



Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky



Mgr. Ivana Jakšová

Autoreferát dizertačnej práce

Zdroje a stabilita populácie meteorov sporadického pozadia

na získanie akademického titulu philosophiae doctor

v odbore doktorandského štúdia:

4.1.7. – 8. Astronómia a astrofyzika

Miesto a dátum:

Bratislava, 2014

Dizertačná práca bola vypracovaná
v dennej forme doktorandského štúdia

na Fakulte matematiky, fyziky a informatiky, Univerzity Komenského v Bratislave

Predkladateľ: **Mgr. Ivana Jakšová**
Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Školiteľ: **prof. RNDr. Vladimír Porubčan, DrSc.**
Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

Oponenti: **Ing. Ján Vondrák, DrSc.**
Astronomický ústav AV ČR, Boční II, 141 31 Praha 4, Česká republika
RNDr. Peter Pecina, CSc.
Astronomický ústav AV ČR, 251 65 Ondřejov, Česká republika
Doc. RNDr. Štefan Parimucha, PhD.
Prírodovedecká fakulta UPJŠ, Jesenná 5, 04001 Košice

Obhajoba dizertačnej práce sa koná o h
pred komisiou pre obhajobu dizertačnej práce v odbore doktorandského štúdia vymenovanou predsedom
odborovej komisie
(uviesť dátum vymenovania)

4.1.7. – 8. Astronómia a astrofyzika
(študijný odbor) (názov študijného programu doktorandského štúdia)

na
(presná adresa miesta konania obhajoby dizertačnej práce)

Predseda odborovej komisie:

Doc. RNDr. Jozef Klačka, CSc.
Univerzita Komenského v Bratislave
Fakulta matematiky, fyziky a informatiky
Katedra astronómie, fyziky Zeme a meteorológie

OBSAH

Cieľ práce.....	4
1. Úvod do problematiky.....	4
2. Sporadické meteory z databázy SonotaCo.....	7
2.1. Databáza televíznych meteorov SonotaCo.....	7
2.2. Separácia rojových meteorov od sporadického pozadia.....	7
2.3. Rozloženie radiantov sporadických meteorov	8
3. Výsledky dizertačnej práce	9
3.1. Aktivita sporadických meteorov	9
3.2. Rozloženie dráhových elementov v sporadickom pozadí.....	10
3.3. Dominantné smery a zdroje sporadického pozadia	11
3.4. Stavba a pôvod zdrojov sporadických meteorov.....	12
Použitá literatúra	15
Abstract	17
Zoznam publikovaných prác doktoranda	18

Cieľ práce

Cieľom práce je štúdium sporadického pozadia meteorov, jeho aktivity a stavby analýzou televíznej databázy pozorovaní meteorov. Základom je identifikácia samotného sporadického pozadia, jeho hlavných zdrojov a následná analýza ich dráhových charakteristík a variácií v priebehu roka. Predkladaná dizertačná práca si taktiež kladie za cieľ hľadanie potenciálnych materských telies jednotlivých zdrojov, no jej hlavným cieľom je porovnanie výsledkov pre sporadické pozadie získaných z televíznych pozorovaní s doteraz známymi prácami zaoberajúcimi sa radarovými meteormi, ktoré predstavujú odlišnú hmotnostnú populáciu.

V prvej časti práce sa venujeme určeniu sporadickej populácie z japonskej databázy televíznych pozorovaní meteorov SonotaCo. Zamerali sme sa na separáciu meteorických prúdov na základe dráhovej podobnosti meteoroidov a nezávislou metódou sme našli hlavné meteorické roje, ale aj množstvo menších prúdov. Pozorované radianty získaného sporadického pozadia sme opravili o pohyb Zeme, aby sme získali a mohli analyzovať skutočné rozloženie geocentrických radiantov a identifikovať dominantné smery prítoku hmoty na Zem.

V ďalšej časti sa zaoberáme sporadickým pozadím ako celkom, odvodili sme ročnú variáciu chodu frekvencií sporadických meteorov a študovali sme úsek dennej variácie, dostupný z optických pozorovaní. Za účelom určenia dráhových elementov v závislosti od polohy radiantu sme analyzovali ich rozloženie naprieč celým sporadickým pozadím.

Hlavná časť práce sa zameriava na identifikáciu a analýzu charakteristík jednotlivých zdrojov sporadického pozadia, ktoré je možné získať pomocou optických pozorovaní zo severnej pologule. Určili sme typické hodnoty dráhových elementov a študovali variácie v priebehu roka ako aj zmeny v aktivite jednotlivých zdrojov. Na záver sme porovnávali hodnoty dráhových elementov zdrojov so skupinami malých telies slnečnej sústavy s cieľom nájsť ich potenciálne materské telesá.

1. Úvod do problematiky

Populáciu meteoroidov rozdeľujeme na dve zložky. Prvou z nich sú rojové meteoroidy, ktoré sa pohybujú okolo Slnka po veľmi podobných dráhach. V medziplanetárnom priestore tak vytvárajú prúd meteoroidov pozdĺž dráhy materského telesa, z ktorého sa uvoľnili. Veľkosť a smer ejetkej rýchlosti častice spôsobuje len malú zmenu jej dráhovej rýchlosti v porovnaní s materským telesom (Sykes a Walker, 1992). Takto vzniká prúd meteoroidov pozdĺž jeho dráhy, ktorý sa vplyvom gravitačných porúch planét a negravitačných efektov postupne rozptýľuje v priestore. Meteoroidy sa môžu vzdialiť zo svojej pôvodnej dráhy, do takej miery, že ich vzájomný súvis, ale aj súvis s materským telesom je len ťažko odhaliteľný. Vtedy sa stávajú súčasťou sporadickej časti populácie. Zo Zeme ich pozorujeme v priebehu celého roka a ich radianty pokrývajú celú nebeskú sféru. Avšak ich rozloženie nie je izotropné, väčšinu z nich je možné priradiť k niektorému zo 6 hlavných zdrojov, ktorých poloha na oblohe sa vzhľadom na Slnko nemení. V porovnaní s rojovými meteoroidmi majú väčší hmotový exponent, čo znamená, že prevažujú u nich menšie častice. Napriek

tomu je prítok ich hmoty na Zem v oblasti vizuálnych meteorov asi 10-krát väčší. Ide teda o najvýdatnejšiu zložku populácie meteoroidov v okolí našej planéty.

Reálny výskum meteorov sporadického pozadia sa začal v 50-tych rokoch minulého storočia. Vtedy boli vďaka radarovým a vizuálnym pozorovaniam objavené tri hlavné zdroje: apexový, heliónový a antiheliónový (Hawkins, 1956; Hawkins a Prentice, 1957). V roku 1968 k nim pribudol na základe pozorovaní z kanadského meteorického radaru v Springhille aj severný toroidálny zdroj (Štohl, 1968). Zvýšenie záujmu o sporadickú zložku populácie prinieslo v ďalšom období aj dostatočné množstvo dát z južnej pologule, čo umožnilo odhalenie južného toroidálneho zdroja, ale aj rozštiepenia apexového zdroja na severnú a južnú vetvu (Jones a Brown, 1993). Najvýznamnejšie pozorovania sporadických meteorov z posledného obdobia pochádzajú z kanadského meteorického radaru CMOR, ktorý nepretržite operuje od roku 2001. Získané dáta umožnili podrobnejšie štúdium štruktúry komplexu sporadických meteorov a odhalili tak zhustenie radiantov okolo apexu Zeme s polomerom okolo 55° , nazývané aj "prstencový zdroj" (Campbell-Brown, 2008a). Rovnaký útvar vznikol aj v numerickej simulácii sporadického pozadia (Wiegert a kol., 2009). Z tejto práce vyplýva, že prstenec je výsledkom dynamických procesov vyplývajúcich z Kozaiho efektu (Kozai, 1962; Kinoshita a Nakai, 1999). Keď prach pod vplyvom Poynting-Robertsonovho efektu (PR-efekt) špiráluje k Slnku dosiahne maximum zrážkovej pravdepodobnosti so Zemou ak sa hodnota jeho veľkej polosi priblíži 1AU. Prstenec je tak výsledkom dráhového vývoja prachových častíc pod vplyvom PR-efektu a Kozaiho efektu (Campbell-Brown, 2008b).

Apexový zdroj (AP) sa nachádza v oblasti roviny ekliptiky vo vzdialenosti 90° od Slnka. Ide o najvýdatnejší zdroj z hľadiska zaznamenaných meteorických úkazov. Meteoroidy prichádzajúce z oblasti apexu Zeme majú najväčšie geocentrické rýchlosti (50 – 60 km/s) v porovnaní s meteoroidmi z iných smerov. Pohybujú sa totiž po retrográdnych dráhach a ich geocentrická rýchlosť je výsledkom súčtu reálnej heliocentrickej rýchlosti meteoroidu a obežnej rýchlosti Zeme, ktorá je približne 30 km/s. Z rovnice svietivosti ďalej vyplýva, že svietivosť meteoru závisí predovšetkým od jeho rýchlosti a v menšej miere od hmotnosti. Dokonca je priamo úmerna piatej mocnine jeho rýchlosti. Aj relatívne malý meteoroid prichádzajúci od zemského apexu tak dokáže zanechať výraznú svetelnú stopu. Ak by sa však pohyboval po priamej dráhe s rovnakou heliocentrickou rýchlosťou nedokázal by spôsobiť dostatočnú ionizáciu ani excitáciu na jeho zaznamenanie. Preto je apexový zdroj dominantný, ak posudzujeme len tok meteorov do určitej magnitúdy bez ohľadu na ich hmotnosť. Takmer kruhové dráhy naznačujú dlhodobý vplyv PR-efektu a materskými telesami apexových meteoroidov tak môžu byť dlhoperiodické kométy (Campbell-Brown, 2007).

Reálne najvýdatnejším zdrojom vzhľadom na prítok hmoty na Zem je antiheliónový zdroj (AH) a hneď po ňom aj heliónový (HE). Pomer toku hmoty podľa dát z radaru CMOR je $AH/HE = 1,3$ (Campbell-Brown, 2008b). Keďže oba zdroje majú symetrické alebo veľmi podobné charakteristiky, vysvetlenie asymetrie v ich výdatnosti zostáva otvorenou otázkou. Podľa modelu Wiegerta a kol. (2009) odpoveď je potrebné hľadať v dynamických procesoch, ktoré majú vplyv na dráhy častíc od ich uvoľnenia z materského telesa až po presun do oblasti Zeme. Meteory z heliónového zdroja sú pozorovateľné len počas dňa a teda len prostredníctvom radarových systémov. Ich radianty sa koncentrujú v rovine ekliptiky vo vzdialenosti približne 20° od Slnka smerom k apexu Zeme. Antiheliónový zdroj sa nachádza symetricky na nočnej oblohe vo vzdialenosti asi 70° od zemského apexu v rovine ekliptiky. Štúdium týchto zdrojov odhalilo variácie v ich aktivite počas roka. Heliónový zdroj má maximum od apríla do júna a antiheliónový zdroj v období od októbra do decembra (Keay,

1963; Štohl, 1967, 1968). Pre oba zdroje sú typické častice s priamymi dráhami, malými sklonmi voči ekliptike a veľkými excentricitami. Ich heliocentrické rýchlosti sú väčšie ako obežná rýchlosť Zeme. Viaceré práce poukazujú na podobnosť dráhových charakteristík týchto meteoroidov s krátkoperiodickými kométami (Galligan a Baggaley, 2005; Jones a Brown, 1993). Prvý kto uviedol ako možné materské teleso týchto zdrojov kométy 2P/Encke bol Whipple a kol. (1967). Štohl (1986) túto teóriu rozviedol a pozorované variácie v ich aktivite vysvetlil existenciou veľmi rozšíreného prúdu meteoroidov. Ten by bol pozorovateľný pred prechodom perihéliom ako AH zdroj a po prechode perihéliom ako HE zdroj (Sekanina, 1976). Kométa 2P/Encke je materským telesom oboch zdrojov aj podľa simulácie sporadického pozadia od Wiegerta a kol. (2009).

Ďalšou symetrickou dvojicou zdrojov je severný toroidálny (NT) a južný toroidálny zdroj (ST). Oba sa nachádzajú okolo nultého stupňa apexovej dĺžky, 60° nad a pod rovinou ekliptiky. Tvorené sú meteoroidmi s nižšími hodnotami veľkých polosí, malými excentricitami a veľkými sklonmi. Keďže v slnečnej sústave sú takéto sklony typické pre dlhoperiodické kométy, predpokladá sa, že medzi nimi by sme mali hľadať materské telesá toroidálnych zdrojov. Aj numerický model od Wiegerta a kol. (2009) navrhuje ako materské telesá týchto zdrojov niekoľko dlhoperiodických komét. Kruhové dráhy sa v tomto prípade dajú vysvetliť dlhodobým pôsobením PR-efektu, ktorý má za následok znižovanie veľkých polosí aj excentricít.

Už z prvých systematických vizuálnych pozorovaní bolo zrejme, že aktivita sporadických meteorov podlieha dennej aj ročnej variácii. Ako prvý ich študoval Brandes už v roku 1825. O niečo neskôr v roku 1866 Schiaparelli odhalil, že variácie vznikajú v dôsledku geometrického efektu spôsobeného pohybom Zeme. Detailnejšie štúdium variácii, hlavne dennej, však bolo možné až po zavedení rádiových pozorovaní do praxe. Tie umožnili súvisle pozorovania aj počas dňa a poskytli taktiež dáta neprerušované výkyvmi počasia. Ak by sme priebeh dennej variácie odvodili len z rotácie Zeme a obehu okolo Slnka, maximum by nastalo o 6:00 a minimum o 18:00 miestneho času. Najväčšie množstvo pozorovaných meteorov k nám prichádza z apexového zdroja, preto aj denná variácia závisí od polohy apexu Zeme nad/pod obzorom. Ten nad ránom kulminuje a podvečer sa nachádza najhlbšie pod obzorom. Podľa tejto geometrie denná variácia chodu frekvencií meteorov je najvýraznejšia na rovníku a klesá smerom k zemským pólom (McKinley, 1961). V reálnych dátach však Štohl (1986) našiel až tri maximá dennej variácie o 2, 6 a 10 hodine miestneho času. Tieto maximá zodpovedajú kulmináciám troch zdrojov nachádzajúcich sa na ekliptike - antiheliónový, apexový a heliónový. Pomer medzi minimom a maximom dennej variácie sa pohybuje v rozsahu 3-5 v stredných zemepisných šírkach (Ceplecha a kol., 1998). Viaceré štúdie naznačujú, že denná variácia je ovplyvnená viacerými javmi nie len rotáciou Zeme (napr. Singer a kol., 2004).

Podobne ako denná aj ročná variácia je spôsobená zmenou výšky apexu nad obzorom. Mení sa vďaka zmene sklonu zemskej osi voči rovine ekliptiky v priebehu roka. V jej dôsledku pozorujeme na severnej pologuli v jeseni vyššiu aktivitu sporadického pozadia ako na jar. Schmude (1998) analyzoval dáta z vizuálnych pozorovaní, podľa ktorých je aktivita od júla do decembra asi 3-krát vyššia než v období od januára do júna. Opačný priebeh bol zaznamenaný pre južnú pologuľu s maximom na jar (Štohl, 1969). Ročné zmeny aktivity jednotlivých zdrojov boli podrobne študované vďaka dátam z radaru CMOR (Campbell-Brown, 2007). Výsledky potvrdili maximum HE zdroja v apríli až júni a dve maximá AH zdroja - prvé od apríla do júla a hlavné od októbra do decembra, ktoré odhalil už Keay (1963).

2. Sporadické meteory z databázy SonotaCo

2.1. Databáza televíznych meteorov SonotaCo

Sporadické pozadie bolo doteraz študované spočiatku len na základe vizuálnych následne rádiových a fotografických pozorovaní. Televízne pozorovania sú najmladšou z pozorovacích metód, a keďže štúdium sporadického pozadia vyžaduje homogénnu databázu meteorov z nepretržitých pozorovaní počas dlhšieho obdobia, nepriniesli zatiaľ ucelenú analýzu sporadických meteorov. Televízne pozorovania však poskytujú informácie o meteoroch s väčšou magnitúdou ako radarové, no s menšou než fotografické, a tak môžu vyplniť informačnú medzeru o časticiach s hmotnosťami medzi 10^{-4} g a 10^{-2} g.

Pri našej analýze sporadického pozadia sme vychádzali z japonskej databázy televíznych pozorovaní SonotaCo (SonotaCo, 2009). Táto databáza pochádza z japonskej siete pozorovacích staníc, ktoré zastrešuje a programovo vybavil SonotaCo. Približne 30 z nich sa venuje aj vizuálnym pozorovaniam meteorov a spolu majú k dispozícii viac než 100 videokamier. Sieť vznikla v roku 2004 na internetovom online fóre venovanom programu UFO-capture (SonotaCo, 2005). Program je určený na detekciu pohybu na nočnej oblohe a využíva sa na zaznamenávanie meteorov a svetelných javov spojených s bleskovými výbojmi. SonotaCo je taktiež autorom programu na meranie geofyzikálnych parametrov meteorov UFO-analyzer (SonotaCo, 2007) a programu UFO-orbit (SonotaCo, 2008) na výpočet ich dráh z viacstaničných pozorovaní. Tento balíček programov bol použitý na zaznamenávanie, spracovanie aj výpočet dráh na všetkých pozorovacích staniaciach japonskej siete. Automatizácia celého procesu umožnila nepretržité sledovanie nočnej oblohy nad Japonskom. Veľa staníc používalo pri pozorovaniach viacero kamier, aby zvýšili presnosť meraní a aby pokryli väčšiu oblasť. Typické zariadenie stanice pozostáva z vysokocitlivej monochromatickej CCD kamery typu WATEC-100N alebo WATEC-902H2U so širokouhlým objektívom ($f/0,8$, $f=3,8-12$ mm, $FOV: 90^{\circ}-30^{\circ}$). Pozičná presnosť jednotaničných pozorovaní je $0,03^{\circ}$ a limitná magnitúda $4,5^m$. Jednotnosť technického vybavenia, programového spracovania a nepretržité pozorovania od roku 2007 nám poskytujú ucelenú, rozsiahlu a homogénnu databázu dráh TV meteorov. V dizertačnej práci sme spracovali dáta z rokov 2007 až 2012, ktoré spolu predstavujú súbor 141 511 meteorických dráh.

2.2. Separácia rojových meteorov od sporadického pozadia

Pôvodná databáza SonotaCo obsahuje aj meteory, u ktorých nie je zachytená celá dráha. Keďže ide o malú časť záznamov rozhodli sme sa v záujme zvýšenia presnosti ďalej pracovať len s meteormi, ktorých dráha je úplná (parameter $inout=3$). Po odstránení menej kvalitných záznamov nám zostalo k dispozícii 117 786 meteorov.

Rojová príslušnosť je v databáze SonotaCo už určená programom UFO-orbit na základe polohy radiantu, obdobia aktivity a podľa ďalších geofyzikálnych parametrov. Keďže meteorický roj je definovaný meteormi, ktoré sa pred vstupom do atmosféry Zeme pohybujú na podobných dráhach je na ich identifikáciu vhodnejšie vychádzať z dráhovej podobnosti jednotlivých meteorov. Navyše analýza dráh meteorov, ktoré boli v tejto databáze priradené k niektorému zo 6 hlavných meteorických rojov naznačila, že 2-15 % k nim v skutočnosti nepatrí (Vereš a Tóth, 2010). Zároveň niektoré meteory, určené programom UFO-orbit ako sporadické, boli priradené k rojovým. Tieto výsledky naznačujú, že pre ďalšie štúdium sporadického pozadia je

vhodnejšie odseparovať rojové meteory s ohľadom na ich dráhové charakteristiky, predovšetkým, ak je hlavným cieľom analýza dráhových elementov meteorov sporadického pozadia. Pri separácii sme preto využívali Southworthovo-Hawkinsovo D_{SH} kritérium podobnosti dvoch dráh (Southworth a Hawkins, 1963) a iteračnú metódu (Porubčan a Gavajdová, 1994).

D_{SH} kritérium je najznámejším a najpoužívanejším kritériom podobnosti dvoch kužeľosečiek. Ide o analógiu 5-rozmerného ortogonálneho súradnicového systému, v ktorom dráhové elementy q , e , i , ω , Ω predstavujú jednotlivé súradnice. Dráha meteoroidu je v tomto priestore definovaná jediným bodom a vzdialenosť dvoch bodov je vyjadrená hodnotou D_{SH} kritéria. Pri vyhľadávaní meteorických asociácií sme používali hodnotu $D_{SH} = 0,1$, ktorá nám umožnila identifikovať centrálnu časť prúdov. Okrajové časti najväčších meteorických rojov boli stále dostatočne početné na vytváranie vedľajších prúdov, a tak sme v niektorých prípadoch použili vyššiu hodnotu D_{SH} kritéria. Tú sme určili mierne upravenou metódou „break point“ (Porubčan a kol., 1995).

Základom iteračnej procedúry je postupné hľadanie strednej dráhy meteorického prúdu. K prvému meteoru z databázy sme najprv hľadali meteory, ktoré spĺňali zadanú hraničnú hodnotu D_{SH} kritéria a nachádzali sa od porovnáwanej dráhy $\pm 20^\circ$ v dĺžke Slnka. Z asociovaných meteorov sme následne vypočítali strednú dráhu ako aritmetický priemer jednotlivých dráhových elementov. V druhom kroku sme hľadali meteory asociované k tejto strednej dráhe a z nich sme vypočítali novú strednú dráhu. Postup sme opakovali až kým výsledná stredná dráha v dvoch po sebe nasledujúcich iteráciách nebola totožná. Vykonaním procedúry pre všetky meteory z databázy sme našli asociácie meteorov s podobnými dráhami. Z nich sme vybrali najpočetnejšiu asociáciu v rámci jej obdobia aktivity a odseparovali ju z databázy ako meteorický prúd. Postupne sme odstránili všetky asociácie, ktoré obsahovali viac ako 10 členov. Tento prístup nám umožnil vyhľadávanie meteorických rojov bez vstupnej informácie o ich strednej dráhe a porovnaním nami získaných dráh rojov s doteraz známymi výsledkami sme verifikovali zvolenú metódu. Bez dôkladnejšej analýzy sa podarilo približne 82% nájdených prúdov priradiť k niektorému zo známych meteorických rojov. Získané sporadické pozadie tvorilo 81 670 dráh, čo predstavuje približne 69% vstupného súboru.

2.3. Rozloženie radiantov sporadických meteorov

Po odseparovaní meteorických rojov sme získali databázu meteorov, ktoré sme mohli považovať za sporadické. Avšak stále sa v ňom nachádzali menšie zhustenia radiantov, ktorých polohy sa väčšinou prekrývali s už odseparovanou rojovou zložkou. V záujme ich odstránenia alebo aspoň zredukovania sme uskutočnili ďalšie kolo separácie. Tentokrát sme iteračnú procedúru aplikovali len na vybrané meteory, ktorých radianty sa nachádzali v oblasti konkrétneho zhustenia. Okrajové časti niektorých rojov mohli obsahovať menšie množstvo meteorov, ktorých počet nebol dostatočný na vytvorenie asociácie viac ako 10 dráh. Preto sme tentokrát neseparovali jednotlivé roky osobitne a zohľadňovali sme len dĺžku Slnka. Predpokladali sme, že takýmto spojením vzniknú opäť dostatočne početné asociácie. To sa však podarilo len v niekoľkých prípadoch a výsledky druhého kola separácie priniesli nepatrnú redukciu zhustení radiantov. Ich pôvod preto musíme hľadať aj v stanovení minimálnych podmienok na kvalitu dráh. Meteory, ktorých radianty naznačujú rojovú príslušnosť, zrejme majú dráhové elementy vypočítané s vyššou chybou. A tak sme ich na základe porovnávania dráh nevedeli priradiť k roju inak, než zvýšením D_{SH} kritéria na hodnotu, ktorá by zahŕňala aj väčšie množstvo

sporadických meteorov. Preto sme v ďalšom štúdiu pokračovali so sporadickým pozadím, ktoré sme získali v prvom kole separácie.

Redukciou pozorovaných radiantov na jednotnú dĺžku Slnka sme v ďalšom kroku získali reálne rozloženie geocentrických radiantov. Pri ich zobrazení v Hammerovej projekcii so stredom v apexe pohybu Zeme a Slnkom v bode s elongáciou -90° boli už známe zdroje sporadických meteorov ihneď viditeľné. Dominantný bol apexový zdroj a to v dôsledku pozorovacieho efektu. Svetelná stopa, ktorú zanecháva častica pri prelete atmosférou je totiž priamo úmerná piatej mocnine rýchlosti. Apexové meteoroidy sa pohybujú po retrográdnych dráhach a ich výsledná geocentrická rýchlosť je tak súčtom obežnej rýchlosti Zeme s rýchlosťou meteoroidu. Aj relatívne malá častica tak dokáže vyvolať svetelný úkaz, ktorý by pri vstupe do atmosféry z iného smeru nespôsobila. Viditeľné bolo taktiež rozštiepenie apexového zdroja na severnú a južnú vetvu. Antiheliónový zdroj sa nachádzal približne 70° od apexu Zeme v rovine ekliptiky. Na opačnej strane v mieste s elongáciou okolo -70° od apexu by sa mal nachádzať heliónový zdroj. Avšak Slnko, ktoré sa nachádza na ekliptike vo vzdialenosti -90° od apexu, neumožňuje zaznamenanie meteorov heliónového zdroja pomocou optických systémov. Zhluk radiantov v oblasti okolo 70° nad apexom predstavuje severný toroidálny zdroj. Meteory z južného toroidálneho zdroja sa v databáze SonotaCo nenachádzajú, keďže vznikla z pozorovaní zo severnej pologule. Viditeľná je však časť prstenca, ktorý tvorí zhustenie radiantov okolo apexu s vnútorným polomerom 55° . Jeho existencia bola zatiaľ odhalená len na základe radarových pozorovaní CMOR (Campbell-Brown, 2008a) a nám sa ju podarilo potvrdiť vďaka televíznym pozorovaniam. Pri alternatívnom zobrazení sporadického pozadia so stredom v severnom póle Zeme sme si navyše všimli náznak zhustenia radiantov práve nad severným pólom. Táto oblasť však bola pokrytá pomerne nízkym počtom radiantov, preto je realnosť tohto zhustenia nevyhnutné overiť pomocou početnejších a teda radarových databáz.

3. Výsledky dizertačnej práce

3.1. Aktivita sporadických meteorov

Počty meteorov zachytených v databáze SonotaCo sú ovplyvnené striedaním dňa a noci, čo neumožňuje zaznamenávanie svetelných úkazov počas dňa, ale aj výkyvmi počas dňa. Na základe databáz z optických pozorovaní teda nie je možné dôkladnejšie štúdium dennej variácie. Napriek tomu sme sa pokúsili o jej zaznamenanie. Zistili sme, že bez ohľadu na ročné obdobie frekvencie chodu meteorov kontinuálne rastú počas noci od zotmenia až po svitanie. Získaný priebeh potvrdil maximum dennej variácie v skorých ranných hodinách a minimum vo večerných. Podľa viacerých prác analyzujúcich radarové pozorovania nastáva maximum ráno okolo 6-tej hodiny miestneho času a minimum o 18-tej (Štohl, 1986; Okamoto a Maegawa, 2008; Phanikumar a kol., 2012), čo nie je v rozpore s našimi výsledkami. Avšak presný čas nebolo možné odvodiť nakoľko zachytené maxima nepredstavovali reálne maximum chodu frekvencií meteorov, ale začiatok svitania a minima boli zasa ovplyvnené začínajúcim sa súmrakom.

Už z porovnania dennej variácie určenej pre rôzne ročné obdobia bolo zrejmé, že najnižšie hodinové frekvencie meteorov sú pozorované na jar a najvyššie v jeseni. Avšak najviac meteorov je možné zaznamenať v zime, keď sú hodinové frekvencie len o málo nižšie než v jeseni, ale noci trvajú dlhšie. Aby sme pri štúdiu

ročnej variácie vylúčili vplyv dĺžky dňa a noci na pozorované počty meteorov, brali sme do úvahy len tie, ktoré boli zaznamenané medzi 20-tou hodinou večer a 4-tou hodinou nad ránom. Priebeh ročnej variácie však bol naďalej ovplyvnený výkyvmi počasia. Spojením dát z viacerých rokov je ale možné tento vplyv štatisticky minimalizovať. Získaným priebehom ročnej variácie sme preložili polynomicke funkciu tretieho stupňa a z nej sme odvodili maximum aktivity s dĺžkou Slnka okolo 240° , čo zodpovedá druhej polovici novembra. Minimum aktivity podľa našich dát nastáva v druhej polovici marca, keď je dĺžka Slnka približne 0° . V priebehu však bolo viditeľné lokálne maximum, odpovedajúce obdobiu aktivity roja Perzeid. Pre získanie spoľahlivejšieho priebehu ročnej variácie sme preto skúsili vylúčiť tieto dáta z analýzy. Získali sme tak priebeh, ktorého minimum nastáva v polovici apríla ($25^\circ - 30^\circ$) a maximum až začiatkom decembra ($250^\circ - 255^\circ$). Pomer počtu meteorov medzi maximom a minimom aktivity bol v oboch prípadoch 3. Posun maxima smerom k zimným mesiacom je v našom prípade spôsobený s najväčšou pravdepodobnosťou zostatkovou rojovou aktivitou, ktorá je v novembri a decembri vyššia než v ostatných mesiacoch.

3.2. Rozloženie dráhových elementov v sporadickom pozadí

Pri štúdiu rozloženia dráhových elementov sme si rozdelili oblohu na sieť $2^\circ \times 2^\circ$ a pre každý vzniknutý štvorec sme vypočítali stredné hodnoty geocentrických rýchlostí, perihéliových vzdialeností, sklonov dráh, excentricít a veľkých polosí meteorov, ktorých radianty sa nachádzali v danom štvorci.

Najvyššie geocentrické rýchlosti mali podľa očakávania meteory prichádzajúce od apexu Zeme a postupne klesali smerom k antapexu. Zmeny boli spojité a jednotlivé zdroje sa na základe priebehu geocentrických rýchlostí nedali odlíšiť od zvyšného sporadického pozadia. Geocentrická rýchlosť meteoru je teda určená geometriou zrážky so Zemou a polohou radiantu, ale nie je určujúca pre príslušnosť k jednotlivým zdrojom.

Podobné charakteristiky malo aj rozloženie sklonov dráh, ktoré je opäť výsledkom zrážky so Zemou. Apexový zdroj sa nachádza v oblasti retrográdnych dráh so sklonmi nad 110° . Pre severný toroidálny zdroj sú typické vysoké sklony okolo 60° a meteoroidy antiheliónového zdroja sa pohybujú po priamych dráhach so sklonmi do 20° voči rovine ekliptiky.

Aj rozloženie perihéliových vzdialeností je dané predovšetkým geometrickým efektom. Častice s perihéliom v blízkosti Slnka, ktoré sa dostanú až k dráhe Zeme majú pomerne vysoké excentricity. Preto sa s najväčšou pravdepodobnosťou stretnú so Zemou pod uhlom 90° voči smeru jej pohybu. Takto dostávame dve oblasti nižších perihéliových vzdialeností, ktoré sa nachádzajú symetricky okolo elongácie $\pm 50^\circ$ od apexu. Ovplyvňujú tak nižšie hodnoty perihéliových vzdialeností antiheliónového zdroja a zo symetrie rozloženia hodnôt pravdepodobne aj u heliónového zdroja.

Excentricity uvedené v databáze SonotaCo častokrát nadobudajú hodnoty väčšie ako 1. Ide o štandardnú chybu meraní, ktorá posúva rýchlo pohybujúce sa meteory z excentrických eliptických dráh na hyperbolické, ktoré však nie sú reálne. Aby sme predišli nadhodnoteniu stredných hodnôt v jednotlivých binoch stanovili sme si hornú hranicu excentricít na 1. U všetkých meteorov, ktoré túto hodnotu prekročili sme excentricitu upravili na 1 a až potom sme vypočítali stredné hodnoty v jednotlivých štvorcoch $2^\circ \times 2^\circ$. Vzniknuté rozloženie už nebolo natoľko spojité ako v predošlých prípadoch. Naznačilo však, že antiheliónový a symetricky aj heliónový zdroj sú tvorené mladšími časticami, ktorých dráhy majú vysoké excentricity. Nižšie hodnoty okolo 0,7 sú typické pre severný toroidálny zdroj.

Rovnako ako excentricity aj veľké polosi sú citlivé na chyby meraní a oproti perihéliovým vzdialenostiam majú aj veľký rozptyl hodnôt. Preto sme museli opäť stanoviť hraničnú hodnotu na 100 AU. Tú sme použili nielen v prípade dráh, ktoré ju prekročili, ale predovšetkým u hyperbolických meteoroidov so zápornými hodnotami. Rozloženie veľkých polosi bolo aj po tejto úprave ťažko čitateľné. Meteoroidy z apexového smeru k nám prichádzajú z veľkých vzdialeností, no antapexové sa už sotva dostanú za hlavný pás asteroidov. Vytvárajú sa tiež 4 oblasti v okolí apexu s väčšími hodnotami veľkých polosi. Náznak zvýšených hodnôt bol taktiež v oblasti prstencového zdroja. Na rozdiel od výsledkov pre predošlé skúmané parametre sa hodnoty veľkých polosi značne líšili od podobnej práce založenej na dátach z radaru CMOR (Campbell-Brown, 2008b). Rozdiely môžu byť spôsobené chybným určením veľkých polosi z meraní. V našom prípade ide taktiež o využitie podstatne menšieho súboru dát, ktoré mohlo viesť k nesprávnemu štatistickému vyhodnoteniu v slabo pokrytých častiach grafu. Dôvod však možno aj v tomto prípade hľadať predovšetkým v rozdielnej hmotnostnej populácii skúmaných častíc. Naše meteoroidy sú hmotnejšie a negravitačné efekty majú na ne menší vplyv. Ich dráhy a najmä veľké polosi a excentricity by teda mali podliehať menším zmenám. V našom prípade sú hodnoty excentricít aj veľkých polosi v jednotlivých zdrojoch skutočne väčšie v porovnaní s radarovými meteormi. Problémom však ostávajú meteory z oblasti antapexu, ktoré v našom prípade vykazujú najnižšie hodnoty excentricít aj veľkých polosi v porovnaní s ostatnými skúmanými oblasťami. U radarových pozorovaní dosahujú antapexové meteory hornú hranicu excentricít aj veľkých polosi.

3.3. Dominantné smery a zdroje sporadického pozadia

Priemetom geocentrických radiantov do roviny ekliptiky sme získali predstavu o rozložení a výdatnosti jednotlivých smerov prítoku sporadických meteoroidov na Zem. Keďže sme v záujme zachovania čo najväčšieho počtu meteorov pre ďalšie štúdium, nerobili redukciu databázy vzhľadom na geocentrické rýchlosti a hmotnosti pozorovaných meteorov najvýdatnejším bol smer od zemského apexu. Jeho maximum však bolo vplyvom Slnka na optické pozorovania posunuté od apexu Zeme približne o 10° . Ďalší výdatný smer prítoku hmoty predstavoval antiheliónový zdroj s maximom okolo 70° od apexu. Aby sme mohli určiť vplyv severného toroidálneho zdroja, samostatne sme analyzovali počty meteorov s ekliptikálnymi šírkami $-45^\circ < \beta < 45^\circ$ a $55^\circ < \beta < 90^\circ$. Jeho vplyv na celkový prítok hmoty bol minimálny a maximum výdatnosti bolo aj v tomto prípade mierne posunuté voči 0° apexovej dĺžky smerom od Slnka.

Aby sme mohli študovať jednotlivé zdroje sporadického pozadia samostatne bolo najprv potrebné identifikovať meteory, ktoré k nim patria. Sčítaním počtov meteorov premietnutých do roviny ekliptiky z vybraného intervalu ekliptikálnych šírok sme získali priebehy početnosti jednotlivých zdrojov. Na tie sme následne aplikovali Gaussovu alebo Lorentzovu funkciu, podľa toho, ktorá lepšie zodpovedala reálnym dátam. Zo získaných kriviek sme určili stredy zdrojov odpovedajúce ich maximám v elongáciách od apexu. Šírku jednotlivých zdrojov sme určili ako šírku krivky v polovici jej plného rozsahu. Rovnakým spôsobom sme určili aj stredy a šírky zdrojov v ekliptikálnej šírke. Stredy apexového zdroja, jeho oboch vetiev a severného toroidálneho zdroja boli v porovnaní s radarovými pozorovaniami posunuté výraznejšie smerom od Slnka, čo je v prípade optických pozorovaní prirodzené. Taktiež stredy apexového zdroja ako celku a jeho južnej vetvy boli posunuté severným smerom z dôvodu polohy pozorovacích staníc siete SonotaCo na severnej pologuli. Výsledky pre antiheliónový zdroj boli vo výbornej zhode s porovnávanou prácou (Campbell-Brown, 2008b). Tento zdroj bol zároveň najmenej ovplyvnený zvolenou pozorovacou metódou a ani poloha pozorovacích staníc

v tomto prípade nebola určujúca. Nami určené zdroje sporadických meteorov zaberali len širšiu centrálnu oblasť pozorovaných zhustení, takže priradené meteory sme mohli považovať za ich typických predstaviteľov.

3.4. Stavba a pôvod zdrojov sporadických meteorov

Po identifikácii zdrojov sme sa venovali štúdiu ich charakteristických dráhových parametrov. Najskôr sme vypočítali stredné hodnoty vybraných dráhových elementov a geocentrických rýchlostí (Tab. 1). V prípade veľkých polosí a excentricít sme mali opäť problém s nadhodnotením strednej hodnoty v dôsledku väčšieho počtu hyperbolických dráh, alebo veľmi vysokých veľkých polosí. Malá chyba v určení rýchlosti meteoru totiž spôsobuje veľkú chybu jeho veľkej polosi. Veľkosť chyby pritom rastie s rýchlosťou meteoru. Najvyšší pomer hyperbolických dráh k eliptickým mali práve apexové zdroje, pre ktoré sú typické vysoké geocentrické rýchlosti. Naopak najmenej hyperbolických dráh sa nachádzalo medzi meteorami priradenými k antiheliónovému zdroju, ktorého rýchlosti sú najnižšie. Aby sme predišli nadhodnoteniu stredných hodnôt veľkých polosí a excentricít v dôsledku ich chybného určenia z pozorovaní, stanovili sme opäť hraničnú hodnotu na 100 AU a pre excentricity na hodnotu 1. Touto zmenou boli ovplyvnené aj stredné hodnoty aféliových vzdialeností, ktoré sa v databáze SonotaCo nenachádzali, a preto sme ich dopočítali z a a e . Napriek úprave sme získali značne vyššie hodnoty veľkých polosí aj excentricít u všetkých zdrojov ako je to v prípade radarových pozorovaní (Campbell-Brown, 2008b). Tento výsledok naznačuje potrebu štúdia rôznych hmotnostných populácií sporadického pozadia. Dráhový vývoj meteoroidov je závislý predovšetkým od ich hmotností. Menej hmotné častice, ktoré sú typické v prípade meteorov zachytených radarom, pritom podliehajú najväčším zmenám. Súvis s dráhou ich materského telesa je už len ťažko odhaliteľný. Dráhy hmotnejších častíc by preto mohli poskytnúť lepšiu predstavu o pôvode zdrojov sporadického pozadia. Pri štúdiu dráhových charakteristík zdrojov sme sa venovali aj rozdeleniam početnosti meteorov pre jednotlivé elementy dráh.

zdroj	stred		počet meteorov	Q [AU]	q [AU]	a [AU]	e	i [°]	v _g [km/s]
	ϵ_{apex} [°]	β [°]							
Apexový	11	17	19 083	59,00	0,83	29,82	0,85	147,23	65,33
Severný apexový	10	20	18 955	60,01	0,83	30,33	0,85	143,67	65,02
Južný apexový	16	-13	5 039	66,08	0,72	33,31	0,88	154,40	66,20
Antiheliónový	71	3	7 170	16,63	0,25	8,44	0,89	11,18	33,57
Severný toroidálny	12	60	2 181	36,80	0,96	18,83	0,77	75,55	43,51

Tabuľka 1.: Zdroje sporadického pozadia a polohy ich stredov v elongácii od zemského apexu a v ekliptikálnej šírke, počty priradených meteorov a stredné hodnoty dráhových elementov a geocentrických rýchlostí.

Pri štúdiu ročnej variácie aktivity zdrojov sme opäť minimalizovali výkyvy spôsobené počasím spojením dát zo všetkých rokov a za účelom odstránenia vplyvu dĺžky noci počas roka sme brali do úvahy len meteorické úkazy zaznamenané medzi 20-tou hodinou večer a 4-tou hodinou ráno miestneho času. Získané priebehy sme následne fitovali polynomicou funkciou 3. stupňa, z ktorej sme vypočítali maximum a minimum aktivity pre daný zdroj. Priebeh apexového zdroja a jeho severnej vetvy bol veľmi podobný navzájom aj priebehu ročnej variácie chodu frekvencií celého sporadického pozadia. Pozorované počty meteorov južného apexového zdroja boli silne ovplyvnené jeho výškou nad obzorom. Na jar je zo severnej pologule ťažko pozorovateľný a podmienky sa s približovaním jesene výrazne zlepšujú. Preto a aj kvôli nižším početnostiam

meteorov sme sa nepokúšali odvodiť závery o jeho skutočnej aktivite. Antiheliómový zdroj vykazoval maximum aktivity od júla do januára. Najzaujímavejší však bol severný toroidálny zdroj, ktorý nemal jedno výraznejšie maximum a minimum. Viditeľné boli tri maximá aktivity podobne ako na dátach z radaru CMOR (Campbell-Brown a Wiegert, 2009). Prvé sa nachádzalo okolo dĺžky Slnka 30° , druhé maximum okolo 150° bolo mierne posunuté oproti radarovým pozorovaniam a tretie maximum sa nachádzalo v oblasti zvýšenej rojovej aktivity s dĺžkou Slnka okolo 260° . Výsledky boli v prekvapujúco dobrej zhode aj napriek nízkemu počtu nami analyzovaných meteorov severného toroidálneho zdroja.

V ďalšom štúdiu zdrojov sporadického pozadia sme sa venovali variáciám vybraných dráhových elementov a geocentrických rýchlostí počas roka. Vypočítané zmeny stredných hodnôt sklonov a geocentrických rýchlostí apexového zdroja a jeho severnej vetvy sa dali vysvetliť zmenou výšky apexu nad obzorom. Antiheliómový zdroj bol zaujímavý variáciou veľkých polosí počas roka. Ich hodnoty postupne rastli bez väčších výkyvov od približne 5 AU na jar až po takmer 14 AU v novembri a potom opäť klesali. Aj keď rozdiel medzi minimom a maximom bol menší než chyba určenia strednej hodnoty, kontinuálny nárast a pokles na takmer trojnásobnú hodnotu môže zachytávať reálny trend. Podľa viacerých prác je antiheliómový zdroj tvorený veľmi rozšíreným prúdom meteoroidov, ktorého najhustejšia časť sa stretáva s dráhou Zeme na jeseň. Meteoroidy tohto prúdu zároveň vytvárajú po prechode perihéliom heliómový zdroj s maximum aktivity v období od mája do júla (Štohl, 1983; Štohl, 1986). Existencia tohto prúdu sa často spája s komplexom Tauríd a kométou 2P/Encke prípadne s blízkozemskými asteroidmi (Štohl a Porubčan, 1990; Steel a kol., 1991; Babadzhanov, 2001). Ak je antiheliómový (aj heliómový) zdroj naozaj tvorený extrémne širokým prúdom meteoroidov, zmeny stredných hodnôt veľkých polosí počas roka by mohli súvisieť s dráhovým vývojom častíc pod vplyvom PR-efektu. Najväčšie a by pritom znamenali najmladšiu časť prúdu a smerom k nižším hodnotám by rástol vek častíc od uvoľnenia sa z materského telesa podobným spôsobom, ako je to u prúdov vytvárajúcich meteorické roje. Hodnoty veľkých polosí však boli zaťažené pomerne veľkou chybou určenia z pozorovaní. Na overenie nášho predpokladu sme navyše nemali k dispozícii ani heliómový zdroj, ktorý by mal dosahovať najväčšie a v júni a v júli. Variácia stredných hodnôt sklonov antiheliómového zdroja bola ovplyvnená zostatkovou aktivitou meteorických rojov – južné δ Akvaridy, β Piscidy a Geminidy. Výsledky pre severný toroidálny zdroj ukázali podobný priebeh veľkých polosí a excentricít s pomerne výraznými zmenami. Práve tieto parametre sme pri výpočte upravovali stanovením hornej hraničnej hodnoty. Podobný priebeh sme získali aj v prípade geocentrických rýchlostí, ktorých chyba výpočtu z pozorovaní znamená ešte väčšiu chybu excentricít aj veľkých polosí. Neistota určenia zároveň rastie s rýchlosťou meteoroidu, čo vysvetľuje podobnosť priebehov. Zachytené variácie tak môžu byť spôsobené vyššou chybou určenia hodnôt z pozorovaní ako aj pomerne nízkymi počtami meteorov severného toroidálneho zdroja. Perihéliové vzdialenosti a sklony, ktoré sú z pozorovaní určené s najväčšou presnosťou, sa držali počas celého roka približne na tej istej úrovni.

Analýzu potenciálnych materských telies zdrojov sme robili na základe porovnania ich vlastností so skupinami menších telies slnečnej sústavy. Použili sme pritom dáta z databázy malých telies NASA Jet Propulsion Laboratory. Aby sme vylúčili telesá, ktorých dráhy nepretínajú dráhu Zeme, ani sa nedostávajú do jej blízkosti stanovili sme hornú hranicu perihéliových vzdialeností na $q=1,3 AU$. Porovnaním polôh týchto telies s polohami meteoroidov patriacich jednotlivým zdrojom vo fázových priestoroch $a-e$, $a-i$, $e-i$, $q-e$, $q-i$ sme diskutovali ich možný pôvod.

Antiheliómový zdroj môže byť tvorený len malým počtom krátkoperiodických komét. Konkrétne podmienkam $q < 0,5 \text{ AU}$ a $i < 40^\circ$ vyhovuje len pár SOHO komét s perihéliovými vzdialenosťami pod 0,1 AU, ktoré len ťažko môžu produkovať materiál s väčšími perihéliovými vzdialenosťami, a kométy C/1917 F1 (Mellish), 2P/Encke, D/1766 G1 (Helfenzrieder). Dlhoperiodické kométy pravdepodobne len mierne obohacujú antiheliómový zdroj svojím materiálom a podobne aj blízkozemské asteroidy, ktoré produkujú len malé množstvo prachových častíc a to predovšetkým zrážkami. Tento výsledok tak podporuje predpoklad, že hlavným materským telesom antiheliómového aj heliómového zdroja môže byť kométa 2P/Encke (Whipple a kol., 1967, Steel a kol., 1991, Wiegert a kol., 2009).

Severný toroidálny zdroj je s najväčšou pravdepodobnosťou tvorený materiálom z dlhoperiodických komét. Prispievať však môžu aj niektoré blízkozemské asteroidy a krátkoperiodické kométy, z ktorých nám dráhovo najlepšie vyhovovala kométa C/2001 OG108 (LONEOS). Tá je však v súčasnosti známa nízkou kometárnou aktivitou.

V prípade apexového zdroja sme vylúčili ako materské telesá blízkozemské asteroidy, zo všetkých známych sa len 3 pohybujú po retrográdnych dráhach. Zdrojom materiálu pre apexové meteoroidy tak môžu byť dlhoperiodické kométy a krátkoperiodické kométy, ako: 55P/Tempel-Tuttle, 1P/Halley, P/2005 T4 (SWAN), C/2010 L5 (WISE), 273P/Pons-Gambart, C/2001 W2 (BATTERS), 109P/Swift-Tuttle. Práve kométa 55P/Tempel-Tuttle je podľa numerickej simulácie od Wiegerta a kol. (2009) hlavným zdrojom meteoroidov apexového zdroja a v menšej miere aj kométa 109P/Swift-Tuttle.

Použitá literatura

- BABADZHANOV, P.B.: 2001, Search for meteor showers associated with Near-Earth Asteroids I. Taurid Complex. *Astronomy and Astrophysics*, 373, 329-335
- CAMPBELL-BROWN, M.D.: 2007: The Meteoroid Environment: Shower and Sporadic Meteors. *Dust in Planetary Systems*, 11-21
- CAMPBELL-BROWN, M.D.: 2008a: Directional Variation of Sporadic Meteor Activity and Velocity. *Earth Moon Planet*, 102, 79-84
- CAMPBELL-BROWN, M.D.: 2008b: High resolution radiant distribution and orbits of sporadic radar meteoroids. *Icarus*, 196, 144-163
- CAMPBELL-BROWN, M.D., WIEGERT, P.: 2009: Seasonal variations in the north toroidal sporadic meteor source. *Meteoritics and Planetary Science*, 44, 1837-1848
- CEPLECHA, Z., BOROVIČKA, J., ELFORD, W.G., REVELLE, D.O., HAWKES, R.L., PORUBČAN, V., ŠIMEK, M.: 1998, Meteor phenomena and bodies. *Space Science Reviews*, 84, 327-471
- GALLIGAN, D.P., BAGGALEY, W.J.: 2005, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 359, p.551
- HAWKINS, G.S.: 1956, *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 116, 92-104
- HAWKINS, G.S., PRENTICE, J.P.M.: 1957, *Astron. J.*, 62, 234
- JONES, J., BROWN, P.: 1993: Sporadic Meteor Radiant Distributions: Orbital Survey Results. *Monthly Not. Roy. Astron. Soc.*, 265, 524-532.
- KEAY, C.S.L.: 1963, The distribution of meteors around the Earth's orbit *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 126, 165-176
- KINOSHITA, H., NAKAI, H.: 1999, Analytical solution of the Kozai resonance and its application. *Celest. Mech. Dynam. Astron.*, 75, 125-147
- KOZAI, Y.: 1962, Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity. *Astron. J.*, 67, 591-598
- McKINLEY, D.W.R.: 1961, *Meteor Science and Engineering* McGraw Hill, New York, 1-309
- OKAMOTO, S., MAEGAWA, K.: 2008, Annual and Diurnal Variation of Meteor Rates by the Forward-Scatter Radio Observation. *Earth Moon Planet*, 103, 65-68
- PHANIKUMAR, D.V., KWAK, Y.S., PATRA, A.K., KISHORE KUMAR, K., YELLAIAH, G.: 2012, Altitudinal and latitudinal asymmetry in diurnal variation of sporadic meteor flux observed over Thumba. *Current Science*, 103, 62-67
- PORUBČAN, V., GAVAJDOVÁ, M.: 1994, A search for fireball streams among photographic meteors. *Planet. Space Sci.*, 42, 151-155
- PORUBČAN, V., SVOREŇ, J., NESLUŠAN, L.: 1995, On separation of Major Meteoroid Streams from the Sporadic Background. *Earth, Moon and Planets*, 68, 471-478
- SCHMUDE, R.W., Jr.: 1998, *Icarus*, 135, 496-500
- SEKANINA, Z.: 1976, *Icarus*, 27, 265
- SINGER, W., WEIS, J., VON ZAHN, U.: 2004: Diurnal and annual variations of meteor rates at the Arctic circle. *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, 4, 1-20
- SonotaCo: 2005: UFOCaptureV2 Users Manual.

- <http://sonotaco.com/soft/UFO2/help/english/index.html>
- SonotaCo: 2007: UFOAnalyzerV2 Users Manual. http://sonotaco.com/soft/UO2/UO21Manual_EN.pdf
- SonotaCo: 2008: UFOOrbitV2 Users Manual. http://sonotaco.com/soft/UO2/UO21Manual_EN.pdf
- SonotaCo: 2009: Ongoing meteor work. A meteor shower catalog based on video observations in 2007-2008. WGN, the Journal of IMO, 37, 55-62
- SOUTHWORTH, R.B. a HAWKINS, G.S.: 1963: Statistics of Meteor Streams. Smithsonian Contr. Astrophys., 7, 261-285
- STEEL, D.I., ASHER, D.J., CLUBE, S.V.M.: 1991: The structure and evolution of the Taurid Complex. Mon. Not. R. Astron. Soc., 251, 632-648
- SYKES, M. V., WALKER, R. G.: 1992, Cometary Dust Trails I. Survey. Icarus, 95, 180 – 210.
- ŠTOHL, J.: 1967: In Meteor Orbits and Dust. Contr. Astrophys., 11, 115-117
- ŠTOHL, J.: 1968, Physics and Dynamics of Meteors. IAU Symp. 33, eds. L. Kresák, P.M. Millman, p.298
- ŠTOHL, J.: 1969: Contr. Astron. Obs. Skalnaté Pleso 4, 46-82
- ŠTOHL, J.: 1983: On the Distribution of Sporadic Meteor Orbits. Asteroids, Comets, Meteors. eds. C.I. Lagerkvist, H. Rickman, Uppsala Univ., 419-424
- ŠTOHL, J.: 1986, Asteroids, Comets, Meteors. eds. C.I. Lagerkvist, B.A. Lindblad, H. Ljunstedt, H. Rickman, Uppsala Univ., p.565
- ŠTOHL, J., PORUBČAN, V.: 1990, in Asteroids, Comets, Meteors III, eds.: C.I. Lagerkvist, H. Rickman, B.A. Lindblad and M. Lindgren, Reprocentralen HSC, Uppsala, 571-574
- VEREŠ, P., TÓTH, J.: 2010: Meteor Science. Analysis of the SonotaCo Video Meteor Orbits. WGN, 38, 54-57
- WHIPPLE, F.L., SOUTHWORTH, R.B., NILSSON, C.S.: 1967, SAO Special Report #239
- WIEGERT, P., VAUBAILLON, J., CAMPBELL-BROWN, M.D.: 2009: A dynamical model of the sporadic meteoroid complex. Icarus, 201, 295-310

Abstract

The purpose of this thesis is to investigate meteor sporadic background by the analysis of SonotaCo database, which currently represents the largest set of meteor television observations. They are executed continuously since 2007 and provide us large enough and homogeneous material for the comprehensive analysis of sporadic background from optical observations. A similar analysis was previously possible only by using radar data. The aim of the study is therefore to compare the present results of radar observations with television, which represents distinct mass meteoroid population. At first we developed a methodology for meteor showers separation by using Southworth - Hawkins D_{SH} criterion and iteration procedure to obtain sporadic background mainly suitable for the orbital analysis. Study of the activity confirmed diurnal variation of sporadic meteors and minimum of the annual variation in the spring. However the peak of annual variation was shifted to the turn of autumn and winter in comparison with other studies. By adjusting the positions of the observed meteor radiants by the length of the Sun we obtained the distribution of geocentric radiants and revealed north toroidal, antihelion, north and south apex sources. Moreover, we confirmed the radiant concentration in a ring of radius 50° , which is so far known only from radar CMOR. Next, we focused on the distribution of the orbital elements and geocentric velocities of the whole sporadic background. Subsequently, we identified the positions of the sources and calculated mean values of selected orbital elements and geocentric velocities. We also studied the variation of mean values during the year. From this point of view variation of semi-major axis of the antihelion source is interesting. Its confirmation by the radar observations and comparison with the helion source could help in study of the antihelion and the helion source origin. Analysis of annual variations of individual sources revealed three maxima of the Northern toroidal source activity, which results from radar observations too. By comparing typical orbital elements of individual sources with selected groups of small bodies of the Solar System, we discussed their possible origin. The most likely parent bodies of the antihelion source are selected short-period comets. We can exclude the contribution of Near-Earth Asteroids to the apex source, while the northern toroidal source may be formed of material from all groups of the small bodies.

Zoznam publikovaných prác doktoranda

AED01 Jakšová, Ivana 50% - Porubčan, Vladimír 50%: Populácia a zdroje meteorov sporadického pozadia
Lit. 16 záz.

In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 32. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť pri SAV, 2011. - S. 41-48

AED02 Jakšová, Ivana 50% - Porubčan, Vladimír 50%: Sporadické pozadie z databázy TV dráh meteorov
SonotaCo

Recenzované

Lit. 13 záz., 5 obr.

In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 33. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť pri SAV, 2012. - S. 93-101. - ISBN 978-80-971242-0-5

AED03 Jakšová, Ivana 50% - Porubčan, Vladimír 50%: Zdroje meteorov sporadického pozadia: aktivita a stavba
Lit. 15 záz.

In: Meteorické správy Slovenskej astronomickej spoločnosti pri SAV, Č. 34. - Banská Bystrica : Slovenská astronomická spoločnosť pri SAV, 2013. - S. 55-64. - ISBN 978-80-971242-0-5