Na čem pracujeme: Tepelné namáhání jako primární mechanismus fragmentace meteoroidů roje Geminid

21.1.2026 - T. Henych, J. Borovička, D. Čapek | Astronomický ústav AV ČR

Geminidy patří mezi ty nejlépe sledovatelné meteorické roje, každoročně slibující stabilní hodinové frekvence. Přesto jsou tato tělíska do jisté míry mezi jinými meteorickými roji unikátní. Autorský tým z Oddělení meziplanetární hmoty ASU se věnoval zevrubné studii několika exemplářů Geminid pozorovaných vlastními silami, pokrývajících rozsáhlý interval hmotností těles. Autoři studovali jak a proč se tyto objekty rozpadají, jaké mechanické a tepelně-mechanické síly je ovlivňují a co jejich chování říká o vnitřní struktuře a původu těchto těles. Studie přináší ucelený pohled na dynamiku fragmentace meteoroidů různých velikostí a nabízí důkazy, že jejich počáteční praskání je způsobeno tepelným namáháním při nástupu do atmosféry.

Meteory jsou světelné jevy, které mají svůj původ v průletu malého tělíska meziplanetární hmoty zemskou atmosférou. Země je sice meteory bombardována neustále, ale po průletech například komet zůstávají v určitých oblastech Sluneční soustavy tyto zbytky nahloučeny. Prochází-li Země takovým proudem, pozorujeme zvýšení činnosti meteorů, které navíc jakoby vylétají z jednoho místa na obloze. Mluvíme o meteorických rojích. Jedním z takových jsou Geminidy, které jsou každoročně aktivní v první polovině prosince. Geminidy jsou mezi dalšími roji zvláštní tím, že mají obecně vyšší hustotu než většina jiných meteorických rojů a pocházejí z aktivního asteroidu (3200) Phaethon, nikoli z klasické komety. Tento roj je každoročně dobře pozorovatelný a poskytuje příležitost zkoumat vlastnosti původních částic – meteoroidů – v širokém rozsahu hmotností, od velmi malých prachových zrn až po větší tělesa, která jsou při průletu tak jasná, že vrhají stíny. Mluvíme o bolidech.

Rozpad meteoroidů v atmosféře je komplexní proces, který je ovlivněn jak jejich mechanickou pevností, tak vnitřní strukturou, tak interakcí s atmosférickým prostředím. Tradiční představy o fragmentaci počítají především s aerodynamickým tlakem a teplotními efekty způsobenými třením o vzduch. Studium těchto procesů není jen akademickou disciplínou: výsledky pomáhají interpretovat data z pozorovacích sítí, jako je Evropská bolidová síť, a přispívají k lepšímu pochopení původních vlastností meteoroidů i jejich mateřských těles.

Studie vedená Tomášem Henychem z ASU se věnuje detailní analýze chování 39 různě jasných Geminid. Použitá pozorování obsahují jak záznamy bolidů z Evropské bolidové sítě, tak slabší meteory zaznamenané například pomocí videosystémů. Cílem studie bylo určit, při jakém tlaku a na jakém principu se tyto objekty rozpadávají, jaká je jejich vnitřní struktura a jakou roli hraje tepelné a mechanické namáhání během průletu atmosférou.

Klíčovou součástí metodologie bylo použití fyzikálního modelu fragmentace meteoroidů, který dokázal rekonstrukcí světelných křivek a dynamiky letu jednotlivých těles určovat okamžik a charakter jejich rozpadů. Tento model zahrnuje různé způsoby, jak může těleso ztrácet hmotu: ablaci (odpařování povrchu vlivem zahřátí), erozi jemných částic a hrubou fragmentaci, kdy se těleso rozpadne na větší kusy. Model pracoval s množstvím fyzikálních parametrů, jako jsou počáteční hmotnost meteoroidu, jeho rychlost, úhel vstupu a parametry týkající se odporu vzduchu a účinnosti záření. Optimalizace parametrů probíhala pomocí paralelních genetických algoritmů, které umožnily najít nejlepší shodu mezi simulacemi a skutečnými pozorovanými daty.

Důležitou součástí přístupu byla i numerická simulace tepelného namáhání uvnitř meteoroidů během vstupu do atmosféry. Tento model řešil teplotní pole uvnitř tělesa, přičemž zohlednil i výsledky předchozích studií, které ukázaly, že speciálně Geminidy jsou působením kosmického prostředí obaleny jakousi kůrkou, která dále působí silně izolačně a chrání křehké nitro tělíska před delším zvětráváním.

Analýza ukázala, že mechanické vlastnosti Geminid se výrazně liší v závislosti na jejich hmotnosti. Nejkompaktnější objekty o hmotnosti mezi přibližně 20 až 200 gramy vykazují relativně vysoké hodnoty pevnosti, zatímco částečky menší než několik gramů nebo naopak větší než přibližně 0,26 kilogramu vykazují různorodější chování a rozpadají se při nižších dynamických tlacích. Největší meteoroidy jsou zřejmě poněkud heterogenní, obsahující mimo jiné menší kompaktní domény. Ze simulací také vyplynulo, že nejmenší tělesa mají nejjemnější zrnitost při erozi, zatímco u větších objektů byly odvozeny strukturální části o velikosti až několika milimetrů, které se dále nerozpadaly. Hustoty těchto těles se pohybují v rozmezí přibližně 1400 až 2800 kg/m^3 u menších meteoroidů a u větších pak přibližně dosahují hodnoty hustoty samotných zrn (~3000 kg/m^3).

Fyzikálně lze pak modelovat rozvoj teplotního pnutí uvnitř takového tělesa ohřevem při vstupu do atmosféry. Výsledky simulací tepelného namáhání potvrdily, že povrchová vrstva tělesa se zahřeje velmi rychle v tenké vrstvě o tloušťce cca 1 milimetr, zatímco vnitřní partie zůstávají relativně chladné. Tepelné gradienty generují napětí, která překračují pevnost materiálu ještě před začátkem výrazné ablace, což podporuje hlavní závěr, že první krok rozbití Geminid je způsoben tepelným namáháním. Následně se tyto již narušené fragmenty podrobují mechanickému namáhání způsobenému aerodynamickým tlakem, který jejich rozpad dále urychluje a vede k pozorované fragmentaci meteorů.

Spojením pečlivé analýzy pozorovaných světelných křivek a průletových stop bolidů s numerickým modelováním prostupu tepla tělesem při vstupu do atmosféry vysvětluje, jak postupně dochází k destrukci těchto jinak zřejmě kompaktních tělísek meziplanetární hmoty. Geminidy jsou jedním z mála rojů, jejichž mateřským tělesem není kometa. Porovnáním s vlastnostmi těles z jiných rojů se tak dozvídáme informace jednak o struktuře Sluneční soustavy, ale také o její minulosti.

T. Henych, J. Borovička, D. Čapek a kol., *Geminids are initially cracked by atmospheric thermal stress*, Astronomy & Astrophysics v tisku, preprint arXiv:2512.14516

https://www.asu.cas.cz/articles/2517/19/na-cem-pracujeme-tepelne-namahani-jako-primarni-mechanismus-fragmentace-meteoroidu-roje-geminid