

# Preludium o sopkách, bombardování Země a formamidu

## Preludium o sopkách, bombardování Země a formamidu

Jaká je chemická struktura prvotních živých struktur 140

## Život je jen koncept

Dělit systémy na živé a neživé nedává smysl 146

## Překážka nebo výzva pro mimozemský život?

Mohl by existovat život na jiných tělesech sluneční soustavy? 150

další články k tématu na [www.vesmir.cz](http://www.vesmir.cz)

## Mezi chemií a smrtí

Před 290 byla poprvé syntetizována močovina, což navždy změnilo pohled na organickou chemii.

## Jsmo opravdu sami?

Metan na Marsu nesignalizuje přítomnost života

...a další příspěvky

Při úvahách o vzniku života si vědci kladou celou řadu otázek, na něž dosud nelze jednoznačně odpovědět. Kde se formoval, jaké jsou jeho stavební kameny, jaká je chemická podstata prvotních živých struktur... Současné znalosti a výsledky chemických, biochemických, genetických i fyzikálních experimentů nabízejí širokou paletu představ.

text **EDUARD KEJNOVSKÝ, JIŘÍ ŠPONER, MARTIN FERUS, SVATOPLUK CIVIŠ A JUDIT E. ŠPONER**

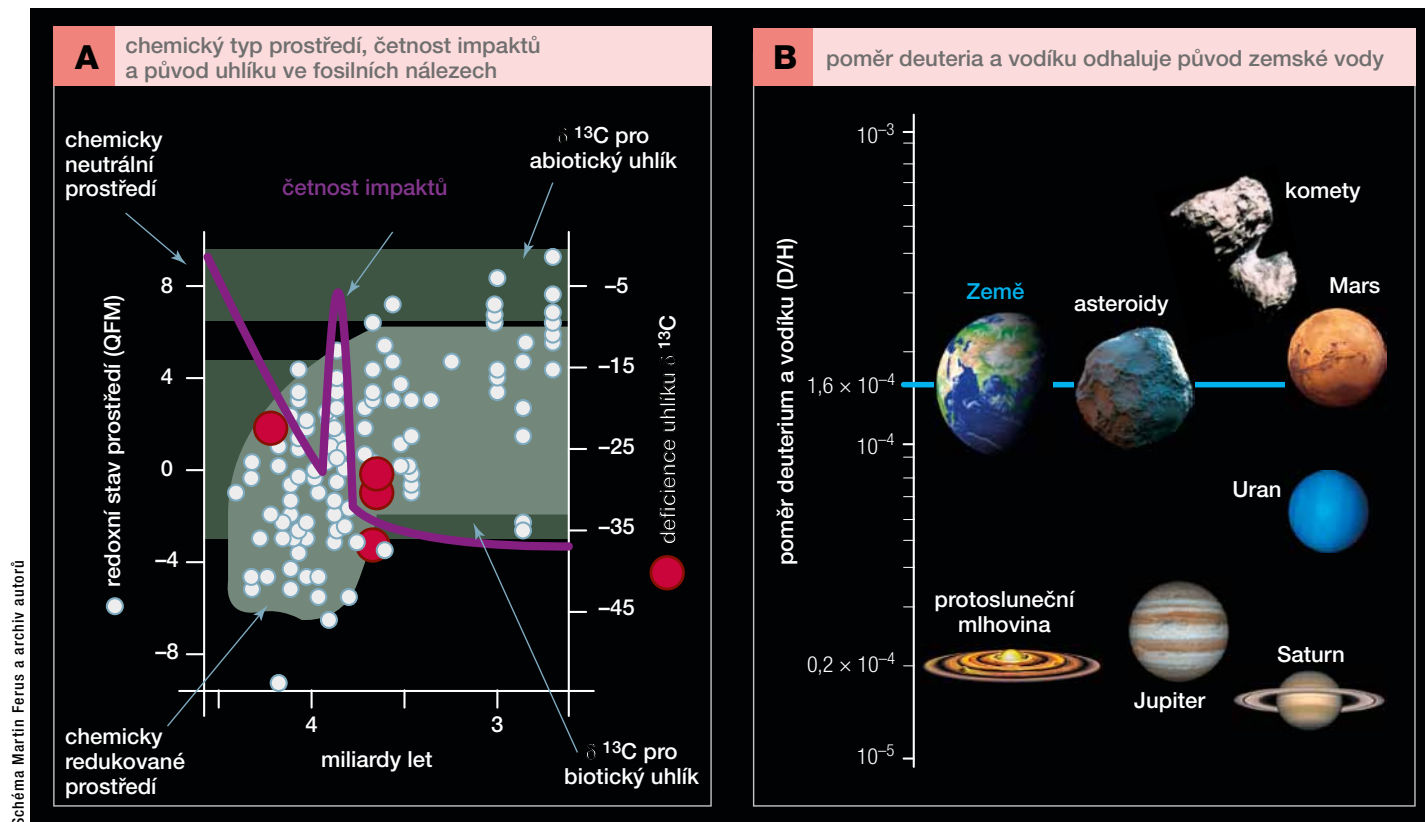
**KDYBYCHOM MĚLI** okno umožňující pohled do minulosti, mohli bychom odhalit hádanku vzniku života docela snadno. Příroda však postavila před člověka, kladoucího si tuto odvěkou otázku, řadu těžko překonatelných bariér. Řeka času smyla z povrchu Země téměř všechny stopy toho, jak několik set milionů let po vzniku naší planety složité organické sloučeniny ožily - projevily schopnost kopírovat sebe sama.

Nemilosrdná eroze zanechala lidstvu pouze odolné minerály nacházející se v mnohem mladších usazeninách - drahokamy zirkony. Z nich vědci usuzují, že před 3,6 miliardy let byla naše planeta velmi bohatá na organické látky (podmínky byly tzv. redukční) a také, že již před 4,325 miliardy let zde existovala kapalná voda, tedy podmínky příhodné pro život. Zirkony uchovávají nejstarší možné indicie jeho existence: Před 4,1 miliardy let byl do jejich nitra uzavřen uhlíkový materiál vykazující izotopové posuny  $^{13}\text{C}$  typické pro zkažené organismy (obr. 1A). Formování naší planety je datováno do doby před 4,5682 miliardy let, nicméně její povrch je mnohem mladší, neboť před asi 4,4 miliardy let se

srazila s bludnou planetou Theiou. Při této apokalypse vznikl náš souputník, Měsíc. Jeho zjizvená tvář odhaluje, že tato srážka nebyla před 4,4 až 3,8 miliardy let zdaleka jedinou kolizí s jinými kosmickými objekty. Země se dnes srazí průměrně jednou ročně s tělesem o velikosti jeden metr. Na srážku s větším asteroidem si musíme počkat i miliony let.

Když však vědci dostali například díky misím Apollo šanci prostudovat stáří kráterů na Měsíci (na Zemi je smyly erozní procesy), s překvapením zjistili, že většina z nich vznikla před více než 3,8 miliardy let. Mladších kráterů je jen málo a většinou dosahují menších rozměrů. Znamená to, že povrch Země byl v době vzniku života doslova bičován dopadajícími asteroidy, meteority a kometami. (Na obr. 1A je purpurovou barvou naznačena křivka postupného snižování frekvence impaktů na Zemi. Nárůst mezi 3,8-4 miliardami let je označován jako pozdní těžké bombardování předpokládané na základě datování některých velkých impaktních struktur na Měsíci.)

Má se však za to, že lavina materiálu z pásu asteroidů a chladnějších oblastí Sluneční



**1. ASTEROIDY** mohly přinést na naši planetu životodárnou vodu, těkavé plyny a snad i organické látky. Výsledky stanovení redoxního stavu prostředí podle stopových koncentrací kovu ceru v prastarých zirkonech odhalují jeho tzv. redukční charakter před 3,6 miliardy let ukazuje panel A (tzv. parametr QFM, blíže v článku Yanga X. a kol., *Earth and Planetary Science Letters* 393, 210-219, 2014). Ustávající četnost impaktů asteroidů znázorněná purpurovou křivkou viditelně koreluje s postupnou změnou chemického složení prostředí. Červené body ukazují nižší podíl uhlíku-13 ( $\delta^{13}\text{C}$ , ‰) dokladující biotický původ uhlíku v prastarých zirkonech a usazeninách apatitu (podle Bell E. A. a kol., *PNAS* 112, 14518-14521, 2015). Panel B zobrazuje srovnání poměru lehkého a těžkého vodíku ve vodě na Zemi a ve vodě detegované na různých tělesech sluneční soustavy. Shoda mezi pozemskými oceány a asteroidy je dobře patrná.

soustavy byla ve svém důsledku životodárná. Spolu s asteroidy se patrně dostal na Zemi i vodní led a ledy těkavých a plyných látek, které daly vzniknout husté atmosféře a poměrně mohutné hydrosféře. Bez nich by život na naší planetě nebyl možný (viz shodné poměry mezi lehkým a těžkým vodíkem na asteroidech a na Zemi, obr. 1B).

## OKNO DO MINULOSTI

Něco tedy o vzniku Země přece jenom víme. V poslední době nám navíc rozvoj citlivých spektrálních metod v astronomii pootevřel ono zázračné okno do minulosti. V nezměřném vesmíru lze pozorovat hvězdy různých typů a různého stáří, vidíme jejich zrod po desítkách, stovkách i tisících v takzvaných hvězdných porodnicích, kde kolabují mezihvězdná oblaka plynů a prachu, pozorujeme jejich zánik ve stadiu rudých obrů a supernov.

Moderní technika nám umožňuje odhalit či dokonce přímo spatřit i planety u cizích hvězd, včetně těch, které se nacházejí ještě v plenkách (tak jako naše Země v době vzniku života). Ačkoliv si na detailní pozorování

budeme muset ještě počkat, již známe chemické složení materiálu v oblastech formování nových hvězd (obr. 2) i protoplanetárních disků (obr. 2B), a to včetně těch, které obklopují mladé hvězdy slunečního typu, jako například „atraktivním“ jménem IRAS 16293-2422 AB (viz obr. 2C, spolu se seznamem zde nalezených zajímavých molekul).

Jak je vidět, tento objekt a s ním patrně i další mladé „sluneční“ soustavy obsahují spoustu organických látek včetně těch, ze kterých mohou chemickými pochody vznikat základní stavební kameny života. Také v pozůstatcích raného materiálu v naší vlastní Sluneční soustavě lze odhalit organické chemikálie nevyjímaje báze genetického kódu, cukry, mastné kyseliny či aminokyseliny. Známé jsou výsledky analýz řady uhlíkatých chondritů, například meteoritů Murchison, d'Orgueil či Paris.

Střípky skládačky shrnující některé informace o podmínkách panujících na Zemi a ve Sluneční soustavě v době vzniku života tak vypovídají o impaktech asteroidů, které přinášejí na mladé planety vodu, atmosféru a bohatství organických

sloučenin z meziplanetárního prostoru. Co se s těmito látkami děje během dopadu, jaké přesné chemické prostředí na raných planetách panuje, jak je stabilní, z čeho, kde a jak život následně vzniká, je však již příliš detailní otázka, na kterou současná věda zatím hledá odpověď.

## VZNIK ŽIVOTA – ŠIROKÁ PLEJÁDA PŘEDSTAV

Asi nejznámější Ureyovy-Millerovy experimenty (publikované v roce 1953) simulují prebiotické podmínky a vycházejí z předpokladu Alexandra I. Oparina a Johna Haldana, že prvotní atmosféra Země měla redukční vlastnosti (podle původních představ ji tvořila směs plynů jako je vodík, metan, dusík, čpavek, oxid uhelnatý s menším množstvím oxidu uhličitého, uhlovodíků, sulfanu, fosfanu). Další hypotézy umísťují primitivní replikující se molekuly na dno oceánů do extrémního prostředí hydrotermálních prúdů zvaných „černí kuřáci“ (black smokers). Představy Güntera Wächtershausera zase zdůrazňují důležitost (proto)metabolismu sulfidů kovů. Ten měl předcházet světu nukleových kyselin. Zajímavé jsou i scénáře existence života v extrémních teplotních i tlakových podmínkách v hlubokých vrstvách zemské kůry (litosférické organismy, živící se bizarním způsobem, možná tvoří většinu biomasy na naší planetě) popsané Thomasem Goldem v knize *The deep hot biosphere* (viz recenzi, *Vesmír* 79, 253, 2000/5).

Za pozornost stojí také teorie vycházející z klasické představ formování života v mělkých lagunách. Spekuluje o tom, že právě tam mohly dopadat meteority a asteroidy nesoucí důležité chemické látky představující

**2. OKNO DO MINULOSTI – obrázky tzv. hvězdných porodnic na panelu A, protoplanetárních disků kolem mladých hvězd na panelu B včetně těch odpovídajících svou velikostí mladé hvězdy IRAS 16293-2422 AB na panelu C. Spektrální analýza odhaluje přítomnost řady organických sloučenin (viz tabulku dole). Ty byly objeveny v prastarých uhlíkových meteoritech, v nichž se vyskytovaly i aminokyseliny, cukry, nukleové báze a mastné kyseliny.**

Schéma a podklady Martin Ferus, NASA  
a <https://almascience.eso.org/alma-science/planet-forming-disks>

sloučeniny objevené v IRAS 16293-2422 AB	
1997	ionty CO <sup>+</sup>
2000	formaldehyd
2003	metanol
2007	izokyanát
2013	<b>formamid</b>
2014	acetonitril, keten, acetaldehyd, dimetyléter, metylformiát
2017	metylizokyanát

jeho základní stavební kameny (viz Vesmír 96, 646, 2017/11). V tomto ohledu lze hovořit o tzv. chemické panspermi, tedy osetí Země chemikáliemi umožňujícími přímý vznik živých struktur. S tím souvisí i staronová koncepce původní myšlenky panspermie – „infekce“ zemského povrchu zárodky života.

Teorie panspermie, ať už biologické či chemické, se však potýká s řadou problémů. Jakékoliv chemické látky obsažené v kosmickém projektilu jsou vystaveny účinkům plazmatu a mohou být zcela rozloženy. Nežraněny mohou zemského povrchu dosáhnout pouze tělesa určitých rozměrů, neboť příliš malý objekt se vypaří při cestě atmosférou a příliš velký při srážce s povrchem. Osetí planet organickými látkami však nelze vyloučit a jak bylo zmíněno v úvodu, má se za to, že redukční charakter prostředí na rané Zemi, doložený analýzou prastarých zirkonů, mohl být přímým důsledkem dopadu asteroidů a komet bohatých na sloučeniny uhlíku pocházející z meziplanetárního prostoru akrečního disku kolem mladého Slunce. Oproti tomu teorie panspermie nepřináší nic nového ať už předpokládá zárodky života na asteroidech (tzv. litopanspermie) nebo nověji také v částech rychle se pohybujícího prachu uvolněného z povrchu planet.

Pokud bychom připustili přenos živých forem, pak otázku vzniku života nezodpovídáme, jen ji posouváme mimo Zemi. Důkazy podporující teorii panspermie jsou zatím

málo propracované a největším problémem zůstává přežití jakýchkoliv forem života v podmínkách kosmického prostoru po tisíce i miliony let. Ani výsledky získané na mikroorganismech vystavených kosmickým podmínkám nemusejí být zcela relevantní. Pokud bychom alespoň připustili přenos života mezi terestrickými planetami uvnitř Sluneční soustavy, můžeme předpokládat, že stejně dobře jako na Marsu mohl život podobnými pochody vzniknout také na Venuši, Zemi či na všech planetách současně, neboť se mezi sebou nemusely v raných stadiích vývoje příliš lišit.

V široké plejádě představ o počátcích života – od otázky, kde život vznikl, po otázku jakou podobu měly první živé chemické struktury (replikátory) – se jako červená nit táhnou témata

- dělby práce mezi molekulami zajišťujícími uchování genetické informace a molekulami plnícími nějakou katalytickou funkci;
- otázka vzniku a formování genetického kódu;
- problém nezbytné minimální koncentrace monomerů základních stavebních bloků a účinnost jejich následné polymerace;
- problém stability i nestability prvních autokatalytických cyklů.

#### TEORIE SVĚTA RNA

Obecně přijímaná a v současnosti zřejmě dominující hypotéza je teorie světa RNA. Moderní genetický materiál v podobě

molekul DNA se do hry dostal až po počátečním období života založeném na genomech RNA. Kdy a jak DNA vstoupila do děje, ale pořád nevíme.

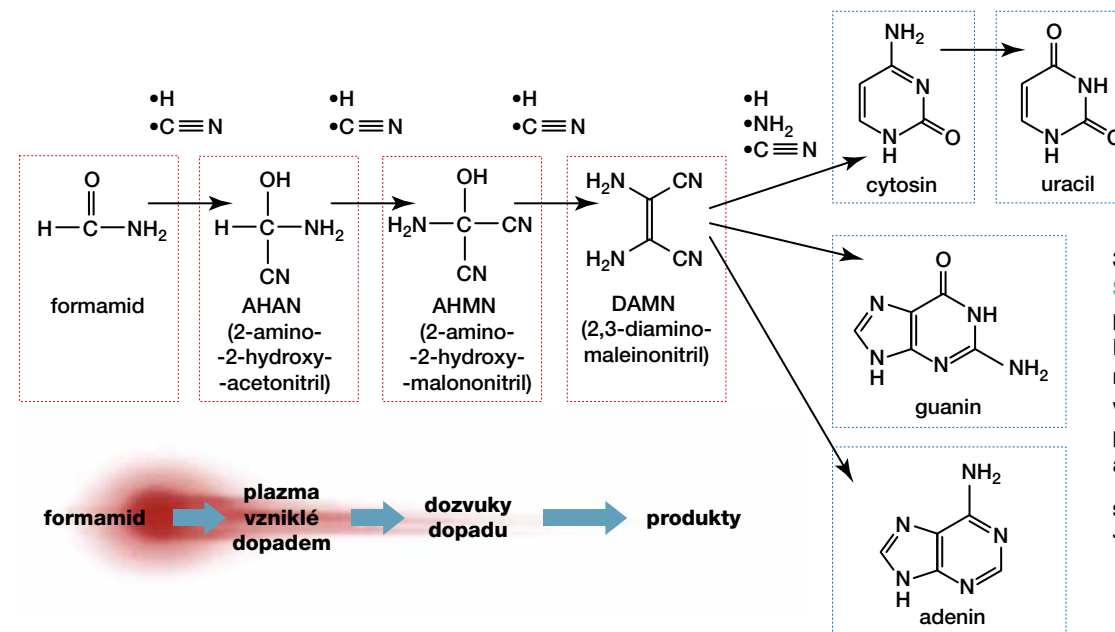
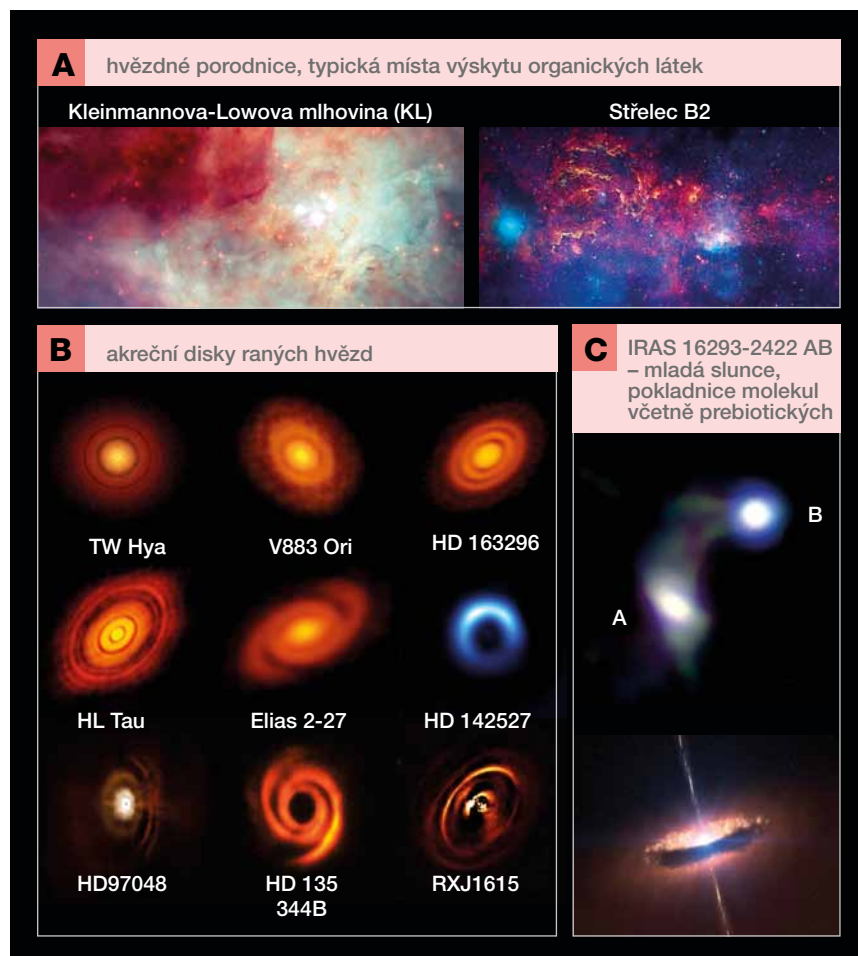
Představa světa RNA je vybudována na několika do sebe logicky zapadajících předpokladech: Molekuly RNA jsou v dnešních biologických systémech všudypřítomné, mají katalytické schopnosti (ribozomy), genomy obsahují retroelementy, tj. úseky vkládající své kopie do jiných míst genomu prostřednictvím molekul RNA.

Je otázkou, které z dnešních molekul RNA lze považovat za relikty světa RNA stojícího na počátku života a které jsou mladší a odvozené. Pravděpodobně nejstarší známý „relikt“ světa RNA je katalytické centrum velké ribosomální podjednotky.

Je však nutné připustit, že rekonstruování obrazu dávného světa prvních molekul nukleových kyselin není jednoduché. RNA je již značně komplexní molekula, dosti nestabilní, její katalytické schopnosti jsou vzácné a repertoár reakcí omezený. Proto nelze vyloučit, že v budoucnu může dojít k nahrazení hypotézy světa RNA hypotézou alternativní (proteiny na počátku, koevoluce RNA a proteinů či jiné molekuly), ale tak to ve vědě chodí.

#### DŮLEŽITÁ ROLE FORMAMIDU

Vydejme se opět na cestu proti proudu času a podívejme se na samotné počátky chemické evoluce, která předcházela evoluci



**3. MECHANISMUS SYNTÉZY** všech čtyř bází přítomných v molekulách RNA z formamidu pomocí radikálové chemie v chladnoucím plazmatu při dopadu meteoritu či asteroidu.

Schéma Martin Ferus, Judit E. a Jiří Šponerovi

biologické. Za přechod mezi oběma světy můžeme považovat vznik jednobuněčných organismů, snad podobných dnešním prokaryotům. Řada experimentů vytvářela vědomostní podhoubí pro úvahy a scénáře popisující, jak mohly vznikat proteiny a nukleové kyseliny. Tyto komplexní polymerní biomakromolekuly se formovaly z mnohem jednodušších mateřských molekul.

Již delší dobu se předpokládá, že cukerná složka RNA, ribóza, mohla vznikat formózou reakcí z formaldehydu, zatímco pyrimidiny (cytosin a uracil) z kyanooacetaldehydu nebo kyanooacetyleny, a puriny (guanin a adenin) z kyanovodíku. Kyanovodíková hypotéza však předpokládá přítomnost vody při formování prvních genetických molekul. O vodě je ale nyní známo, že byla

Zanedbat nelze ani další možné zdroje formamidu. Byl nalezen například i v protoplanetárním disku u výše zmíněné mladé hvězdy slunečního typu IRAS 16293-2422 AB. Mohl tak přijít na Zemi i ve formě chemické panspermie. Kromě toho vzniká také působením elektrických výbojů a rázových vln ve směsi čpavku, oxidu uhelnatého a vody, tedy prototypu redukční atmosféry, která mohla Zemi halit v době před vznikem života. Formamid je také produktem hydrolyzy kyanovodíku, který vzniká působením elektrických výbojů a rázových vln na většinu organických látek (dopadajících spolu s asteroidy na ranou Zemi). Experimenty již navíc jednoznačně ukázaly, že za vysokých energií a teplot se mohou z formamidu syntetizovat nukleobáze. Raffaele Saladino a Ernesto Di Mauro ozařovali formamid

chemikáliemi pro vznik biomolekul. Co se s nimi stalo? V louži formamidu po zásahu rázovou vlnou, při vysoké teplotě a tlaku mohlo docházet k reakcím s produkty jeho rozkladu (jako jsou radikály CN<sup>•</sup> a NH<sup>•</sup>), a tak se bez potřeby katalýzy syntetizovaly báze RNA. Výhodou formamidu je, že mohl být prekurzorem všech čtyř bází RNA najednou (obr. 3).

Stále zůstává otázkou, jakou roli při tvorbě prvních molekul sehrály dopady meteoritů a jakou aktivita sopek (obr. 4). Termální syntéza bází a některých ostatních molekul prokázali experimentálně Di Mauro a Saladino, nebylo však jasné, zda termální energie pochází z vulkanické činnosti. Podle vulkanického modelu Judit Šponer a kol. postupné snižování teploty umožnilo chemické přeměny vedoucí ke stále komplexnějším molekulám. Formamid (teplota varu 210 °C) se nejprve vytvářel disociací mravenčanu amonného (při teplotě kolem 180 °C). Chemická syntéza organických stavebních kamenů se odehrávala po zchladnutí formamidu, nejlépe při teplotách 130-150 °C. Ve vodě by vznikat nemohly kvůli její nižší teplotě varu.

Hlavním důvodem diskvalifikujícím vodu je ale zřejmě chemická nestabilita prekurzorů RNA ve vodě. Ty totiž vznikají kondenzačními reakcemi, při nichž se uvolňují molekuly vody, což je díky reverzibilitě těchto reakcí problém ve vodním prostředí, nikoliv však ve formamidu (viz výše zmíněná chemická toxicita vody). Oligonukleotidy se pak mohly tvořit z 3',5' cyklických nukleotidů již asi při 85 °C.

Za přechod od neživého k živému lze považovat zrození katalytické aktivity RNA při teplotách kolem 65 °C. Důležitým momentem v popisovaném scénáři byl pokles teploty pod 100 °C, což posunulo chemickou rovnováhu ve prospěch samovolného vzniku informačních biopolymerů, jež mohly, obklopeny polévkou jiných organických molekul, začít své první neobratné

### „Jako by život byl logickým důsledkem přirozeného vývoje hmoty a energie začínajícího velkým třeskem.“

pro první replikující se molekuly možná toxická, hydrolyzou je neustále rozbíjela. První a nejtriviálnější evoluční „pokusy“ o vznik nejstaršího chemického RNA života se tedy pravděpodobně odehrávaly v jiném chemickém prostředí.

V poslední době se objevuje názor podpořený experimenty, že významným prekurzorem bází nukleových kyselin mohl být formamid (HCONH<sub>2</sub>, známý také jako amid kyseliny mravenčí). Při masivní vulkanické činnosti na mladé Zemi nemusela být o formamid nouze, mohl se tvořit z kyseliny mravenčí a amoniaku v atmosférických výbojích díky tření mezi prachovými částicemi v průběhu sopečných výbuchů. Na úpatí sopek pak mohl formamid kondenzovat a poskytovat materiál prvním chemickým reakcím, probíhajícím krok za krokem, pomalu a nevratně.

protony, čímž simulovali sluneční vítr, a získali tak dokonce nukleosidy adenosin, cytidin a uridin. Je známo, že sluneční erupce významně utvářely složení atmosféry dávné Země.

#### BOMBARDOVÁNÍ ZEMĚ A SOPEČNÉ ERUPCE

Značnou pozornost vědecké obce upoutala i hypotéza českých badatelů, že zdrojem vysokých energií, potřebných k prvním prebiotickým reakcím, mohl být také velké bombardování Země asteroidy. V té době dopadalo na povrch naší planety o několik řádů více meziplanetární hmoty, než dnes – až 10<sup>10</sup> tun ročně. Fyzikální následky dopadu těles pohybujících se rychlostmi desítek kilometrů za vteřinu byly apokalyptické. Tehdy však na Zemi byly přítomny organické látky a mezi nimi také formamid – mateřská

pokusy o chemickou evoluci ve vodě jako rozpouštědla.

Celý tento chemický experiment (řízený poklesem teploty a probíhající podle principů nerovnovážné chemie) od zkapalnění formamidu až po spontánní vznik krátkých molekul RNA se mohl odehrát za přítomnosti vhodných minerálů během několika hodin, v důsledku fluktuací vulkanické aktivity, pohybu materiálu, střídání dne a noci i kolísání povětrnostních podmínek.

Ve skutečnosti se vulkanická činnost a dopady meziplanetární hmoty pohybující se v mladém Sluneční soustavě po nestabilních drahách mohly doplňovat, meteority mohly přinášet chemickou variabilitu, dodávat katalytické materiály či organické molekuly (dnes již víme, že vznikají ve vesmíru běžně).

Obě teorie jsou podpořeny experimentálně a jsou platné pro celý vesmír. Chemických cest k prvním „darwinistickým“ biopolymerům je ale určitě více. Nepochybným důsledkem sopečné činnosti a „nukleární zimy“ po častých dopadech asteroidů musela být i hustá oblačnost s četnými elektrickými výboji. Naše výzkumy rovněž ukázaly, že i za těchto podmínek vzniká formamid a nukleové báze.

Skutečně, raná Země byla velmi dynamickým systémem. Mladou planetu si lze jen těžko představit jako unylý chemický reaktor pracující za jednotných podmínek. Rychlý přechod z jednoho prostředí do druhého (ať v místě nebo v čase) vytváří předpoklady spíše pro jakousi chemickou revoluci než pozvolnou evoluci v původním smyslu slova. Zde se možná nabízí odpověď na otázku, jak se mohl život na Zemi po bombardování vesmírnými tělesy objevit tak „rychle“, když jeho následná evoluce trvala od nejprimitivnějších forem po mnohobuněčné organismy tak dlouho (první doložené živé struktury dělí od vzniku oceánů 100 až 200 milionů let, jednobuněčný život od mnohobuněčných organismů téměř tři miliardy let). Možná byla existence biomolekul bombardováním podmíněna, následný vznik života se pak udal velmi rychle, stejně jako velmi rychle probíhá řada chemických reakcí. Další evoluci možná nepovažujeme za rychlou pouze díky našemu omezenému vnímání.

Co všechno se muselo stát, než vznikl první mnohobuněčný život se složitou diferenciací tkání? Evoluce vedoucí k základní stavební jednotce – eukaryotní buňce – byla možná mnohem složitější než následný vývoj mnohobuněčných organismů.

## JE ŽIVOT POUHOU NÁHODOU?

Vznikl život právě v tomto období trvalé sopečné činnosti a zejména zvýšeného bombardování Země asteroidy? Je možné, že silné bombardování mohlo přispět třeba tím, že napomohlo transformaci biomolekul a jejich prekurzorů na zemském povrchu,

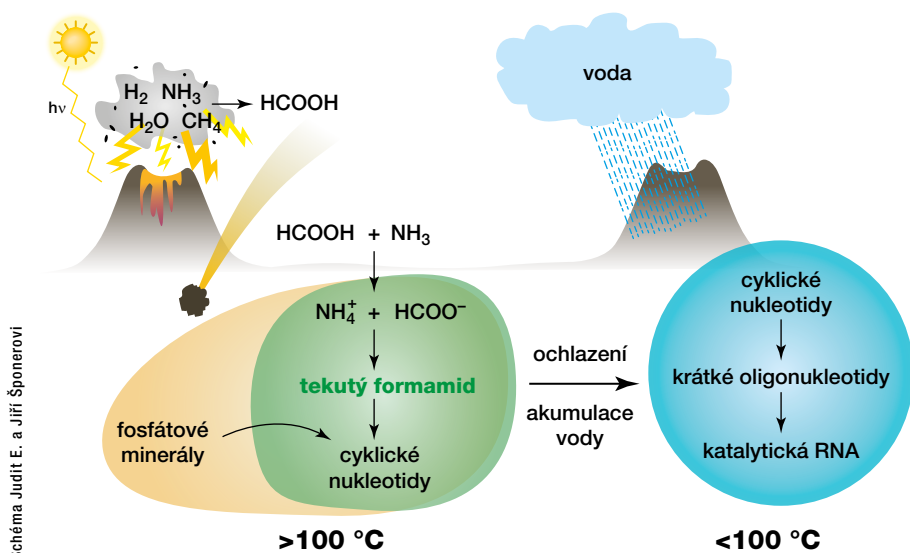


Schéma Judit E. a Jiří Šponerovi

**4. JEDEN (NE)VŠEDNÍ DEN** na úpatí sopky na konci hadaika (někdy též prearchaikum, před 4,6 až 3,8 miliardy let). Po masivní erupci vzniká z kyseliny mravenčí a amoniaku formamid, který může nad teplotou bodu varu vody kondenzovat a vytvořit ideální podmínky pro vznik prekurzorů molekul RNA, cyklických nukleotidů. Při poklesu teploty se chemická rovnováha skokově posune ve prospěch spontánní oligomerizace prvních RNA. Po přidání vody (například deště) první oligonukleotidy získají i schopnost „samoštěpení“ a tedy „změny sekvence“ a nastartují evoluci. Všechny znázorněné dílčí chemické kroky jsou experimentálně prokázány.

ať již při tom byla úloha formamidu větší, či menší. Nicméně stále zůstává ve hře i tradiční názor, že život mohl vzniknout až poté, co destruktivní bombardování skončilo. Nejsme zde schopni odlišit příčinu a důsledek, oba scénáře jsou kompatibilní se známými daty.

Musíme se smířit s představou, že počátky života i podoba prvních genetických systémů se nám nevratně ztrácejí v dále za obzorem, 4 miliardy let rozostřily naši optiku. Jejich obraz můžeme načrtávat jen s obtížemi, opření o nejrůznější experimenty simulující dávné podmínky na Zemi, a naše závěry bychom neměli přeceňovat. Stále zobrazujeme jen více či méně pravděpodobné scénáře, které nejsou v rozporu se zákony fyziky, chemie či genetiky. Nicméně výše uvedené

objevy naznačují, že vznik života nemusí být pouhou náhodnou událostí, ale že je spíše přímým důsledkem podmínek, které vládly na primordiální Zemi a v jejím okolí.

Ať již byly chemické podmínky pro vznik darwinistických biopolymerů jakékoliv, je pravděpodobné, že se událo mnoho pokusů o vznik života na bázi RNA. Většina z nich ale měla jepičí život. Z velkého množství realizací se nakonec jednomu či více pokusům podařilo obstát a pokročit vpřed k vyšší komplexitě.

Jako by život byl logickým důsledkem přirozeného vývoje hmoty a energie začínajícího velkým třeskem. Když první generace hvězd poskytly chemický materiál (prvky jiné než vodík a helium) pro organické molekuly, začaly kolem dalších generací hvězd vznikat podmínky pro vznik planet s vhodným chemickým materiálem. Tato metamorfóza energie ve hmotu vytvořila předpoklady (spolu s termodynamickou nerovnováhou) k samoorganizaci vedoucí nakonec k darwinistickému chování chemických systémů – reprodukci s variací doprovázenou selekcí.

Princip evoluce přitom představuje základní přírodní zákon platný ve vesmíru, stejně tak jako platí Newtonova mechanika, kvantová mechanika, teorie relativity, či zákony termodynamiky. Od ostatních principů se liší jen tím, že se začne projevovat až po určité době vývoje vesmíru. ●

## K dalšímu čtení...

Ferus M. a kol.: High-energy chemistry of formamide: A unified mechanism of nucleobase formation. PNAS 112, 657–662, 2015/3.

Ferus M. a kol.: Formation of nucleobases in a Miller-Urey reducing atmosphere. PNAS 114, 4306–4311, 2017.

Saladino R. a kol.: Genetics first or metabolism first? The formamide clue. Chem. Soc. Rev. 41, 5526–5565, 2012.

Saladino R. a kol.: Meteorite-catalyzed syntheses of nucleosides and of other prebiotic compounds from formamide under proton irradiation. PNAS 112, E2746–E2755, 2015.

Sponer J. E. a kol.: Emergence of the first catalytic oligonucleotides in a formamide-based origin scenario. Chem. Eur. J. 22, 3572–3586, 2016.

Sponer J. E. a kol.: New evolutionary insights into the non-enzymatic origin of RNA oligomers. Wiley Interdisciplinary Reviews-RNA 8, e1400, 2017.

 více o autorech na [www.vesmir.cz](http://www.vesmir.cz)