

Původ vody ve vesmíru a na Zemi

ROZHOVOR O VZNIKU VODY NA POVRCHU METEORITU BOMBARDOVÁNÍM „STELÁRNÍM“ A „SOLÁRNÍM“ VĚTREM

Svatopluk Civiš¹, Jana Žďárská²

¹ Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, Dolejškova 2155/3, 182 28 Praha 8-Kobylisy

² Fyzikální ústav AV ČR, Na Slovance 2, 182 21 Praha 8

Vědci se již dlouhou dobu snaží zjistit, jakým způsobem vznikla nebo jak se dostala voda na planetu Zemi. Zdali se tak stalo již při formování Sluneční soustavy, nebo až později – třeba prostřednictvím dopadu těles v době pozdního velkého bombardování (Late Heavy Bombardment – LHB) asteroidů, které do planety Země narážely. Astronomické poznání vesmíru v současnosti velice pokročilo a nabízí řadu řešení, jak se odpovědi na tuto fundamentální otázku přiblížit. O tom, co je nového v této oblasti laboratorního výzkumu, jsme hovořili s fyzikálním chemikem prof. RNDr. Svatooplukem Civišem, DSc., z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR.

■ **Jana Žďárská:** Působíte jako fyzikální chemik a mimo jiné se významnou měrou věnujete chemickému výzkumu vesmíru. Opakoval a testoval jste Millerovy–Üreyovy pokusy¹, týkající se vzniku aminokyselin za působení elektrických výbojů v prvopočátcích planety Země, studoval jste vznik metanu na Marsu^{2,3} a nyní jste s kolegy úspěšně publikoval článek o vzniku vody

na Zemi v prestižním americkém časopise *Astrophysical Journal*. Přiblížili jste se díky tomu zase o krok blíže k poznání vzniku života na Zemi?

Svatopluk Civiš: Dlouhá léta se zabývám studiem polovodičových materiálů, celá řada z nich se vyskytuje v krystalické formě na Zemi i na planetách včetně meteoritů v hojné míře. Fascinují mě vlastnosti těchto materiálů i jejich přesah, funkce v přírodě kolem nás i mimo naši planetu. V této studii o vzniku vody ve vesmíru a původu vody na Zemi je to v pořadí již třetí jev, který mě nadchl a inspiroval k aplikacím spojeným s vesmírem

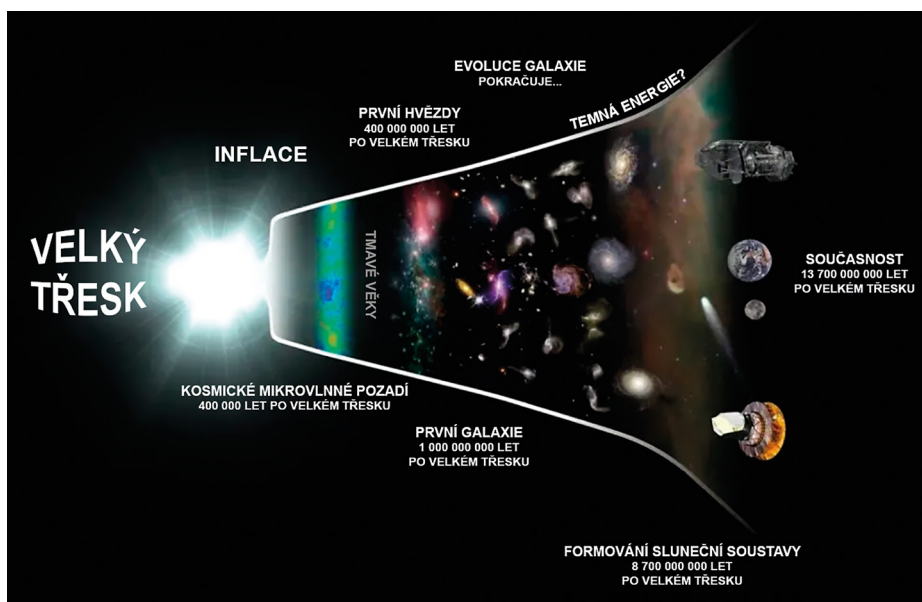
1 <https://doi.org/10.1073/pnas.1700010114>

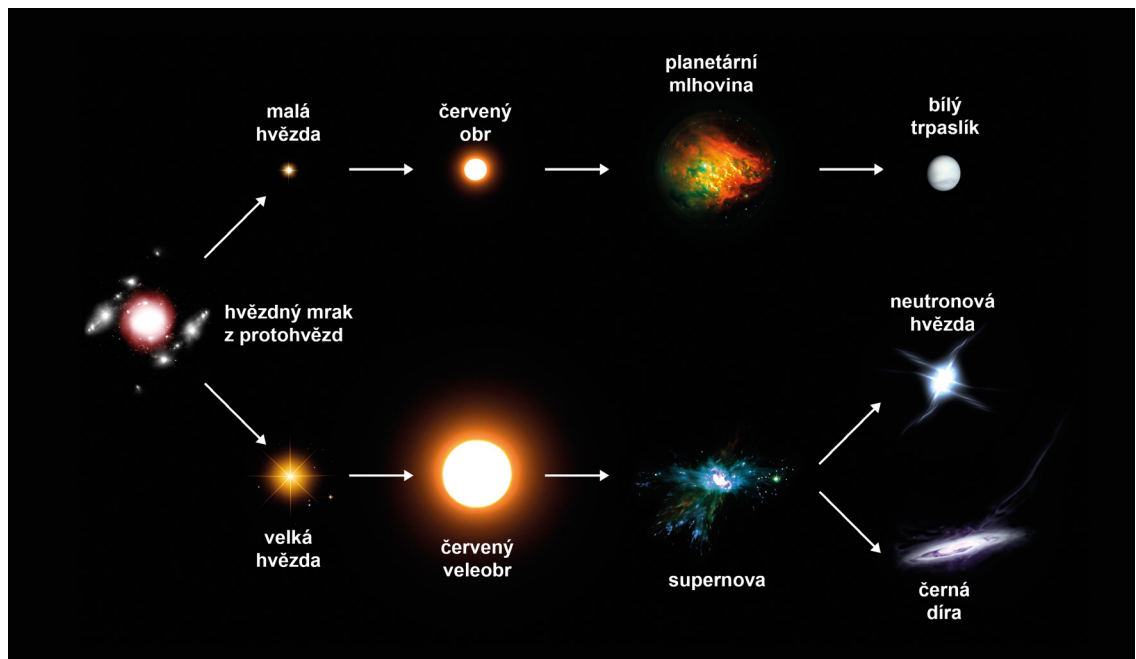
2 Svatoopluk Civiš, Jana Žďárská: Nalezne Perseverance původ metanu na Marsu? *Čs. čas. fyz.* 71, 160–168 (2021).

3 <https://www.nature.com/articles/s41550-017-0260-8>

Obr. 1

Několik sekund po velkém třesku se jako první v gluon-kvarkovém plazmatu objevily atomy vodíku. Avšak první hvězdy vznikly až 400 milionů let po velkém třesku. Poté musely projít procesy vzniku a zániku, při kterých se teprve objevily složitější prvky, včetně kyslíku. Teprve potom mohla vzniknout voda.





Obr. 2 Vznik a zánik hvězd, zjednodušené schéma.

nou chemií. Nejprve to byla výměna kyslíku mezi pevnými oxidy kovů a oxidem uhličitým, metanogeneze, kdy dochází v kyselém prostředí k redukci oxidu uhličitého na metan a nyní interakce hvězdného větru (*Stellar wind*, nabité atomy vodíku H^+) s kyslíkovými atomy vázanými v minerálech za následného vzniku vody.

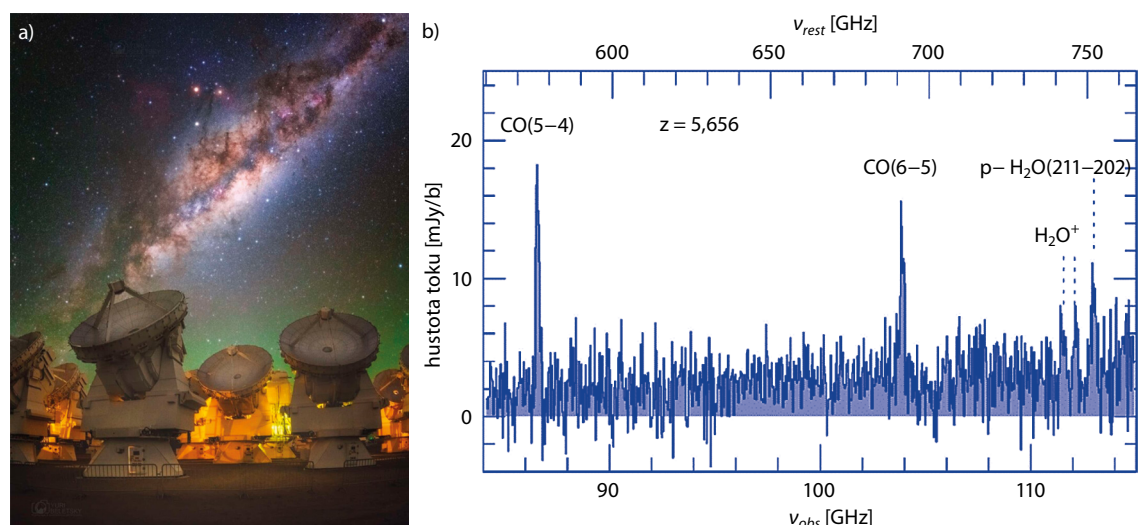
■ JŽ: *Původní práce, která nyní vyšla v časopise *Astrophysical Journal*, má poněkud obecnější název i charakter. Je určena pro širokou astronomickou obec a jmenuje se *Stellar Wind Contribution to the Origin of Water on the Surface of Oxygen-containing Minerals* (Příspěvek hvězdného větru ke vzniku vody na povrchu oxidických minerálů) a najdete ji v otevřeném přístupu na adrese: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/ad77cd>. Mohl byste nám vysvětlit, co bylo motivací této práce?*

SC: Chtěl jsem se laboratorními experimenty dostat k objasnění původu vody na naší planetě. Exis-

tuje řada teorií o původu vody na Zemi. Jedna z nich tvrdí, že voda na naší planetě je již od jejího počátku, tedy od formování Sluneční soustavy z protoplanetárního disku a je tady ve Sluneční soustavě a zároveň také na Zemi odpradávná. Viz obrázky 9. Odpůrci této teorie argumentují tím, že v době zhruba před 4 miliardami let došlo k oddělení Měsíce od Země impaktem asteroidu o velikosti Marsu. Tento náraz způsobil přetavení povrchu Země i Měsíce. Úvaha, že voda na naší planetě setrvala i přes obrovské teploty vzniklé při srážce obou těles, je málo pravděpodobná. Pak okamžitě vyvstane otázka, odkud se tedy voda na naši planetu dostala.

■ JŽ: *Ale voda na Zemi je. Jak se sem tedy dostala a odkud?*

SC: Existuje mnoho vysvětlení o původu vody na naší planetě, jedním z nich je možnost transportu vody vázané na povrchu různých těles, včetně asteroidů a komet, v době formování naší Sluneční soustavy.



Obr. 3 a,b ALMA spektrum vzdálené galaxie SPT0346-52 ukazující detekce čistě rotačních čar neutrální a ionizované vody spolu s CO. Galaxie má červený posun $z = 5,66$. Tento červený posun odpovídá stáří pouze 1,0 miliardy let od velkého vřesku. Obrázek 3b převzat z: A. Weiß, C. De Breuck, D. Marrone, et al. ALMA Redshifts of Millimeter-selected Galaxies from the SPT Survey: The Redshift Distribution of Dusty Star-forming Galaxies. *The Astrophysical Journal* **767**, 88 (2013). <https://doi.org/10.1088/0004-637X/767/1/88>

■ *JŽ: Jak ale zjistit, jak to skutečně bylo? Je možné nějakým způsobem pravdu nejen vypátrat, ale i dokázat?*

SC: Máme štěstí, že současné informace o chemii vesmírných těles, získané prostřednictvím různých satelitů vyslaných do vesmíru, poskytují tolik informací, že jsme schopni do té hlubiny trošku nahlédnout. Náš výzkum a pátrání jsou postaveny na principu izotopického zastoupení vodíku, ať už těžkého, či lehkého, v různých vesmírných materiálech. A podle tohoto zastoupení pak lze usoudit, odkud takový materiál pochází.

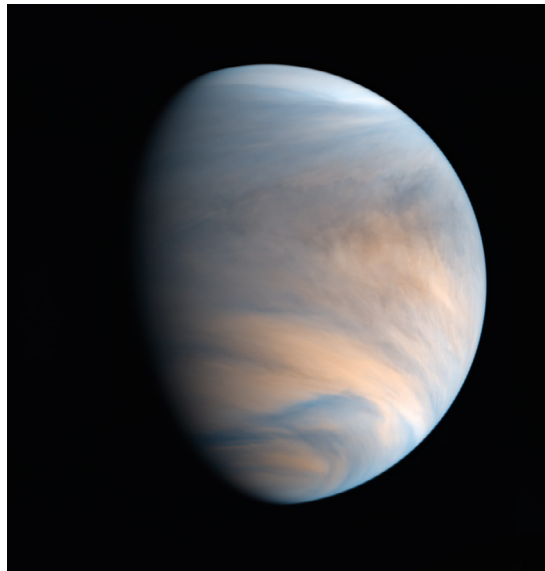
■ *JŽ: A jak to můžete poznat?*

SC: My jsme schopni zkoumat vesmírná tělesa na základě izotopického poměru D/H. Porovnááme izotopické zastoupení deuteria k atomu vodíku ve vodě vázané na nějaký materiál přicházející z vesmíru. Platí obecná rovnice izotopické rovnováhy mezi DH molekulou a vodou, z níž vyplývá, že čím je nižší teplota v prostoru, odkud objekt přichází, tím je větší zastoupení deuteria. Naopak, přichází-li objekt z teplejších oblastí našeho vesmíru, například z blízkosti Slunce, voda má mnohem větší zastoupení vodíku oproti deuteriu. Na základě těchto faktů lze usuzovat, odkud přicházející materiál pochází.

■ *JŽ: A je známo, jak a kdy voda ve vesmíru vznikla?*

SC: Existuje řada způsobů, jak voda může vznikat. Ve vesmírných molekulárních plynových mračnecích převažují iontové procesy. Ve hvězdách za vysokých teplot převažuje atomizace a následné slučování atomů mezi sebou. Dalším způsobem jsou procesy spojené s reakcemi na povrchích prachových částic.

Vesmír je starý zhruba 13,7 miliardy let. Viz obr. 1. Abychom zjistili, kdy v něm vznikly první molekuly vody, musíme se vrátit úplně na začátek, tedy do období velkého třesku. Několik sekund po velkém třesku se jako první v gluon-kvarkovém plazmatu objevily atomy vodíku. Ale jak všichni víme, vodík ke vzniku vody potřebuje svého partnera – kyslík. Kyslík je však produktem termonukleárních reakcí ve hvězdách. Viz obr. 2. Avšak první hvězdy vznikly až 400 milionů let po velkém třesku. Poté musely projít procesy vzniku



Obr. 4 Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, teplota 460 °C, tlak atmosférického CO₂ 90 barů.

a zániku, při kterých se teprve objevily těžší prvky, včetně kyslíku. Pak teprve mohla vzniknout voda.

■ *JŽ: A jak je tato voda na vesmírných tělesech vázána? Na povrchu, nebo uvnitř?*

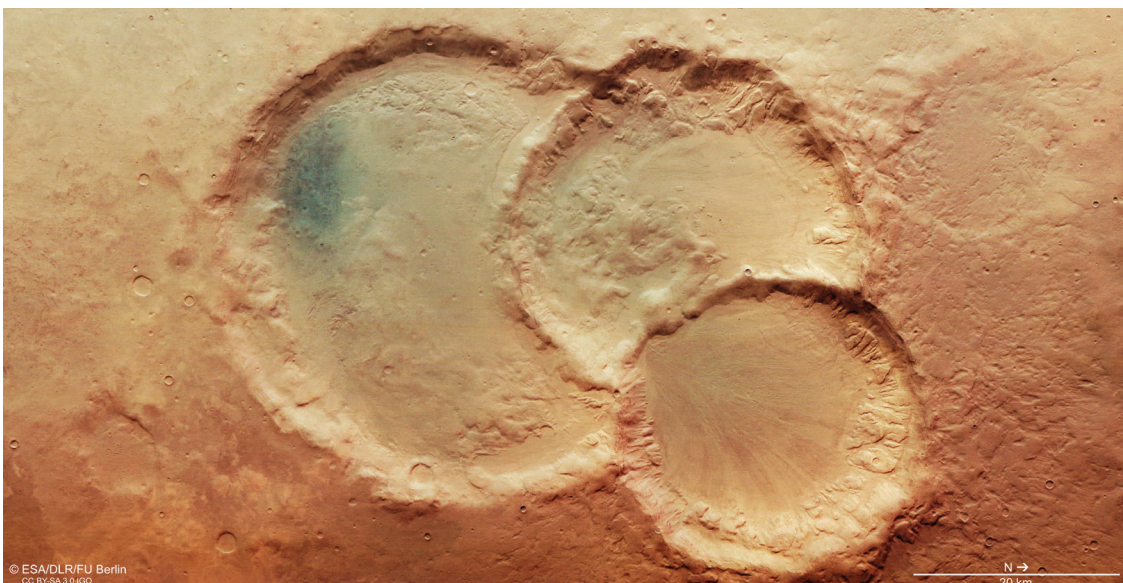
SC: Tato otázka je už příliš na tělo. My jsme laboratorně zjistili, že voda na povrchu může vzniknout bombardováním minerálů obsahujících kyslík nabitými atomy vodíku (H⁺) a že síly, které drží vodu na povrchu nebo uvnitř minerálů, jsou relativně značné. Zároveň teplota, kdy je voda z povrchu odpařena, je relativně vysoká, pohybuje se okolo 400 K.

■ *JŽ: Jaké jsou nejstarší důkazy o existenci vody ve vesmíru?*

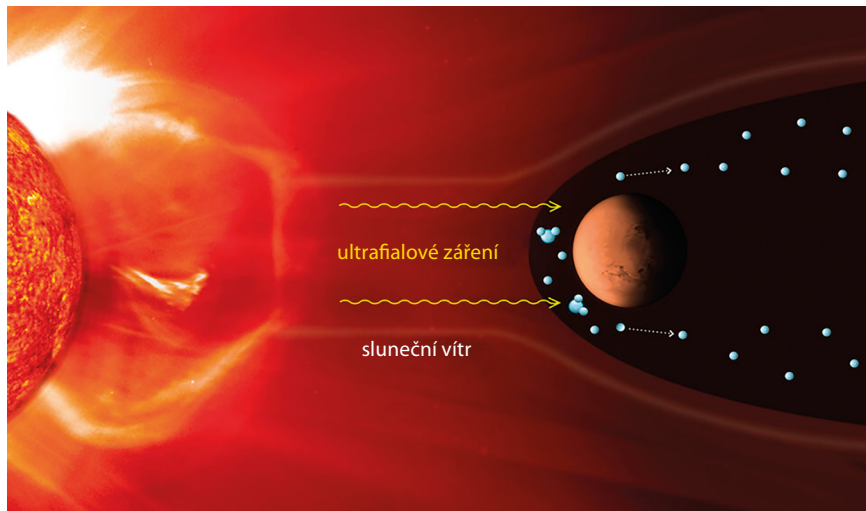
SC: Nejstarší důkazy o existenci vody byly získány observatoří ALMA⁴⁵ (obr. 3a), jde pravděpodobně

4 Jana Žďárská: ALMA uvidí pětikrát ostřeji. *Čs. čas. fyz.* 52, 394–398 (2002).

5 Jana Žďárská: Čeští vědci v observatoři ALMA. *Čs. čas. fyz.* 69, 458–461 (2019).



Obr. 5 Na Marsu bylo objeveno asi 50 kráterů, které mají průměr větší než 50 km. Z toho lze usuzovat, že na Mars dopadala opravdu velká tělesa. Trojice kráterů nacházející se na jižní polokouli Marsu v oblasti Noachis Terra východně od kráteru Le Verrier.

**Obr. 6**

Před 4 miliardami roků měl Mars relativně silné magnetické pole, které však pravděpodobně v důsledku obrovských energií uvolněných v období pozdního velkého bombardování „zmizelo“, a planeta tak zůstala bez ochrany před slunečním větrem.

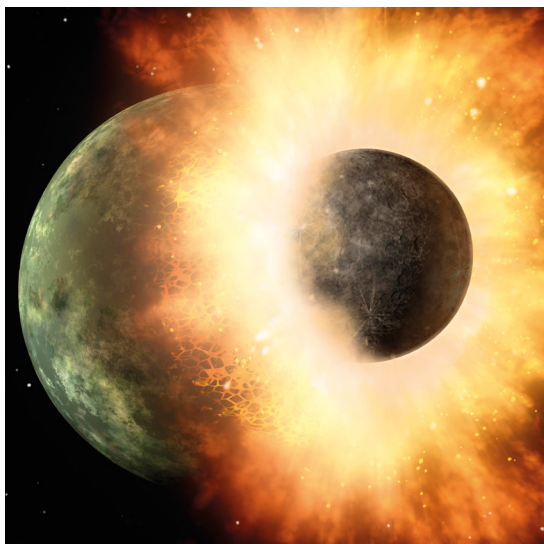
o největší radioteleskop na světě, měřící v mikrovlnné a milimetrové spektrální oblasti. Jsou to astronomická data vzdálené galaxie (obr. 3b), která prošla mimořádným obdobím intenzivní tvorby hvězd. Tato galaxie, známá jako SPT0346-52, je vzdálená 12,7 miliardy světelných let od Země. To znamená, že astronomové ji pozorují ve velmi důležité fázi jejího vývoje, přibližně miliardu let po velkém třesku. Ze získaného spektra lze odvodit dopplerovský posun, který zde činí $z = 5,66$ a který odpovídá situaci jedné miliardy let po velkém třesku.

■ *JŽ: Takže toto spektrum je 12,7 miliardy let staré?*

SC: Přesně tak. A celou tu dobu putuje vesmírem. Je to tedy jedna z nejstarších identifikací vody ve vesmíru. Když bylo toto spektrum prostřednictvím ALMA detekováno, na čarách vody vidíme a máme potvrzeno, že tato voda v období jedné miliardy let po velkém třesku už existovala.

■ *JŽ: Pojdme se nyní podívat na to, jak je to s vodou v naší Sluneční soustavě. Naše planeta, nacházející se v tzv. obyvatelné zóně, vodu má. Jak jsou na tom planety další?*

SC: Ve Sluneční soustavě byly v obyvatelné zóně, kde existuje kapalná voda umožňující existenci života, původně tři planety. Byla to Venuše, Mars a naše Země.



Obr. 7 V období formování Země, před 4 miliardami let vznikl Měsíc srážkou tělesa velikosti Marsu se Zemí.

Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, a pokud by neměla atmosféru, byla by teplota na jejím povrchu pod bodem mrazu. Venuše však atmosféru má, a to pořádně hustou. Skládá se převážně z oxidu uhličitého, 96,5%. Zbytek připadá zejména na dusík a další plyny. Oxid uhličitý je skleníkový plyn. Na povrchu je 90krát větší tlak než na Zemi a teplota dosahuje přibližně 460 °C. I díky tomu tam funguje obrovský skleníkový efekt. Otázka, zda voda na Venuši za takových podmínek existuje a v jakém skupenství, je stále otevřená a je diskutabilní.

■ *JŽ: A jak je na tom s vodou planeta Mars?*

SC: Asi před 4 miliardami let měl Mars (viz obr. 6) relativně silné magnetické pole, které však v důsledku obrovských energií uvolněných v období pozdního velkého bombardování „zmizelo“ a planeta tak zůstala bez ochrany před slunečním větrem. Na Marsu bylo objeveno asi 50 kráterů, které mají průměr větší než 50 km. Z toho lze usuzovat, že na něj dopadala opravdu velká tělesa. A zřejmě kvůli tomu Mars ztratil své ochranné magnetické pole, vyplo se jeho magnetické dynamo, které jej chránilo před kosmickým zářením. Mars v průběhu času přišel možná až o 99% své původní atmosféry, která je nyní přibližně stokrát řidší než ta pozemská. Astronomové se domnívají, že poté, co vychladlo jeho planetární jádro a následně vymizelo magnetické pole, byl plynný obal postupně vymetán do kosmického prostoru. Dnes víme, že Mars vodu kdysi měl. Víme také, že Mars má vodu včetně suchého ledu (pevný CO₂). – to jsou ty jeho pověstné bílé čepičky na pólech. Na jeho povrchu vidíme i stopy po korytech řek, takže voda na Marsu zřejmě tekla a v poměrně velkém množství.

■ *JŽ: A jak je to se Zemí?*

SC: Země má pevné jádro v tekutém obalu. Jádro je složeno z železa a niklu. Díky rotaci vzniká dynamo, které vytváří kolem naší planety magnetické pole. To chrání naši planetu před slunečním větrem, který je tvořen převážně protony (ionizovaný vodík, přibližně 90% částic slunečního větru tvoří protony, což jsou jádra atomů vodíku), alfa částicemi (ionizované helium, asi 8% částic), dále elektrony a stopovými množstvími těžších iontů, například iontů uhlíku, kyslíku, neonu, hořčíku a dalších prvků, které pocházejí ze sluneční koróny. Sluneční vítr se pohybuje rychlostí od 300 km/s do 800 km/s a má důležitý vliv na vesmírné prostředí,



Obr. 8 Historie formování Země.

včetně interakcí s magnetosférou Země, což způsobuje jevy jako polární záře.

■ *JŽ: Když se vrátíme k původní otázce – tedy k tomu, jakým způsobem vznikla voda na Zemi, co všechno už v současné době víme?*

SC: Jak už bylo řečeno, jednou z možností je sledovat izotopické zastoupení ve vodě přicházející z různých oblastí vesmíru. Můžeme tedy měřit poměr deuteria a vodíku. Pokud si k tomuto zkoumání vezmeme jakoukoliv vodu na Zemi, dojdeme vždycky ke stejnému výsledku, a to takovému, že přibližně na každých deset tisíc molekul vody je jedna molekula vody těžké. Tomu se říká oceánský standard.

■ *JŽ: Voda na planetě Zemi má tedy parametry, které označujeme jako oceánský standard. A co voda ve vesmíru? Můžeme z tohoto hlediska zjistit i její parametry?*

SC: V literatuře najdeme výsledky celé řady vesmírných misí týkajících se průzkumu izotopického složení komet, různých vesmírných těles včetně atmosfér velkých obrů, jako jsou Jupiter, Saturn a Uran. Zajímavé je například izotopické měření, které bylo provedeno pomocí modulu Philae, v rámci mise Rosseta, při průzkumu jádra komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko.

Přistání Philae nebylo příliš úspěšné, ale přesto se podařilo po několik hodin udržet systém modulu včetně přístrojů v chodu a tak získat zajímavá data o složení povrchu této komety.

■ *JŽ: A co jste při porovnání těchto dat zjistili ohledně vody ve vesmírných tělesech?*

SC: V literatuře existuje celá řada studií týkajících se poměru D/H. V práci^{6,7} byla publikována data porovnávající poměr D/H v různých tělesech. Z obrázku 12 je na první pohled vidět, že většina komet se svým složením vody značně liší od pozemského oceánského standardu.

■ *JŽ: A co se tedy přibližuje oceánskému standardu?*

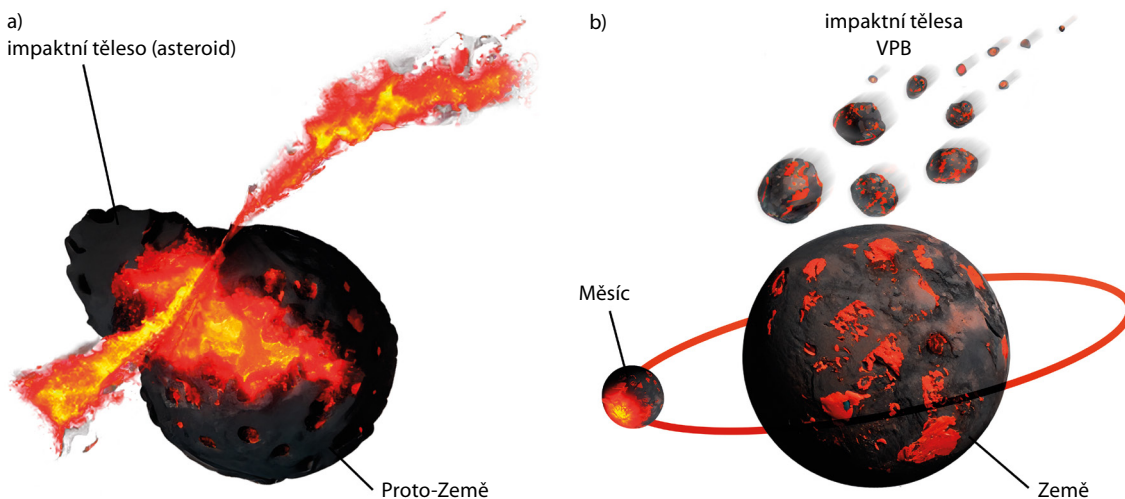
SC: Je to jednoznačně voda vázaná na asteroidy a meteority.

■ *JŽ: Zbývá tedy už jen dokázat, že původ vody na Zemi má úzkou souvislost s impakty těles?*

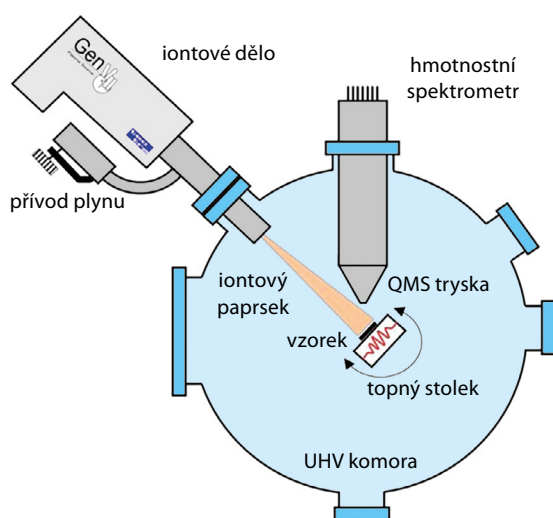
SC: Ano. Studium literatury týkající se impaktních procesů, transportu vody na povrchu a vzniku vody

6 D. Bockelée-Morvan & N. Biver: The composition of cometary ices. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375, 20160252 (2017).

7 <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0252>



Obr. 9 Obrázek zachycuje endogenní (a) a exogenní (b) zdroje vody na planetě Zemi: J. J. Barnes, D. A. Kríng, R. Tartèse, I. A. Franchi, M. Anand, S. S. Russell: An asteroidal origin for water in the Moon. *Nature Comm.* 7, 11684 (2016). <https://doi.org/10.1038/ncomms11684>.



Obr. 10 Průřez zařízením TPD (Teplotní programovatelná desorpce)

na povrchu impaktních těles inspirovalo naše laboratorní experimenty.

■ **JŽ:** Co bylo cílem těchto experimentů a jak jste je chtěli provést?

SC: Cíl byl jasný – hledat odpovědi na následující otázky: Lze v laboratoři ověřit vznik vody na povrchu pevných těles při bombardování stelárními větry? Jak voda vzniká, za jakých podmínek, jaké jsou síly, které drží vodu vazebně na povrchu? Dá se toto množství vody na povrchu nějakým způsobem kvantifikovat? Je množství vygenerované vody dostatečné, aby zásobilo celou naši planetu?

■ **JŽ:** Jaké experimenty jste zvolili?

SC: Použili jsme metodu teplotní programované desorpce vody s hmotnostní detekcí (TPD-MS) a pro účely kvantifikace tvorby vody na povrchu minerálů obsahujících kyslík jsme navrhli metodu vysoce rozlišené infračervené spektrometrie. Testovali jsme 14 různých minerálů a přírodních vzorků a u většiny jsme pozorovali tvorbu vody na jejich površích po ozáření ionty H^+ nebo D^+ . Vzorky, včetně dvou meteoritů (RAS 445,

SAU 567), prokázaly schopnost adsorpce vody v rozmezí 0,09 až 0,7 % hmotnosti. Adsorbovaná voda, pevně držená kapilárními silami, zůstává na povrchu i při tlaku až 10^{-7} Pa (TPD experiment) a teplotě až 600 K, což naznačuje možný transport vody ve vakuu kosmického prostoru na velké vzdálenosti.

■ **JŽ:** Nemohly být vaše vzorky kontaminovány vodou z okolního prostředí?

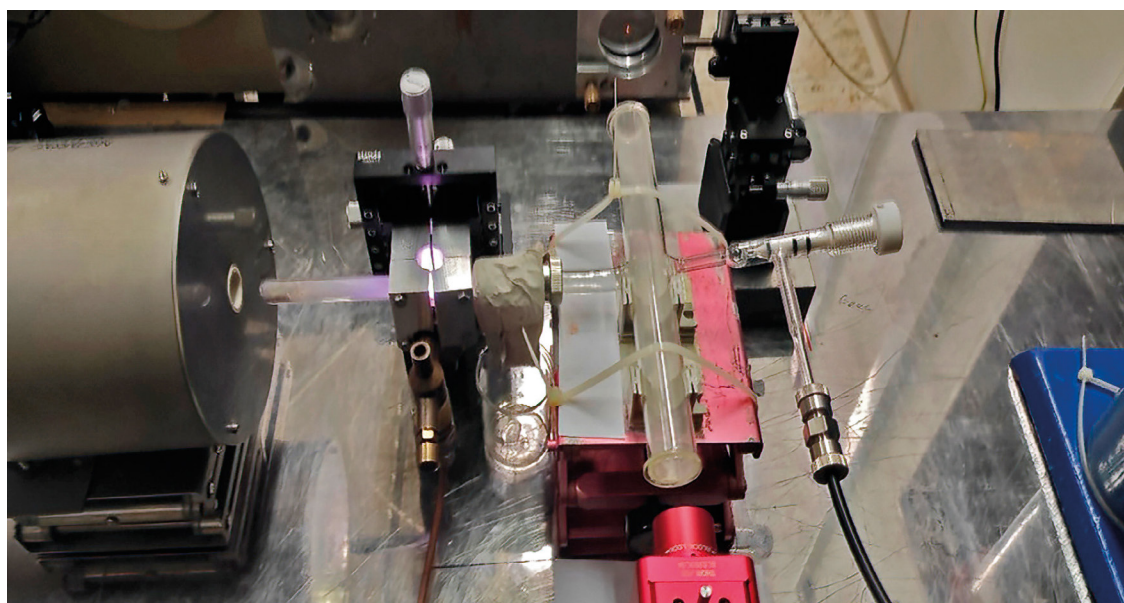
SC: To je velice důležitá otázka. K tomu, abychom předešli jakékoliv diskuzi o kontaminaci vzorku vodou z okolního prostředí, jsme všechny naše experimenty založili na použití izotopického značení. Obsahovali vzorek atom kyslíku ^{16}O , byl vzorek ozařován ionty deuteria. Vznikla tak těžká voda D_2O . Kvantifikovali jsme pak přímo vznik molekuly D_2O a na základě měření infračervených spekter těžké vody jsme kvantifikovali její množství vázané na povrchu. Postup byl tedy ten, že vzorek minerálu byl dokonale vyžlhnán a pak po několika hodinách ozařován ionty deuteria. Vzniklá voda byla opět zahřátím desorbovaná z povrchu do absorpční kyvety, ve které jsme na základě jejího objemu a intenzity jednotlivých rotačně vibračních linií OD vibračního pásu D_2O kvantifikovali množství uvolněné vody. Protože jsme zkoumaný vzorek měli přesně zvážený, mohli jsme určit množství vody, které se naváže na jeden gram nebo kilogram minerálu.

■ **JŽ:** A na jakých druzích vzorků jste tento experiment zkoušeli?

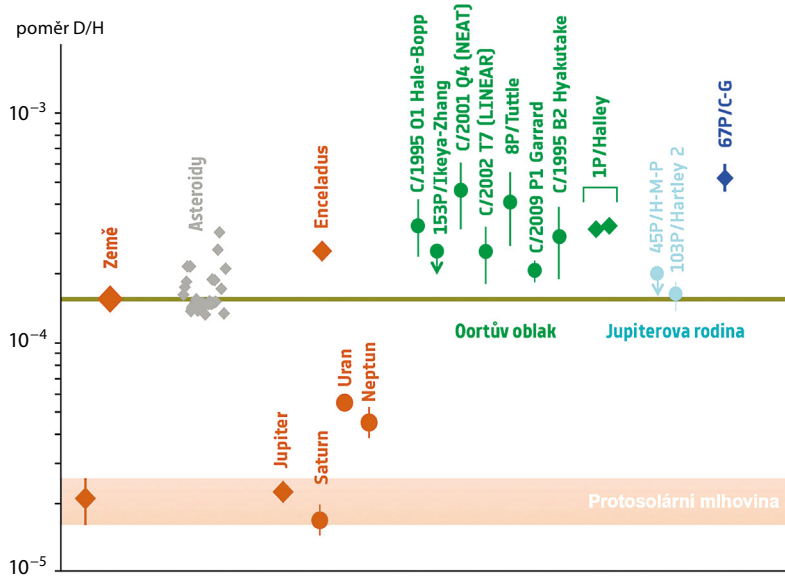
SC: Experiment jsme prováděli například na $Ti^{18}O_2$, který jsme bombardovali ionty vodíku a kde vznikl izotopolog vody $H_2^{18}O$, který byl detekován na hmotnosti 20. Jak jsem se již zmínil, celkem jsme ozařovali 14 oxidických vzorků včetně dvou meteoritů.

■ **JŽ:** Takže tímto způsobem lze bezpečně tvorbu vody v minerálech a meteoritech dokázat?

SC: Dokazuje se takto hned několik zajímavých efektů. Prvním z nich je ten, že voda bombardováním povrchu ionty vodíku či deuteria vznikne. Druhým efektem je, že i když celý proces ozařování (TPD)



Obr. 11 Fotografie experimentálního uspořádání pro měření vysoce rozlišených absorpčních spekter D_2O odpařené s povrchu oxidických minerálů po ozáření mikrovlnným výbojem (D^+ ionty)



Obr. 12 Oceánskému standardu se jednoznačně přibližuje voda vázaná na asteroidy a meteority. Převzato z D. Bockelée-Morvan & N. Biver (2017): The composition of cometary ices. *Phil. Trans. R. Soc. A* 375, 20160252 (2017). <https://doi.org/10.1098/rsta.2016.0252>

probíhá v hlubokém vakuu, voda na povrchu zůstává navázána. Uvolní se až při relativně vysoké teplotě 150 °C.

JŽ: Jaká je spojitost mezi vašimi experimenty a původem vody na Zemi?

SC: Jak jsme již řekli v diskusi, původ vody na Zemi lze objasnit, akceptujeme-li teorii impaktů, kdy voda je na Zemi druhotně dopravena impaktními tělesy. Z historie víme, že asi před 3,8 miliardy let došlo k takzvanému období *pozdního velkého bombardování*⁸. Stejně jako Měsíc i naše planeta byla velice hustě bombardována impaktními tělesy z vesmíru. Právě tomuto těžkému období v životě naší planety možná vděčíme za vznik života na Zemi, viz náš článek v časopise PNAS⁹, a s největší pravděpodobností i za vodu v oceánech.

JŽ: A dá se tedy říci, že jste objevili či potvrdili vznik vody na Zemi v souvislosti s pozdním velkým bombardováním?

SC: Víme s určitostí, že pozdní velké bombardování na Zemi bylo. Během tohoto období je teoreticky předpokládáno, že na rané terestrické planety ve vnitřním slunečním systému, včetně Merkuru, Venuše, Země a Marsu, narazilo poměrně velké množství asteroidů. A pozůstatkem těchto událostí je i náš Měsíc. Když se podíváme na Měsíc, vidíme, že je téměř zcela pokryt krátery. Na Zemi to už vidět nemůžeme, ale dá se dost dobře předpokládat, že pokud tolik asteroidů dopadlo na Měsíc, stejný či ještě větší počet (Země je větší) jich dopadl i na Zemi. A protože jsou všechny krátery na Měsíci relativně dobře zmapovány, dá se spočítat, jak velká byla tělesa, která je vytvořila. Existuje tedy odhad, kolik materiálu na Měsíc dopadlo během pozdního velkého bombardování. Po extrapolaci na velikost Země vychází, že v tomto období dopadlo na naši planetu zhruba $1,1 \times 10^{17}$ tun materiálu. Po převodu na kilogramy je to $1,1 \times 10^{20}$ kilogramů materiálu.

JŽ: A co z tohoto čísla můžeme zjistit?

SC: Na základě našich laboratorních předchozích experimentů lze jednoduchým způsobem spočítat, ko-

lik kilogramů impaktů musí dopadnout na naši planetu, aby se naplnily všechny pozemské oceány. Samozřejmě musíme znát množství (procento) vody, které je na jejich povrch navázáno. Z našich měření nám vycházelo, že v průměru bychom potřebovali v rámci jednotlivých minerálů přibližně $9,2 \times 10^{19}$ kilogramů materiálu. Když toto číslo srovnáte s množstvím a hmotností impaktního bombardování odvozeného z měsíčního v době pozdního velkého bombardování, dostanete se k řádové shodě z našimi experimentálně získanými daty.

JŽ: Je úžasné, jak to do sebe krásně zapadá. Jaký to byl pocit – něco takového zjistit a potvrdit?

SC: Ta shoda výsledku přináší úlevu, radost a hrdost na to, že se možná něco podařilo.

JŽ: Mohl byste na závěr našeho rozhovoru ještě stručně zrekapitulovat výsledky vašeho výše zmiňovaného výzkumu?

SC: Velmi rád.

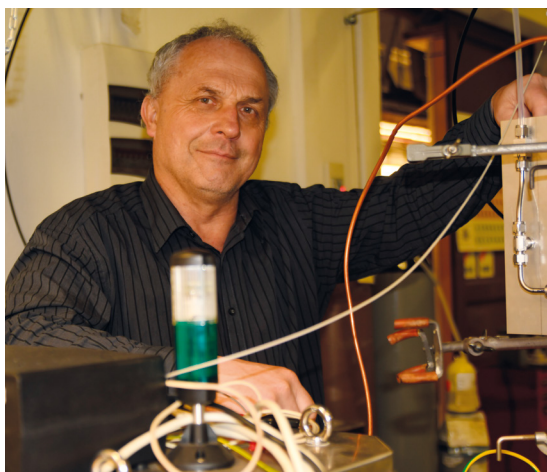
1. Výsledné experimenty shrnuté v této práci, které jsou zaměřeny na bombardování povrchu atomy vodíku, jednoznačně potvrzují teorii interakce excitovaných atomů vodíku nebo deuteria s atomy kyslíku na povrchu oxidových minerálů.



Země a voda = život.

» Dva atomy vodíku a jeden kyslíku – zdánlivě prostá molekula, a přece tajemství, na němž spočívá celý život. «

⁸ Late Heavy Bombardment – LHB period.
⁹ <https://www.pnas.org/doi/full/10.1073/pnas.1507471112>



Prof. RNDr. Svatopluk Civiš, DSc., narozen v roce 1955, absolvoval Přírodovědeckou fakultu Univerzity Karlovy (PřF UK, obor chemie, RNDr. 1980, CSc. 1986, prof. 2012). Od roku 1990 působí na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, kde vykonává funkci vedoucího oddělení spektroskopie. V roce 1988 obdržel prestižní stipendium – Alexander von Humboldt Fellowship – a na univerzitě Justuse Liebiga v německém Giessenu se věnoval studiu a experimentální detekci infračervených spekter molekulárních iontů. Po dvou letech v Německu se vrátil zpět do Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského, kde začal rozvíjet laboratorní techniky spektroskopie vysokého rozlišení. V roce 1992 obdržel pozvání od nositele Nobelovy ceny G. Herzberga a dva roky pracoval v Herzbergově institutu pro astrofyziku, NRC, v kanadském hlavním městě Ottawa. V roce 1994 se vrátil do mateřského ústavu a jeho současná vědecká činnost je zaměřena především na aplikace využívající experimentální techniky spektroskopie s Fourierovou transformací ve spojení s lasery. Je autorem více než 200 publikací, byl a je řešitelem nebo spoluřešitelem více než 20 mezinárodních (evropské, japonské) a českých grantů. Od roku 2015 zastupuje Českou republiku v Mezinárodní astronomické unii.

2. Molekuly vody jsou následně adsorbovány na povrchu přírodních nebo syntetických minerálů, včetně povrchů vybraných meteoritů.
3. Pro detekci vody byly použity dvě nezávislé metody – TPD a FTIR. Díky silným kapilárním silám je

voda na povrchu minerálu pevně vázána i při velice nízkých tlacích 10^{-7} Pa (TPD experiment) a desorpce odolává i relativně vysokým teplotám. TPD experimenty odhalily desorpci vody při teplotách 400 K a výše.

4. Díky silným intramolekulárním silám na povrchu oxidických materiálů může být molekula vody adsorbována na povrchu kyslíkatých minerálů po relativně dlouhou dobu a následně transportována vesmírem na velké vzdálenosti a během dlouhých časových úseků.
5. Působením kosmického záření mateřské hvězdy může navíc na povrchu kyslíkatých minerálů docházet k permanentnímu doplňování adsorbované vody.
6. Uvedená hypotéza se snaží vysvětlit původ vody nejen v naší Sluneční soustavě, ale i dále, v mezihvězdném prostoru, v oblastech prachových zrn, která jsou vystavena silnému proudu nabitých částic v blízkosti mateřské hvězdy.
7. Poměr D/H určuje původ vody. Relativně velký poměr D/H v kometách částečně vylučuje teorii kometárního původu na naší planetě.
8. Bylo otestováno 14 minerálů (vzorků obsahujících kyslík), včetně dvou vzorků meteoritů (RAS 445, SAU 567). Bylo zjištěno, že kapacita adsorpce vody se pohybuje mezi 0,09 a 0,7 hm. %. Na základě této hodnoty bylo odhadnuto teoretické množství materiálu, které je nutno ve formě impaktů (asteroidy, pevná tělesa, meteority) nechat dopadnout na planetu Zemi, aby bylo možné naplnit vodou všechny pozemské oceány. Na základě tohoto laboratorního měření bylo spočítáno, že na Zemi musí být doručeno mezi 10^{19} a 10^{20} kg pevného materiálu.
9. Množství 10^{19} až 10^{20} kg pevného materiálu odpovídá výpočtům množství materiálu, které se údajně akumulovalo během období pozdního velkého bombardování (LHB), v době před 3,8 miliardy let.

■ *JŽ: Děkuji vám za rozhovor a jeho srozumitelné shrnutí a za celou redakci vám a vašemu týmu gratulujeme k potvrzení vaší teorie.*



Sonda Rosetta spolu s přistávacím modulem Philae byla určena pro průzkum jádra komety 67P/Čurjumov-Gerasimenko.

Zdroj: Wikipedie