

Stopy života na exoplanetě K2-18 b? Dimethylsulfid a jeho dvojznačný původ

Traces of Life on the Exoplanet K2-18 b? Dimethyl Sulfide and Its Ambiguous Origin

Svatopluk Civiš

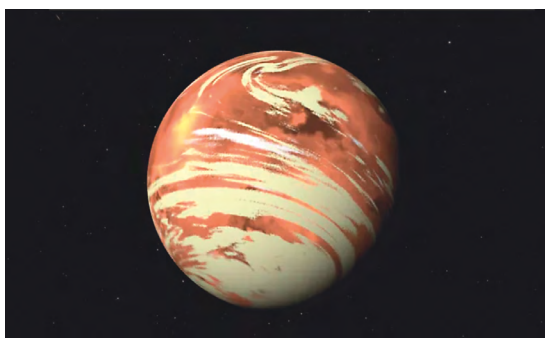
Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského, Dolejškova 2155/3, 182 23 Praha 8; svatopluk.civis@jh-inst.cas.cz

Tento článek shrnuje první vážné kandidáty na chemický důkaz života mimo Zemi, založený na přímém pozorování atmosféry exoplanety pomocí teleskopu JWST. Ukazuje, proč jsou hyceané světy – planety s globálními oceány a vodíkovou atmosférou – jedním z nejperspektivnějších cílů současné astrobiologie. Zároveň zdůrazňuje, že interpretace biosignatur je zásadní vědeckou výzvou, která může rozhodnout o tom, zda stojíme na prahu největšího objevu moderní astronomie.

Hyceané světy v hledáčku

Hledání života mimo naši planetu se v posledních desetiletích proměnilo z čistě teoretického uvažování v experimentálně podložený vědecký směr. Teleskopy nové generace, v čele s Vesmírným dalekohledem Jamese Webba (*James Webb Space Telescope* – JWST), nám poprvé umožňují studovat atmosféry exoplanet s dostatečnou přesností, abychom mohli pátrat po tzv. biosignaturách – chemických stopách, které mohou svědčit o existenci života [1].

Jedním z nejzajímavějších cílů se stala exoplaneta K2-18 b, obíhající kolem červeného trpaslíka ve vzdálenosti 124 světelných let. Tato planeta spadá do kategorie tzv. *subneptunských planet*, tedy těles s hmotností mezi Zemí a Neptunem. Specifickým podtypem, který si získal mimořádnou pozornost, jsou tzv. *hyceané světy* – planety s atmosférami bohatými na vodík a s globálními oceány. Podmínky na jejich povrchu by mohly být příznivé pro život [2], i když se od prostředí na Zemi výrazně liší. K2-18 b je jedním z nejnadějnějších kandidátů pro tento scénář.



Exoplaneta K2-18 b. Zdroj: NASA

Dimethylsulfid jako stopa života

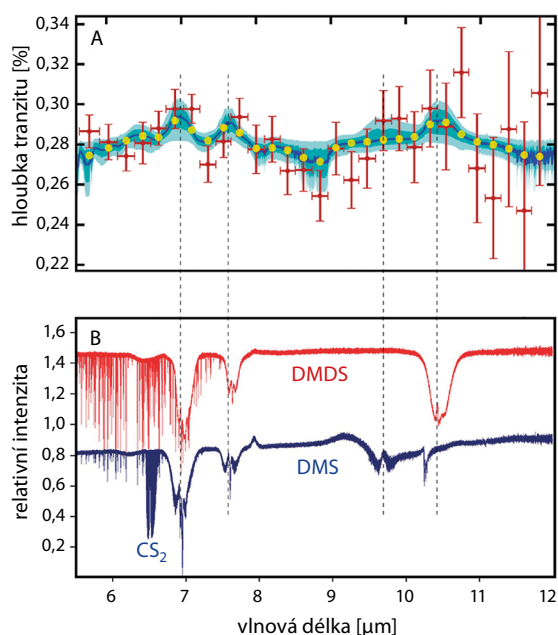
Dimethylsulfid (DMS, CH_3SCH_3) je organosírová sloučenina, která na Zemi vzniká převážně biologicky. Produkují jej zejména mořské mikroorganismy při rozkladu dimethylsulfoniopropionátu ($((\text{CH}_3)_2\text{S}^+\text{CH}_2\text{CH}_2\text{COO}^-)$) – látky, která slouží fytoplanktonu k osmoregulaci. Zatímco u jiných plynů, jako je metan, existují početné geologické či abiotické cesty vzniku, pro DMS na Zemi takové zdroje prakticky neexistují. Právě proto je považován za jednu z nejslibnějších biosignatur: pokud ho objevíme v atmosféře exoplanety, je pravděpodobnost biologického původu vyšší než u jiných molekul.

Na Zemi má DMS navíc klíčový klimatický význam. Po úniku do atmosféry se oxiduje na sulfátové aerosoly, které fungují jako kondenzační jádra a ovlivňují tvorbu oblačnosti. Tímto mechanismem DMS reguluje množství slunečního záření, které dopadá na povrch planety. Známa je tzv. *CLAW hypotéza*, podle níž mořský fytoplankton prostřednictvím emisí DMS zpětně ovlivňuje klima Země a stabilizuje jeho vývoj [3].

Pozorování exoplanety K2-18 b teleskopem JWST

První náznaky přítomnosti DMS na K2-18 b se objevily v roce 2023, kdy přístroje NIRISS a NIRSpec na JWST zaznamenaly spektrální znaky odpovídající této molekule ve spektrální oblasti 0,9–5,2 μm . Statistická významnost však byla nízká a bylo třeba nezávislého potvrzení.

To přišlo až v roce 2025: tým vedený Nikku Madhusudhanem [4] publikoval výsledky měření přístrojem MIRI (*Mid-Infrared Instrument*) v pásmu



Obr. 1 (A) Infračervené transmisní spektrum K2-18 b, získané přístrojem JWST MIRI LRS. Datové body s chybovými úsečkami (hnědě) ukazují pozorované spektrum. Vodovlnné chybové úsečky odpovídají šířce spektrálního binu (spektrální šířce pixelu detektoru). Tmavě modrá křivka znázorňuje medián získaného spektrálního fitu, zatímco dvě světlejší stínované oblasti označují intervaly 1σ a 2σ . Jsou identifikovány výrazné znaky DMS a DMDS. Obě molekuly mají překrývající se spektrální znaky mezi 6,8 a 8 μm, přičemž DMS vykazuje širší struktury v oblasti ~9–10 μm a DMDS v oblasti ~10–11 μm. *Převzato a upraveno z [3]* (B) Laboratorní absorpční spektra DMS a DMDS v plynné fázi (300 K), tlak 5 torr, rozlišení $0,01\text{ cm}^{-1}$, 30 cm optická délka, měřené pomocí absorpční spektroskopie s Fourierovou transformací.

6–12 μm. Spektrum planety vykázalo výrazné absorpční znaky, které nelze vysvětlit běžnými atmosférickými složkami. Nejlépe odpovídají přítomnosti DMS a/nebo příbuzného dimethyldisulfidu (DMDS). Významnost signálu dosáhla 2,9–3,2 σ a odhadované koncentrace jsou vyšší než 10 ppmv – tedy tisíckrát více než na Zemi.

Spektrální znaky DMS a DMDS se však značně překrývají, a proto zatím nelze rozhodnout, která z molekul v atmosféře skutečně dominuje. Pravděpodobně se vyskytuje alespoň jedna z nich – obě jsou přítom na Zemi úzce spjaté s biologickou aktivitou.

Atmosférické podmínky K2-18 b

Z analýzy spekter vyplývá, že atmosféra K2-18 b obsahuje metan (CH_4) a oxid uhličitý (CO_2), zatímco amoniak (NH_3) a oxid uhelnatý (CO) nebyly detekovány. Tento stav není v souladu s jednoduchou chemickou rovnováhou, což naznačuje přítomnost procesů udržujících atmosféru v nerovnovážném stavu – typickém rysu planet s aktivními zdroji plynů [1].

Teplota planety K2-18 b při průchodu záření svrchní vrstvou atmosféry byla na základě získaných spekter odhadnuta na $420 \pm 130\text{ K}$. Pokud se tyto hodnoty potvrdí, je možné, že pod atmosférou bohatou na vodík se může nacházet globální oceán. Přítomnost oblaků nebo mlžného oparu, která by mohla ovlivnit signály, nebyla v pozorovaném pásmu prokázána.

Abiotické cesty vzniku DMS

Přestože je DMS na Zemi spojován téměř výhradně s biologickými procesy, jeho detekce v jiných prostředích ukazuje, že abiotická produkce je možná. Molekula byla potvrzena na kometě 67P/Čurjumov-Gerasimenko a v molekulárním oblaku G+0.693-0.027 v galaktickém centru.

Teoretické modely [5] navrhuji několik cest:

- **reakce na povrchu prachových zrn:** rekombinace CH_3 a CH_3S v ledové matici může vést ke vzniku DMS,
- **iontově-molekulové reakce:** například $\text{CH}_3\text{SH} + \text{CH}_3\text{OH}_2^+ \rightarrow (\text{CH}_3)_2\text{SH}^+ + \text{H}_2\text{O}$, která následně vede k neutrálnímu DMS,
- **radiační asociace v řídkých atmosférách:** méně efektivní mechanismus, který by mohl být významný v chladných oblacích.

Tyto procesy zatím nebyly plně zahrnuty do fotochemických modelů exoplanet. Je proto možné, že část signálu na K2-18 b má abiotický původ.

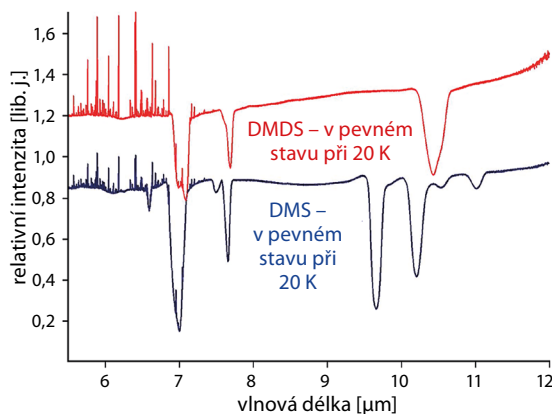
Srovnání se Zemí

Rozdíly mezi Zemí a K2-18 b jsou zásadní. Na Zemi se koncentrace DMS v atmosféře pohybují v jednotkách až desítkách ppbv (10^{-9}), přičemž celkové globální emise se odhadují na 20–30 milionů tun ročně. Tyto hodnoty jsou dostatečné k ovlivnění klimatu a oblačnosti, ale z hlediska objemu plynu jde o stopová množství.

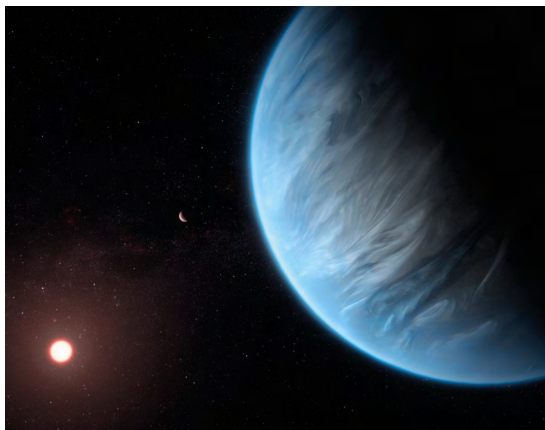
Na K2-18 b se uvažuje o koncentracích přesahujících 10 ppmv (10^{-6}), tedy tisíckrát vyšších než na Zemi. Pokud by byl jejich původ biologický, musela by tamní biosféra produkovat DMS mnohonásobně intenzivněji než pozemské oceány – což by naznačovalo zcela odlišný metabolismus nebo ekologii. Pokud by šlo o původ abiotický, musely by existovat dosud neznámé procesy schopné udržet tak vysoké koncentrace v husté vodíkové atmosféře.

Význam pro hledání života

Detekce DMS a DMDS na K2-18 b je vzrušujícím výsledkem a ukazuje schopnosti teleskopu JWST při pátrání po chemických stopách života. Zároveň však připomíná, že interpretace biosignatur musí být obezřetná. Molekuly, které se na Zemi jeví jako jednoznačné, mohou mít v jiných prostředích alternativní vysvětlení.



Obr. 2 Laboratorní absorpční spektra DMS a DMDS v pevném stavu (20 K). Měřeno pomocí kryogenní techniky absorpční spektrometrie s Fourierovou transformací. Spektrální rozlišení $0,06\text{ cm}^{-1}$.



Exoplaneta K2-18 b. Zdroj: ESA/Hubble, M. Kornmesser

Otázka obyvatelnosti planety K2-18b zůstává nadále otevřená. Nedostatečná znalost přesného teplotního profilu, povrchových podmínek a spektrálních vlastností hvězdného záření omezuje přesnost, s níž lze provádět atmosférickou inverzi. Kromě samotného modelování atmosféry přetrvává i obecnější problém kritérií obyvatelnosti: je nutné vyjasnit, které biomarkery jsou skutečně spolehlivé a jaké environmentální podmínky musejí být splněny, aby život mohl vzniknout, přetrvat a zanechat pozorovatelnou stopu [6, 7].

Oblast charakterizace exoplanetárních atmosfér se rychle rozvíjí a nová pozorování mohou zásadně změnit interpretaci zde prezentovaných výsledků. Přesto poskytují důležitá omezení pro některé planetární parametry a elementární složení atmosféry. Konkrétně ukazuje, že v atmosféře K2-18b mohou být přítomny významné organické a sirné mlhy. Je žádoucí dále zkoumat jejich vliv na albedo planety a celkovou dynamiku atmosféry. Tyto mlhy mohou ztěžovat detekci jiných molekul a jejich přítomnost by mohla sloužit jako nepřímý indikátor chladnějšího teplotního profilu (Rimmer)[1].

V celé řadě současných teoretických výzkumů K2-18b se objevuje molekula etanu, který ve všech simulovaných případech naznačuje možnost provést studii s proměnnými vstupy CH_4 a CO_2 , jež testuje celkovou produkci C_2H_6 , a využít ji jako nepřímý indikátor přítomnosti DMS. Pokud by byl etan naměřen ve vyšších než očekávaných koncentracích, bylo by možné ověřit hypotézu [8] Domagal-Goldman et al. (2011), podle níž by pocházel z methylových radikálů vznikajících při disociaci DMS.

Ukazuje se, že interpretace atmosféry K2-18b stojí na křehké rovnováze mezi modelovými předpoklady a omezenými observačními daty. Přestože definitivní odpověď na otázku obyvatelnosti zatím nemáme, každý nový model a každé nové měření zpřesňuje hranice možných scénářů. K2-18b tak zůstává nejen cílem detailního výzkumu, ale i připomínkou toho, že hledání života mimo Zemi je procesem postupného odhalování – nikoli jednorázového objevu.

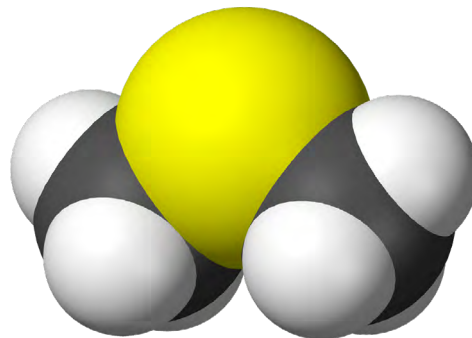
Další pozorování, jak s JWST, tak s budoucími teleskopy (například ELT či Habitable Worlds Observatory), budou klíčová pro potvrzení výsledků. Stejně důležité budou i laboratorní experimenty, které upřesní absorpční vlastnosti DMS a DMDS v podmínkách vodíkových atmosfér, a modely zahrnující nové abiotické reakce.

Literatura

- [1] A. B. Claringbold, P. B. Rimmer, S. Rugheimer et al.: Pre-biosignature Molecules Can Be Detected in Temperate Exoplanet Atmospheres with JWST. *Astron. J.* **166**, 39 (2023). Dostupné z: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/acdacc>.
- [2] B. Benneke, I. Wong, C. Piaulet et al.: Water Vapor and Clouds on the Habitable-zone Sub-Neptune Exoplanet K2-18b. *Astrophys. J. Lett.* **887**, L14 (2019). Dostupné z: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ab59dc>.
- [3] K. M. Fung, C. L. Heald, J. H. Kroll et al.: Exploring dimethyl sulfide (DMS) oxidation and implications for global aerosol radiative forcing. *Atmos. Chem. Phys.* **22**, 1549–1573 (2022). Dostupné z: <https://doi.org/10.5194/acp-22-1549-2022>.
- [4] N. Madhusudhan, S. Constantinou, M. Holmberg et al.: New Constraints on DMS and DMDS in the Atmosphere of K2-18 b from JWST MIRI. *Astrophys. J. Lett.* **983**, L40 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.3847/2041-8213/ad-clc8>.
- [5] G. Di Genova, N. Balucani, L. Mancini et al.: Gas-phase formation routes of dimethyl sulfide in the interstellar medium 2025. *Astron. Astrophys.* **704**, A305 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202555216>.
- [6] K. B. Stevenson, J. Lustig-Yaeger, E. M. May et al.: K2-18b Does Not Meet the Standards of Evidence for Life. *Astron. J.* **170**, 257 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.3847/1538-3881/ae0338>.
- [7] J. Tennyson, S. N. Yurchenko: A spectroscopist's view of the evolving story of exoplanet K2-18 b. *Nature Reviews Physics* **7**, 596 (2025). Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s42254-025-00856-y>.
- [8] S. D. Domagal-Goldman, V. S. Meadows, M. W. Claire et al.: Using biogenic sulfur gases as remotely detectable biosignatures on anoxic planets. *Astrobiology* **11**, 419–441 (2011). Dostupné z: <https://doi.org/10.1089/ast.2010.0509>.

Abstract

The detection of biosignature gases in exoplanet atmospheres represents a key milestone in the search for life beyond Earth. Here we present laboratory infrared spectra of dimethyl sulphide (DMS) and dimethyldisulphide (DMDS) in both gas and solid phases, enabling direct comparison with recent JWST/MIRI transmission spectra of the temperate sub-Neptune K2-18 b. The observed features between 6 – 12 μm are best explained by the presence of DMS and/or DMDS, with retrieved abundances exceeding 10 ppmv. On Earth, DMS is produced almost exclusively by biological activity, raising the possibility of a biosignature detection. However, plausible abiotic pathways such as grain-surface chemistry or ion-molecule reactions remain poorly constrained in exoplanetary environments. Our results highlight both the promise and the ambiguity of sulphur-bearing organics as indicators of life, and emphasize the necessity of laboratory spectroscopy to interpret forthcoming JWST observations of habitable-zone exoplanets.



Model molekuly Dimethylsulfidu – $(\text{CH}_3)_2\text{S}$. Zdroj: Wikipedia, Benjah-bmm27