

Molekuly vody – odolní cestovatelé vesmírem

Voda. Téměř magické slovo. Tam, kde je voda, může být i život. Ale jak je to s vodou ve vesmíru? A jak se dostala do Sluneční soustavy, potažmo na planetu Zemi? O tom, co je nového v této oblasti, jsme hovořili s fyzikálním chemikem, prof. RNDr. Svato-plukem Civišem, DSc., z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR.

Vznik vody a života ve vesmíru vás jako fyzikálního chemika fascinuje již dlouho. Nyní jste na toto téma publikoval článek v prestižním *Astrophysical Journal*. Myslíte si, že jste našli možnou cestu, jak vznikla voda na Zemi?

„Dlouhá léta se zabývám studiem polovodi-

čových materiálů, řada z nich se vyskytuje v podobě minerálů 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 vesmírnou chemií. Nejprve to byla výměna kyslíku mezi pevnými oxidy kovů a oxidem uhličitým, metanogeneze, kdy dochází v kyselém prostředí k redukcí oxidu uhličitého na metan a nyní interakce hvězdného větru s kyslíkovými atomy vázanými v minerálech za následného vzniku vody. Chtěl jsem se proto laboratorními experimenty dostat

k objasnění původu vody na naší planetě.“
Zjistit původ vody na Zemi je pro vědce velice důležité. Jaké jsou současné vědecké teorie v této oblasti výzkumu?

„Existuje 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, je tedy ve Sluneční soustavě a zároveň také na Zemi odpradávná. Odpůrci této teorie argumentují tím, že v době zhruba před 4 miliardami let došlo k oddělení Měsíce od Země impaktem tělesa o velikosti Marsu. Tento náraz způsobil přetavení povrchu Země i Měsíce. Možnost, že voda na naší planetě setrvala i přes obrovské teploty vzniklé při srážce obou těles, je málo pravděpodobná.“

Voda na Zemi ale prokazatelně je. Byla tedy na planetu transportována jiným způsobem?

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

Mohou však vědci dokázat, že tomu tak skutečně bylo?

„Náš výzkum je postaven 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. Tím bychom mohli původ vody na Zemi vystopovat.“

Mohl byste nám tento postup vysvětlit ještě podrobněji?

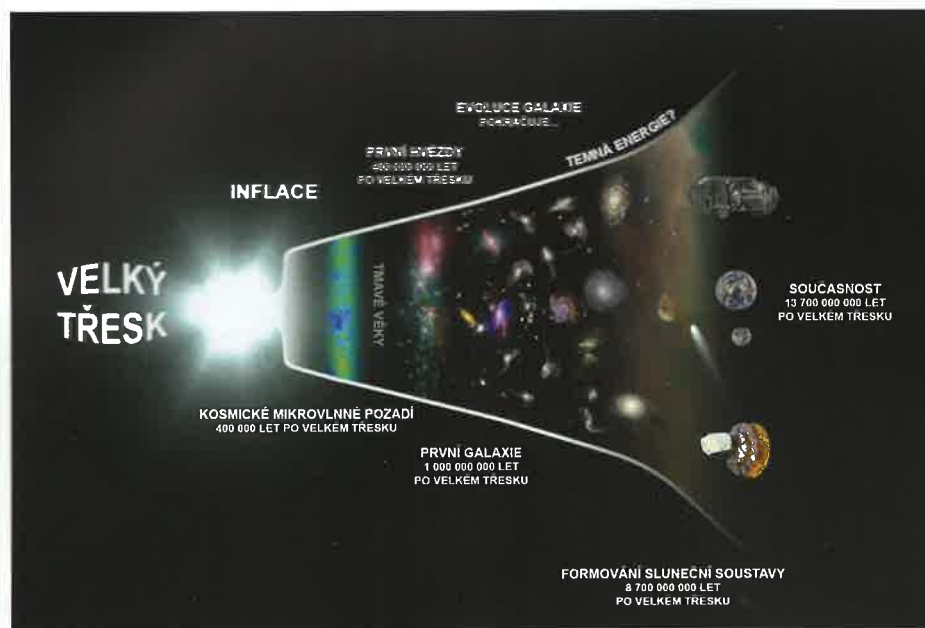
„My jsme schopni zkoumat vesmírná tělesa na základě izotopického poměru těžké vody (deuteria) a vodíku. Platí obecná rovnice izotopické rovnováhy mezi HD molekulou a vodou ($H_2O + HD \rightleftharpoons HDO + H_2$), z níž vyplývá, že čím nižší teplota v prostoru, odkud objekt přichází, tím vyšší zastoupení deuteria. Naopak, přichází-li objekt z teplejších oblastí vesmíru, například z blízkosti Slunce, voda má mnohem větší zastoupení vodíku oproti deuteriu. Na základě toho lze usuzovat, odkud přicházející materiál pochází.“

Než se dostala voda na Zem, musela nejprve nějakým způsobem ve vesmíru vzniknout? Známe tento mechanismus?

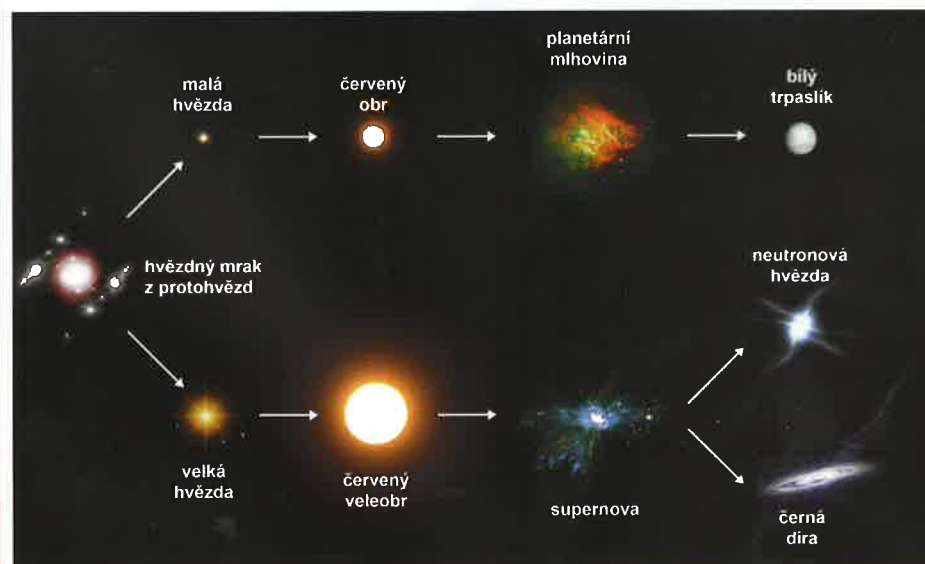
„Existuje řada způsobů, jak voda může vzniknout. Ve vesmírných molekulárních plynových mračcích převažují iontové procesy. Ve hvězdách za vysokých teplot převažuje atomizace a následně slučování atomů. Dalším způsobem jsou procesy spojené s reakcemi na povrchu prachových částic.“

Vesmír je starý zhruba 13,7 miliard let. Víme, kdy v něm voda začala vznikat?

„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 termionukleárních reakcí



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.



Vznik a zánik hvězd, zjednodušené schéma.

Avšak první hvězdy vznikly až 13,7 miliard let po Velkém třesku. Poté musejí probít procesy vzniku a zániku, při kterých se teprve objevily těžší prvky včetně kyslíku. Pak teprve mohla vzniknout voda.

A jak je tato voda na vesmírných tělesech vázána? Na povrchu nebo uvnitř?

„Tato otázka je už příliš na tělo. My jsme laboratorně zjistili, že voda na povrchu může vzniknout bombardováním kyslíkatých minerálů 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 450 kelvinů.“

Jaké jsou nejstarší důkazy o existenci vody ve vesmíru?

„Takové důkazy byly získány na observatoři ALMA, pravděpodobně největším radioteleskopem na světě, který měří v mikrovlnné a milimetrové spektrální oblasti. Jsou to astronomická data vzdálené galaxie, která prošla mimořádným obdobím intenzivní tvorby hvězd. Tato galaxie, známá jako SPT0346-52, je vzdálená 12,7 miliard světelných let od Země. To znamená, že astronomové ji pozorují ve velmi důležité fázi vývoje, přibližně miliardu let po Velkém třesku. Ze získaného spektra lze odvodit dopplerovský posun generovaný rozpínáním vesmíru a zvyšující se rychlosti vzdalování této galaxie od Země, který zde činí $z = 5,66$, což odpovídá situaci jedné miliardy let po Velkém třesku.“

Máte tedy k dispozici spektrum, které je opravdu 12,7 miliard let staré?

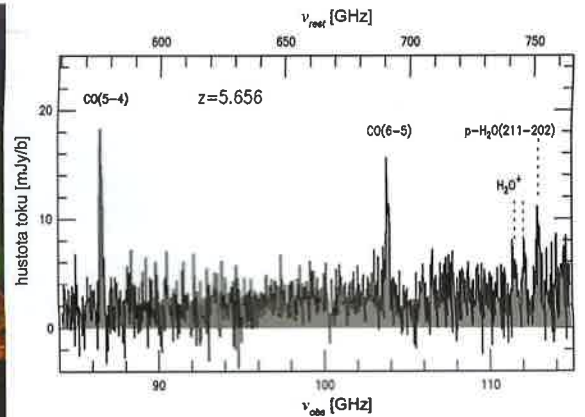
„Přesně tak. A celou tu dobu světelnou rychlostí putuje vesmírem. Je to tedy jedna z nejstarších identifikací vody ve vesmíru. Když bylo toto spektrum prostřednictvím ALMA detekováno, na čarách vody vidíme a máme potvrzeno, že tato voda v období jedné miliardy let po Velkém třesku už existovala.“

A poté se dostala i do Sluneční soustavy. Na základě výzkumu víme, že planety zde vodu v různých jejím skupenství mají. Přesto vznikl život jen na naší planetě. Víme proč?

„Ve Sluneční soustavě byly v obyvatelné zóně, kde existuje kapalná voda umožňující existenci života, původně tři planety: Venuše, Mars a Země. Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, a pokud by neměla atmosféru, byla by



ALMA spektrum vzdálené galaxie SPT0346-52 ukazující detekce čisté rotačních čar neutrální a ionizované vody spolu s CO. Galaxie má červený posun $z = 5,66$ [přechod posunut na $\nu = \nu_{rest}/(1+z)$]. Tento červený posun odpovídá stáří pouze jedné miliardy let od Velkého třesku. (Zdroj: Weiß, A., De Breuck, C., Marrone, D. et al. The Astrophysical Journal)



teplota na jejím povrchu pod bodem mrazu. Venuše ale atmosféru má, a to pořádné hustotou. Skládá se převážně z oxidu uhličitého – 96,5%. Zbytek připadá zejména na dusík a další plyny. Oxid uhličitý je skleníkový plyn. Na povrchu je kvůli tomu 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, i když diskutabilní.“

A jak je na tom s vodou Mars?

„Asi před 4 miliardami roků měl Mars relativně silné magnetické pole, které však v důsledku obrovských energií uvolněných v období těžkého pozdního bombardování 'zmizelo' a planeta tak zůstala bez ochrany před slunečním větrem. Na Marsu bylo objeveno asi 50 kráterů, které mají průměr přes 50 km. Z toho lze usuzovat, že na Mars dopadala opravdu velká tělesa, a ten zřejmě proto ztratil ochranné magnetické pole, vyplo se jeho magnetické dynamo, které ho 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 plyný obal postupně vymetán do kosmického pro-

storu. Dnes víme, že Mars vodu kdysi měl. Víme také, že Mars má vodu včetně suchého ledu (pevný CO_2) – to jsou 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.“

A dostáváme se opět k naší planetě, která nejen vodu získala, ale našťástí pro nás si ji i udržela. Jak to dokázala?

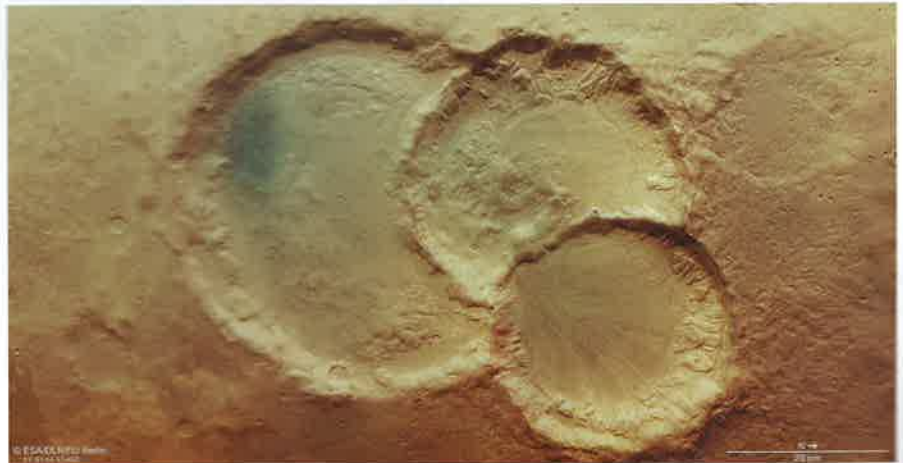
„Země má pevné jádro v tekutém obalu, jádro je složeno z železa a niklu. Díky rotaci vzniká magnetické dynamo, které vytváří kolem planety magnetické pole, a to ji chrání před slunečním větrem tvořeným převážně protony (ionizovaný vodík). Takže až 90% částic slunečního větru tvoří protony, což jsou jádra atomů vodíku, dále alfa částice (ionizované helium, asi 8% částic), dále elektrony a stopová množství těžších iontů, například iontů uhlíku, kyslíku, neonu, hořčíku a dalších prvků, které pocházejí ze sluneční koróny. Sluneční vítr se pohybuje rychlostí od 300 do 800 km/s a má důležitý vliv na vesmírné prostředí včetně interakcí s magnetosférou Země, což způsobuje jevy jako polární záře.“

Mohl byste nám vysvětlit, co jste zjistili při výzkumu vody na Zemi? Dá se specifikovat, odkud která voda na Zemi pochází a co znamená pojem "oceánský standard"?

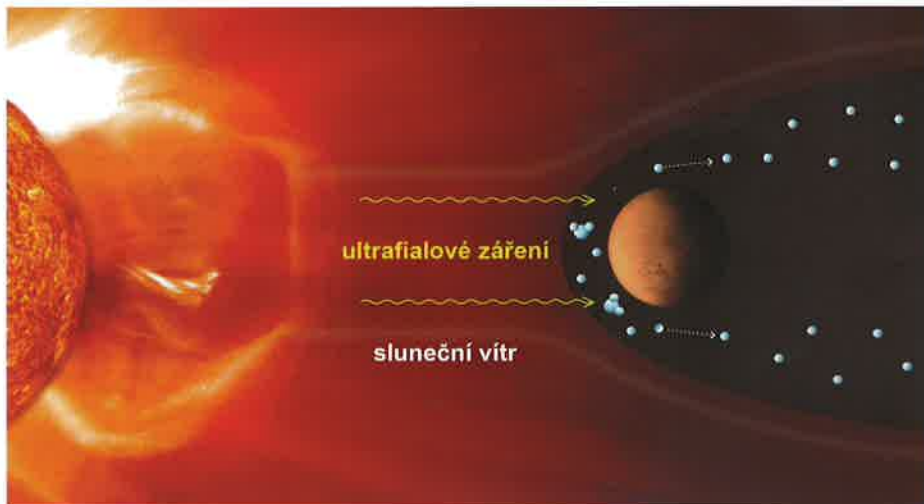
„Jak už bylo řečeno, jedna z možností je sledo-



Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, teplota 460 °C, tlak atmosférického CO_2 90 barů.



Na Marsu bylo objeveno asi 50 kráterů s průměrem větším než 50 km. Z toho lze usuzovat, že na Mars dopadala opravdu velká tělesa.



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

vat izotopické zastoupení ve vodě, přicházející z různých oblastí vesmíru – tedy v meteoritech či různých minerálech. Můžeme v nich měřit poměr deuteria a vodíku. Pokud si k tomuto zkoumání vezmeme jakoukoliv vodu na Zemi, dojdeme vždy ke stejnému výsledku: na každých deset tisíc molekul vody je jedna molekula vody těžké. Tomu se říká oceánský standard ($155,5 \times 10^{-6}$ V-SMOW neboli Vienna-Standard Mean Oceanic Water).“

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

„V literatuře najdeme výsledky řady vesmírných misí, týkajících se průzkumu izotopického složení komet, různých vesmírných těles včetně atmosfér 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 získat tak

zajímavá data o složení povrchu komety.“

A co jste při porovnání těchto dat ohledně vody ve vesmírných tělesech zjistili?

„V literatuře existuje celá řada studií týkajících se poměru deuteria a vodíku. My jsme porovnávali poměr deuteria a vodíku v různých tělesech. Výsledkem je graf, který ukazuje, že například většina komet se svým složením vody značně liší od pozemského oceánského standardu.“

A co se tedy přibližuje tomuto oceánskému standardu?

„Je to jednoznačně voda vázaná na asteroidy a meteority.“

Pokusili jste se tedy vypátrat, že vznik vody na Zemi skutečně zřejmě souvisí s nárazy asteroidů, které Zemi bombardovaly?

„Ano. Studium literatury, týkající se impaktních procesů, transportu vody na povrchu a vzniku vody na povrchu impaktních těles inspirovalo naše laboratorní experimenty.“

Na jaké otázky jste se při tomto výzkumu zaměřili?

„Bylo jich několik. Dá se v laboratoři ověřit vznik vody na povrchu pevných těles při bom-

bardování stelárním větrem? 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?“

Takový výzkum jistě probíhá v náročných laboratorních zařízeních. Mohl byste nám zjednodušeně přiblí-



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

žit, jak jste postupovali?

„Použili jsme metodu teplotní programované desorpce vody s hmotnostní detekcí. Navrhli jsme 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 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^{-9} mbar a teplotě až 600 K, což naznačuje možný transport vody ve vakuu kosmického prostoru na velké vzdálenosti.“

A nemohla být voda v aparatuře přítomna ještě před pokusy?

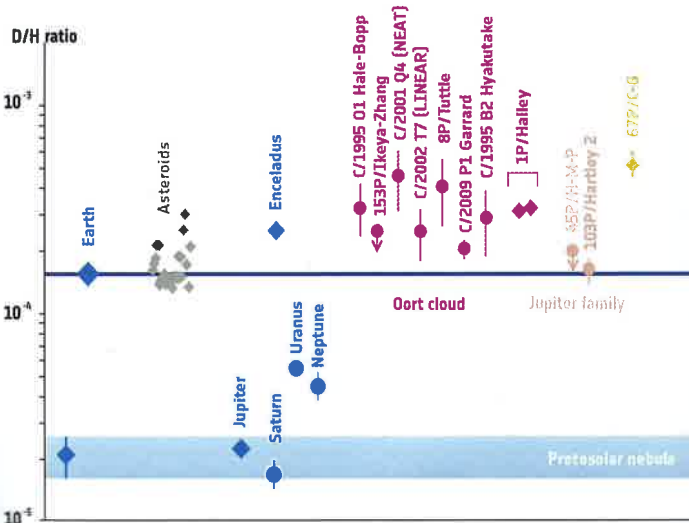
„To je velice důležitá otázka. Ve snaze předejít jakékoliv diskusi o kontaminaci vzorku vody z okolního prostředí jsme všechny naše experimenty založili na použití izotopického značení. Obsahoval-li vzorek atom kyslíku ^{16}O , byl vzorek ozařován ionty deuteria. Vznikla tak těžká voda D_2O . Kvantifikovali 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 vyčištěn a pak po několik hodin ozařován ionty deuteria. Vzniklá voda byla opět zahřátím desorbovaná z povrchu do absorpční kvety, 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.“

A na jakých druzích vzorků jste tento experiment zkoušeli?

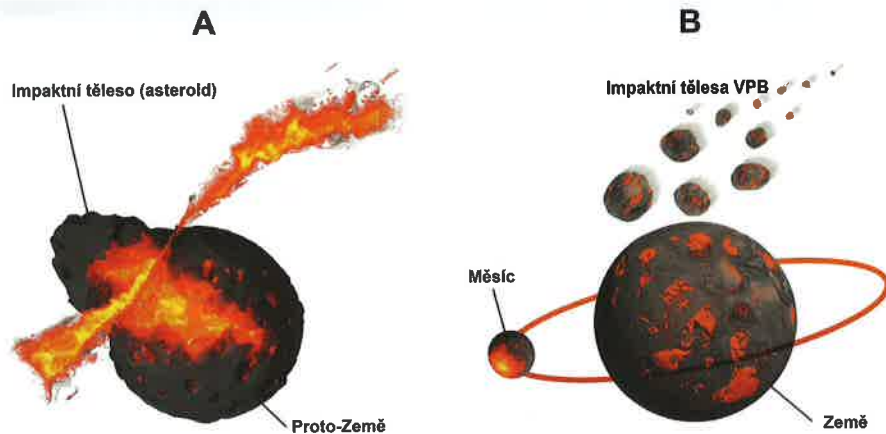
„Experiment jsme prováděli například na $Ti^{18}O_2$, který jsme bombardovali ionty vodíku a kde vznikl izotopolog vody $H_2^{18}O$, který byl detekován na hmotnosti 20. Jak jsem se již zmínil, celkem jsme ozařovali 14 oxidických vzorků včetně dvou meteoritů.“

Takže tímto způsobem lze tvorbu vody v minerálech a meteoritech bezpečně dokázat?

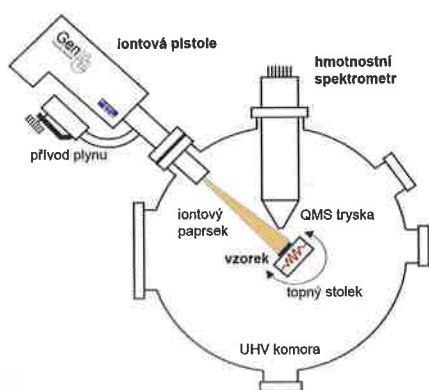
„Dokazuje se takto hned pár zajímavých efektů. Prvním z nich je ten, že voda bombardováním povrchu ionty vodíku či deuteria vznikne. Druhým efektem je, že i když celý proces ozařování probíhá v hlubokém vakuu, voda na povrchu zůstává navázaná. Uvolní se až při relativně vysoké teplotě 150 °C.“



Oceánskému standardu se jednoznačně přibližuje voda vázaná na asteroidy a meteority. (Zdroj: Bockelée-Morvan, D., & Biver, N., 2017)



Obrázek zachycuje endogenní (a) a exogenní (b) zdroje vody na Zemi. (Zdroj: Barnes J. J., Kring, D. A., Tartèse, R., Franchi, I. A., Anand, M., & Russell, Nature Communications)



Průřez zařízením TPD (teplotní programovatelná desorpce)

Dalo by se tedy zjednodušeně říci, že vodu na Zemi přinesly asteroidy?

„Jak jsme již uvedli 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 miliardami let došlo k takzvanému období pozdního velkého bombardování. 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 a s největší pravděpodobností i za vodu v oceánech.“

Byly to tedy asteroidy, které dopadaly na Zem v období pozdního těžkého bombardování?

„Víme s určitostí, že pozdní bombardování Země proběhlo. 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. Vidíme, že Měsíc je téměř zcela pokryt krátery. Na Zemi to už vidět nemůžeme, ale lze předpokládat, že pokud tolik asteroidů dopadlo na Měsíc, stejný či ještě větší počet (Země je větší) dopadlo i na Zemi. A protože jsou všechny krátery na Měsíci relativně dobře zmapovány, lze spočítat i velikost těles, 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 $1,1 \times 10^{20}$ kg materiálu.“

Pokud zhruba víme hmotnost materiálu, který na Zemi v době pozdního těžkého bombardování dopadl, můžeme i říci, kolik z toho bylo vody?

„Na základě našich laboratorních předchozích experimentů lze jednoduchým způsobem spočítat, kolik 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 vycházelo, že v průměru bychom potřebovali v rámci jednotlivých minerálů přibližně $9,2 \times 10^{19}$ kg materiálu. Když toto číslo srovnáte s množstvím a hmotností impaktního bombardování odvozeného z měsíčního povrchu v době pozdního velkého bombardování, dostanete se k řádové shodě z našimi experimentálně získanými daty.“

Znamená to tedy, že můžete potvrdit, že množství vody, které na Zemi je, na ni přinesly asteroidy?

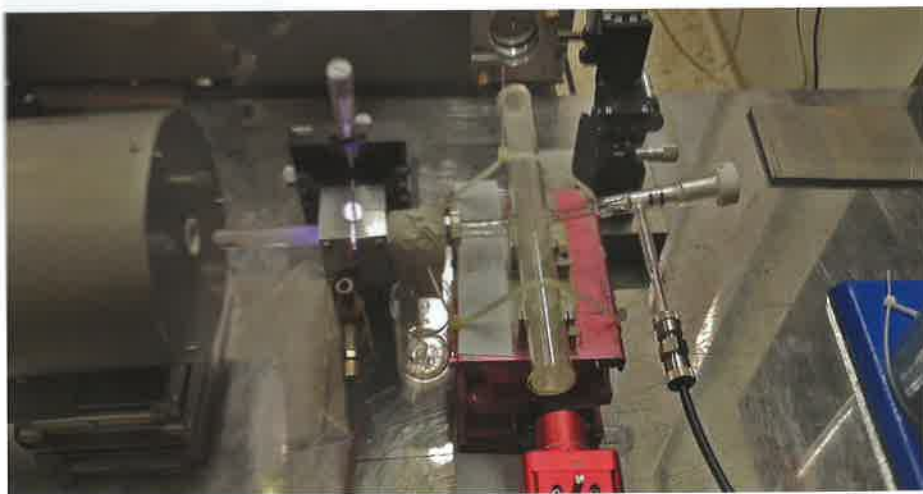
„Ano, náš výsledek se shoduje s množstvím vody na Zemi. Můžeme tedy s určitostí říci,



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 jako vedoucí oddělení spektroskopie. V roce 1988 obdržel prestižní stipendium Alexander von Humboldt Fellowship a na univerzitě Justuse Liebiga v Giesse 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 Ottawě. 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.

že všechna voda byla na planetu přinesena až po jejím vzniku – a to prostřednictvím asteroidů, přicházejících v době pozdního těžkého bombardování z vesmíru.“

Jana Žďárská



Fotografie experimentálního uspořádání pro měření vysoce rozlišitelných absorpčních spekter D_2O odpařených z povrchu oxidických minerálů po ozáření mikrovlnným výbojem (D^+ ionty)