

# Jak vznikla voda na planetě Zemi?

## Rozhovor s prof. Svatoplukem Civišem

*Pokud hledáme život ve vesmíru, pátráme především po vodě, kterou považujeme za jeden z hlavních předpokladů vzniku života. Abychom mohli v tomto výzkumu pokročit, bylo by dobré znát nejprve původ vody na naší planetě. Z nového výzkumu fyzikálního chemika prof. RNDr. Svatopluka Civiše, DSc., z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR vyplývá, že se tak mohlo stát bombardováním „stelárním“ a „solárním“ větrem. Pojďme se tedy na nové výsledky tohoto výzkumu společně podívat.*

• Výzkumem vzniku vody i života na planetě Zemi se zabýváte dlouhodobě. Výsledky svého výzkumu jste nyní publikovali v prestižním časopise *Astrophysical Journal*. Podařilo se vám vaše předpoklady o původu vody na Zemi potvrdit?

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. Chtěl jsem se proto laboratorními experimenty dostat k objasnění původu vody na naší planetě.

• Opakoval a testoval jste Millerovy–Ureyovy pokusy, týkající se vzniku aminokyselin za působení elektrických výbojů v prvopočátcích planety Země a také jste studoval vznik metanu na Marsu. A do pomyslné třetice je to nyní voda, že?

Dlouhá léta se zabývám studiem polovodičových materiálů, celá 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. Nejprve jsem se zabýval výměnou kyslíku mezi pevnými oxidy kovů a oxidem uhličitým, tzv. metanogenezí, kdy dochází v kyselém prostředí k redukci oxidu uhličitého na metan. A nyní mě zaujala interakce hvězdného větru s kyslíkovými atomy vázanými v minerálech za následného vzniku vody.

• V současné době existuje několik teorií o původu vody na Zemi. Mohl byste nám tyto teorie objasnit?

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 a je tady 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 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.

• O tom, že voda na Zemi existuje, není pochyb. Jakým způsobem se tedy voda na naši planetu mohla dostat?

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 naší Sluneční soustavy. Náš výzkum a pátrání je postaveno na principu izotopického zastoupení vodíku a deuteria 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 více vysvětlit?

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

• Pokud zkoumáme původ vody na Zemi, je nejprve třeba vědět, jak vznikla voda ve vesmíru. Mohl byste nám vznik vody ve vesmíru vysvětlit?

Existuje řada způsobů, jak voda může vznikat. Ve vesmírných molekulárních plynových mračnách převažují iontové procesy. Ve hvězdách za vysokých teplot převažuje atomizace (rozklad na atomy) a následné slučování atomů mezi sebou. Dalším způsobem jsou procesy spojené s reakcemi na povrchích 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 ve hvězdách. Avšak první hvězdy vznikly až 400 milionů let po Velkém třesku. Poté musely



Vznik vody na povrchu oxidických materiálů během procesu bombardování slunečním větrem

projít 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?*

Nejstarší důkazy o existenci vody byly získány observatoří ALMA, jde pravděpodobně o největší radioteleskop na světě, měřící 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 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 generovaný rozpínáním vesmíru a zvyšující se rychlosti vzdalování galaxie *SPT0346-52* od Země, který zde činí  $z=5,66$  a který 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 existence 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.

• *Na základě výzkumu víme, že planety naší Sluneční soustavy vodu v různém skupenství mají. Přesto vznikl život jen na Zemi. Proč právě na ní?*

Ve Sluneční soustavě byly v obyvatelné zóně, kde existuje kapalná voda umožňující existenci života, původně tři planety. Byla to Venuše, Mars a naše Země. Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, pokud by neměla atmosféru, byla by teplota na jejím povrchu pod bodem mrazu. Venuše ale atmosféru má, a to pořádně hustou. Skládá se převážně z oxidu uhličitýho (96,5 %). Zbytek připadá zejména na dusík a další plyny. Oxid uhličitý je skleníkový plyn. Na povrchu je kvůli tomu 90× 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.

• *Pojďme se podívat na planetu Mars. Vědci předpokládají, že vodu v minulosti měla, ale postupem doby o ni přišla. Jaké informace o vodě na Marsu máme v současné době?*

Asi před 4 miliardami roků měl Mars relativně silné magnetické pole, které zřejmě 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 větší než 50 km. Z toho lze usuzovat, že na Mars dopadala opravdu velká tělesa. A zřejmě kvůli tomu Mars ztratil své ochranné magnetické pole, vypnulo se jeho magnetické dy-

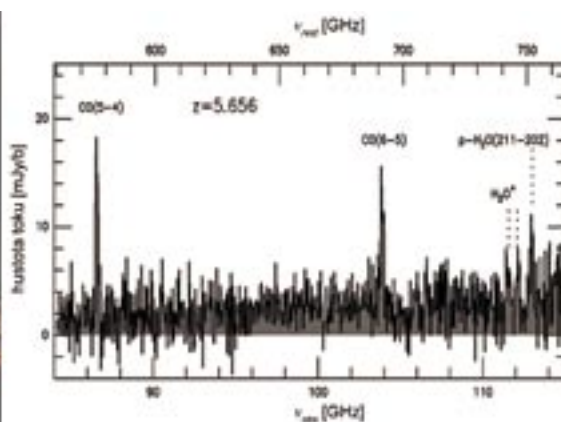


**Prof. RNDr. Svatopluk Civiš, DSc.**, narozen v roce 1955, absolvoval Přírodovědeckou fakultu Univerzity Karlovy (obor chemie, RNDr. 1980, CSc. 1986, prof. 2012). Od roku 1990 působí na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR, kde vykonával funkci vedoucího oddělení Spektroskopie. V roce 1988 obdržel 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.

namo, které chránilo Mars 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 prostoru. 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



Observatoř Atacama Large Millimeter Array (ALMA), milimetrové 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 třesku.





Venuše se nachází blíže ke Slunci než Země, teplota 460 °C, tlak atmosférického CO<sub>2</sub> 90 barů



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.

i stopy po korytech řek, takže voda na Marsu zřejmě tekla a v poměrně velkém množství.

• *Naše Země vodu nejen získala, ale našťastí pro nás, její obyvatele, si ji i udržela. Čemu za toto můžeme být vděční?*

Země má pevné jádro v tekutém obalu. Jádro je složeno z železa a niklu. Díky rotaci vzniká magnetické dynamo, které vytváří kolem naší planety magnetické pole, které chrání naši planetu před slunečním větrem, který je tvořen převážně protony (ionizovaný vodík – přibližně 90 %) a dále částicemi alfa (ionizované helium – 8 %) a zbytek tvoří 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, která se projevuje polární září.

• *Dá se specifikovat, odkud voda na Zemi pochází a co znamená pojem „oceánský standard“?*

Jak už bylo řečeno, jedna z možností je sledovat izotopický poměr D/H 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 vždycky ke stejnému výsledku a to takovému, že na každých deset tisíc molekul vody je jedna molekula vody těžké. Tomu se říká oceánský standard.

• *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?*

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 *Rosetta*, 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.

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

V literatuře existuje celá řada studií týkajících se poměru deuteria a vodíku ve vodě. 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.

• *Která voda se tedy přibližuje tomuto oceánskému standardu?*

Je to jednoznačně voda vázaná na asteroidy a meteority.

• *Podařilo se vám zjistit, zdali vznik vody na Zemi skutečně souvisí s nárazy asteroidů, které na Zemi dopadaly?*

Ano. Naše laboratorní experimenty inspirovalo především studium literatury, týkající se impaktních procesů, transportu vody na povrchu a vzniku vody na povrchu impaktních těles.

• *Na jaké otázky jste se nejvíce při tomto výzkumu zaměřili?*

Otázek bylo několik. Dá se v laboratoři ověřit vznik vody na povrchu pevných těles při bombardování 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?

• *Jak takto náročný výzkum probíhá? Mohl byste nám představit pokusy ve vašich laboratořích, které jste v rámci tohoto výzkumu prováděli?*

Použili jsme metodu teplotní programované desorpce (proces uvolnění molekul z povr-



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

chu pevné látky) vody s hmotnostní detekcí. K určení obsahu vody jsme použili 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 adsorpcie vody (proces, jehož principem je hromadění částic, atomů či molekul plynu, kapaliny či pevné látky na povrchu účinkem mezipovrchových přitažlivých sil) v rozmezí 0,09 až 0,7 % hmotnosti. Adsorbovaná voda, pevně držená kapilárními silami, zůstává na povrchu i při velice nízkém tlaku až  $10^{-9}$  mbar a teplotě až 600 K, což naznačuje možný transport vody ve vakuu kosmického prostoru na velké vzdálenosti.

• *Je opravdu jisté, že voda vznikla? Nemohla být v laboratorní aparatuře už nějakým způsobem přítomna ještě před pokusy?*

To je velice důležitá otázka. K tomu, abychom přešli jakékoliv diskuzi o kontaminaci vzorku vodou 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 vyžhán 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 zváženy, mohli jsme určit množství vody, které se naváže na jeden gram nebo kilogram minerálu.

• *Které vzorky jste pro tyto experimenty použili?*

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.

• *Dá se tedy říci, že tímto způsobem lze bezpečně tvorbu vody v minerálech a meteoritech 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,



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

že i když celý proces ozařování probíhá v hlubokém vakuu, voda na povrchu zůstává navázána. Uvolní se až při relativně vysoké teplotě 150 °C.

• *Je tedy finálním výsledkem vašich experimentů skutečnost, že vodu na planetu zemi přinesly asteroidy?*

Jak jsme již řekli v diskuzi, 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 Velkého pozdního bombardování. Stejně jako Měsíc i naše planeta byla velice hustě bombardována impaktními tělesy z vesmíru. Právě to-muto těžkému období v životě naší planety možná vděčíme za vznik života na Zemi, a s největší pravděpodobností i za vodu v oceánech.

• *Jednalo se tedy o asteroidy, které bombardovaly Zemi v období Velkého pozdního bombardování?*

Víme s určitostí, že pozdní 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 těles. Svědkem 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 Velkého pozdního 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.

• *Dá se odvodit z hmotnosti materiálu, který na naši planetu v období Velkého pozdního bombardování dopadl, kolik z toho bylo vody?*

Na základě našich předchozích laboratorních 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 povrch minerálů 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 Velkého pozdního bombardování, dostanete se k řádové shodě s našimi experimentálně získanými daty.

• *Na základě vašich výsledků tedy můžete potvrdit, že množství vody, které na Zemi je, na ni přenesly asteroidy?*

Ano, náš výsledek se shoduje s množstvím vody na Zemi. Můžeme tedy na základě výsledků našich experimentů říci, že všechna voda mohla být na planetu přinesena až po jejím vzniku – a to prostřednictvím těles, přicházejících v době Velkého pozdního bombardování z vesmíru.

• *Děkuji vám za rozhovor. (Za Astropis se ptala Jana Žďárská.)*