

Na čem pracujeme: Záření meteorů v laboratoři

Datum 10.10.2026
Subjekt Astronomický ústav AV ČR
Region Česká republika
Kategorie Věda a výzkum

„Výsledkem práce tedy není jednoduchý recept, podle něhož by bylo možné vzít meteorické spektrum a přímo z něj odečíst chemické složení meteoroidu. Studie naopak ukazuje, proč je takový postup fyzikálně problematický.“

Když meteoroid vstoupí do zemské atmosféry, jeho povrch se začne intenzivně zahřívat a materiál se postupně odpařuje. Vznikající plyn je vystaven vysoké teplotě a část atomů se ionizuje. Tento zářící oblak plazmatu pozorujeme jako meteor. Ve spektru jeho záření se objevují charakteristické čáry jednotlivých chemických prvků, takže spektroskopie představuje prakticky jediný způsob, jak na dálku určit chemické složení původního materiálu. To přitom není zajímavé pouze samo o sobě. Meteoroidy představují pozůstatky materiálu, z něhož vznikala tělesa Sluneční soustavy, a jejich složení proto poskytuje informace o původu a vývoji malých těles, jako jsou asteroidy a komety, a také o podmínkách v rané protoplanetární soustavě.

Převést pozorované spektrum přímo na chemické složení meteoroidu však není jednoduché. Intenzita jednotlivých spektrálních čar nezávisí pouze na množství daného prvku. Ovlivňuje ji také teplota a hustota plazmatu, ionizace atomů, takzvaná samoabsorpce, při níž plazma část vlastního záření znovu pohltí, a především rozdílná těkavost jednotlivých prvků. Některé prvky se při zahřívání uvolňují snadno, zatímco jiné zůstávají v pevném zbytku. Proto například silná sodíková čára nemusí jednoduše znamenat, že meteoroid obsahoval mimořádně mnoho sodíku.

Jednou z možností, jak tento problém obejít, je vytvořit meteory v laboratorních podmínkách. Výhodou takových experimentů je, že na rozdíl od skutečného meteoroidu přesně známe výchozí materiál a můžeme kontrolovat podmínky, za nichž k jeho odpařování dochází. V předchozí práci, na níž se hlavní autorka podílela během svého působení na Univerzitě Komenského v Bratislavě, vznikl rozsáhlý soubor spekter dvaadvaceti různých meteoritů pořízených s vysokým rozlišením a ukázalo se, že jejich spektrální charakteristiky umožňují kvalitativně rozlišovat různé skupiny meteoritů. Nová studie na tuto práci navazuje: zatímco předchozí výzkum se zaměřoval na porovnávání intenzity spektrálních čar, autoři se nyní pokusili pomocí fyzikálního modelu rekonstruovat teplotu plazmatu a zastoupení jednotlivých prvků a výsledky přímo porovnat se skutečným složením použitých meteoritů.

Spektra byla získána při laboratorních experimentech simulujících průlet pomalejšího asteroidálního meteoroidu atmosférou. Jde o mimořádně rozmanitý soubor meteoritů zahrnující běžné, uhlíkaté i enstatitové chondrity, několik druhů achondritů včetně meteoritů z Měsíce a Marsu, dále mezosiderit a železný meteorit. Experimenty probíhaly v plazmovém aerodynamickém tunelu v Institutu kosmických systémů Univerzity ve Stuttgartu, laboratorní podmínky odpovídaly přibližně vstupu asi čtyřcentimetrového tělesa do atmosféry ve výšce kolem 80 kilometrů rychlostí zhruba 12 km/s. Spektra byla pořizována v širokém rozsahu vlnových délek s vysokým rozlišením a vysokou kadencí. Protože poměry intenzit spektrálních čar zůstávaly během experimentu stabilní, mohli autoři jednotlivé snímky sečíst a vytvořit reprezentativní spektrum pro každý zkoumaný meteorit.

Klíčovou součástí práce je způsob, jakým byla tato spektra interpretována. Autoři použili model přenosu záření původně zavedený Jiřím Borovičkou z ASU pro analýzu spekter bolidů. Model předpokládá, že zářící plazma je v lokální termodynamické rovnováze a představuje přibližně homogenní zářící oblak plynu. Zároveň ale na rozdíl od jednoduchých modelů počítá se samoabsorpcí, tedy s tím, že některé části záření jsou pohlcovány samotným plazmatem. To je důležité především u silných spektrálních čar, které mohou být opticky tlusté a jejichž intenzita proto neroste jednoduše úměrně množství příslušného prvku. Důležitým krokem v modelu je také započtení ionizačních procesů, které ovlivňují intenzitu spektrálních čar a jsou důležité pro správné určení zastoupení jednotlivých prvků. Model při fitování spektra určuje několik parametrů, především teplotu plazmatu, sloupcovou hustotu atomů železa, parametr určující šířku čar a velikost zářící oblasti. Následně lze z intenzit čar určit relativní zastoupení dalších prvků.

Model dokázal ve většině případů velmi dobře reprodukovat pozorovaná spektra v rozsahu přibližně 380 až 780 nm. Autoři při modelování zohlednili pouze nízkoteplotní složku plazmatu v lokální termodynamické rovnováze, která za podmínek simulujících pomalé meteory představuje hlavní zdroj záření, zatímco vysokoteplotní složka je obvykle zanedbatelná nebo zcela chybí. Odchytky se objevovaly zejména v oblastech s horší kalibrací, u čar kyslíku a dusíku pocházejících ze samotného plazmatického proudu, u vodíkových čar spojených s vysokoteplotní složkou a v oblasti molekulárního pásu CN. Tyto oblasti však podle autorů neovlivňují určování zastoupení sledovaných atomárních prvků.

Zlatým hřebem každého modelu je přirozeně porovnání jeho výsledků se skutečností, v tomto případě chemického složení odvozeného ze spekter se skutečným objemovým složením meteoritů známým z laboratorních měření. Zde se ukázaly systematické rozdíly. Nejdrastičtější nesoulad se týkal těkavých prvků sodíku a draslíku. Zde bylo ze spekter odvozeno zastoupení, které prakticky o dva řády překračuje realitu. Autoři proto výsledky zasadili do modelu postupného odpařování. Ten vychází z jednoduché představy, že při zahřívání se z meteorického materiálu nejdříve uvolňují nejvíce těkavé prvky, zatímco méně těkavé a žáruvzdorné prvky zůstávají déle v roztaveném zbytku a uvolňují se až v pozdějších fázích letu meteoroidu atmosférou. Výsledky naznačují, že se během laboratorních experimentů odpařila jen malá část materiálu, zatímco ve spektrech meteorů při průletu atmosférou pozorujeme i emise některých žáruvzdorných prvků, což svědčí o jejich alespoň částečném odpaření. Použité laboratorní podmínky odpovídají přibližně výšce 80 kilometrů, kde ještě není přenos tepla do meteoroidu dostatečný k úplnému odpaření méně těkavých složek. Meteoroid navíc při průletu atmosférou postupně vstupuje do hustších vrstev a zahřívání se mění s výškou. Ve vyšších částech atmosféry proto mohou ve spektru dominovat například čáry sodíku, zatímco při hlubším průletu mohou být účinněji odpařovány silikáty a později i část žáruvzdorných prvků. U centimetrových a větších těles navíc významně vstupuje do hry vedení tepla a difúze, což ještě komplikuje situaci.

Výsledkem práce tedy není jednoduchý recept, podle něhož by bylo možné vzít meteorické spektrum a přímo z něj odečíst chemické složení meteoroidu. Studie naopak ukazuje, proč je takový postup fyzikálně problematický. Pro interpretaci meteorických spekter je nutné spojit spektroskopická měření s fyzikálním modelem přenosu záření a s popisem samotného procesu ablace. Použití zářivého přenosu se samo o sobě ukázalo jako účinný způsob, jak určit teplotu, hustotu a další vlastnosti zářícího plazmatu a jak zlepšit kvantitativní interpretaci meteorických pozorování. Cesta k přesnému stanovení chemického složení je ale ještě trnitá. K naplnění tohoto úkolu je důležité lépe popsat proces selektivního odpařování a jeho závislost na teplotě, mineralogii, velikosti tělesa a množství již odpařeného materiálu.

A. Pisarčíková, J. Borovička, P. Matlovič: *Determining elemental composition in laboratory meteorite ablation spectra through radiative transfer modeling*, Icarus 462 (2027) 117327. arXiv:2609.17156

<https://www.asu.cas.cz/articles/2620/19/na-cem-pracujeme-zareni-meteoru-v-laboratori>