

Charakteristika vedeckých cieľov projektu

Meteoroidy, čiže malé kamenné alebo železné telieska obiehajúce okolo Slnka, sú jedným z najcennejších zdrojov informácií o pôvode a vývoji Slnčnej sústavy. Za meteoroidy považujeme telesá s rozmermi v rozpätí 30 μm až 1 m (Perlerin, 2018); pričom väčšie telesá nazývame asteroidmi a pri menších telesách hovoríme o medziplanetárnom prachu. Pri súčasnom stave techniky nie je možné meteoroidy možné pozorovať priamo v otvorenom medziplanetárnom priestore. Naše znalosti o nich pochádzajú najmä zo sledovania ich interakcie s vrchnými vrstvami atmosféry Zeme. Ak dráha meteoroidu križuje dráhu Zeme a teleso vstúpi do zemskej atmosféry, jeho kinetická energia je dostatočná na roztavenie a ionizáciu materiálu. Vznikajúcu svetelnú stopu následne môžeme pozorovať ako meteor.

Zdanlivý pohyb meteorov je oproti ostatným nebeským telesám veľmi rýchly. Pravdepodobne aj preto boli meteory historicky považované skôr za meteorologický, než astronomický úkaz, a ich kozmický pôvod bol definitívne potvrdený až v roku 1798 (Czegka, 2000). Pozorovaním meteorov zo zemského povrchu je možné zistiť, že sú často združené do *meteorických rojov*, teda zoskupení telies s podobnými geocentrickými dráhami. Projekcia na oblohu vytvára ilúziu bodového zdroja, čiže *radiantu*.

Dominantným zdrojom meteoroidov sú malé telesá Slnčnej sústavy, najmä kométy a blízkozemské asteroidy, ktoré pri preletoch blízko Slnka uvoľňujú drobné telieska, prípadne fragmentujú pri vzájomných zrážkach. Mierne odlišnosti počiatočných rýchlostí telies, gravitačné perturbácie pochádzajúce od planét a negravitačné efekty pôsobiace na častice spôsobujú, že ich dráhy sa na dlhých časových škálach pomaly menia a diverzifikujú. Na škálach stoviek až tisícov rokov vytvoria široký prstenec okolo pôvodnej orbity svojho materského telesa. Na ešte dlhších škálach sa prstence rozpadajú a prispievajú do *sporadického pozadia*, teda zdroja rozptýlených meteoroidov na zdanlivo náhodných dráhach (Jenniskens, 1998).

Mimo zemskej atmosféry tieto telieska predstavujú vážne nebezpečenstvo pre ľudské misie a komerčné satelity. Potreba presných dát o priestorovej koncentrácii a toku meteoroidných častíc v okolí Zeme a jej dráhy sa bude s narastajúcim vedeckým a komerčným využívaním kozmického priestoru neustále zvyšovať. Detailné poznanie dráhových charakteristík, početnosti a distribúcie veľkostí častí je dôležité aj pre zhodnotenie ohrozenia povrchu Zeme. Objekty s rozmermi viac ako 10 metrov predstavujú nebezpečenstvo a majú potenciál spôsobiť značné škody, od lokálnych materiálnych škôd až po katastrofy globálneho charakteru.

V práci sa zameriame na pôvod a dynamický vývoj prúdov meteoroidov od ich vzniku až po zánik v atmosfére. Cieľom projektu je vytvoriť ucelený model ich priestorového rozloženia vo vnútornej Slnčnej sústave. Vhodným nástrojom na výskum dráhovej dynamiky a evolučných ciest meteorických rojov sú numerické N-body simulácie. Výsledok simulácie je možné štatisticky porovnať s observačnými dátami a následne optimalizačnými metódami nájsť najlepšiu možnú zhodu. Takto získaná virtuálna

populácia dobre popisuje skutočné rozloženie častíc. Primárnym zdrojom observačných dát na našom pracovisku sú kamery systému AMOS (All-sky Meteor Orbit System), ktorý bol vyvinutý a je prevádzkovaný Oddelením astronómie a astrofyziky KAFZM FMFI UK (Tóth et al., 2015; Zigo et al., 2013). Počas riešenia projektu očakávame splnenie nasledujúcich úloh:

- návrh *N*-body simulácie s využitím masívnej paralelizácie pomocou grafického procesora (GPU),
- implementácia simulácie v jazyku Python alebo C++,
- vývoj porovnávacích algoritmov a optimalizačných procedúr,
- porovnanie výsledkov s inými modelmi, napríklad (Ryabova, 2013).

V rámci projektu sa taktiež plánujeme zúčastniť na konferencii **Meteoroids 2019**, ktorú v tomto roku organizuje Univerzita Komenského v Bratislave, a prezentovať dovtedy získané výsledky vo forme príspevku alebo postera; prípadne tiež na konferencii **IMC 2019** v Bollmannsrueh v Nemecku.

Referencie

- Czegka, W., 2000. Lichenberg, Benzenberg, Brandes, and Their Meteor Height Determination in 1798–1800: An Empirical Approach to Solve the Meteorite Enigma. *Meteoritics and Planetary Science Supplement* 35, A45.
- Jenniskens, P., 1998. On the dynamics of meteoroid streams. *Earth, Planets, and Space* 50, 555–567. <https://doi.org/10.1186/BF03352149>
- Perlerin, V., 2018. Definition of Terms in Meteor Astronomy (IAU).
- Ryabova, G., 2013. Modeling of meteoroid streams: The velocity of ejection of meteoroids from comets (a review). *Solar System Research* 47, 219–238. <https://doi.org/10.1134/S0038094613030052>
- Tóth, J., Kornoš, L., Zigo, P., others, 2015. All-sky Meteor Orbit System AMOS and preliminary analysis of three unusual meteor showers. *Planetary and Space Science* 118, 102–106. <https://doi.org/10.1016/j.pss.2015.07.007>
- Zigo, P., Tóth, J., Kalmančok, D., 2013. All-Sky Meteor Orbit System AMOS, v: Gyssens, M., Roggemans, P. (Ed.), *Proceedings of the International Meteor Conference, 31st IMC, La Palma, Canary Islands, Spain, 2012*. s. 18–20.

Rozbor aktuálneho stavu riešenia témy projektu

Moderné siete fotografických staníc a videostaníc poskytujú dostatočne presné dáta na určenie dráhových charakteristík pozorovaných telies (Borovička, 1990). Nemožnosť reprodukovania meteorov v laboratórnych podmienkach však necháva veľké neistoty v určení hodnôt niektorých fyzikálnych parametrov, ako napríklad skutočnej hmotnosti meteoroidov alebo distribúcie hmotností v populácii.

Základným parametrom populácie meteoroidov je *hmotnostný exponent* s , ktorým popisujeme distribúciu hmotností častíc ako mocninnú závislosť $N(m) \propto m^{-s}$ (Pokorný a Brown, 2016). Súčasné modely určenia hmotnostného exponentu sú však vo viacerých ohľadoch nedostatočné. Pri redukcii dát z tradičných vizuálnych alebo prístrojových pozorovacích metód sa obvykle neuvažujú výberové efekty (*selection bias*). Do zaznamenaných pozorovaní vstupuje rad prirodzených aj inštrumentálnych vplyvov, ktoré skresľujú výslednú štatistickú vzorku. Automatické videostanice, fotografické prístroje aj vizuálne pozorovania prirodzene preferujú meteory s väčšou zdanlivou jasnosťou a dĺžkou dráhy a menšou vzdialenosťou od zenitu. Tieto efekty je potrebné zmerať a vyvinúť procedúry na ich odstránenie. Ďalšie parametre populácie je možné určiť až po oprave štatistického súboru o výberové efekty.

Alternatívnym spôsobom korekcie je numerická simulácia, v ktorej vytvoríme populáciu meteoroidov, simulujeme ich vstup do atmosféry a pozorovaný súbor meteorov následne štatisticky vyhodnocujeme. Porovnaním výstupu simulácie so skutočnými pozorovaniami za rovnakých podmienok získavame mieru zhody. Postupnými zmenami parametrov simulácie a veľkosti výberových efektov sme schopní určiť hodnoty parametrov, pre ktoré je dosiahnutá najlepšia možná zhoda medzi simuláciou a pozorovaním. Simulovanú populáciu potom môžeme vyhlásiť za štatistický model skutočného rozloženia meteoroidných častíc.

Podobné postupy sú využívané na odstránenie výberových efektov pri astronomických pozorovaniach blízkozemských asteroidov (Chesley a Vereš, 2017), ale dosiaľ neboli aplikované na opravu štatistických dát pri pozemských pozorovaniach meteorov. Úspešne však boli použité na odhad celkového počtu viditeľných meteorov (Gural, 2002). Výsledky sú priamo porovnateľné s hodnotami získanými inými metódami, napríklad vizuálnymi pozorovaniami vykonanými skupinou pozorovateľov, priamou redukciou dát z kamerových systémov AMOS (Zigo et al., 2013) a CILBO (Koschny et al., 2013) alebo inými metódami (Blaauw et al., 2016). Špeciálnu pozornosť sme venovali porovnaniu s analýzami konkrétnych pozorovacích nocí, publikovanými napríklad portálom MeteorFlux.io (Molau a Barentsen, 2018).

Predbežné výsledky (Baláž, 2018) indikujú, že udávané hodnoty hmotnostného exponentu s sú všeobecne skreslené ignorovaním pôsobiacich výberových efektov. Publikované dáta udávajú hodnoty s približne 1,85 (Hughes, 1995; Krisciunas, 1980), prípadne iba 1,7 (Bel'kovich a Ishmukhametova, 2006). Tieto hodnoty však nie sú konzistentné s výsledkami simulácií – zhoda s experimentálnymi dátami je dosiahnutá až pri podstatne vyššej hodnote $s = 2,15$. Pravdepodobným vysvetlením je práve

nízka detekčná schopnosť pozorovateľov pri zaznamenávaní menej hmotných častíc a z nej vyplývajúce podhodnotenie ich skutočného počtu.

Referencie

Baláž, M., 2018. Determination of total meteoroid flux in millimetre to metre size range (Master's thesis). Comenius University in Bratislava, Bratislava, Slovakia.

Bel'kovich, O.I., Ishmukhametova, M.G., 2006. Mass Distribution of Perseid Meteoroids. *Solar System Research* 40, 208–213. <https://doi.org/10.1134/S003809460603004X>

Blaauw, R.C., Campbell-Brown, M., Kingery, A., 2016. Optical meteor fluxes and application to the 2015 Perseids. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 463, 441–448. <https://doi.org/10.1093/mnras/stw1979>

Borovička, J., 1990. The comparison of two methods of determining meteor trajectories from photographs. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia* 41, 391–396.

Chesley, S.R., Vereš, P., 2017. Projected Near-Earth Object Discovery Performance of the Large Synoptic Survey Telescope, v: 2016 IEEE Aerospace Conference. <https://doi.org/10.1109/AERO.2016.7500539>

Gural, P., 2002. Meteor Observation Simulation Tool, v: Proceedings of the International Meteor Conference 2001, Cerkno, Slovenia. s. 29–35.

Hughes, D.W., 1995. The Perseid Meteor Shower. *Earth, Moon and Planets* 31–70. <https://doi.org/10.1007/BF00671498>

Koschny, D., Bettonvil, F., Licandro, J., others, 2013. A double-station meteor camera set-up in the Canary Islands. *Geoscientific Instrumentation Methods and Data Systems* 2, 339–348.

Krisciunas, K., 1980. The luminosity functions of the 1969 Perseid and Orionid meteor showers. *Icarus* 43, 381–384. [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(80\)90182-7](https://doi.org/10.1016/0019-1035(80)90182-7)

Molau, S., Barentsen, G., 2018. MeteorFlux.io.

Pokorný, P., Brown, P.G., 2016. A reproducible method to determine the meteoroid mass index. *Astronomy & Astrophysics* 592. <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201628134>

Zigo, P., Tóth, J., Kalmančok, D., 2013. All-Sky Meteor Orbit System AMOS, v: Gyssens, M., Roggemans, P. (Ed.), Proceedings of the International Meteor Conference, 31st IMC, La Palma, Canary Islands, Spain, 2012. s. 18–20.

Návrh metódy riešenia projektu

Projektom nadväzujeme na diplomovú prácu (Baláž, 2018), v ktorej sme sa zaoberali tokom meteoroidných častíc v hornej atmosfére. Prirodzeným ďalším krokom je rozšírenie zamerania práce na pôvod a vývoj týchto telies, teda na obdobie od ich uvoľnenia z materského telesa až po zánik v zemskej atmosfére.

Základom metódy je numerická *N*-body simulácia s využitím masívnej paralelizácie pomocou grafického procesora (GPU). V simulácii budeme vytvárať jednotlivé častice pri známych materských telesách meteoroidov a následne numerickou integráciou pohybových rovníc určíme ich budúcu polohu. Celkové silové pôsobenie je dané najmä gravitačným pôsobením Slnka ako centrálného telesa, rušiacimi gravitačnými vplyvmi planét a krátkodobou aj pôsobením materského objektu. Pre častice s veľmi malými rozmermi sú dôležité aj negravitačné vplyvy, najmä tlak slnečného žiarenia a Poyntingov-Robertsonov efekt.

Jednotlivé častice sú nezávislé a ich vzájomné silové pôsobenie môžeme úplne zanedbať. Pri využití masívnej paralelizácie pomocou GPU očakávame podstatné zvýšenie výpočtového výkonu na úroveň miliárd integračných krokov za sekundu, čo umožní simulovať milióny častíc (Nyland et al., 2007). Vysoký počet simulovaných častíc je dôležitý, keďže k zrážkam so Zemou dochádza pomerne zriedkavo, kým pre účely štatistického vyhodnotenia súboru potrebujeme získať dostatočne početnú populáciu.

Ak počas integrácie dôjde ku kolízii niektorej z častíc so Zemou, daná častica je označená ako pozorovaná. Sumárny štatistický súbor všetkých takýchto častíc je po aplikácii výberových efektov možné porovnať s pozemskými pozorovaniami a určiť zhodu s experimentálnymi dátami. Variáciou parametrov simulácie a minimalizáciou odchýlok sme schopní určiť skutočnú distribúciu a pôvodnú dráhu telies. Opätovné spustenie simulácie s optimálnymi hodnotami parametrov spolu so znalosťou dráhy skutočného materského telesa nám umožnia identifikovať jednotlivé prúdy častíc, predpovedať aktivitu zodpovedajúcich meteorických rojov a určiť tok a distribúciu častíc v danej oblasti Slnčnej sústavy.

Referencie

- Baláž, M., 2018. Determination of total meteoroid flux in millimetre to metre size range (Master's thesis). Comenius University in Bratislava, Bratislava, Slovakia.
- Nyland, L., Harris, M., Prins, J., 2007. GPU Gems 3, chapter 31: Fast N-Body Simulation with CUDA. Addison-Wesley Professional.

Finančné nároky projektu a ich odôvodnenie

1. Bežné výdavky (1700 €)

a. Cestovné výdavky (450 €)

- účasnícky poplatok a cestovné náklady potrebné na účasť na konferencii **Meteoroids 2019**, organizovanej v Bratislave 16. – 21. 06. 2019.
- úhrada nákladov spojených s cestovaním na Astronomické a Geofyzikálne Observatórium v Modre

b. Materiál a dodávky (1150 €)

- zakúpenie počítačových komponentov za účelom ovládania simulácie a archivovania výstupných dát (GPU, SSD disk)
- nákup kancelárskych potrieb (tonery, papier a iné)

c. Ostatné tovary a služby (100 €)

- nákup odborných knižných publikácií

2. Kapitálové výdavky (0 €)

Finančná požiadavka spolu: 1700 €.

Anotácia

Primárnym cieľom vedeckej práce je vytvoriť priestorový model rozloženia a dynamiky malých meteoroidných častíc vo vnútornej Slnčnej sústave. Ťažiskovou časťou práce je numerická simulácia, pomocou ktorej budeme schopní vytvárať virtuálne meteoroidy, sledovať ich dynamiku vo vnútornej Slnčnej sústave a interakciu so zemskou atmosférou. Výsledky simulácie porovnáme s observačnými dátami získanými pomocou systému celooblohových kamier AMOS.

Opakovanou variáciou parametrov simulácie až do dosiahnutia optimálnej zhody s experimentálnymi dátami budeme schopní určiť skutočnú priestorovú distribúciu a početnosť meteoroidov v oblasti orbity Zeme, ako aj vyhodnotiť celkový početný a hmotnostný tok častíc dopadajúcich na Zem. Porovnaním výsledkov s inými publikáciami dokážeme zistiť, do akej miery sú staršie dáta získané priamou redukciou observačných dát zaťažené výberovými efektami a prispejeme k tvorbe predstavy o populácii meteoroidov vo vnútornej Slnčnej sústave. V rámci riešenia projektu sa plánujeme zúčastniť na konferencii Meteoroids 2019 a prezentovať doterajšie výsledky vo forme príspevku alebo postera.