. kosmologická konstanta; tlak  $p$  a hustotu  $\rho$  látky a záření navzájem váže stavová rovnice. Pro hustotu látky  $\rho_l$  a záření  $\rho_z$  implikuje zákon zachování energie

$$(4) \quad \rho_l(t) \sim \frac{1}{a^3(t)},$$

$$(5) \quad \rho_z(t) \sim \frac{1}{a^4(t)},$$

přičemž jsou látka a záření ve vesmíru idealizovány jako spojitě rozložená dokonalá kapalina. Homogenita a izotropie vesmíru v měřítkách  $\sim 10^8$  světelných let a větších znamená, že galaxie můžeme považovat za „částice kapaliny“ vyplňující spojitě vesmír.

Zpomalování expanze vesmíru je observačně charakterizováno deceleračním parametrem  $q_0$ , který je při kosmologické konstantě  $\Lambda = 0$  (což je rozumný a i námi dále používaný předpoklad; podrobně viz např. (3)) určen současnou hustotou látky  $\varrho_0$  a Hubbleovou konstantou  $H_0$  vztahem

$$(6) \quad q_0 = \frac{4\pi G \varrho_{t_0}}{3H_0^2}.$$

Pro charakter expanze je rozhodující, zda dnešní průměrná hustota hmoty ve vesmíru převyšuje kritickou hodnotu

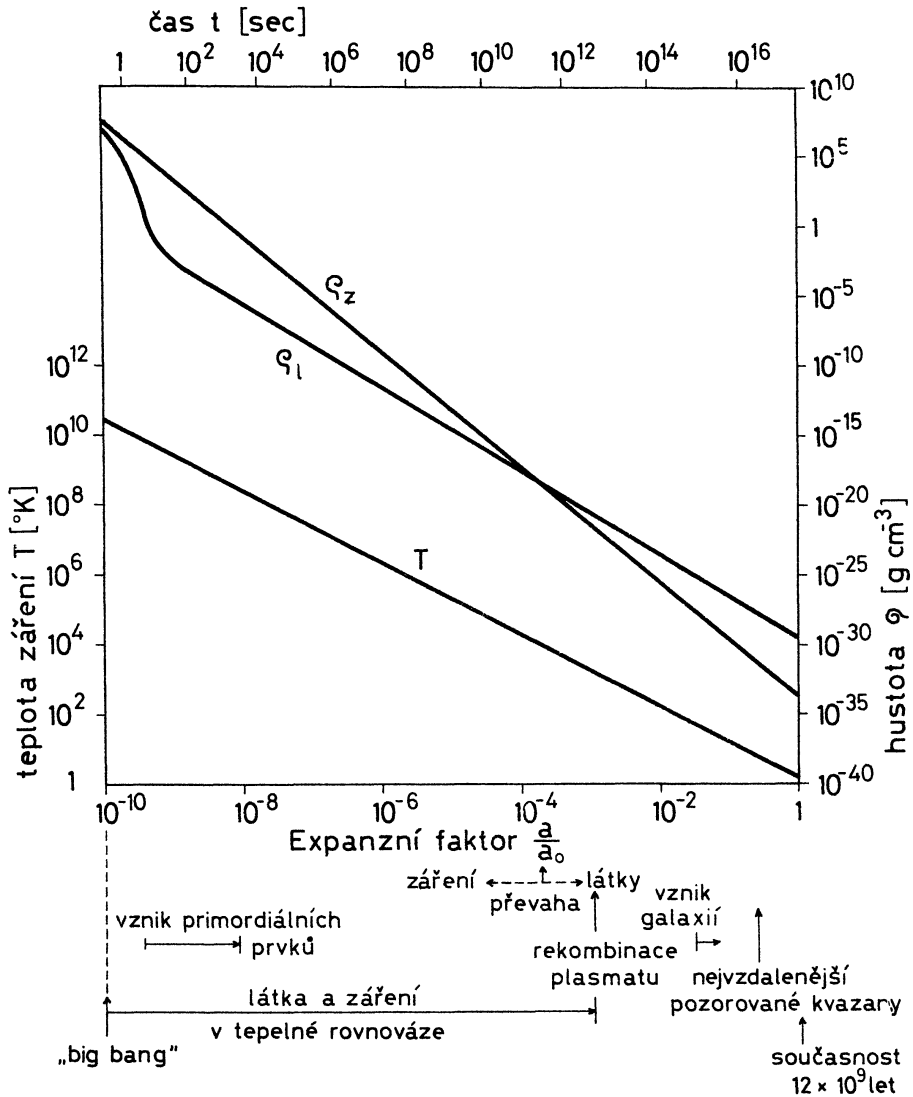
$$(7) \quad \varrho_{0_{krit}} = \frac{3H_0^2}{8\pi G}.$$

Tři výše uvedené typy modelů vesmíru se liší charakterem expanze: a) sférický (uzavřený) vesmír s parametry  $q_0 > \frac{1}{2}$ ,  $k = +1$ ,  $\varrho > \varrho_{0_{krit}}$  se po expanzi v budoucnosti smršťuje; b) plochý (otevřený) vesmír s parametry  $q_0 = \frac{1}{2}$ ,  $k = 0$ ,  $\varrho_0 = \varrho_{0_{krit}}$  stále expanduje (často je označován jako Einsteinův-de Sitterův vesmír); c) hyperbolický (otevřený) vesmír s parametry  $q_0 < \frac{1}{2}$ ,  $k = -1$ ,  $\varrho_0 < \varrho_{0_{krit}}$  také stále expanduje, a to vyšší rychlostí než plochý vesmír.

Lze snadno ukázat, že všechny uvedené modely vycházejí ze singulárního „počátku“, kdy  $a(t=0) = 0$  a  $\varrho \rightarrow \infty$  (srv. [1]). Tato počáteční singularita („big bang“) je fyzikálně interpretována v tom smyslu, že pro extrémně vysokou hustotu hmoty zhruba do  $10^{-23}$  s po „počátku“ času neplatí výše uvedené předpoklady modelů. Globální rysy vývoje vesmíru od „big bangu“ do současnosti jsou podle [4] znázorněny na obr. 1, v němž jsou křivky základních fyzikálních parametrů vyčísleny pro plochý vesmír a současnou hustotu látky  $\varrho_{t_0} = 0,5679 \cdot 10^{-29}$  g cm $^{-3}$  a hustotu záření  $\varrho_{z_0} = 10^{-33}$  g cm $^{-3}$ .

V první sekundě po „big bangu“ byly všechny elementární částice v termodynamické rovnováze. Při poklesu teploty  $T$  na  $10^{10}$  K a hustoty hmoty  $\varrho$  na  $10^5$  g cm $^{-3}$  proběhla rekombinace všech párů nukleonů a antinukleonů, rozpad mezonů a hyperonů a došlo k oddělení neutrin a gravitonů od látky. Zhruba po třech sekundách se vesmír skládal z rovnovážného elektromagnetického záření se spektrem záření černého tělesa o teplotě řádově  $10^{10}$  K, z elektronových – pozitronových párů, neutronů, protonů a z volně se šířících neutrin a gravitonů. Již v prvních minutách, kdy  $T$  klesalo až na  $10^9$  K,  $\varrho$  pak přibližně na  $10^{-1}$  g cm $^{-3}$ , vznikaly primordiální prvky He $^3$ , He $^4$ , H $^1$  a Li. Tepelná interakce látky a elektromagnetického záření probíhala až do  $t \approx 10^5$  let. V této době již fotony nemohly ionizovat atomy vodíku, což vedlo k rekombinaci elektronů a protonů. V rozpínajícím se vesmíru začala (zhruba při hodnotě expanzního faktoru  $a/a_0 \approx 10^{-3}$  a hustoty hmoty  $\varrho \approx 10^{-20}$  g cm $^{-3}$ ) dominovat látka nad zářením. Kondenzace první generace hvězd, galaxií a skupin galaxií (pravděpodobně zvětšováním původně malých perturbací hustot látky a záření), mohla pak probíhat nejpozději mezi  $10^8$  let  $\lesssim t \lesssim 10^9$  let, tj. mezi  $\frac{1}{30} \lesssim a/a_0 \lesssim \frac{1}{10}$ . Při  $a/a_0 \approx \frac{1}{4}$  počaly zářit kvazary, jejichž světlo dosahuje v současné době Zemi. Vznik naší Galaxie, sluneční soustavy a Země jako samostatného tělesa proběhly postupně mezi  $\frac{1}{3} \lesssim a/a_0 \lesssim \frac{2}{3}$ .

Podle pozorování Sandageho [5] leží hodnota  $H_0$  v mezích 30 až 100 km s $^{-1}$  Mpc $^{-1}$



s průměrnou hodnotou  $55 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  a  $q_0 \approx 1 \pm 0,5$ . Potom by byl ovšem vesmír uzavřený ( $k = +1$ ,  $\rho_0 > \rho_{0\text{krit}} = 0,5679 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ ), přičemž  $\rho_{l_0} \approx 1,1352 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3}$ . Odhady současné hustoty svítící látky galaxií vedou k hodnotě nejméně o řád nižší, než odpovídá modelu uzavřeného vesmíru. Je však pravděpodobné, že v galaxiích je soustředěno i značné množství nezářící látky a kromě toho existuje také rozptýlená mezigalaktická látka. \*) Současná kritická hustota látky a záření, při níž se vesmír uzavře, leží v mezích

\*) Nedávná pozorování nenulové klidové hmotnosti neutrin naznačují, že vesmír je ve skutečnosti patrně uzavřený.

$$0,17 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3} \lesssim \varrho_{0_{\text{krit}}} \lesssim 1,3956 \cdot 10^{-29} \text{ g cm}^{-3} .$$

Poměrně dobré řádové shody různých metod měření Hubbleovy konstanty  $H_0$ , deceleračního parametru  $q_0$  a hustoty látky a záření  $\varrho_0$  spolu s ověřováním konzistence jejich vzájemných vztahů podporují názor, že popisované homogenní a izotropní modely vesmíru s počáteční singularitou dobře vystihují geometrii prostoročasu. Jsou proto všeobecně brány jako východisko při rozboru experimentálních testů i pozorovaných dějů ve vesmíru.\*)

Vědy o Zemi a jejím nejbližším kosmickém okolí mají ve standardním horkém „big bang“ modelu vesmíru k dispozici reálný, matematicky a fyzikálně dobře propracovaný teoretický aparát, vhodný k popisu událostí a dějů nejméně z období trvání naší Galaxie.

### Chronodynamika geologických událostí ve vyvíjejícím se vesmíru

V přírodních vědách užívané časové standardy, např. siderický, efemeridní či univerzální čas, se v delších časových intervalech rozcházejí a jejich prodloužení do vzdálené minulosti je pouze extrapolací. Dosud nejlepším reálným časovým standardem je atomový čas, odvozený ze zákonů radioaktivního rozpadu. Jeho měření v geologické historii pomocí radiometrického určování stáří hornin povrchové části zemské kůry má ovšem statistický charakter. Ukážeme si, že tok tohoto radiometrického času, určujícího časovou odlehlost geologických událostí v historii Země, je globálně v souladu s vývojovými změnami expandujícího vesmíru, tj. s chodem kosmického času.

Rychlost pohybu Země vzhledem k základnímu kosmologickému systému vesmíru, který s vysokou přesností představuje reliktové izotropní mikrovlnné záření, nepřesahuje  $450 \text{ km s}^{-1}$ . Připomeňme, že Země se pohybuje kolem Slunce rychlostí  $30 \text{ km s}^{-1}$ , Slunce kolem centra Galaxie zhruba  $250 \text{ km s}^{-1}$ , Galaxie vzhledem k místní skupině galaxií asi  $100 \text{ km s}^{-1}$ , která „padá“ ke kupě galaxií v souhvězdí Panny rychlostí okolo  $1000 \text{ km s}^{-1}$ . Relativistické korekce chodu vlastních časů na Zemi a ve vztažné soustavě kosmického izotropního záření jsou tedy řádu pouze  $10^{-8}$ . Univerzální kosmický čas  $t$  měřený v soustavě reliktového izotropního kosmického záření je velmi blízký času měřenému v soustavě spojené se Zemí. To usnadňuje začlenění chronodynamiky geologických jevů do kontextu vývojových změn vesmíru jako celku.

Od prebiotické fáze vývoje planety s pevnou kůrou, kdy byl její povrch určitou dobu sterilizován zářením dosud neustáleného Slunce, až do současnosti, kdy složitý živý

\*) Proti rivalitním teoriím typu „steady-state“ (Bondi, Gold, Hoyle, Narlikar) svědčí již existence prvotního hélia a zejména objev reliktového izotropního mikrovlnného záření o současné teplotě  $2,7 \text{ K}$  [6] (česky viz [7]). Stacionární modely vesmíru, které musí mít decelerační parametr  $q_0 = -1$ , jsou navíc vyloučeny pozorovanou hodnotou tohoto parametru. Hubbleův test počtu galaxií jako funkce jejich limitní zdánlivé velikosti a měření zdánlivých úhlových velikostí galaxií jako funkce rudého posuvu také diskvalifikují statické modely vesmíru, v nichž je rudý posuv nutno vysvětlovat předpokladem „unaveného světla“. Termodynamická rovnováha v nekonečně dlouho trvajícím statickém vesmíru by vedla při existenci rovnoměrně rozložených zářících hvězd k jasnému oblohy, srovnatelnému se zářením na povrchu hvězdy (de Chésauxův—Olbersův paradox). Nestandardní dosud známé anizotropní a nehomogenní modely vesmíru jsou nerealistické kromě snad zcela inerciálních fází jeho vývoje.

organismus dosáhl schopnosti myšlení, je geologická historie ovšem ovlivňována i lokálními změnami ve vesmíru. Přirozeným důsledkem této skutečnosti je existence sekulárních geologických rytmů [8, 9]. Tak by radiometrický čas mohl být ovlivňován lokálními změnami v rámci naší Galaxie, sluneční soustavy nebo samotné Země. V obecné relativitě lokální změny metriky prostoročasu závisejí na vlastnostech gravitačního pole, které zároveň ovlivňuje rychlost geologických procesů. Relativistický rozdíl v chodu vlastních časů atomových hodin, umístěných na různých ekvipotenciálních plochách tíže, činí v podmínkách geoidu a při jejich vertikální vzdálenosti 9 km přibližně pouze  $3 \cdot 10^{-4} \text{ s rok}^{-1}$  [10].\*)

Rozsah sekulárních změn gravitačního pole Země v minulosti, které mohou být vyvolávány změnami hmotnosti planety, jejího poloměru, úhlové rychlosti rotace a zploštění nelze spolehlivě zjistit metodami známými v současné době. Vybrané gravitačně citlivé geologické systémy, např. globálně reologické, zejména geotektonické jevy, gravitační diagenese jílů, růst diapirů, velikost koster fosilních suchozemských živočichů a ptáků mohou při statisticky bohatém srovnávacím materiálu z dlouhých časových úseků 100 až 200 miliónů let dosáhnout přesnosti určení intenzity gravitačního pole pouze 20–30% [8]. Gravitační interakce mezi tělesy sluneční soustavy a Zemí způsobuje i změny sklonu zemské osy, tvaru a rozměrů oběžné dráhy planety kolem Slunce a precesi jarního bodu, což se projevuje na měnící se délce roku.\*\*\*) Systematické testování obecné teorie relativity a jejích rivalitních pozorováním dosud ne zcela vyvráčených metrických teorií zahrnuje i sledování slapových jevů. Například teorie gravitace s preferovaným systémem předpovídají slapy zemských hmot s periodou 12 hodin hvězdného času [12] a roční změny v periodě rotace planety, způsobené pohybem Země vzhledem k inerciální soustavě kosmického izotropního záření. Rozbor údajů vysoce přesných gravimetrů a atomových hodin však klade na velikost předpokládaných jevů silná omezení a teorie s preferovaným systémem prakticky vylučují. Velmi populární je skalárně tenzorová teorie gravitace Branse a Dickeho, v níž se vzrůstajícím stářím vesmíru gravitační konstanta  $G$  klesá. Tento pokles by měl být doprovázen sekulárním rozpínáním Země [13, 14], změnami rozsahu plochy moří, intenzity geomagnetického pole a v geochemickém vývoji nitra planety. Pozorování ve sluneční soustavě [15, 16] však naznačují, že možná řádová změna gravitační konstanty  $G$  nepřesahuje hodnotu  $10^{-11} \text{ rok}^{-1}$ . Často je diskutována [17, 18] a stále prověřována možnost proměnlivosti i některých dalších základních přírodních konstant ( $\hbar$ ,  $\alpha$ ,  $m_p$ ,  $m_e$ ) se stářím vesmíru. Studium záření velmi vzdálených objektů však ukazuje, že jejich spektra lze uspokojivě vyložit známými hodnotami fyzikálních konstant, takže atomové konstanty se proto mohou považovat za neproměnné.

Opěrným údajem kosmologické časové stupnice je sled geologických událostí v histo-

---

\*) Na povrchu Země byly změny tempa všech procesů v gravitačním poli prokázány pomocí Mössbauerova efektu měřením gravitačního posuvu frekvence fotonů POUNDEM, REBKOU a SNIDEREM v letech 1960 a 1964 [11].

\*\*) O sekulárním zpomalování rotace Země svědčí i paleontologické údaje. Na růstu korálů, který citlivě odráží střídání dne a noci, ukazují WELLS, NEWTON, SCRUTTON, RUNCORN a další (cit. viz např. in [9, 21]), že rok měl v mladším paleozoiku délku nejméně 400 dnů.

rii Země. Litostratigrafické, paleobiologické a paleomagnetické události\*) jsou při jeho určování porovnávány s radiometrickým stářím hornin zemské kůry. Odhady stáří vesmíru, které se pohybují mezi 10 až 14 miliardami let, jsou odvozeny z rychlostí vzájemného vzdalování galaxií, z věku nejstarších hvězd odhadnutého z jejich vlastností teorií hvězdného vývoje a z doby vzniku atomů U, Th, Pl zjišťované z relativního nadbytku některých množství různých atomových jader. Spodní meze odhadů stáří vesmíru jsou samozřejmě radiometrické údaje o době vzniku Galaxie před 7 až 8 miliardami let, o zažehnutí Slunce jako hvězdy zhruba před 6 miliardami let a o nejvyšším stáří hornin zemské kůry (4 až 5 miliard let) v zakončení hetegonického stadia vývoje Země. Stáří naší sluneční soustavy vypočítané z měření relativního množství  $Rb^{87}$  a  $Sr^{87}$ ,  $K^{40}$  a  $A^{40}$ ,  $Pb^{204,206,207}$  a  $U^{234,238}$  v měsíčních horninách, meteoritech a oceánských sedimentech nepřesahuje 5,5 miliardy let.

Změny obecných vlastností kosmického prostředí za období trvání Země jako samostatného tělesa lze charakterizovat průběhem hodnot hlavních kosmologických parametrů v čase. Radiometrické stáří hornin  $t_{rad}$ , které od vzniku prvotní zemské kůry roste v současnosti až do zhruba  $1,5 \cdot 10^{17}$  s, je možné s dobrou přesností považovat za úsek výše definovaného univerzálního kosmického času. Potom platí

$$(8) \quad t_{rad} = t_0 - t,$$

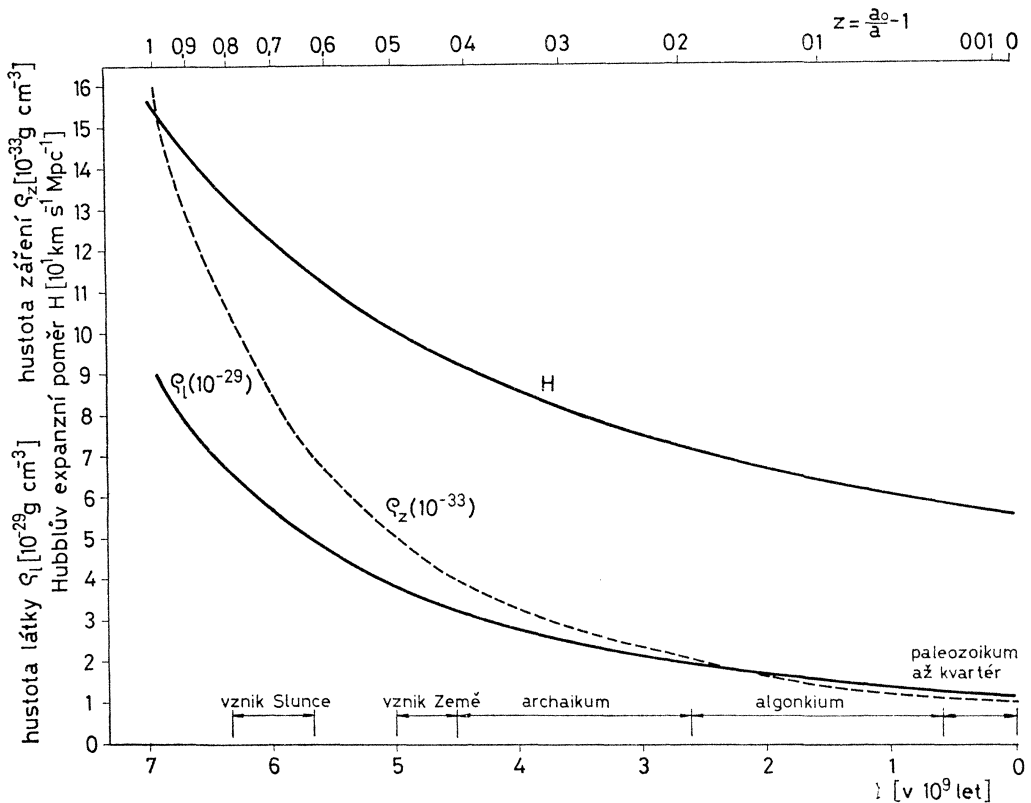
kde  $t_0$  je nynější stáří vesmíru, jehož hodnota se v mezích pozorování pohybuje mezi  $3$  až  $5 \cdot 10^{17}$  s,  $t$  pak stáří vesmíru v době vzniku zkoumané horniny. Dynamika vesmíru v éře převahy látky nad zářením, tj. od doby  $t \gtrsim 10^5$  let, je určena Einsteinovými rovnicemi (2) a (3), jejichž vyjádření pomocí  $q_0$  a  $H_0$  vede k řešení (podrobně viz Kalvoda v [19]):

$$(9) \quad t_{rad} = H_0^{-1} \left[ \left\{ \frac{\pi}{2} - 1 \right\} - \left\{ \arccos \left( 1 - \frac{a}{a_0} \right) - \sqrt{\left[ \frac{2a}{a_0} - \left( \frac{a}{a_0} \right)^2 \right]} \right\} \right].$$

Stáří  $t_0$  uzavřeného vesmíru s  $q_0 \approx 1$  a  $H_0 \approx 55 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$  je zhruba  $10,2 \cdot 10^9$  let. Znamenalo by to, že stáří Země činí přibližně 44% z doby, která uplynula od singulárního počátku expandujícího vesmíru. Pro  $q_0 = \frac{1}{2}$  by se stáří vesmíru blížilo  $12 \cdot 10^9$  let. Každému okamžiku geologické časové stupnice odpovídá určitý soubor kosmologických parametrů charakterizujících globální prostoročasovou geometrii vesmíru. Vypočtené hodnoty změn průměrné hustoty látky ve vesmíru  $\rho_b$ , průměrné hustoty záření ve vesmíru  $\rho_z$ , Hubbleova expanzního poměru  $H$ , teploty reliktového izotropního mikrovlnného záření se spektrem Planckova záření černého tělesa  $T$ , poloměru uzavřeného vesmíru  $a$  a jeho objemu  $V$  v období od vzniku naší Galaxie, sluneční soustavy a Země jako samostatného tělesa do současnosti jsou znázorněny podle [19] na obr. 2 a 3. Časová souřadnice  $t_{rad}$  je kalibrována podle rovnice (9), hodnoty kosmologických parametrů jsou vypočítány v rámci standardního horkého „big bang“ modelu vesmíru pro  $A = 0$ ,  $q_0 = 1$ ,  $H_0 = 55 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Časový interval označený symbolem  $S$  vymezuje období zažehnutí Slunce jako hvězdy,  $Z$  období vzniku Země

\*) Studium vrstev usazených hornin různé geneze a mocností, zkamenělin jako svědectví o vývoji života i změně směru remanentní magnetizace vyvěřelých a sedimentárních hornin je získáván soubor informací tvořících základ tzv. relativní geologické časové stupnice.

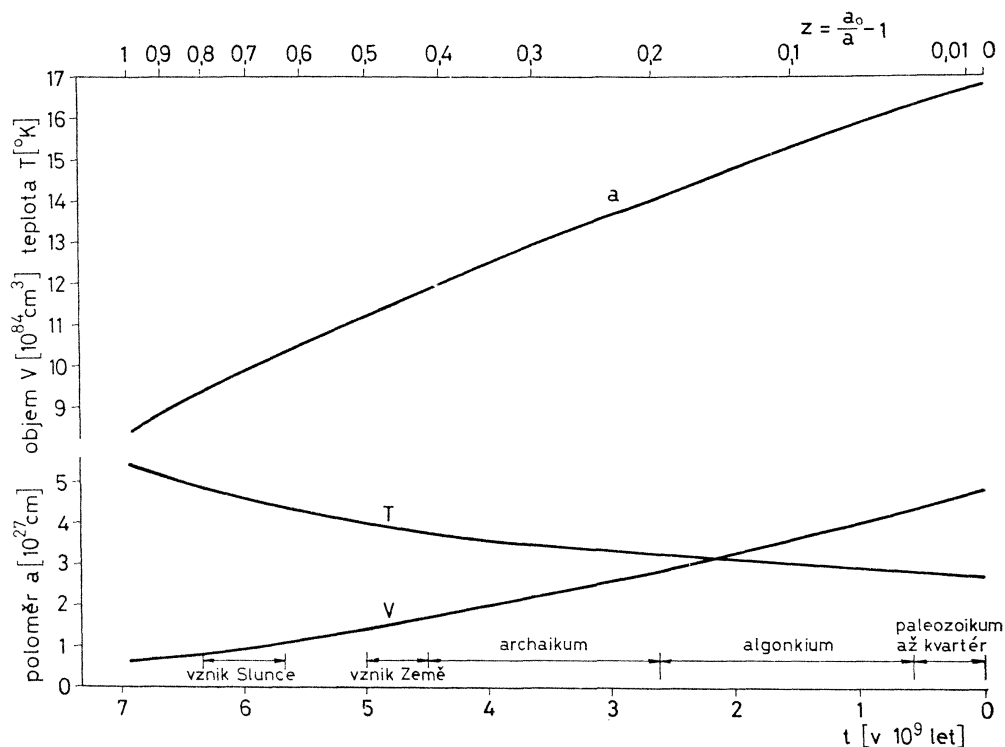




Obr. 2

jako samostatného tělesa; na časové ose jsou vymezeny i hlavní geologické éry. Například v období středního algonkia, odpovídajícího kosmologickému rudému posuvu  $z = 0,1$  a  $t_{\text{rad}} \approx 1,54 \cdot 10^9$  let, bylo přibližně  $\rho_1 = 1,3\rho_{10}$ ,  $\rho_2 = 1,5\rho_{20}$ ,  $H = 1,2H_0$ ,  $a = 0,9a_0$ , resp.  $V = 0,75V_0$ . Od vzniku Země se průměrná hustota látky ve vesmíru zmenšila více než 3krát, hustota záření 5krát, teplota izotropního kosmického záření 1,5krát a Hubbleův expanzní poměr téměř 2krát, zatímco poloměr (uzavřeného) vesmíru se zmenšil o  $1/3$  a jeho objem o více než  $2/3$ .

Změny průměrných fyzikálních podmínek ve vesmíru jako celku, vyjádřené hodnotami základních kosmologických parametrů, určily v první řadě globální rysy vývoje Země a v obdobích kratších než  $10^9$  let se prakticky neprojevují. Ve vědách o Zemi postulovaný princip aktualismu, podle něhož v současnosti pozorované geologické síly působily stejně i v minulých geologických dobách, je tedy možné i z kosmického hlediska aplikovat nejméně od pozdního prekambria. V této době se již průměrné fyzikální podmínky ve vesmíru blížily dnešním, což ovšem výrazně omezuje možnost porušení principu aktualismu astronomickými aktivitami kosmologického původu. Příkladem sekulárně se měnících kosmických jevů, které mohou dlouhodobě ovlivňovat geologické procesy, jsou v minulosti vyšší tyto jevy: 1. energetická aktivita naší Galaxie a galaxií v mladších etapách jejich vývoje vůbec, 2. průměrná četnost výbuchů supernov a 3. intenzita gravitačního záření z velmi vzdálených extrémně silných zdrojů.



Obr. 3

Hvězdy, galaxie, kupy galaxií či kvazary, které jsou hlavními reprezentanty nehomogenity vesmíru v malých měřítkách (tj. „buňky“ prostoru s průměrem cca 60 Mpc a méně), jsou potenciálně velmi cenným zdrojem poznatků o vývoji vesmíru v dávné minulosti. Vzdálenosti úměrný kosmologický rudý posuv  $z$  (srv. obr. 2 a 3) ukazuje, jakým způsobem nás současná pozorování vesmíru informují o jeho historii. Průměrným vzdálenostím kosmických objektů je spojena se sledem událostí ve vesmíru i geologická časová stupnice. Například dnes na Zemi registrované záření radiového zdroje Cygnus A se  $z = 0,057$ , vzdáleného od nás zhruba 170 Mpc (tj. 554 miliard světelných let), ukazuje stav tohoto objektu v pozemském období staršího paleozoika.\*)

### Planeta v kosmických testech — vybrané epizody

Kosmická fyzika okolí Země, geofyzika a geologie získávají poznatky o dějích za období nejméně posledních 5 miliard let. Systematické promyšlení projevů geologického vývoje (viz např. [20, 21]), které zabírají téměř 5 miliard let, a též vývoje života na Zemi, jak jej poznává paleontologie a historická geologie, je velmi lákavé území pro observační ověřování kosmologických modelů.

\*) Pozorované „fosilní“ záření z Cygnus A bylo tedy vysláno v době, kdy k nejdokonaleji vyvinutým živočichům naší planety náleželi korýši (např. Trilobita, Ostracoda) v prvohorních mořích. Zkameněliny trilobitů jsou ovšem i dnes ozdobou sedimentárních hornin českého Barrandienu.

Typické kosmologické rozměry jsou řádu  $10^{27} - 10^{28}$  cm, což je podstatně více než charakteristická velikost geologických a geofyzikálních objektů  $10^8 - 10^9$  cm. Přestože efekty obecné relativity dominují v kosmologickém měřítku, mohou být sledovány i jako odchylky od newtonovské fyziky ve sluneční soustavě nebo na menších objektech.

Vztahy prostorově a časově velmi vzdálených dějů ve vesmíru k Zemi lze dokumentovat i při objasnění původu radioaktivity hornin a výskytu prvků s hmotovým číslem větším než 12 ve sluneční soustavě vůbec. V planetárních podmínkách neprobíhají spontánní štěpné či termonukleární procesy. Hlavním zdrojem pozemských těžkých prvků byl pravděpodobně výbuch supernovy ve vzdálenosti zhruba 200 pc od oblasti, kde po  $10^5$  až  $10^6$  let vznikla kondenzací mezihvězdného plynu naše sluneční soustava.

Statistika četnosti výbuchů supernov pouze v naší Galaxii ukazuje, že v ní lze očekávat nejméně jednu explozi za století. Kromě emise gravitačních vln při tom vzniká krátkodobý silný tok kosmického záření. Vyšší organismy jsou na ozáření velmi citlivé. Při dávce  $0,129$  coulomb  $\cdot$  kg $^{-1}$ , absorbované během několika dnů, hyne přes 50% obratlovců a ostatní se stávají sterilní. Výbuch supernovy ve vzdálenosti 100 pc od Slunce může vyvolat ještě silnější tok záření. Za 110 miliard let by mohla Zemi zasáhnout vlna ozáření přes  $0,052$  coulomb  $\cdot$  kg $^{-1}$  zhruba 10krát, což by mělo být v paleontologických výzkumech indikováno vyhynutím některých druhů fauny.

K nejexotičtějším představám při rozborech interakce Země s vesmírným prostředím, které ji obklopuje, patří setkání planety s velmi malou primordiální černou dírou. Tyto černé díry – pokud existují – nevznikly gravitačním kolapsem hvězd, ale z malých perturbací extrémně stlačené horké husté hmoty, krátce po „big bangu“. Při hmotnosti miliardy tun by měla mít černá díra poloměr asi  $10^{-13}$  cm. Průměrná hustota primordiálních černých děr ve vesmíru však musí být menší než 200 na krychlový světelný rok [22], přičemž jejich lokální hustota v galaxii může být až  $10^6$ krát větší. Zemi nejbližší primordiální černá díra by tedy měla být nejméně tak daleko jako planeta Pluto. Pokud by taková miniaturní černá díra pouze značnou rychlostí Zemí prolétla, důsledky střetu by pravděpodobně byly podobné jako při pádu velkých meteoritů včetně druhotných seismických jevů. V případě exploze černé díry s uvedenou hmotností se však může uvolnit energie až do  $10^{28}$  Joule, což by ovšem vedlo ke zničení velké části planety.

Země a další tělesa sluneční soustavy mohou být v principu využity také jako detektory gravitačního záření. Snahy o zachycení gravitačních vln (jejichž existence plyne již z linearizovaných rovnic obecné teorie relativity) byly dosud neúspěšné. Při dopadu na soustavu částic jim gravitační vlna udílí relativní zrychlení úměrné jejich vzájemné vzdálenosti (podobněji viz [23]) v rovině kolmé ke směru šíření vlny, Gravitační vlnu charakterizuje pole slapových sil. Vlastní kvadrupólové kmity planety, registrované velmi přesnými seismografy, by mohly být tedy měřitelným efektem dostatečně intenzivního gravitačního záření, např. periodických monochromatických gravitačních vln z osově nesymetrických pulsarů.

Podle Dysona [24] je u rotující Země naděje na detekci tohoto typu gravitačního záření při seismické registraci v nízkofrekvenčním pásmu kolem 1 Hz. Experimentálně reálná je pouze detekce gravitačního záření z velmi silných zdrojů, jakými jsou černé díry, supernovy, pulsary a dvojhvězdy. Energie gravitačních vln závisí na vzdálenosti

Země od jejich zdroje. Posunutí zemského povrchu při průchodu gravitačních vln z pulsarů o toku energie zhruba  $10^{-12}$  Joule  $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$  má amplitudu řádu pouze  $10^{-17}$  cm. Kromě klasických seismografů a gravimetrů na Zemi nebo na Měsíci budou k detekci posunů částic vlivem gravitačního záření používány laserové interferometry, silně ochlazená masivní pružná tělesa, molekulární systémy, monokrystaly safíru apod. [25, 26].

Významným testem kosmologických modelů je zjišťování, které z modelů mohou vysvětlit vznik galaxií na určitém stupni vývoje vesmíru. Je-li existence galaxií jako základních stavebních jednotek vesmíru ve velkém měřítku také předpokladem vývoje inteligentního života, ověřovali bychom naše představy o kosmu i svými poznatky o životě na Zemi. Ze souboru všech možných modelů vesmíru, charakterizovaných různými přípustnými kombinacemi počátečních podmínek a základních fyzikálních konstant, je existence života, jak se nejméně 3,5 miliardy let v geologické historii planety vyvíjel, možná pouze za určité, velmi omezené kombinace parametrů. Tento antropický princip [27] klade důrazná omezení při výběru kosmologického modelu, který by uspokojivě popisoval náš vesmír.\*)

Prostorově homogenní modely vesmíru s různými typy anizotropií vyšetřovali Collins a Hawking [28]. Hledali modely vedoucí k pozorovanému typu izotropie vesmíru ve velkých měřítkách. Existuje pouze malý soubor počátečních podmínek, které vedou k modelům vesmíru s pozorovaným typem izotropie v současné době. Pozorovanou izotropii nelze vysvětlit bez zadání speciálních podmínek. Podle Dickeho a Cartera v modelech vesmíru s rychlostí expanze podstatně menší, než je úniková rychlost, by kolaps nastal dříve, než se vytvoří hvězdy a galaxie, zatímco ve vesmíru s rychlostí expanze podstatně větší, než je úniková rychlost, se z malých perturbací hustoty nevytvoří gravitačně vázané systémy. Pouze v modelech vesmíru s rychlostí expanze blízké únikové rychlosti se mohou vyvinout galaxie. Můžeme dokázat, že se tyto modely vesmíru obecně blíží i k pozorované izotropii. Za předpokladu, že existence galaxií je pro vznik života nutná, dokladem izotropie vesmíru může být i přítomnost života na Zemi.

#### Poznámka

*Za podnětné diskuse a připomínky při přípravě studie jsem zavázán RNDr. J. Bičákovi, CSc., a RNDr. J. Langerovi, CSc., z katedry matematické fyziky matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze.*

#### Literatura

- [1] MISNER, CH. W., THORNE, K. S., WHEELER, J. A.: *Gravitation*. San Francisco, Freeman nad comp. 1973.
- [2] WEINBERG, S.: *Gravitation and cosmology*. New York, London, Sydney, Toronto, Wiley and sons 1972.

---

\*) Život na Zemi může navíc existovat pouze v přísně vymezených fyzikálních podmínkách. Při povrchu naší planety má hmota teplotu řádově kolem  $3 \cdot 10^2$  K a hustotu  $10^{-4}$  až  $10^1$   $\text{g cm}^{-3}$ .

- [3] BIČÁK, J.: *Struktura a vývoj vesmíru*. Čs. čas. fyz. *A24* (1974), 425—445.
- [4] DICKE, R. H., PEEBLES, P. J. E., ROLL, P. G., WILKINSON, D. T.: *Cosmic-blackbody radiation*. *Astroph. J.* *142* (1965), 414—419.
- [5] SANDAGE, A.: *The redshift-distance relation, II. The Hubble diagram and its scatter for first-ranked cluster galaxies a formal value for  $q_0$* . *Astroph. J.* *178* (1972), 1—24.
- [6] PENZIAS, A. A., WILSON, R. W.: *A measurement of excess antenna temperature at 4080 mc/s*. *Astroph. J.* *142* (1965), 419—421.
- [7] BIČÁK, J.: *Záření černého tělesa z raných stadií ve vývoji vesmíru*. Čs. čas. fyz. *A18* (1968), 725 až 727.
- [8] STEWART, A. D.: *Paleogravity. Paleogeophysics* (vydavatel S. K. RUNCORN). London, New York 1970, 413—434.
- [9] KALVODA, J., ŠPŮREK, M.: *Kosmologické pozadí geologického vývoje*. Čas. min. geol. *23* (1978), 199—211.
- [10] KALVODA, J.: *Gravitační pole a vývoj povrchových tvarů planet*. Věst. Ústř. Úst. geol. *47* (1972), 51—53.
- [11] LANGER, J.: *Experimentální ověření obecné relativity*. Pokr. mat. fyz. a astr. *13* (1968), 333—356.
- [12] WILL, C. M.: *Relativistic gravity in the solar system. II. Anisotropy in the Newtonian gravitational constant*. *Astroph. J.* *169* (1971), 141—155.
- [13] DICKE, R. H.: *Experimental relativity. Relativity, groups and topology* (vydavatelé DE WITT a DE WITT). London, Glasgow 1964, 165—185.
- [14] JORDAN, P.: *Die Expansion der Erde*. Braunschweig, Vieweg und Sohn 1966.
- [15] SHAPIRO, I. I.: *Testing general relativity; progress, problems and prospects*. Proceedings of the Conference on experimental tests of gravitational theories (vydavatel P. W. DAVIES). California 1970, 136—147.
- [16] RICHARD, J. P.: *Test of theories of gravity in the Solar system. General relativity and gravitation* (vydavatelé G. SHAVIV, J. ROSEN). New York, Toronto, Jerusalem 1975, 169—188.
- [17] DYSON, F. J.: *The fundamental constants and their time variation. Aspects of quantum theory* (vydavatelé ABDUS SALAM, E. P. WIGNER). Cambridge 1972, 213—236.
- [18] WILL, C. M.: *Ostře sledovaný Einstein*. Pokr. mat. fyz. a astr. *18* (1973), 256—270.
- [19] KALVODA, J.: *The spacetime structure related to geological events*. Sb. Vys. šk. báň., v tisku.
- [20] TREDER, H. J.: *Thesen zur Kosmologie und Erdenstehung*. Ber. Deutsch. Gess. Geol. Wiss., Geol. Paläont. *16* (1971), 201—205.
- [21] WESSON, P. S.: *Cosmology and geophysics. Monographs on Astronomical Subjects: 3*. Cambridge, Bristol, Hilger Ltd. 1978.
- [22] HAWKING, S. W.: *Kvantová mechanika černých děr*. Čs. čas. fyz. *A28* (1978), 313—322.
- [23] LANGER, J.: *Pozorování gravitačních vln*. Čs. čas. fyz. *A24* (1974), 501—504.
- [24] DYSON, F. J.: *Seismic response of the Earth to a gravitational wave in the 1-Hz band*. *Astroph. J.* *156* (1969), 529—540.
- [25] MARVANOVÁ, V.: *Detekce gravitačních vln*. Pokr. mat. fyz. a astr. *21* (1976), 276—290.
- [26] KARSKÝ, G.: *Relativistická geodézie?* Geod. kart. obz. *25* (1979), 242—248.
- [27] CARTER, B.: *Large number coincidences and the anthropic principle in cosmology. Confrontation of cosmological theories with observational data* (vydavatel M. S. LONGAIR) Dodrecht 1974, 291—298.
- [28] COLLINS, C. B., HAWKING, S. W.: *Why is the Universe isotropic?* *Astroph. J.* *180* (1973), 317—334.