

Na čem pracujeme: Vodík a křemík v jasných bolidech mění paradigma o složení meteoroidů

25.11.2025 - Michal Švanda | Astronomický ústav AV ČR

Meteory nejsou jen efektní podívanou na noční obloze, ale nesou v sobě informace o chemickém složení malých těles Sluneční soustavy. Nová studie využívající spektra jasných bolidů odhalila souvislost mezi množstvím vodíku v kometárních meteoroidích a jejich velikostí: větší tělesa si dokážou uchovat více těkavých látek. Tento výsledek přispívá do diskuse o původu vody na Zemi a o rozdílech mezi materiálem komet a asteroidů.

Když malý úlomek kamene – meteoroid – ze Sluneční soustavy vstoupí do zemské atmosféry vysokou rychlostí, vznikne meteor – světelný jev způsobený prudkým zahřátím při tření o atmosféru, přičemž se těleso zcela vypaří. V případě větších těles mluvíme o bolidích – velmi jasných meteorech, které mohou zářit tak jasně, že osvětlí krajinu pod sebou. Světlo bolidu lze rozložit pomocí spektroskopie na jednotlivé vlnové délky, což umožňuje určit chemické složení tělesa, které v atmosféře shořelo. Spektroskopie tak představuje unikátní cestu k poznání malých těles Sluneční soustavy.

Spektroskopie meteorů je však složitá, protože detekované záření pochází nejen z původního materiálu meteoroidu, ale i z atmosféry. Navíc se ukazuje, že různé části meteorického plazmatu mají různé teploty. Ve spektru meteorů se objevují dvě teplotní složky: „chladnější“ část pocházející z hlavy meteoru s teplotou kolem 5000 K a „žhavá“ rázová vlna v přední části letu. Právě ta druhá může dosahovat teplot kolem 10 000 K a obsahuje informace o prvcích, které jsou jinak obtížně detekovatelné, například o vodíku vázaném v ledových nebo organických sloučeninách.

Přítomnost vodíku v malých tělesech Sluneční soustavy je zásadní v debatě o původu vody na Zemi. Podle dvou hlavních hypotéz by mohla být voda přinesena buď kometami z vnějších oblastí Sluneční soustavy, nebo pocházet z těles typu uhlíkatých asteroidů. Přímé určení množství vodíku v meteoroidích tak pomáhá hodnotit pravděpodobnost těchto scénářů.

Nová studie Vlastimila Vojáčka a jeho kolegů z Oddělení meziplanetární hmoty ASU se zaměřuje na analýzu dvou spektrálních čar pocházejících z vysokoteplotní složky plazmatu bolidů: čáry vodíku H α (656,28 nm) a dvojité spektrální čáry ionizovaného křemíku Si II (634,71 a 637,14 nm). Cílem bylo zjistit, jak se poměr vodíku ke křemíku mění u meteoroidů různého původu a různé velikosti, a zda lze tento poměr spojit s procesy zachování těkavých látek uvnitř malých těles.

Autoři využili databázi spekter z kamer SDAFO Evropské bolidové sítě provozované ASU. Tyto stanice používají fotografické přístroje vybavené difrakčními mřížkami, které dovolují zachytit celé spektrum bolidu ve velmi širokém zorném poli. Databáze obsahovala více než 1100 spekter, ovšem jen 31 z nich vykazovalo jasné čáry ionizovaného křemíku a pouze 22 obsahovalo navíc detekovatelnou čáru vodíku. Studované spektrální čáry jsou tedy ve spektrech meteorů velmi vzácné. Je to mimo jiné proto, že je vysokoteplotní složka vzniká pouze u meteorů s rychlostí větší než asi 30 km/s. Komplementární pozorování z vícečetných pozorování stanicemi DAFO byla použita k charakterizaci pohybu tělesa, tedy jak k určení heliocentrické trajektorie, tak k popisu průletu meteoroidu atmosférou, zejména tedy k určení průletové rychlosti.

Z pozorovaných spekter určili autoři poměry intenzit vybraných čar, hodnotu, z níž lze zjistit poměr počtu atomů příslušných prvků v plazmatu. K tomu je však nutné korigovat měřené intenzity

spektrálních čar na míru ionizace plazmatu. Dané spektrální rozlišení SDAFO a celkově malý pozorovaný počet čar vysokoteplotní složky spektra bohužel neumožňuje určit nezávisle teplotu meteoru, autoři se proto spokojili s odhadem teploty 10 500 K, známého z předchozích přesnějších pozorování.

Jedním z důležitých výsledků studie je, že poměr zastoupení vodíku vůči křemíku nezávisí na rychlosti meteoru. To znamená, že poměr vodíku ke křemíku lze považovat za skutečný materiálový ukazatel, ne deformaci způsobenou fyzikou vstupu meteoru do atmosféry. Z údajů dále vyplývá, že u kometárních meteoroidů roste poměr vodíku ku křemíku s jejich hmotností. Malé úlomky obsahují méně vodíku, zatímco větší tělesa si jej dokáží uchovat. Autoři interpretují tento trend jako důsledek rozdílné schopnosti těles odolávat ztrátě těkavých látek během dlouhodobého pobytu ve vesmíru. Menší úlomky mají velký poměr povrchu k objemu, čili se snadněji zahřejí a těkavé sloučeniny se z nich odpaří. Větší kusy však mají dostatečně hluboké, méně ovlivněné vrstvy. No a v neposlední řadě asteroidální meteoroidy vykazují nízké hodnoty poměru vodíku ke křemíku bez ohledu na velikost. To odpovídá jejich očekávanému složení: asteroidy jsou ve velké míře vysušené, jejich vodík je vázán v minerálech nebo zcela chybí. Naproti tomu kometární meteoroidy velkých velikostí (desítky gramů až kilogramy) obsahují více vodíku než uhlíkaté chondrity. To ale znamená, že komety mohou obsahovat materiál bohatý na vodík v podobě ledu a organických sloučenin, který může být zachován až do vstupu do atmosféry.

Autoři porovnali své výsledky s měřeními provedenými přímo in-situ v kosmu. Větší kometární meteoroidy mají poměr vodíku ke křemíku stejný či vyšší, než bylo naměřeno u prachových částic získaných kosmickými sondami. To naznačuje, že prach odebraný sondami nemusí reprezentovat hlubší vrstvy kometárního materiálu, ale spíše povrch podléhající ztrátě těkavých látek.

Výsledky studie V. Vojáčka a jeho kolegů podporují scénáře, ve kterých se část vody na Zemi dostala prostřednictvím komet – ovšem nikoli nutně pomocí malých prachových částic, ale spíše větších úlomků těles.

V. Vojáček, J. Borovička, P. Spurný, *Spectroscopic analysis of hydrogen and silicon in bright fireballs: New insights into meteoroid composition*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2511.04373

<https://www.asu.cas.cz/articles/2501/19/na-cem-pracujeme-vodik-a-kremik-v-jasných-bolidech-meni-paradigma-o-slozeni-meteoroidu>