

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Měření a zpracování dvojstaničních pozorování televizních meteorů

Filip Murár

Třebíč 2012

STŘEDOŠKOLSKÁ ODBORNÁ ČINNOST

Obor SOČ: 2. Fyzika

Měření a zpracování dvojstaničních pozorování
televizních meteorů

Measurment and Processing of Double-Station
Observations of Television Meteors

Autor: Filip Murár

Škola: Gymnázium Třebíč
Masarykovo nám. 9/116

Konzultant: RNDr. Jiří Borovička, CSc.

Třebíč 2012

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto práci vypracoval samostatně, použil jsem pouze podklady uvedné v příloženém seznamu a postup při zpracování a dalším nakládání s prací je v souladu se zákonem č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů v plném znění.

V Třebíči dne 18. března 2012

Filip Musáň

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své stáže RNDr. Jiřímu Borovičkovi, CSc., který mi trpělivě vysvětlil všechny klíčové teoretické poznatky, naučil mě postup zpracování a pomohl vyřešit jakékoli nejasnosti. Také bych chtěl poděkovat RNDr. Rostislavu Štorkovi, PhD. za pravidelné poskytování spolujízdy do jinak těžko dostupného Ondřejova a Tomáši Pikálkovi za uveřejnění šablony pro psaní seminárních prací.

Abstrakt

Tato práce se zabývá studiem jevu meteorů, popisem jejich původu a typických vlastností a především digitalizací a následným statistickým zpracováním. Data byla získána ze záznamů týž těles z dvojice vzdálených videokamer. Touto metodou můžeme určit a zkoumat mnohé důležité parametry těles meziplanetární hmoty, jako například tvar dráhy ve sluneční soustavě. Tyto údaje jsou poté velmi cenné při popisu blízkého okolí naší planety. Práce vznikla v návaznosti na studentskou stáž Meteory v zemské atmosféře v rámci projektu Otevřená věda II. Stáž probíhala v pravidelných intervalech v období jednoho roku na Astronomickém ústavu Akademie věd ČR.

Klíčová slova

- meteory
- dvojstaniční televizní pozorování
- statistické zpracování

Abstract

This work deals with studying the meteor phenomenon, with the description of the origin of meteor and their typical properties and mainly with the digital and subsequent statistical processing. The data were obtained from recordings from two mutually distant camcorders. This way we can determine and study many important parameters of interplanetary bodies such as the shape of the orbits in the Solar System. The work arose from a student internship Meteors in the Earth's Atmosphere within the Open Science II (Otevřená věda II) project. The internship consisted of regular visits to the Astronomical Institute of the Academy of Sciences of the Czech Republic during a time span of one year.

Keywords

- meteors
- double-station television observation
- statistical processing

Vyjádření vedoucího

k práci v rámci Středoškolské odborné činnosti

Měření a zpracování dvojstaničních pozorování televizních meteorů

autora Filipa Murára (Gymnázium Třebíč)

Uvedená práce vznikala během pravidelných stáží programu Otevřená věda II na hvězdárně v Ondřejově. Student Filip Murár se tématu, které jsem mu zadal, zhostil výborně a výsledkem je předkládaná práce. První fáze práce představovala zpracování syrových napozorovaných dat postupy, které jsme v dřívějších letech v Ondřejově vyvinuli a které jsou popsány v kapitole 4. Tato část byla časově náročná a do jisté míry monotónní, nicméně vyžadovala porozumění datům a jejich kritické zhodnocení. Druhou fází bylo statistické vyhodnocení získaných údajů o meteorech. Student postupoval podle mých pokynů do značné míry samostatně. „Vnutil“ jsem mu programovací jazyk Fortran, který sám používám, a po krátké době byl sám schopen kód dále rozvíjet a upravovat. Prostudoval si literaturu (většinou časopisecké články v angličtině), kterou jsem mu k tématu doporučil. Vytvořil řadu grafů a z nich potom vybral ty, které nejlépe ilustrují poznatky, které lze z dat získat. V nejdůležitější části práce, představované především kapitolou 5, data zanalyzoval a porovnal s údaji publikovanými v literatuře. Cílem bylo především srovnat dráhy meteoroidů ve sluneční soustavě s jejich fyzikálními vlastnostmi. Podobných studií existuje ve světové literatuře málo a po rozšíření statistického vzorku by výsledky předkládané práce určitě bylo vhodné publikovat. Výsledky ukazují, že korelace mezi fyzikálními vlastnostmi a oběžnými drahami meteoroidů studovaných velikostí není nikterak přímočará, což ovšem není v rozporu ani s dřívějšími pracemi ani s nejnovějšími poznatky o kometách a planetkách. V budoucnu by bylo možné toto téma dále rozvíjet a doplnit o analýzu světelných křivek a brzdění meteoroidů.

Závěrem lze říci, že předkládaná práce splňuje vysoké nároky. Má logickou strukturu a grafickou kvalitu. V úvodních kapitolách student prokázal širší přehled o dané problematice. Některé drobné nepřesnosti přisuzuji svému nedokonalému výkladu a nemám je studentovi za zlé. Použitou metodiku řádně vysvětlil a výsledky utřídil. Ještě silnější závěry by bylo možné získat po zpracování většího množství dat, což ale při zvoleném postupu individuálního přístupu ke každému meteoru, který z důvodu kvality zpracování v každém případě upřednostňujeme, bylo mimo časové možnosti této práce.

V Ondřejově dne 27. března 2012

RNDr. Jiří Borovička, CSc.

Obsah

Seznam obrázků	vii
Seznam tabulek	viii
I Úvodní část	1
1 Úvodem	2
2 Cíle práce	4
3 Přehled problematiky	5
3.1 Historie	5
3.1.1 Do poloviny 20. století	5
3.1.2 Vývoj v posledních desetiletích	7
3.2 Obecný přehled	8
3.3 Dělení meteoroidů dle velikosti	9
3.4 Původ meteoroidů	11
3.5 Dráhové elementy a dvoustaniční pozorování	13
3.6 Meteorické roje a sporadické meteory	14
3.7 K_B parametr a fyzikální vlastnosti meteorů	18
II Metodika	21
4 Softwarové zpracování	22
4.1 Pořizování záznamů	22
4.2 Digitalizace dvojestaničních pozorování	23

4.3	Sloučení dat	24
4.4	Statistika a tvorba grafů	27
III	Výsledky práce	30
5	Výsledky a diskuse	31
5.1	Výsledky	31
5.2	Diskuse	39
6	Další možnosti řešení	43
IV	Závěrečná část	44
7	Závěr	45
8	Význam a přínos práce	46
	Literatura	48
V	Přílohy	I
A	Výpočet dráhy meteoroidu	II
B	Výstup z programu Metrec	IV
C	Pracovní tabulka s údaji	V
D	Záběry ze záznamu meteoru	VII
E	Ukázka programu pro statistické výpočty	IX

Seznam obrázků

3.1	Kresba padajících Leonid z roku 1833	6
3.2	Určení trajektorie v prostoru pomocí dvoustaničního pozorování	13
3.3	P1 je rovina oběhu tělesa, P2 rovina ekliptiky (zdroj: <commons.wikipedia.org>)	14
3.4	Meteory zdánlivě vylétávající z jednoho bodu se v prostoru pohybují po rovnoběžných trajektoriích. M_1 , M_2 a M_3 jsou skutečné trajektorie meteoroidů a M_1' , M_2' a M_3' jsou zdánlivé polohy na nebeské sféře.	15
3.5	Antihelionové meteory mají původ v tělesech obíhajících na prográdních drahách s perihelem menším než 1 AU. Se Zemí kolidují při přibližování ke Slunci, zatímco helionové meteory při vzdalování. Odečtením vektorů rychlostí tělesa a Země dostaneme vektor geocentrické rychlosti, který směřuje téměř z antisolárního bodu.	17
3.6	Četnost zaznamenaných meteorů v průběhu dne (zdroj: Plavec (1956), s. 32)	17
3.7	Gaussovský fit radiových pozorování meteorů (Campbell-Brown (2008), s. 149). Uprostřed leží severní s jižní apexové zdroje, nahoře severní toroidální, nalevo od středu helionový a napravo antihelionový. Jižní toroidální je v místě radaru trvale pod obzorem.	18
4.1	Poloha pozorovacích stanišť. (zdroj: <www.mapy.cz>)	22
4.2	Přidat české popisky	23
4.3	Zorné pole před použitím flat-fieldu	24
4.4	Stejně pole po flat-fieldu	24
4.5	Určování polohy meteoru na jednotlivých snímcích. Vlevo dole je výsek oblohy v okolí meteoru, nahoře průběh jasností v tomto výseku pro snadnější určení polohy.	25
4.6	Vyznačená trajektorie meteoru	25
4.7	Prostorové odchylky jednotlivých naměřených poloh od průměrné vypočtené dráhy	26
4.8	Výsledné údaje o meteoru	26

4.9	Fotometrie a z ní vypočtená hmotnost (vlevo dole)	27
5.1	Rozložení hvězdných velikostí	31
5.2	Rozložení hmotností	31
5.3	Počet zachycených meteorů v závislosti na čase	32
5.4	Mapa oblohy	32
5.5	Výška začátku na rychlosti	33
5.6	Rozložení rychlostí	34
5.7	Rozložení výstředností	34
5.8	Rozložení sklonů	35
5.9	Rozložení perihelů	35
5.10	Rozložení K_B skupin dle Tisserandova parametru	36
5.11	Rozložení radiantových zdrojů dle Tisserandova parametru	36
5.12	Kumulativní hmotnosti pro skupiny A+B, B+C a všechny meteoroidy	37
5.13	Vztah mezi sklon dráhy a vzdáleností v afelu	39
5.14	Histogramy rozložení rychlostí, velkých poloos, sklonů a excentricit meteorů naměřených radiovou metodou. Zdroj: (Wiegert et al., 2009, s. 301)	41
5.15	Kumulativní počet částic dopadajících na celou Zemi za celý rok. a) znázorňuje naměřená data (velmi přesná pro $\log m \geq -3$ a b) simulace z r. 1985. Zdroj: (Ceplecha, 1988, s. 230)	42

Seznam tabulek

5.1	Vztah mezi fyzikálními vlastnostmi a dráhovými elementy	38
-----	---	----

Část I

Úvodní část

Kapitola 1

Úvodem

Meteory neboli „padající hvězdy“ jsou jevem každému dobře známým, bohužel si však málokdo uvědomuje, o jak bohatý a vědecky důležitý jev se jedná. Již v minulosti byl zájem o meteorickou astronomii zastiňován jinými odvětvými a ani dnes se nejedná o přední cíl výzkumu. Měli bychom však při výzkumu dalekého vesmíru, exoplanet a hvězdných soustav mít na paměti, že i výzkum meziplanetární hmoty může vnést mnoho světla do důležitých otázek astronomie, jako např. formování hvězd a planet.

Meteor je jev pozorovatelný v zemské atmosféře způsobený malou částicí meziplanetární hmoty střetávající se s částicemi atmosférických plynů. Zde dochází k jejímu zahřátí a následné emisi světla. Jestliže je světelná stopa zaznamenána současně dvěma nebo více kamerami, je možné určit trajektorii a rychlost původního tělesa a z těchto údajů spočítat jeho dráhu ve sluneční soustavě. Jelikož běžné meteory bývají způsobeny velmi malými objekty, nemůžeme je pozorovat dříve, než se srazí se zemskou atmosférou, což činí ze systematického pozorování meteorů jedinou možnost, jak tato tělesa z blízkého okolí naší planety studovat a zjišťovat jejich složení, četnost a původ.

Svoji práci jsem zpracoval v souvislosti s účastí na vědecké stáži Meteory v zemské atmosféře v rámci projektu Otevřená věda II. Téma stáže jsem si vybral zejména kvůli svému dlouhodobému zájmu o astronomii, konkrétně ke studiu meteorů mě však přitáhl fakt, že ve výzkumu v této oblasti patří česká věda ke světové špičce. V 50. letech byl pod vedením Zdeňka Ceplechy nalezen meteorit Příbram, první na světě, který byl pozorován již při pádu jako bolid (velmi jasný meteor) a u něhož se podařilo vypočítat původní dráhu ve sluneční soustavě. Dodnes je známo celkem 15 meteoritů s rodokmenem, tj. s vypočtenou drahou, přičemž čeští astronomové se podíleli na

výzkumu šesti z nich ¹. Ve zkoumání meteorů dosahují čeští vědci neustále světově významných objevů. Z těchto důvodů pro mne byla práce na pracovišti, jakým je Astronomický ústav AV ČR, velmi atraktivní a motivující.

¹ČAPEK, D. *Meteority, meteory, meteoroidy II.* (prezentace), s. 14.

Kapitola 2

Cíle práce

Cílem mojí činnosti, probíhající v rámci studentské stáže, bylo hledání souvislostí mezi fyzikálními vlastnostmi meteoroidů a jejich drahami ve sluneční soustavě. Studium těchto souvislostí přispívá ke zkoumání vlastností komet, planetek, přechodových těles a vztahů mezi nimi a k porozumění procesů vedoucím ke vzniku meteoroidů a jejich přísunu k Zemi. Dosažení tohoto cíle by však vyžadovalo komplexnější analýzu a zpracování většího vzorku meteorů. Proto jsem se i při studiu menšího počtu meteorů zaměřil na získání co nejkvalitnějších výsledků, jež by souhlasily s doposud získanými poznatky a potvrzovaly teorii.

Kapitola 3

Přehled problematiky

V této kapitole uvedu souhrn obecně známých faktů a výsledků již dosažených, přičemž se budu snažit položit základ pro jednoduché pochopení dalších částí (metodika, výsledky). Přitom budu vycházet z uvedené literatury – v přehledu historie především Plavec (1956) a Campbell-Brown (2004), v popisu vlastností a dělení meteorů Ceplecha (1988), Ceplecha et al. (1998), Borovička et al. (2005), Wiegert et al. (2009), Campbell-Brown (2008) a Kikwaya Eluo (2011) – a částečně z vlastních znalostí (dráhové elementy). Odkazy na další zdroje budou uvedeny na konkrétních místech v textu.

3.1 Historie

3.1.1 Do poloviny 20. století

„Již na úsvitu civilizace si praktické potřeby jako zemědělství, cestování apod. vynutily pozorování hvězdné oblohy a hlavně sledování Slunce, Měsíce a planet.“¹ Velké oblibě se těšilo též pozorování komet, o nichž máme z historie četné záznamy. Jasně komety byly totiž jevy pozorovatelné z velkých území a po dlouhou dobu. Naopak o meteorickou astronomii nikdy takový zájem nebyl, především kvůli krátkodobosti a lokálnosti úkazů. I velké meteorické deště netrvaly nikdy více než několik hodin.

Nejstarší zpráva o pozorování meteorického roje pochází z r. 687 př. n. l. a záznam o pozorování pádu meteoritu z r. 644 př. n. l. z Číny. Po dlouhá staletí se však nikdo nepokoušel o exaktní popis či vysvětlení. Meteory byly považovány za atmosférické jevy spojené s počasím (podobně jako blesky) a proto jim ani astronomové jako Koperník, Galilei nebo Kepler nevěnovali

¹PLAVEC, M. *Meteorické roje*. 1956, s. 8.

velkou pozornost. Základy vědeckého výzkumu byly položeny až na konci 18. století, kdy člen Petrohradské akademie věd, E. F. CHLADNI, prokázal mimozemský původ nalezeného železného meteoritu. Současně vyslovil hypotézu spojitosti mezi kosmickými kameny a meteory pozorovanými na obloze. Tou dobou napomohli výraznému posunu napomohli také dva němečtí studenti, BRANDES a BENZENBERG, kteří systematicky pozorovali meteory ze dvou míst. Podařilo se jim zakreslit 22 společných meteorů, jež přelétly ve stejnou dobu, ale mezi jinými hvězdami. Z posunutí stop mezi hvězdami pak určili výšky meteorů nad Zemí. Zjistili, že meteory září ve výšce okolo 100 km nad zemí, a jedná se tedy o atmosférický jev. Zároveň zjistili, že začátek světelné dráhy je výše než konec, a tudíž že se musí jednat o kosmická tělesa.



Obrázek 3.1: Kresba padajících Leonid z roku 1833

Během posledních staletí proběhlo několik velkých meteorických dešťů, kdy byla obloha do slova zaplavena meteory. Nejznámějšími jsou spršky z let 1833, 1933 a 1966, kdy jediný pozorovatel mohl napočítat až 10 meteorů za vteřinu (obr. 3.1). Tyto události napomohly k probuzení

zájmu o meteorickou astronomii a vedly k několika poznáním. První zmíněná událost například vedla ke zjištění, že meteory na obloze zdánlivě vylétají z jednoho bodu (ze souhvězdí Lva), jako by vyzařovaly, proto byl tento bod pojmenován „radiant“. D. OLMSTED si ale uvědomil, že se jedná pouze o důsledek perspektivy a tělesa se ve skutečnosti pohybují po podobných drahách ve velkém shluku (viz obr. 3.4). Po výpočtu jejich drah se zjistilo, že dráhy pozorovaných meteorů (Leonid) se shodují s drahou komety Tempel-Tuttle 1866. Podobných spojitostí bylo později objeveno několik, např. pro Perseidy či Andromedidy. Pozorování meteorů se díky své jednoduchosti a přístupnosti stalo programem většiny tehdejších hvězdáren. Velkým počinem bylo pořízení prvního fotografického snímku meteoru, který pořídil v Praze ředitel hvězdárny L. WEINEK.

Přelom století však přinesl náhlý úpadek zájmu o meteorickou astronomii. Důvodem byl například fakt, že očekávané velké spršky se znovu nedostavily. Také se zjistilo, že významných rojů je poměrně málo a většina z nich již byla popsána. Na rozdíl od jiných odvětví astronomie, jež využívala nejnovějších instrumentálních technik a metod, meteory se pozorovaly stále stejně, pouhým okem, a výzkum meteorů tak byl často považován za nevhodný a nedůstojný program pro hvězdárny. Proto se pozorování na delší dobu přesunulo od odborníků na víceméně amatérské kolektivy. Velkým zlom nastal až r. 1944, kdy se začaly používat radioelektrické metody, umožňující rozšířit a do jisté míry překonat pozorování vizuální.

3.1.2 Vývoj v posledních desetiletích

V uplynulých několika desítkách let byla velmi zdokonalena jak pozorovací technika používaná k zaznamenávání, tak teoretické modely umožňující kvalitnější zpracování. Nejvýznamější postavení si stále drží pozorování v optickém spektru. Vedle nejjednoduššího vizuálního přístupu, jenž díky své jednoduchosti a snadné dostupnosti amatérům z různých částí světa stále neztrácí na významu, se rozvinula fotografická a televizní technika.

Systematické fotografické pozorování meteorů započalo na ondřejovské hvězdárně již roku 1951. Klíčový význam meteorické astronomie mělo vyfotografování bolidu Příbram 9. 4. 1959. Díky dvojstaničnímu záznamu se podařilo nejen najít meteority, ale také spolehlivě určit dráhu původního tělesa ve sluneční soustavě. Iniciativou Dr. Ceplechy byla v dalších letech budování tzv. Evropská bolidová síť, nejprve na území Čech a Moravy, pak také v Německu a Nizozemí a postupně na téměř celém území střední Evropy. Fotografická pozorování mají velkou výhodu v možnosti záznamu velké části oblohy – při použití objektivu typu rybí oko dokonce celé hemisféry.

Zároveň disponují velkou přesností a polohu meteoru je z nich možné určit s přesností asi jedné obloukové minuty. Díky tomu přispěla k porozumění vnitřní struktury meteoroidů. Fotografická pozorování mají ale některé nevýhody: stacionarita záběru (která je však omezována pravidelným mechanickým přerušováním obrazu, díky čemuž je stopa meteorů čárkovaná a je možné počítat jejich rychlost) a menší citlivost. Až na výjimky slouží fotografie k zachycení meteorů jasnějších než nultá hvězdná velikost.

Tyto problémy řeší televizní pozorování. První televizní záběry byly pořízeny v šedesátých letech, rozvoj zaznamenaly hlavně v letech sedmdesátých po přidání zesilovačů obrazu. Takovéto kamery dokáží běžně zachytit meteory do 3. až 9. magnitudy. V porovnání s fotografiemi mají menší rozlišení obrazu, což ale vyvažují velmi dobrým časovým rozlišením s 25 snímky za vteřinu. Kamery také mívají menší zorné pole, asi $11^\circ \times 15^\circ$, a pro vícestaniční pozorování je tedy nutné vybrat jen určitý výsek oblohy.

Jak fotografickou, tak televizní technikou je možné kromě samotné dráhy zaznamenávat také spektra meteorů. Ta do velké míry vypovídají o jejich složení a o fyzikálně-chemických procesech probíhajících při pronikání atmosférou.

Velmi odlišnou metodou je využití radarů, pozorujících meteory v rádiovém oboru spektra. To v minulosti díky schopnosti zaznamenávat meteory i ve dne a skrz mraky přispělo k porozumění denní variace počtu těles srážejících se se Zemí. Radarová technika je velmi rozmanitá a zahrnuje přístroje od jednoduchých amatérských přijímačů až po obrovské parabolické radioteleskopy sledující malý výsek oblohy s velkou přesností. Nejčastěji používané přístroje, schopné zachytit meteory až 9. hvězdné velikosti, však mají přesnost pozorování velmi malou v porovnání s optickými metodami a pozorování jsou zatížena výběrovými jevy.

Pozorovací technika se i dnes velmi rychle vyvíjí, aby pomohla lépe vysvětlit složité děje probíhající při průletu částic mimozemského původu atmosférou.

3.2 Obecný přehled

Meteor je v astronomickém pojetí atmosférický úkaz způsobený vstupem částice meziplanetární hmoty, tedy meteoroidu, do zemské atmosféry. Kvůli kolizím s částicemi vzduchu dochází k zahřívání tělesa, jehož povrch začne od teploty asi 2200 K sublimovat. Následné srážky atomů a molekul meteoroidu s částicemi vzduchu způsobují excitaci a ionizaci. Odraz radiových vln od volných elektronů poté umožňuje pozorování radary. Při zpětné deexcitaci a rekombinaci atomů

a molekul podél trajektorie meteoroidu dochází k vyzařování světla, které můžeme z povrchu Země pozorovat. Během letu dochází jednak ke ztrátě hmoty tělesa, jednak k brzdění. Ve většině případů však těleso ztratí všechnu svoji hmotnost dříve, než se stačí výrazně zbrzdit. Co se bude s částicí dít po vletu do zemské atmosféry, určují především dva parametry: počáteční hmotnost a geocentrická rychlost tělesa. Dolní hranici hmotnosti, při níž ještě probíhá jev meteoru, tvoří meteoroidy o průměru asi 10 mikronů (tj. 0,01 mm)². Ty bývají označovány jako mikrometeoroidy, jež se v atmosféře zbrzdí dříve, než se stačí zahřát na potřebný limit.

3.3 Dělení meteoroidů dle velikosti

Meteorické jevy dělíme dle jejich chování v zemské atmosféře do čtyř skupin: meteory, bolidy, explozivní impakty a průlety prachových částic.

Typické meteory

Běžné meteory jsou tvořeny částicemi o rozměrech od 0,05 mm do 20 cm. Jejich vlastnosti záleží kromě hmoty také na rychlosti – např. meteor nulté magnitudy³ může být způsoben 2cm tělesem o rychlosti 15 km/s, 1cm tělesem o rychlosti 30 km/s nebo 0,5cm tělesem o rychlosti 60 km/s. Geocentrické rychlosti meteoroidů jsou teoreticky vymezeny dvěma hranicemi: nejnižší rychlost 11,2 km/s budou mít tělesa se stejnou heliocentrickou rychlostí jako Země, která budou urychlena pouze zemskou gravitací ($v_{min} = \sqrt{\frac{2GM_Z}{R_Z}}$) (kde G je gravitační konstanta, M_Z a R_Z hmotnost a poloměr Země). Druhou hranici tvoří – za předpokladu, že meteor se nepohybuje po hyperbolické dráze (což je velmi vzácné) – rychlost 72,8 km/s pro meteory obíhající kolem Slunce retrogradně⁴, jež se se Zemí střetnou poblíž perihelu. Geocentrická rychlost bude dána součtem heliocentrické perihelové rychlosti Země, tj. asi 30,3 km/s, a meteoru na parabolické dráze, 42,5 km/s

$\left(v_{met} = \sqrt{GM_S \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)}$, kde $a \rightarrow \infty$ je velká poloosa dráhy, r okamžitá vzdálenost od Slunce a M_S hmotnost Slunce)

Teploty okolo 2200 K bývá typicky dosaženo ve výškách 100 až 110 km; konkrétní výška počátku je jedním z kritérií určujících hustotu a složení meteoroidu. Po několika kilometrech až

²Kikwaya Eluo (2011), s. 1

³odpovídá světelnému toku $J_0 = 2,54 \cdot 10^{-6} \text{ lm} \cdot \text{m}^{-2}$

⁴opačným směrem než planety

desítkách kilometrů ztratí meteoroid všechnu svoji hmotu a přestane svítit. Obecně se předpokládá, že intenzita vyzařování je úměrná změně kinetické energie tělesa:

$$I = \tau \frac{dE_k}{dt}.$$

V obecném případě můžeme změnu energie vyjádřit jako

$$I = -\tau \left(\frac{v^2}{2} \frac{dm}{dt} + mv \frac{dv}{dt} \right),$$

kde záporné znaménko je z důvodu záporných hodnot změny hmotnosti a rychlosti a τ je zářivá účinnost („luminous efficiency“). Pro malá tělesa (na která je tato práce zaměřena) je druhý člen většinou zanedbatelný (změna rychlosti v řádu procent) a rovnice se zjednoduší na

$$I = -\tau \left(\frac{dm}{dt} \right) \frac{v^2}{2}, \quad (3.1)$$

odkud je možné dopočítat hmotnost meteoroidu. Hodnota koeficientu τ je závislá na rychlosti meteoru přibližně dle vzorce⁵

$$\log \tau = -12,834 - 10,307 \log v + 22,522 \log^2 v - 16,125 \log^3 v + 3,922 \log^4 v,$$

kde v je v km/s. Vzorec je implemetován do programu Mimi (viz oddíl 4.3) a výpočet koeficientu při zpracování probíhá automaticky. Hmotnost se určí integrací 3.1 (I a v známe z pozorování).

Bolidy, meteority

Jako bolid se označuje meteor jasnější než asi -4. magnituda. Ve většině případů jsou i tato tělesa stále ještě relativně malá a v atmosféře se chovají výše popsáním způsobem (brzdění zde může být výraznější). Od velikosti přibližně 20 cm však meteoroid nemá dostatek času, aby se celý vypařil dříve, než dojde k poklesu jeho rychlosti pod kritickou mez 3 km/s. Tehdy těleso přestává svítit a jeho povrch začíná chladnout a tuhnout. Nadále se zpomaluje, dokud nedosáhne rychlosti volného pádu v odporujícím prostředí. Této části letu se říká temná dráha – těleso není pozorovatelné. Po několika minutách objekt dopadne na povrch Země a od této chvíle může

⁵Pecina et al. (1982), s. 107

být označován jako meteorit⁶. Hmotnost na konci ablační fáze je úměrná v_{∞}^{-6} , proto maximální rychlost těles, které dopadnou až na povrch, je asi 30 km/s.

Explozivní impakty

Pravděpodobnost, že těleso po průletu atmosférou způsobí explozivní impakt, je velice nízká. Pouze tělesa velikosti metrů a větší mají takovou kinetickou energii, že nejsou atmosférou dostatečně zpomalena a narazí na povrch Země vysokou (nadzvukovou) rychlostí. Takové kolize pak způsobují impaktních krátery.

Prachové částice

Posledním typem jsou částice menší než setiny milimetru. Hmotnost těchto meteoroidů klesne na několik km/s již ve vysokých vrstvách atmosféry. Tyto částice nikdy nedosáhnou teplot potřebných k vypařování hmoty, nejsou tedy ani produkovány ionty a nevzniká jev meteoru. Prachové částice poté pomalu sedimentují na povrch Země jako mikrometeority.

Ač jsou malá tělesa mnohem čtenější než velká, tvoří právě velké meteoroidy a malé asteroidy v dlouhodobém průměru největší podíl přírůstku hmoty Země. Meziplanetární prachové částice přispívají k dopadající hmotě ze 17 %, zatímco 83 % připadá na tělesa o hmotnostech 10^5 až 10^8 kg (tj. velikostí desítek až stovek metrů). Cepelcha (1988) udává, že v hmotnostním rozmezí meteoroidů $2 \cdot 10^{-8}$ až $2 \cdot 10^4$ kg dopadne na Zemi ročně $5 \cdot 10^6$ kg hmoty.

3.4 Původ meteoroidů

Meteoroidy ve sluneční soustavě mají dva hlavní typy původců – komety a planetky (asteroidy; vzácně mohou pocházet z povrchů jiných planet nebo jejich měsíců). Komety jsou objekty složené především z ledu a prachu, z jejichž povrchu se po přiblížení ke Slunci začnou uvolňovat těkavé prvky a kolem kometárního jádra, velikosti běžně kilometrů, se vytvoří o několik řádů větší koma a ohon. Částice uvolněné z komety mají vůči kometárnímu jádru nenulovou únikovou

⁶Pojmy meteor a meteorit bývají většinou chybně zaměňovány, ač mají jasně vymezený význam. Meteor (z řeckého *μετέωρος* (meteōros), tj. "na obloze se vyskytující", z *μετά* (meta), tedy "v, mezi" a *αἰέρω* (aeiro), "zvednout, povznést") je v obecném smyslu jakýkoli jev v zemské atmosféře, popř. na zemském povrchu [CHLÁDOVÁ, Zuzana [online]. *Úvod do meteorologie II.* (staženo 2009). Dostupné z <<http://expa.astronomy.cz/download/uvod_meteorologieII_2008.ppt>>]. Tento meteorologický pojem zahrnuje podskupiny jako fotometeory (světelné, např. duha, halové jevy), hydrometeory (vodní, např. déšť, jinovatka), elektrometeory (elektrické, např. blesk) a litometeory (pevné částice, např. kouř). V užším smyslu, používaném v astronomii, se jedná o optický jev způsobený průletem malé částice meziplanetárního původu zemskou atmosférou. Na rozdíl meteorit je označení pro horninu kosmického původu, která po kolizi se Zemí a průletu atmosférou dopadla až na zemský povrch (přípona -it je typická pro minerály).

rychlost, vlivem čehož (a také např. vlivem slunečního větru či tlaku záření, gravitace planet ad.) se jejich trajektorie postupně mění a mohou se z nich stát meteoroidy křížící dráhu Země a produkující meteory. Meteoroidy kometárního původu mívají velké excentricity a často velké sklony.

Kometry se dělí do skupin na základě sklonu i vůči rovině ekliptiky⁷ a podle tzv. Tisserandova parametru vzhledem k Jupiteru, definovaného jako⁸

$$T_J = \frac{a_J}{a} + 2\sqrt{(1-e^2)\frac{a}{a_J}} \cos i, \quad (3.2)$$

kde a , e a i jsou velká poloosa, excentricita a sklon dráhy komety, a_J velká poloosa Jupitera. Základní dvě skupiny jsou téměř izotropní (nearly isotropic) neboli dlouhoperiodické kometry, s původem v Oortově oblaku⁹ a ekliptikální neboli krátkoperiodické kometry, pravděpodobně s původem v Kuiperově pásu^{10 11}. Ty první mají sklony téměř rovnoměrně rozprostřené do všech směrů a $T_J < 2$; typickými zástupci jsou kometry Halleyova typu. Krátkoperiodické se dělí na tzv. kometry Jupiterovy rodiny s $2 < T_J < 3$, Kentaury s $T_J > 3$ a $a > a_J$ (obíhají vně Jupitera) a kometry Enckeho typu s $T_J > 3$, ale $a < a_J$ (dráha se nachází uvnitř dráhy Jupitera).

Asteroid či lépe planetka je těleso sluneční soustavy o velikost desítek metrů až stovek kilometrů. Planetky jsou téměř vždy tělesa kamenného složení s hustotami většinou 2 až 3 g · cm⁻³¹². Většina planetek sluneční soustavy se nachází v tzv. hlavním pásu planetek mezi Marsem a Jupiterem. Mají nízké excentricity a malé sklony. Produkce meteoroidů zde na rozdíl od komet pravděpodobně probíhá pomocí vzájemných srážek¹³. Počet známých planetek se pohybuje ve stovkách tisíc¹⁴. Pro meteoroidy asteroidálního původu jsou hodnoty Tisserandova parametru typicky větší než 3 ($T_J > 3$). Důvodem používání veličiny jako je Tisserandův parametr je fakt,

⁷Ekliptika je "průsečnice, v níž rovina dráhy Země kolem Slunce protíná světovou sféru" (<<http://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=1184>>) a zároveň kružnice na nebeské sféře, po níž se zdánlivě během roku pohybuje Slunce. Rovina ekliptiky je rovina oběžné dráhy Země kolem Slunce.

⁸Borovička et al. (2005)

⁹Jakási „zásobárna kometárních jader, která se nachází ve vzdálenosti zhruba 20000 ÷ 100000 AU od Slunce. Obsahuje velké množství nepravidelných těles s drahami o sklonech v rozmezí 0° ÷ 90°. Jedná se většinou o slepence zmrzlých plynů, vodního ledu a úlomků hornin, které se dostávají do blízkosti Slunce vlivem gravitačních poruch. Jejich počet se odhaduje na jeden bilión při celkové hmotnosti do 10 M_Z.“ (<<www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=245>>)

¹⁰Kikwaya Eluo (2011)

¹¹Pás malých kamenných nebo ledových těles. Jeho vnitřní okraj se nachází ve vzdálenosti asi 30 AU a vnější 600 AU od Slunce. Leží v rovině ekliptiky a obsahuje řádově stovky milionů těles kilometrových průměru. Dnes jich známe více než 1 400, mimo jiné Pluto nebo Sedna (<<www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=165>>)

¹²<<<http://planety.astro.cz/planetky/1813-vlastnosti-planetek>>>

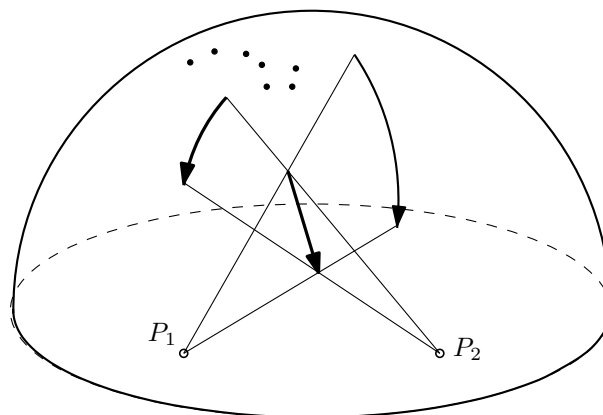
¹³Ceplecha et al. (1998), Kikwaya Eluo (2011)

¹⁴<<<http://www.planetky.cz/article.php3?sid=289>>>

že takto definované číslo je pro každý meteoroid přibližně konstantní v čase¹⁵. Během přiblížení meteoroidu k Jupiteru může dojít vlivem Jupiterovy gravitace k výraznému ovlivnění parametrů dráhy, jako je velká poloosa, excentricita nebo sklon, avšak hodnota T_J zůstává přibližně konstantní.

3.5 Dráhové elementy a dvoustaniční pozorování

Každou dráhu (resp. trajektorii) pohybu tělesa sluneční soustavy je možno popsat pomocí pěti nezávislých údajů. Nejčastěji používanými jsou velká poloosa a , výstřednost e , sklon k rovině ekliptiky i , délka vzestupného uzlu Ω a argument šířky perihelu ω . První dva souvisejí s tvarem trajektorie (nejčastěji jde o elipsu, ale může se jednat i o parabolu či hyperbolu) a zbývající s její orientací v prostoru (viz obr. 3.3). Délka vzestupného uzlu je úhlová vzdálenost vzestupného uzlu, tedy bodu, v němž trajektorie tělesa protíná ekliptiku, od osy x použité soustavy souřadnic; argument šířky perihelu úhlová vzdálenost mezi přímkou apsid (hlavní osou kuželosečky) a uzlovou přímkou (spojnicí průsečíků dráhy s rovinou ekliptiky).

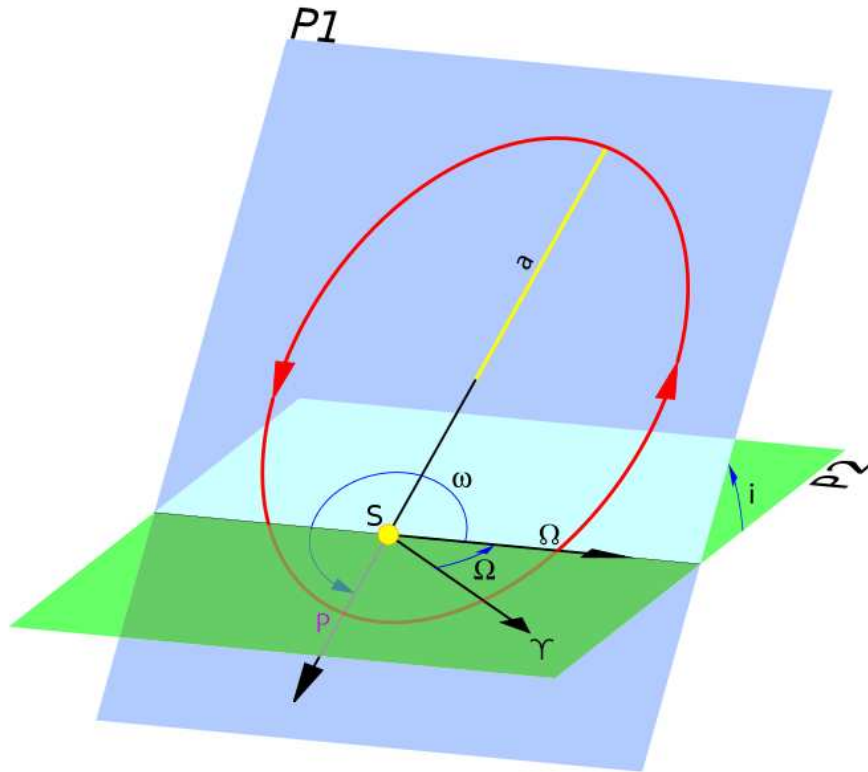


Obrázek 3.2: Určení trajektorie v prostoru pomocí dvoustaničního pozorování

Základem určování parametrů drah meteorů je jejich dvoustaniční pozorování. Jeden záznam určuje rovinu, ve které meteor letí, průsečnice dvou takovýchto rovin dává přímkou. Každý meteor tedy musí být zaznamenán (alespoň) dvěma dostatečně vzdálenými kamerami.

¹⁵ <<<http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/tisserand.html>>>

Měřeními získáme o meteoru několik výchozích informací: počáteční rychlost, její směr udaný pomocí rekascenze a deklinace radiantu. Z těchto veličin je možné spočítat parametry dráhy meteoroidu postupem, který je naznačen v příloze A.



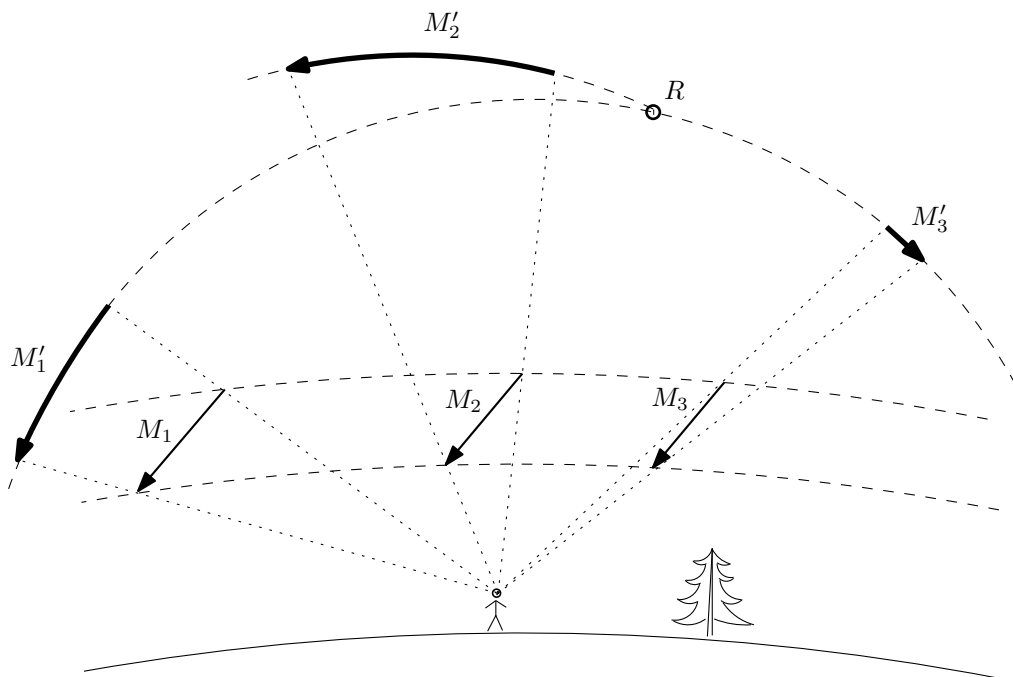
Obrázek 3.3: P1 je rovina oběhu tělesa, P2 rovina ekliptiky (zdroj: <commons.wikipedia.org>)

3.6 Meteorické roje a sporadické meteory

Meteoroidy bývají běžně rozdělovány do dvou skupin dle směru na obloze, ze kterého vylétají. První jsou rojové meteoroidy, jež obíhají kolem Slunce po velmi podobných drahách jako jejich mateřské těleso (kometa nebo planetka). V některých případech jsme schopni rojové meteory spojit s konkrétním mateřským tělesem, jindy pozorujeme roj, aniž bychom mateřské těleso znali (mohlo se již v minulosti rozpadnout). Tyto meteory tvoří známé roje, s nimiž se Země střetává každoročně ve stejném období, jako např. Perseidy, Leonidy, Orionidy, Kvadrantidy, ad. Částice uvolněné z mateřských těles ale mívají nenulové ejekční rychlosti, proto se během dlouhých období od mateřských těles postupně vzdalují. K tomu přispívají i další efekty, jako např. tlak

záření a Poynting-Robertsonův jev¹⁶. Trajektorie meteoroidů se postupně mění, až se původní oblak rozptýlí natolik, že spojitost s původním tělesem je velmi těžké určit. V této chvíli se částice stávají součástí druhé skupiny, sporadických meteoroidů, které jsou v prostoru rozloženy mnohem rozptýleněji, avšak ne zcela izotropně. Při vizuálním pozorování je těchto meteorů asi desetkrát více než meteorů rojových, a tak by byly při jejich zanedbání naše představy o blízkém okolí Země velmi nekompletní¹⁷. Tato práce je též zaměřena na studium sporadických meteorů.

Meteory rojové lze od sporadických ve většině případů odlišit jednoduše pomocí podobné rychlosti a radiantu. To je místo na obloze, ze kterého meteor zdánlivě vylétá. Všechny meteory jednoho roje vlétají do zemské atmosféry téměř rovnoběžně, a mají tudíž shodný radiant (podle polohy radiantu dostávají roje svá jména). Při pozorování se poté zdá, že všechny meteory roje vylétají z jednoho bodu, což je ovšem pouze důsledek perspektivy (obr. 3.4). Díky podobnosti drah mají i velmi podobné rychlosti.



Obrázek 3.4: Meteory zdánlivě vylétávající z jednoho bodu se v prostoru pohybují po rovnoběžných trajektoriích. M_1 , M_2 a M_3 jsou skutečné trajektorie meteoroidů a M_1' , M_2' a M_3' jsou zdánlivé polohy na nebeské sféře.

¹⁶brzdění meteoru slunečním zářením způsobující jeho spirálovité přibližování ke Slunci. Je důsledkem aberace slunečního záření a působí především na malá tělesa pozorovatelná jako rádiové meteory

¹⁷Wiegert et al. (2009)

Exaktnějším způsobem odlišení rojových a sporadických meteorů je použití tzv. D-kritéria podobnosti dráhy meteoru a roje. To je definováno vztahy:

$$D^2 = (e_2 - e_1)^2 + (q_2 - q_1)^2 + [2 \sin(I/2)]^2 + [(e_1 + e_2) \sin(P/2)]^2, \quad (3.3)$$

kde

$$[2 \sin(I/2)]^2 = \left[2 \sin \frac{i_2 - i_1}{2} \right]^2 + \sin i_1 \sin i_2 \left[2 \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \right]^2,$$

$$P = \omega_2 - \omega_1 + 2 \arcsin \left[\cos \frac{i_2 + i_1}{2} \sin \frac{\Omega_2 - \Omega_1}{2} \sec(I/2) \right].$$

Jestliže hodnota D-kritéria pro daný meteor a roj je menší než 0,2, meteor pravděpodobně k danému roji přísluší.¹⁸

I sporadickým meteorům lze pomocí dvoustaničního záznamu určit polohu radiantu. Mohlo by se zdát, že radianty sporadických meteorů budou na obloze rozloženy rovnoměrně, ve skutečnosti však existuje několik oddělených zdrojů. Ty mají příčinu jednak ve tvarech drah meteoroidů, jednak ve výběrových efektech způsobených pozorováním ze Země. Je důležité zdůraznit, že tyto zdroje nesouvisejí s mateřskými tělesy meteoroidů, kterých může být pro tentýž zdroj mnoho. Běžně se rozlišuje šest zdrojů sporadických meteorů:

- helionový a antihelinový
- severní a jižní apexový
- severní a jižní toroidální.

Všechny tyto zdroje mají na obloze neměnnou polohu vůči apexu¹⁹. Helionový a antihelinový zdroj jsou vzdáleny asi 70° od apexu – helionový 20° od Slunce, antihelinový 20° od protislunečního bodu. Tyto zdroje byly objeveny nejdříve – v druhé polovině 50. let. Jsou tvořeny meteoroidy na prográdních²⁰ drahách s periheliovou vzdáleností $q < 1 \text{ AU}$ (většinou jen nepatrně menší). Jestliže se meteoroid střetne se Zemí při přiblížování ke Slunci, resp. při vzdalování od Slunce, jeho geocentrický radiant²¹ se promítne do okolí protislunečního bodu, resp.

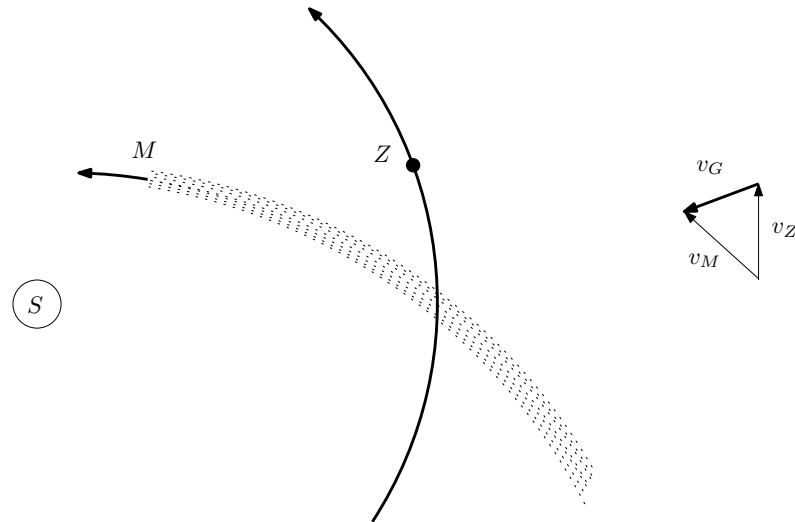
¹⁸Ceplecha et al. (1998), s. 435

¹⁹bod, k němuž směřuje aktuální vektor rychlosti Země při oběhu kolem Slunce

²⁰průmět tělesa do roviny ekliptiky se pohybuje ve stejném směru jako planety neboli sklon $i < 90^\circ$; opakem je retrográdní dráha

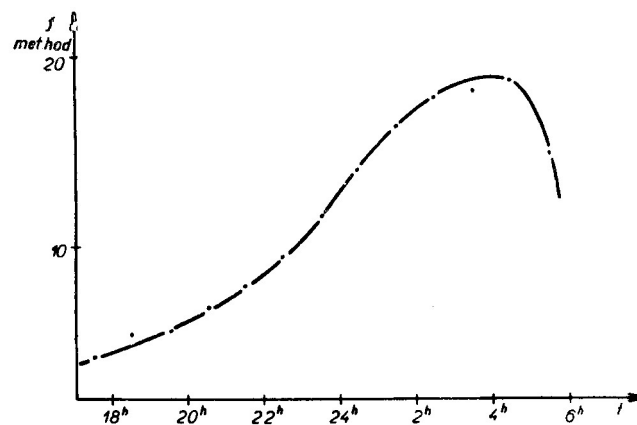
²¹Geocentrický radiant je dán souřadnicemi vektoru geocentrické rychlosti meteoru, tedy rozdílu vektorů jeho rychlosti vůči Slunci a oběžné rychlosti Země. Souřadnice výsledného vektoru vezmeme s opačným znaménkem, jelikož radiant udává, „odkud“, ne „kam“ meteoroid letí.

poblíž Slunce. Helionový a antihelionový zdroj jsou co do počtu zástupců dominantní – podle Campbell-Brown (2008) tvoří dohromady 68 % sporadických meteorů.



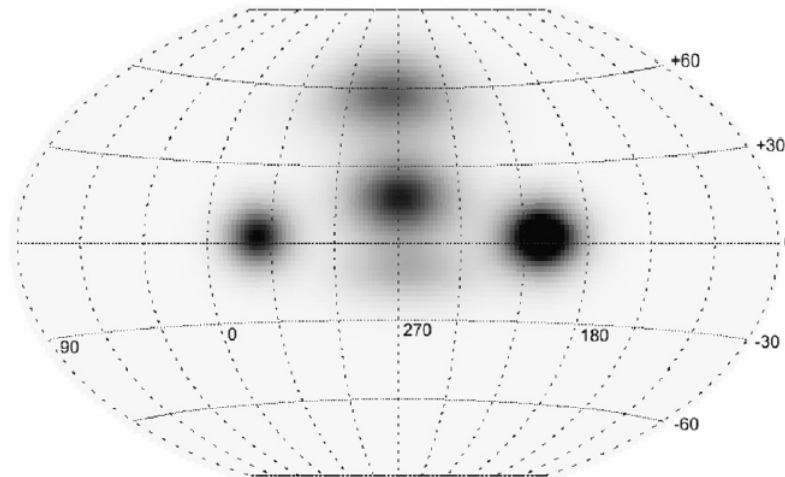
Obrázek 3.5: Antihelionové meteory mají původ v tělesech obíhajících na prográdních drahách s perihelem menším než 1 AU. Se Zemí kolidují při přibližování ke Slunci, zatímco helionové meteory při vzdalování. Odečtením vektorů rychlostí tělesa a Země dostaneme vektor geocentrické rychlosti, který směřuje téměř z antisolárního bodu.

Apexové zdroje se nacházejí asi 20° severně a jižně od ekliptiky ve směru apexu. Jsou tvořeny převážně rychlými meteoroidy na retrográdních drahách. Tyto meteory se nejčastěji střetávají se Zemí v ranních hodinách, neboť tehdy je apex poblíž zenitu (nadhlavníku). Tomu odpovídá i celková denní variace počtu meteorů.



Obrázek 3.6: Četnost zaznamenaných meteorů v průběhu dne (zdroj: Plavec (1956), s. 32)

Posledními historicky rozeznávanými zdroji jsou severní a jižní toroidální. Ty leží asi 60° severně a jižně od ekliptiky s ekliptikální délkou²² shodnou s apexem. Původ těchto zdrojů je již těžší vysvětlit a doposud nemáme přesvědčivé řešení. (Campbell-Brown, 2008, s. 300) uvádí, že empiricky nejlepší shodu se skutečností poskytuje vysvětlení kombinující jako mateřská tělesa kometa Jupiterovy rodiny a blízkozemní planety.



Obrázek 3.7: Gaussovský fit radiových pozorování meteorů (Campbell-Brown (2008), s. 149). Uprostřed leží severní s jižní apexové zdroje, nahoře severní toroidální, nalevo od středu helionový a napravo antihelionový. Jižní toroidální je v místě radaru trvale pod obzorem.

3.7 K_B parametr a fyzikální vlastnosti meteorů

V šedesátých letech minulého století se všeobecně předpokládalo, že meteoroidy střetávající se se Zemí mají přibližně stejné složení a strukturu a že jejich hustota je v průměru velmi nízká, asi $0,2 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$.²³ Tento zjednodušený pohled byl způsoben nesprávnými statistickými výpočty. Novější měření rozlišila různé populace a ukázala, že nejvýznamnější veličinou, jež je navzájem odlišuje, je výška začátku meteoru. Byly objeveny dvě oddělené skupiny lišící se výškou začátků s rozdílem okolo 10 km. Meteory s nižšími začátky byly označeny jako A, s vyššími začátky C.²⁴ Skupina C má kometární původ – tomu odpovídají vysoké začátky způsobené vysokým obsahem těkavých látek. Skupina A je tvořena zčásti asteroidálními a zčásti kometárními meteoroidy s vyšší hustotou a nižším obsahem těkavých látek.

²²na grafu vodorovná souřadnice

²³(Ceplecha, 1988, s. 221)

²⁴Tamtéž, s. 222.

Skupina C byla dále rozlišena na skupinu C1, tvořenou krátkoperidickými drahami s malým sklonem vůči rovině ekliptiky (komety Jupiterovy rodiny), a skupinu C2 s dlouhoperidickými drahami a náhodnými sklony (komety Halleyova typu). Po nových měřeních v 80. letech byla přidána ještě třetí skupina C3 s krátkými oběžnými dobami, ale náhodným sklonem. Zdrojem jak C2, tak i C3 meteoroidů jsou zřejmě dlouhoperiodické komety, ovšem s tím rozdílem, že částice spadající do skupiny C3 měly vyšší ejekční (únikovou) rychlost. Jejich dráha se poté postupně změnila na krátkoperiodickou.²⁵

Dále byla přidána skupina B s výškami začátků mezi skupinami A a C. Jsou pro ni typické malé perihelové vzdálenosti a afely nacházející se poblíž dráhy Jupitera. Poslední je skupina D, tvořená tělesa velmi nízkých hustot, jež začínají zářit nejvýše.

Na základě těchto poznatků byly definovány čtyři skupiny meteoroidů, A, B, C a D (s rozdělením C do tří podskupin) dle polohy v grafu závislosti výšky začátku meteoru na rychlosti ($h_B - v_\infty$). Ceplecha roku 1967 zavedl tzv. K_B parametr, čímž problém klasifikace převedl do jedné hodnoty. Definoval jej jako

$$K_B = \log \rho_B + 2,5 \log v_\infty - 0,5 \log \cos z_R, \quad (3.4)$$

kde ρ_B je hustota vzduchu ve výšce začátku meteoru ($\text{v g} \cdot \text{cm}^{-3}$), v_∞ je rychlost na začátku letu (před brzděním, $\text{v cm} \cdot \text{s}^{-1}$) a z_R zenitová vzdálenost radiantu (tj. $90^\circ -$ 'výška radiantu nad obzorem'). Ceplecha (1988) ještě doporučuje na základě empirických zkušeností posunout hranice při televizním pozorování o 0,15, čehož využijí při zpracování.

Jako dodatečná kritéria při rozdělení se používají parametry dráhy – velká poloosa a , perihelová vzdálenost q , a sklon k rovině ekliptiky i . Potom jsou hranice následující.

- skupina A: $7,30 \leq K_B < 8,00$
- skupina B: $7,10 \leq K_B < 7,30$; $q \leq 0,30\text{AU}$
- skupina C1: $6,60 \leq K_B < 7,10$; $a < 5\text{AU}$; $i \leq 35^\circ$
- skupina C2: $6,60 \leq K_B < 7,10$; $a \geq 5\text{AU}$
- skupina C3: $6,60 \leq K_B < 7,10$; $a < 5\text{AU}$; $i > 35^\circ$
- skupina D: $K_B < 6,60$

²⁵(Ceplecha, 1988, s. 233)

Existuje také vzácná skupina označovaná jako asteroidální s $K_B > 8$, ale tu při výpočtech uvažovat nebudu.

Četnost meteorů jednotlivých skupin silně závisí na hmotnostech pozorovaných meteorů. Skupina A má pro všechny intervaly hmotností poměrně stabilní četnost a podíl těchto meteorů v pozorování nikdy neklesá pod jednu čtvrtinu. Maxima podílu 89 % dosahuje pro tělesa o hmotnostech 0,3 g. Skupina B na druhou stranu nikdy nepřesahuje 4 % pozorovaných meteorů. Tělesa skupiny C1 ubývá s klesající hmotností, jejich podíl pro hmotnosti pod 10^{-7} kg je nevýznamný. Tělesa skupiny C3 jsou mnohem častější u menších hmotností, zatímco C2 s vyšší hmotností tolik neubývá. To je dáno jejich původem – rozdílnou ejetční rychlostí (viz výše). Malá tělesa snáze uniknou z mateřského tělesa a stanou se krátkoperiodickými (C3), velká tělesa pro tento přechod mají příliš malé únikové rychlosti, a zůstávají tedy ve skupině C2.

Část II

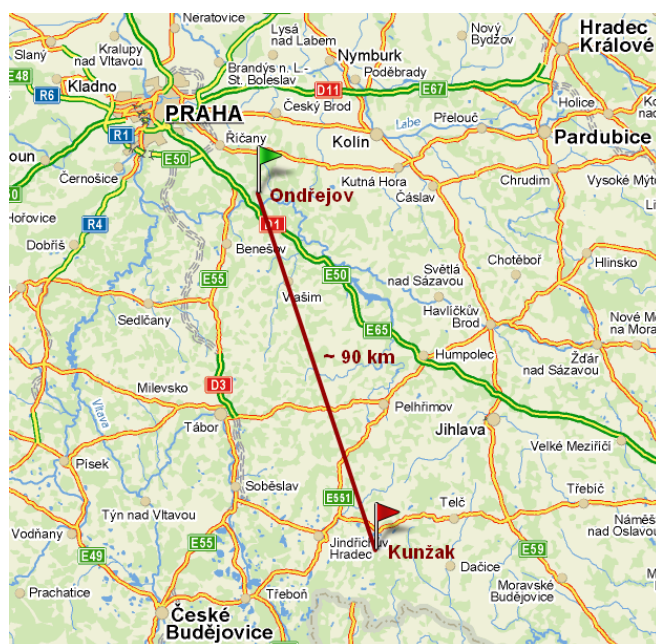
Metodika

Kapitola 4

Softwarové zpracování

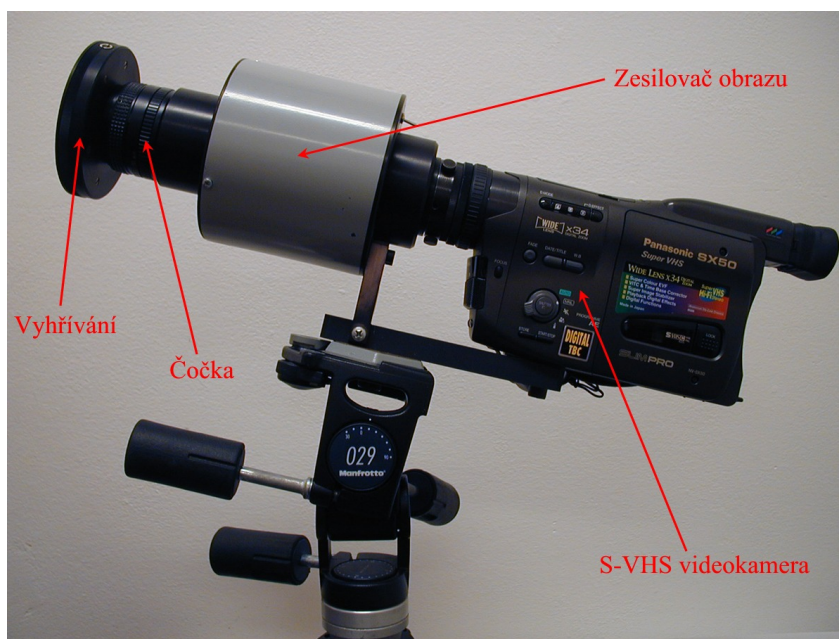
4.1 Pořizování záznamů

Náplní mojí práce bylo softwarové zpracování videozáběrů meteorů a následná statistická analýza získaných dat. Používal jsem záznam ze dvou vizuálních kamer, jedné umístěné v Ondřejově a druhé v Kunžaku, pořizený v noci z 19. na 20. srpna 2009. Během této noci obě kamery zaznamenaly asi 350 meteorů, z nichž asi tři čtvrtiny byly zaznamenány oběma stanicemi, a mohl jsem je tedy použít k výpočtům. Z časových důvodů jsem použil pouze prvních 110 dvoustaničních meteorů, a to v čase od asi 19:30 do 24:00 UT.



Obrázek 4.1: Poloha pozorovacích stanic. (zdroj: <www.mapy.cz>)

Kamery jsou během pozorovací noci namířeny na stále stejnou část oblohy tak, aby se jimi pozorované oblasti v atmosféře co nejvíce překrývaly, tzn. aby co nejvíce meteorů bylo zaznamenáno oběma kamerami zároveň. Takto se každou kamerou za noc vytvoří jeden dlouhý záznam. Tyto záznamy poté projdou programem Metrec, který automaticky vyznačí časy, kdy přelétl nějaký meteor, a jeho přibližnou polohu v zorném poli. Ukázka výstupu z tohoto programu je v příloze B.



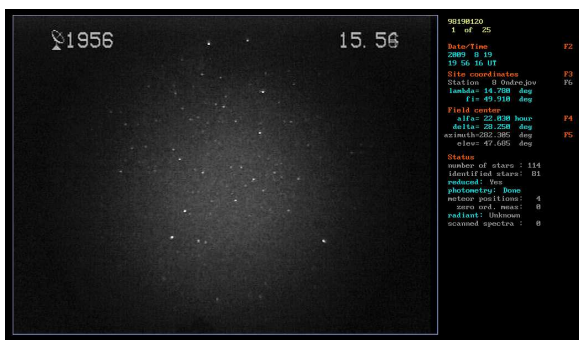
Obrázek 4.2: Přidat české popisky

4.2 Digitalizace dvojstaničních pozorování

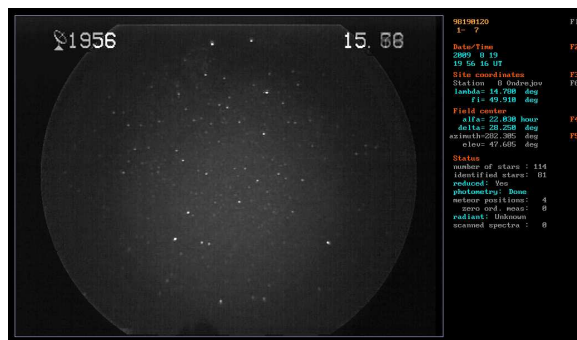
V této chvíli začala moje vlastní práce. První fází byla tzv. digitalizace, jež spočívá ve vyhledání přesného okamžiku letu meteoru (s pomocí výstupu z Metrecu) v souvislém celonočním videozáznamu a vystřížení několikasekundového záběru zachycujícího pouze let meteoru (a několika snímků před ním pro další účely, viz níže). Digitalizaci jsem prováděl v programu Obrv (obr. ...), určeném přímo k tomuto účelu. Jednoduchým krokovým posouváním záběru jsem v něm přesně vyznačoval začátky a konce letu meteoru a program poté vytvořil krátké AVI soubory.

Další fází zpracování byla práce s programem Respec, sloužícím k měření záznamu z jedné stanice. Pro určení přesné polohy meteoru je nutné identifikovat hvězdné pole v zorném poli záznamu, tedy vyhledat v hvězdném katalogu, který je součástí programu, stejné hvězdy a přiřadit je k hvězdám ve videozáznamu. Poté jsem již mohl snímek po snímku vyznačovat přesné polohy

meteoru (obr. 4.6), a získat tak jeho trajektorii na nebeské sféře (obr. 4.6), z níž program určil rovinu danou trajektorií letu meteoroidu a polohou kamery a jeho úhlovou rychlost. Zároveň je provedena fotometrie (viz 4.9 v další sekci), tedy měření jasnosti srovnáním intenzity signálu meteoru s okolními hvězdami. Pro správný výpočet jasnosti musí být každý snímek podělen flat-fieldem¹ (obr. 4.3 a 4.4). Při určování polohy také program využije prvních sedmi snímků záznamu, na nichž je jen hvězdné pozadí těsně před přiletem meteoru, a které jsou po zprůměrování odečteny od každého dalšího snímku. Takto zůstane vždy neodečten pouze meteor, jehož polohu je poté snadné určit – tedy v ideálním případě, v praxi se např. jasné hvězdy nemusí odečíst úplně dokonale.



Obrázek 4.3: Zorné pole před použitím flat-fieldu

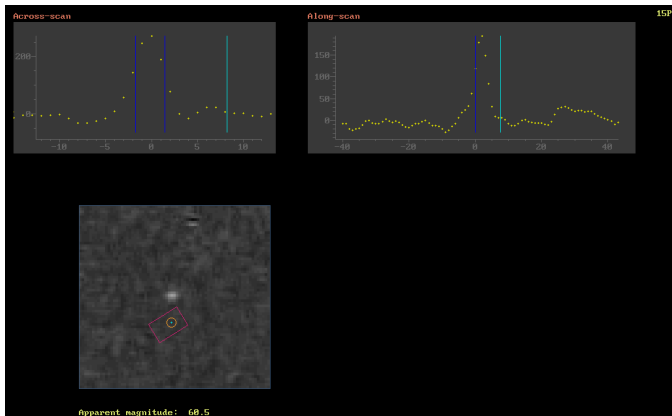


Obrázek 4.4: Stejné pole po flat-fieldu

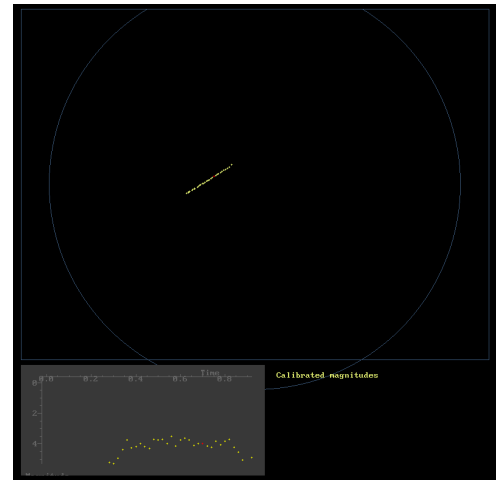
4.3 Sloučení dat

Po provedení předchozích dvou kroků pro oba záznamy téhož meteoru ze dvou (či více) stanic následuje spojení měření. Spojení je zásadní fáze, při které se určuje většina hledaných parametrů popisujících meteoroid a jeho dráhu. Tato fáze je opět z velké části provedena automaticky pomocí programu Mimi, který s využitím výstupu z Respecu vypočítá polohu a tvar trajektorie meteoru v atmosféře (obr. 3.2) a dopočítá oběžnou dráhu meteoroidu ve sluneční soustavě (viz příloha A), po níž se pohyboval před kolizí se Zemí. Trajektorie je popsána pomocí výšky a zeměpisných souřadnic meteoroidu, z nichž nejdůležitější jsou především výška začátku a konce

¹Korekční snímek sloužící k vyrovnání jasností v různých částech snímku. Záznamová zařízení mívají běžně nestejně citlivé pixely (např. ztmavení u okrajů, tzv. vinětace) v různých částech čipu. Flat-fieldové snímky se dělají nejčastěji focením jasné oblohy během soumraku, čímž se získá téměř homogenně bílá fotografie, zachycující pouze nestejnorodosti způsobené vadami čipu nebo optických ploch. Tou se vydělí měřený snímek a fluktuace jas se vyruší. <http://frigg.physastro.mnsu.edu/spect_flat.html>



Obrázek 4.5: Určování polohy meteoru na jednotlivých snímcích. Vlevo dole je výsek oblohy v okolí meteoru, nahoře průběh jasností v tomto výseku pro snadnější určení polohy.

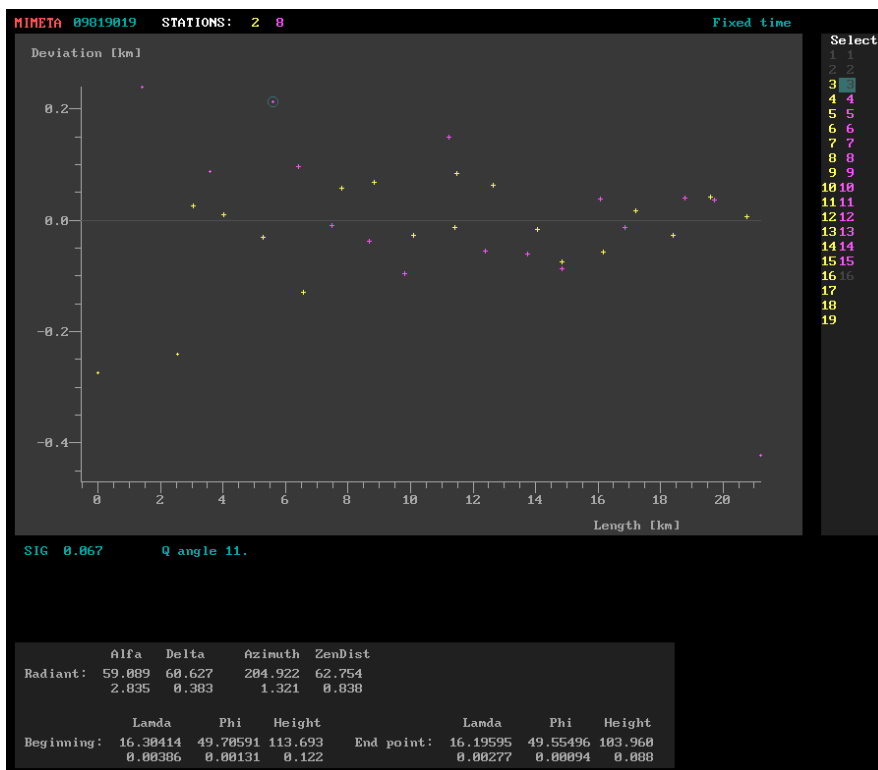


Obrázek 4.6: Vyznačená trajektorie meteoru

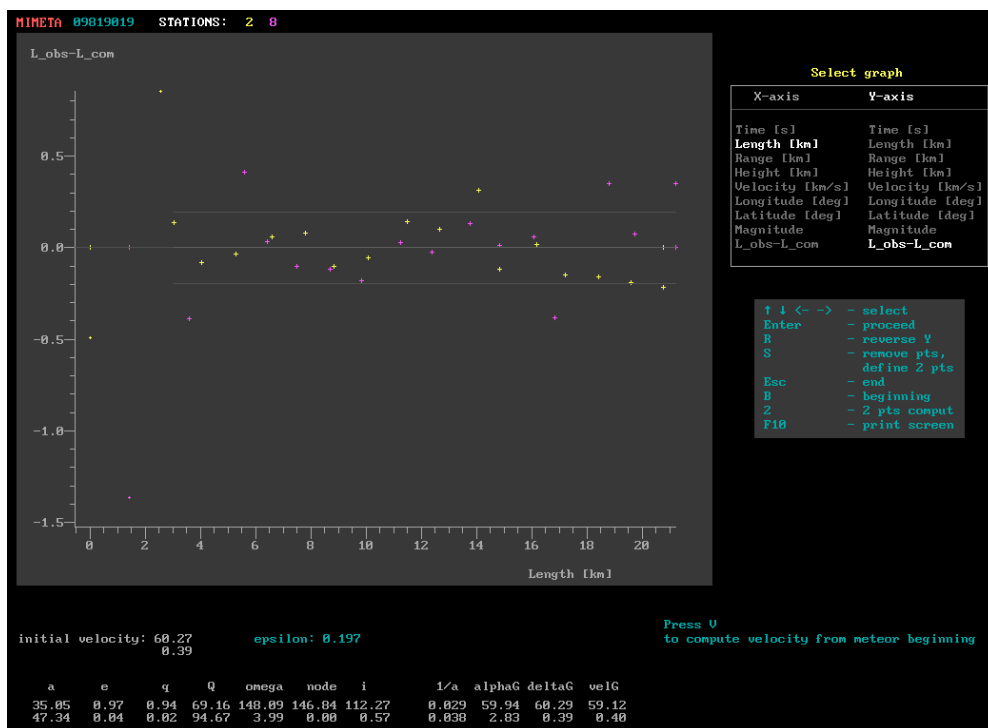
meteoru, sloužící k hrubému určení složení a hustoty. Ze závislosti polohy na čase se určí okamžitá rychlost meteoroidu. Ta bývá většinou téměř konstantní a k výpočtu parametrů dráhy je použit její průměr na celé pozorované dráze. V případě znatelného brzdění je možno parametry počítat z průměrné rychlosti za první polovinu letu. Nakonec jsou určeny elementy dráhy ve sluneční soustavě (sekce 3.5). Nejdůležitější údaje program ukládá do výstupového souboru, odkud jsou čerpány pro statistické zpracování.

Při práci s programem Mimi jsem musel především kontrolovat vypočtené polohy a rychlosti meteoroidu a z dat ručně vyřadit hrubé chyby měření (tj. pokud se poloha meteoru na snímku odchyluje od průměrné dráhy o více než asi tři standardní odchylky, viz obr. 4.7). V některých případech – když se např. meteor nachází u okraje zorného pole kamery – neproběhlo spojení správně a program dával očividně chybné výsledky, např. hyperbolické dráhy (jež jsou dle teorie velice vzácné). Pak bylo třeba pro získání konzistentního řešení upravit nastavení programu a zvážit, které snímky je třeba vyřadit z výpočtu trajektorie – v extrémních případech mohlo jít i o polovinu dat.

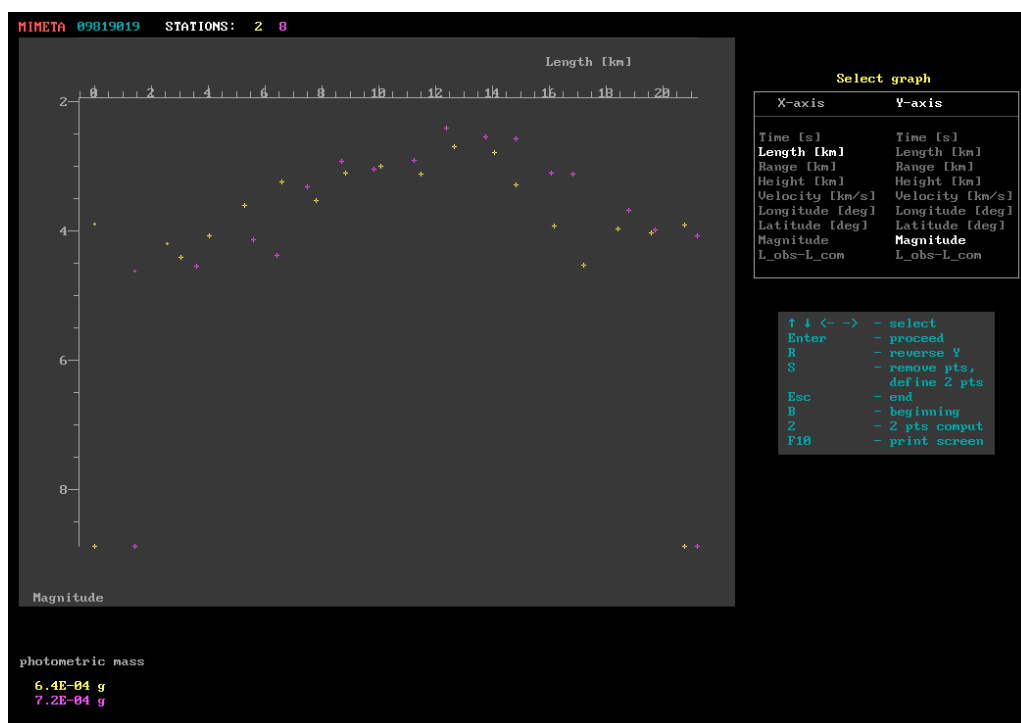
Následující dva obrázky ukazují výstupy programu Respec – odchylky poloh na jednotlivých snímcích, parametry dráhy a rychlost meteoru (obr. 4.8) a tzv. fotometrii meteoru, tedy průběh jasnosti (obr. 4.9). Dvě barvy bodů odpovídají dvěma pozorovacím stanicím.



Obrázek 4.7: Prostorové odchylky jednotlivých naměřených poloh od průměrné vypočtené dráhy



Obrázek 4.8: Výsledné údaje o meteoru



Obrázek 4.9: Fotometrie a z ní vypočtená hmotnost (vlevo dole)

4.4 Statistika a tvorba grafů

Uvedený postup jsem postupně aplikoval na všech 110 meteorů. Nashromážděná data, uložená programem Mimi v jednotném souboru [příloha], jsem poté statisticky zpracovával. K tomu jsem, společně s vedoucím stáže, panem Borovičkou, postupně sepisoval program, který hrubá data roztřídil do skupin dle požadovaných kritérií a vytvářel samostatné soubory vzájemných závislostí různých veličin, z nichž jsem poté vytvářel grafy. Šlo například o vztahy mezi jednotlivými dráhovými elementy či četnosti meteorů s daným parametrem. Hlavní překážkou pro mne byl programovací jazyk Fortran, se kterým jsem se nikdy dříve nesetkal a musel se potřebné příkazy a syntax doučit. Část programu je ukázána v příloze E.

pozn.: Pokud nebude uvedeno jinak, všechny následující kroky jsem prováděl hromadně pomocí programu, nikoli ručně.

Jelikož cílem bylo vytvořit statistiku sporadických meteorů, z naměřených dat bylo třeba vyřadit meteory rojové. Pro každý známý roj lze v dostupných tabulkách² najít údaje jako poloha radiantu (popř. jeho pohyb v průběhu období aktivity), typické rychlosti meteorů a dráhové elementy. Tyto údaje jsou však vždy pouze průměrem, od kterého se jednotlivé meteory roje mohou odchylovat. O příslušnosti meteoru ke konkrétnímu roji rozhoduje tzv. D-kritérium, dané vztahem 3.3. Jednotlivé případy rojových

²Jenniskens (2006), s. 717–722

meteorů určených k vyřazení jsem vybral ze seznamu „kandidátů“ daných malým D-kritériem po přezkoumání dráhových elementů³. Takto jsem z původního souboru 110 meteorů vyřadil 8 případů – 4 Perseidy, 3 α -Cygnydy a jednu δ -Aquaridu. To velmi dobře koreluje s články Ceplecha (1988) a Campbell-Brown (2008), kde rojové tvoří okolo 10 % pozorovaných meteorů (což platí mimo maxima velkých rojů). Zde vidíme význam zkoumání sporadických meteorů jakožto nezanedbatelné složky meziplanetární hmoty a také je tímto poněkud vyvráceno přesvědčení, že meteory je možné pozorovat jen v době zvýšené aktivity některého roje.

Pro lepší názornost je velmi vhodné radianty meteorů graficky znázornit. K zobrazení jsem použil běžný přístup, kdy uprostřed mapy oblohy leží apex, centrální vodorovná linie je shodná s ekliptikou a Slunce leží 90° nalevo od středu. Využil jsem kartografické projekce Winkel-tripel⁴. Dle poloh radiantů v ekliptikálních souřadnicích jsem meteory rozřídil do skupin na zdroje

apexový ($\lambda \in (-30^\circ; 30^\circ)$)

helionový + antihelionový⁵ ($\lambda \in (-120^\circ; -60^\circ) \cup (60^\circ; 120^\circ)$, $\beta \in (-30^\circ; 30^\circ)$)

toroidální ($\lambda \in (-60^\circ; 60^\circ)$, $\beta \in (45^\circ; 90^\circ)$)

a jiný (zbytek).⁶

Tohoto rozdělení jsem poté hojně využíval při dalším zpracování pro znázornění odlišných vlastností meteorů v těchto skupinách.

Dále jsem meteory rozdělil na čtyři typy podle parametru K_B , přičemž jsem spojil skupiny C1, C2 a C3, které by měly být z fyzikálního hlediska identické a liší se pouze drahou ve sluneční soustavě. Hraniční hodnoty uvedené v (Ceplecha, 1988, s. 223) jsem posunul od 0,12 (namísto 0,15, (viz sekci 3.7)) tak, aby hranice mezi skupinami lépe vystihovaly přirozená rozhraní v naměřených datech (viz graf 5.5). Konkrétně

A: $8,12 > K_B \geq 7,42$

B: $7,42 > K_B \geq 7,22$

C: $7,22 > K_B \geq 6,72$

D: $6,72 > K_B$

³Pokud např. D-kritérium vycházelo nízké, avšak rychlost meteoru byla značně odlišná od hodnoty uvedené v literatuře, meteor jsem jako rojový neurčil a ponechal jej pro další zpracování

⁴<http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/tisserand.html>

⁵Helionový a antihelionový zdroj jsem sloučil, neboť k helionovému zdroji příslušel jen jeden zaznamenaný meteor, a všude dále tento sloučený zdroj označoval pro jednoduchost jako helionový (ač většina byla antihelionových). Nepřítomnost většího počtu helionových meteorů je samozřejmě způsobena pozorovací metodou, tj. využití vizuální části spektra, kdy na denní obloze téměř nejsme schopni zaznamenat žádné meteory, ač jich je – z velké míry z helionového zdroje – mnoho. Tyto meteory je možné pozorovat radiovou technikou.

⁶Toroidální zdroj bývá rozdělován na severní a jižní, z našich zeměpisných šířek však jižní není pozorovatelný, tudíž jsem jej neuvažoval.

Obou těchto rozdělení – jak podle polohy radiantu, tak podle K_B typu – jsem hojně využíval při dalším zpracování. Proto jsem ještě vytvořil novou, přehlednější tabulku s vybranými údaji o meteorech, viz příloha C].

Hlavním cílem mé práce bylo vytvoření statistiky pozorovaných meteorů, tj. jejich drah, rychlostí, původů či hmotností. K tomuto účelu slouží lépe než tabulky názorné grafy a histogramy, jež jsem pomocí vlastního programu vytvářel. Bylo třeba roztřídit data podle požadovaných kritérií a uložit do zvláštních datových souborů, odkud jsem je „zviditelnil“ programem Grapher, ver. 1.30.⁷

⁷ <<<http://www.goldensoftware.com/products/grapher/grapher.shtml>>>

Část III

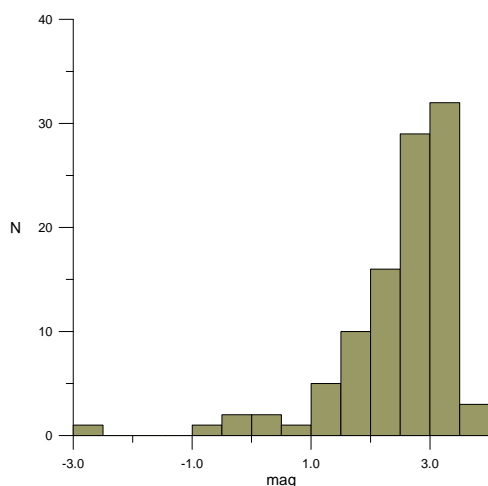
Výsledky práce

Kapitola 5

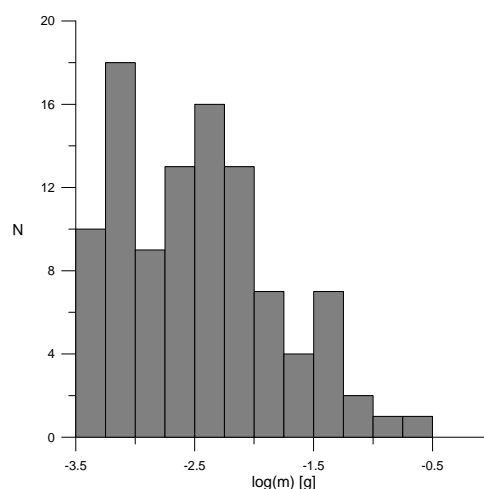
Výsledky a diskuse

5.1 Výsledky

Před samotným zkoumáním fyzikálních vlastností a dráhových elementů meteoroidů jsem vytvořil několik grafů znázorňujících vlastnosti měřeného souboru jako celku. Histogramy 5.1 a 5.2 ukazují, jak jasné a jak hmotné meteory byly zaznamenány. Je zřejmé, že počet zachycených meteorů roste s rostoucí magnitudou a s klesající hmotností, pak ovšem nastává strmý spád způsobený omezením měřicí techniky. Nejvíce meteorů bylo třetí hvězdné velikosti a hmotnosti nejčastěji ležely řádově mezi setinami a tisícinami gramu.



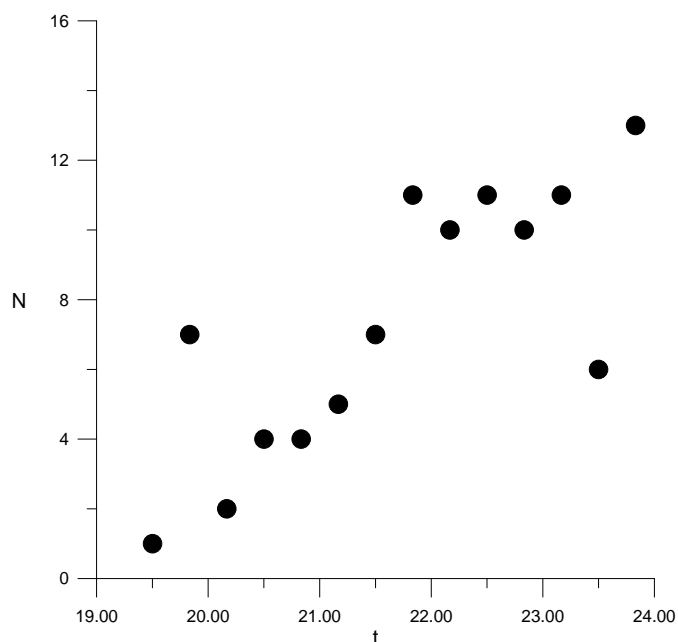
Obrázek 5.1: Rozložení hvězdných velikostí



Obrázek 5.2: Rozložení hmotností

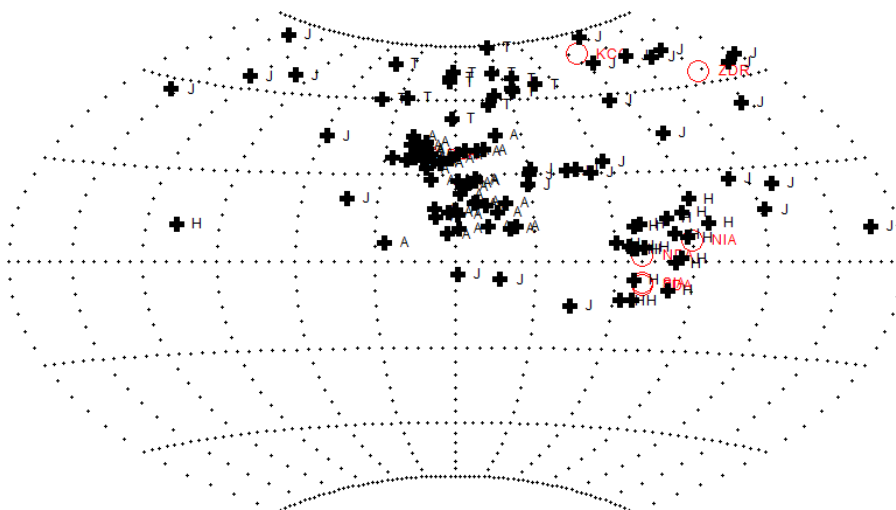
Během noci také postupně narůstal počet zaznamenaných meteorů v souladu s postupným stoupáním antihelionového a apexového zdroje.

Graf 5.4 znázorňuje polohy radiantů všech 102 sporadických meteorů na mapě oblohy. Vodorovná osa je totožná s ekliptikou a počítá se na ní ekliptikální délka λ (rostoucí zprava doleva); na svislé ose



Obrázek 5.3: Počet zachycených meteorů v závislosti na čase

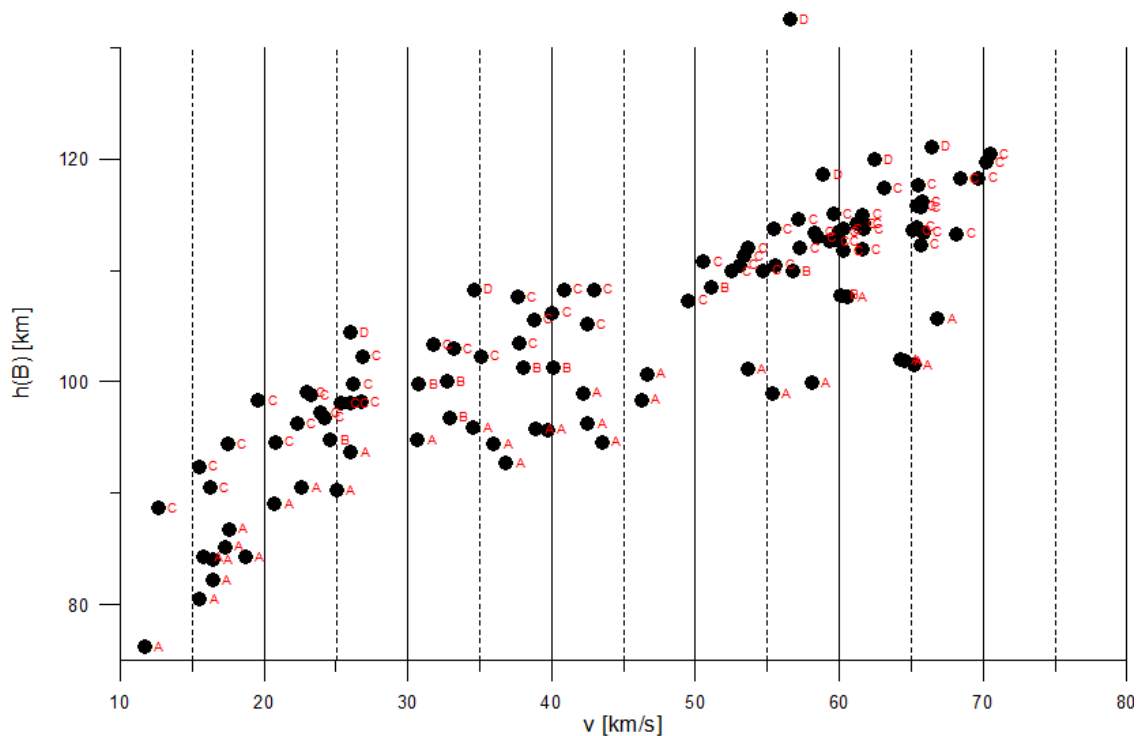
ekliptikální délka β . V okolí středu v šířce cca. 30° se nachází apexový zdroj, asi 90° doleva od středu podél ekliptiky leží Slunce (v jeho okolí zaznamenán jeden helionový meteor) a 90° opačným směrem protisluneční bod, poblíž něhož leží antihelionový zdroj. V šířkách od 45° výše leží meteorů toroidálního zdroje. V grafu jsou kromě meteorů vyznačeny také polohy radiantů právě aktivních rojů.¹



Obrázek 5.4: Mapa oblohy

¹PER – Perseidy (radiant ukryt v apexovém zdroji), KCG – κ -Cygnidy, ZDR – ζ -Drakonidy, NIA – Severní ι -Aquaridy, SIA – Jižní ι -Aquaridy, NDA – Severní δ -Aquaridy, SDA – Jižní δ -Aquaridy

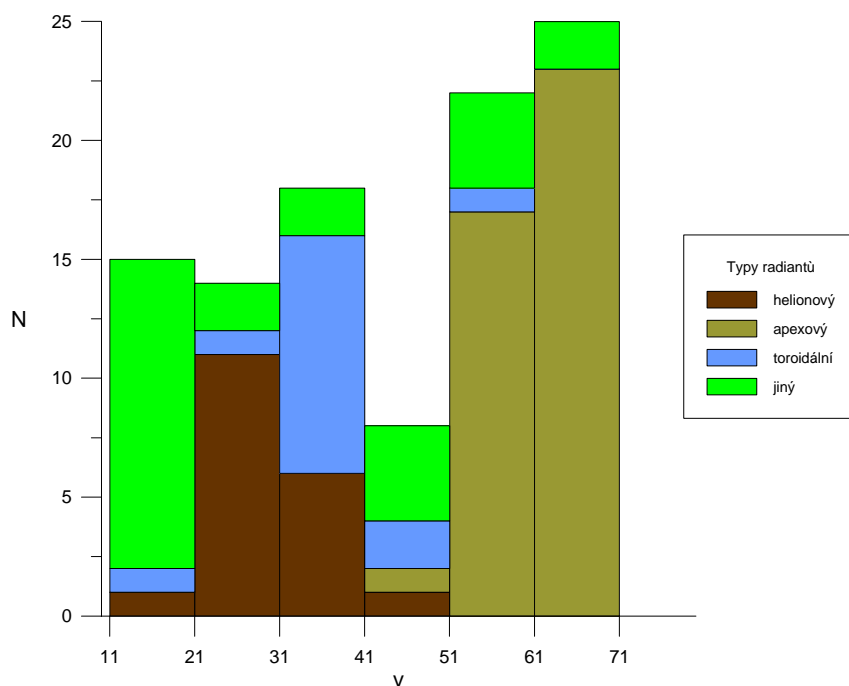
Odlišné fyzikální vlastnosti meteorů vyniknou v grafu závislosti výšky začátku meteoru na rychlosti, tj. na grafu 5.5. Meteory A, složené z hustého asteroidálního nebo uhlíkatého kometárního materiálu, proniknou níže do atmosféry, než začnou zářit, ve srovnání s ostatními typy. Naopak D jakožto nejlehčí a nejtěkavější začínají zářit vysoko. V grafu 5.5 jsou poměrně zřetelné přirozené hranice mezi jednotlivými K_B skupinami A a B a také C a D. Graf však nepostihuje závislost výšky začátku na zenitové vzdálenosti radiantu, která je postižena při výpočtu parametru K_B , proto se mohou typy některých meteorů v grafu zdát nesprávně zařazené.



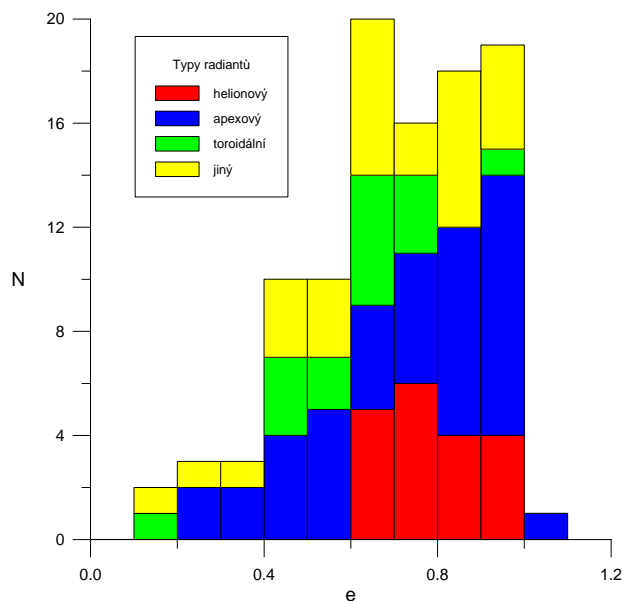
Obrázek 5.5: Výška začátku na rychlosti

Histogram geocentrických rychlostí (5.6) posloužil jako ověření dvou hranic – asi 11 a 72 km/s – mezi nimiž se rychlost tělesa musí nacházet. Zároveň je vidět nerovnoměrné rozložení, maxima okolo 30 a 65 km/s oddělená poklesem četnosti poblíž 45 km/s.

Následující grafy ukazují rozložení některých dráhových elementů (viz sekci 3.5). Pro účely následného zhodnocení a srovnání jsou sloupce v grafech rozděleny barevně podle zdrojového radiantu (sekce 3.6) či podle fyzikálních vlastností na skupiny A, B, C, D (sekce 3.7). Na grafu 5.7 vidíme, že výstřednosti drah meteorů jsou velmi vysoké, což odpovídá kometárnímu původu či změně dráhy gravitačním působením planet, a pohybují se po eliptických až téměř parabolických drahách. Jako hyperbolický ($e > 1$) vyšel jeden meteor, což může být ovšem chyba měření a dráha je ve skutečnosti eliptická. Meteory z různých zdrojů jsou téměř rovnoměrně rozprostřeny na celém intervalu $e \in (0; 1)$, avšak meteory (anti)helionového zdroje v mém vzorku nemají excentricitu menší než 0,6.



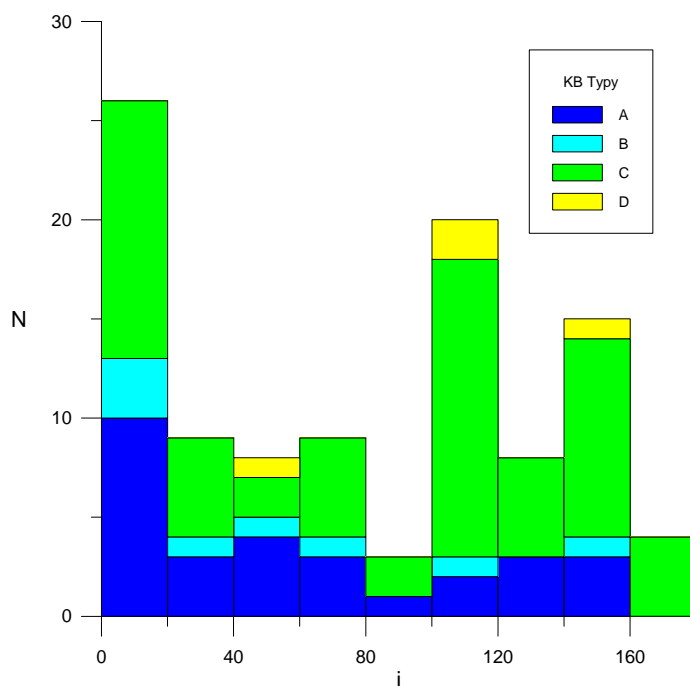
Obrázek 5.6: Rozložení rychlostí



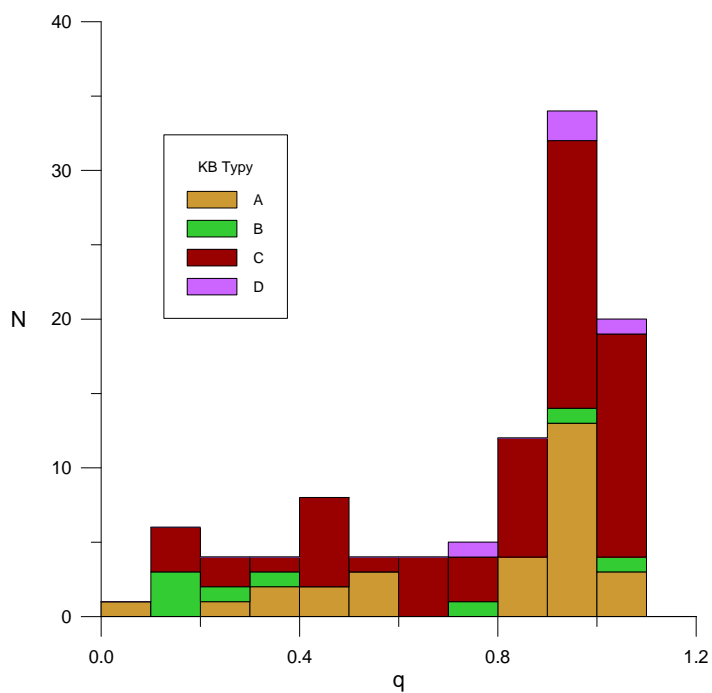
Obrázek 5.7: Rozložení výstředností

Graf 5.8 ukazuje rozložení sklonů drah. Meteory byly zachyceny ze všech 20stupňových intervalů, avšak maximum četnosti leží v nízkých sklonech pod 20° a menší maxima se nacházejí kolem sklonů 110° a 150° . Meteory skupiny A, ač rozprostřeny po celém intervalu, mají zřejmé maximum pro nízké sklony.

Následující dva grafy zobrazují rozložení podle Tisserandova parametru, který je funkcí velké poloosy, sklonu a excentricity (viz sekce 3.4). Vidíme celkové maximum v rozmezí 2 až 4, ale není zřejmý žádný

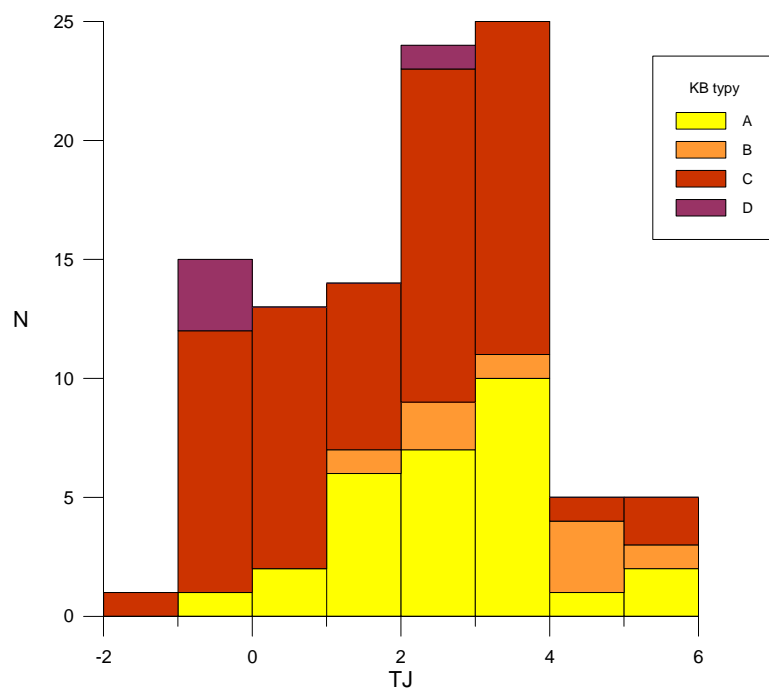
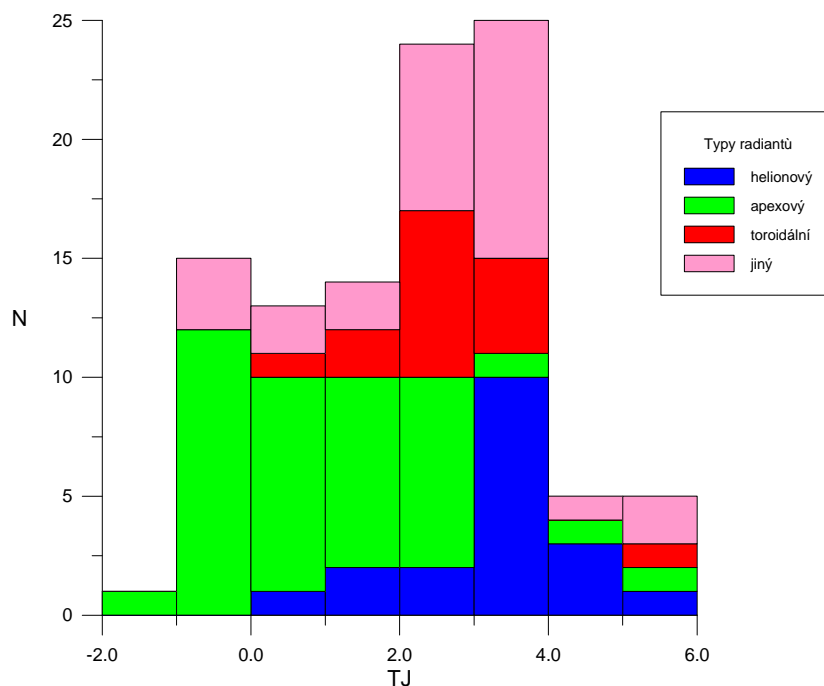


Obrázek 5.8: Rozložení sklonů



Obrázek 5.9: Rozložení periheliů

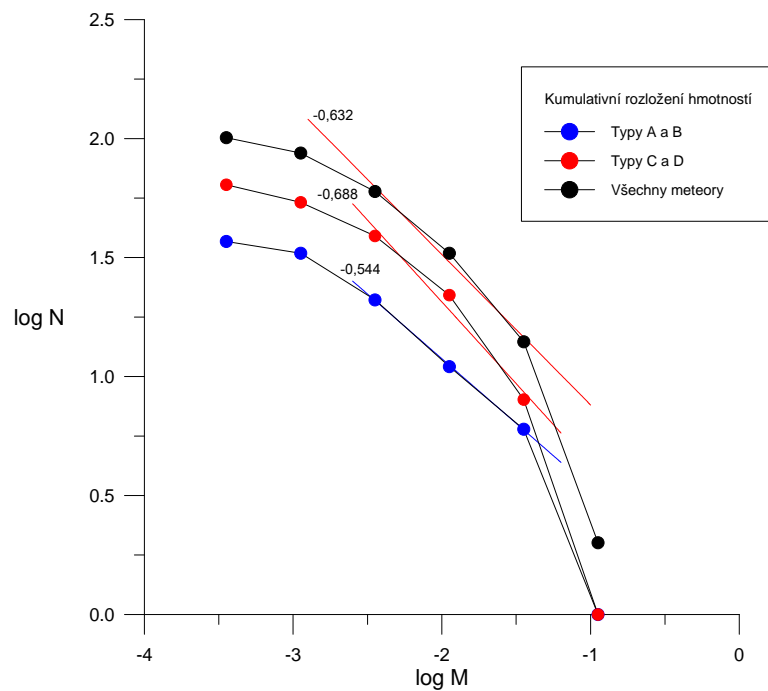
výrazný zlom u hodnoty 3 – především u K_B typů, kde by dle teorie měla být hranice mezi tělesy z komet Jupiterovy rodiny a planetkami. Naopak v rozdělení podle zdrojů je v $T_J = 3$ výrazný zlom jak pro apexový, tak pro antihelionový zdroj.

Obrázek 5.10: Rozložení K_B skupin dle Tisserandova parametru

Obrázek 5.11: Rozložení radiantových zdrojů dle Tisserandova parametru

Další graf ukazuje tzv. kumulativní hmotnosti meteoroidů, tedy součet hmotností všech meteorů těžších než daná hodnota. Tato suma by směrem k menším hmotnostem měla exponenciálně růst, proto jsou křivky proloženy příkami (měřítko jsou logaritmická). U malých těles je náš vzorek neúplný, protože

všechny slabé meteory nemusí být zaznamenány. U velkých těles se jedná o statistiku malých čísel, proto jsou přímkami prokládání jen střední části grafu. Tělesa malých hmotností tvoří slabé meteory a je pradápodobné, že ne všechny byly správně zaznamenány, proto hmota u malých těles tolik neroste a tyto body v grafu jsem při prokládání přímkou nepoužil. Zvlášť jsem zanesl hmotnosti těles skupiny A (+ B) a skupiny C (+ D), aby se zviditelnila jejich odlišná míra nárůstu hmotnosti směrem k malým hmotám.



Obrázek 5.12: Kumulativní hmotnosti pro skupiny A+B, B+C a všechny meteoroidy

Souvislost mezi fyzikálními vlastnostmi a elementy dráhy velmi názorně ukazuje tabulka 5.1. Meteoroidy jsou v ní rozděleny do pěti skupin definovaných velikostí perihelu q a afelu Q dráhy a jejím sklonem i . Ve skutečnosti jsou hranice v následujícím výčtu velmi přibližné, a proto mé rozdělení nemusí plně odpovídat skutečnosti.

dlohoperiodické $Q \gg 5 \text{ AU}$

tělesa Jupiterovy rodiny $Q \approx 5 \text{ AU}, i < 45^\circ$

krátkoperiodické–izotropní $Q < 5 \text{ AU}, i > 45^\circ$

asteroidální $Q < 4,5 \text{ AU}, i < 45^\circ$

blízko Slunce $q < 0,3 \text{ AU}$

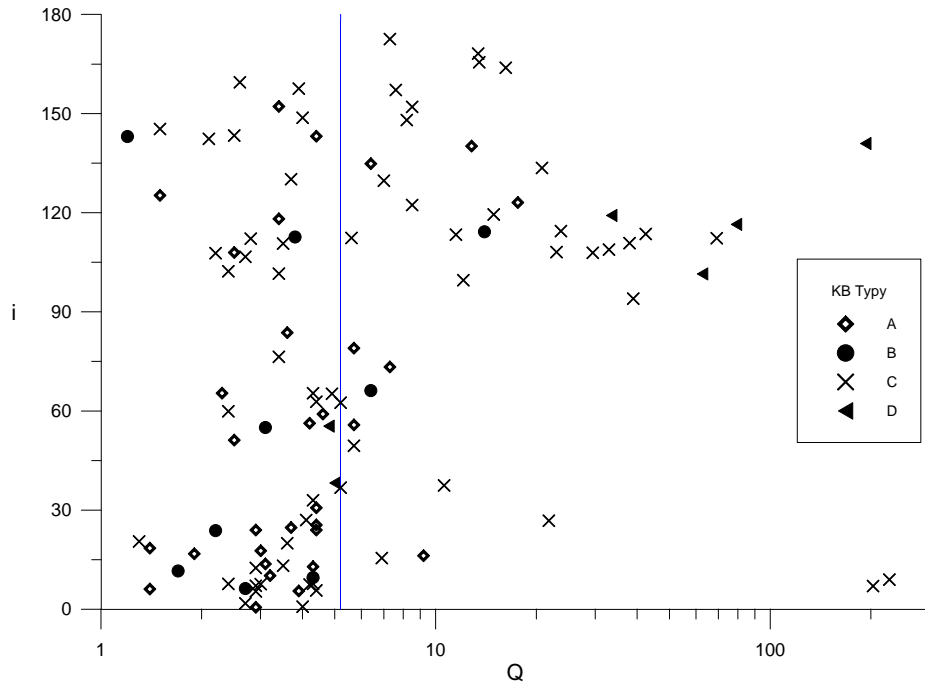
Když meteoroidy rozdělím dle těchto kritérií a zároveň dle parametru K_B , dostanu následující tabulku.

	dlohoperiodické	Jupiterovy rodiny	krátkoperiodické–izotropní	asteroidální	blízko Slunce
A	5	2	10	12	2
B	2	0	2	0	5
C	27	4	17	14	2
D	4	1	1	0	0

Tabulka 5.1: Vztah mezi fyzikálními vlastnostmi a dráhovými elementy

Po řádcích můžeme sledovat dráhy těles jednotlivých K_B skupin. Skupina A obsahuje nejhustější materiál (nejnižší výšky začátků), čemuž dle předpokladu odpovídají hojně zastoupené asteroidální dráhy. Nemale podíl ale tvoří i typicky kometární dráhy, jako dlohoperiodické a krátkoperiodické–izotropní, na něž se mohla malá tělesa dostat opět z dlohoperiodických drah vlivem negravitačních sil (tlak záření). Pro tělesa skupiny B jsou typické malé perihelové vzdálenosti, což odpovídá údajům v tabulce. Skupina C zahrnuje všechny tři podskupiny: C1, z komet Jupiterovy rodiny, C2 na dlohoperiodických drahách a C3 na krátkoperiodických drahách s libovnými sklony. Poněkud neočekávaný je však výskyt drah klasifikovaných jako asteroidální. Poslední skupina, tedy D, obsahuje typicky kometární materiál a dle očekávání odpovídá dlohoperiodickým kometárním drahám.

Tvar dráhy v závislosti na typu K_B částečně vystihuje poslední graf. Na tom jsou v rovině vyneseny všechny naměřené sporadické meteory a rozděleny do jednotlivých skupin odlišnými značkami. Velmi přesvědčivě vidíme, že čím je těleso složeno z hustější, méně těkavé hmoty (skupiny A, B), tím blíže k počátku grafu se nachází, tedy má menší sklony a afelové vzdálenosti. Naopak v horní polovině grafu vidíme převážně tělesa skupiny C a většina naměřených těles D je vpravo nahoře. Jako jistý předěl je svislou čarou znázorněna vzdálenost, v níž kolem Slunce obíhá Jupiter. Také vidíme, že v podstatě neexistují tělesa s malými sklony a velkými afel.



Obrázek 5.13: Vztah mezi sklon dráhy a vzdáleností v afelu

5.2 Diskuse

Podobných závislostí jako jsem uvedl v předchozí kapitole by bylo možno v souboru ještě najít mnoho. Nemám v úmyslu zde uvádět všechny, neboť mnoho vzájemných závislostí dvojic veličin poukazuje na tentýž fakt ohledně fyzikálních vlastností, rozložení drah či původu meteoroidů. Pokusil jsem se však vybrat reprezentativní vzorek statistických výsledků poskytující kvalitní přehled vlastností, jež je možné při zpracování televizních pozorování získat.

V minulé kapitole jsme viděli, že mnohé závislosti veličin vynesných v grafech odpovídaly teoretickým předpokladům. V této kapitole se pokusím výsledky odůvodnit, srovnat s dříve vydanými pracemi a diskutovat závislosti, jejichž průběh se od očekávání poněkud lišil.

Z grafu 5.2 je zřejmé, že většina meteorů pozorovatelných za běžných podmínek je způsobena tělesy velmi malých rozměrů ("zrnka písku"). Jejich zářivá energie vzniká přeměnou kinetické energie (rovnice 3.1 v sekci 3.3), která je díky rychlosti meteoroidů vysoká – např. těleso o hmotnosti 10^{-5} g a rychlosti $40 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ má kinetickou energii asi 8 kJ. Pro představu: stejnou energii by měl tenisový míček při rychlosti $530 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Nárůst počtu pozorovaných meteorů z časem dle grafu 5.3 je dán postupným stoupáním antihelionového a apexového zdroje výše na oblohu. Četnost meteorů v závislosti na výšce radiantu je $\text{HR} = \frac{\text{HR}_0}{\sin h}$, kde h je výška radiantu nad obzorem a HR_0 je četnost pro radiant v zenitu. Jedná se o stejný vliv jako snižování měrného výkonu Slunce (na jednotku povrchu Země) při snižující se výšce nad obzorem.

Graf 5.4 poměrně přesně vystihuje teoreticky popsané rozložení. Meteory antihelionového zdroje neleží přesně u protislunečního bodu, ale spíše v rozmezí 60° až 90° od apexu. Po krátké úvaze zjistíme, že tento fakt koreluje s grafem 5.7, kde vidíme, že dráhy všech antihelionových meteoroidů mají vysokou výstřednost. I když se tedy, jak plyne z fyzikálních principů, při kolizi se Zemí pohybují rychleji než Země (a měly by ji "dohánět" zezadu), kvůli velkému úhlu mezi vektory rychlosti Země a meteoroidu výsledný vektor směřuje "zpět", tedy meteoroidy při pohledu ze Země přilétají mírně zepředu (viz obr. 3.5 vpravo v sekci 3.6). Kromě popsaných zdrojů bylo také pozorováno nemálo těles nepatřících k žádnému zdroji.

Jak je vidět dále, excentricity drah meteoroidů všech skupin jsou poměrně vysoké, což je projevem převážně kometárního původu těchto těles.

Graf 5.6 přesně odpovídá dřívějším poznatkům. Antihelionové meteoroidy se pohybují po prográdních drahách a jejich zdánlivá rychlost vůči Zemi je tedy malá. Naopak apexové meteoroidy z retrográdních drah mají zdánlivou rychlost zvětšenou (přibližně) o oběžnou rychlost Země. (Campbell-Brown, 2008, s. 154) udává, že meteoroidy severního toroidálního zdroje mají rychlosti "*téměř uniformně 35 km/s*".

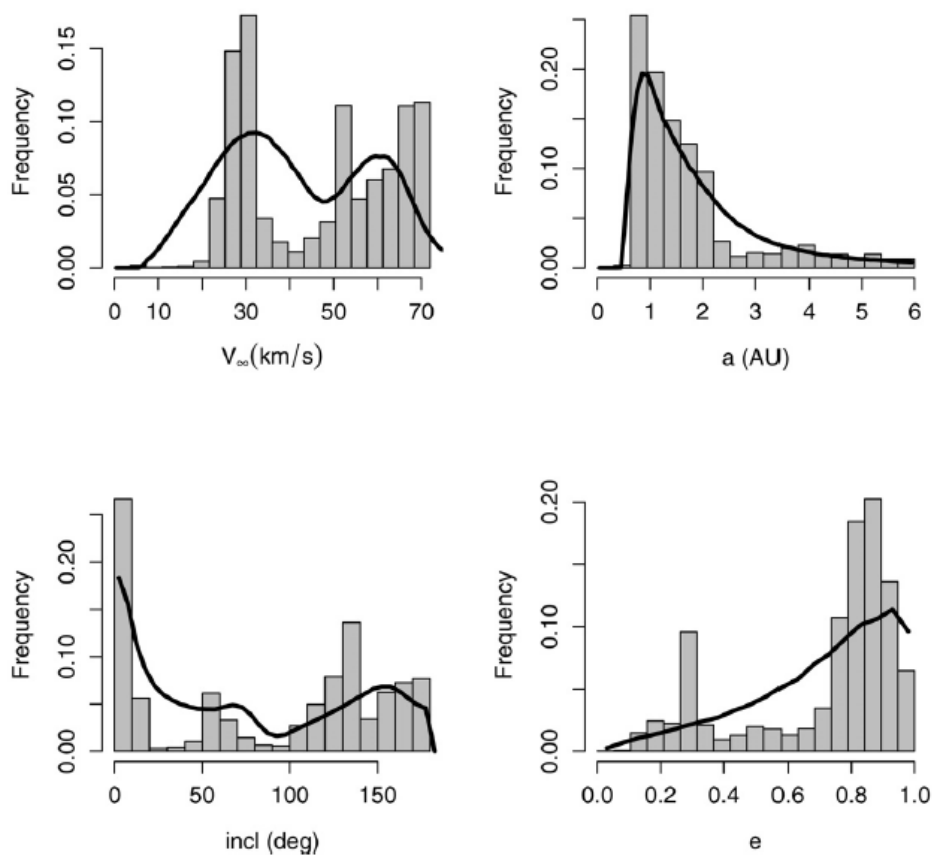
Dalšími výsledky jsou grafy zobrazující korelace mezi fyzikálními vlastnostmi a dráhovými elementy. Graf 5.8 zprvu vypadá jako rovnoměrné rozdělení, lze si ale všimnout zvýšené četnosti meteorů skupiny A u nižších sklonů, což odpovídá jejich (minimálně částečně) asteroidálnímu původu. Graf rozložení perihelů (5.9) zase potvrzuje, že tělesa skupiny B jsou charakteristická malou perihelovou vzdáleností, ač je tato závislost kvůli malému počtu naměřených těles B méně patrná. Pro srovnání s výsledky jiných autorů uvádím obr. 5.15). Ten ukazuje rádiová měření z CMOR (Canadian Meteor Orbit Radar). Rádiová technika zaznamenává převážně menší tělesa, než jaká jsou v mém souboru, jejich vlastnosti se mohou mírně odlišovat. Nicméně průběh histogramu rychlostí a sklonů se velmi podobá mým výsledkům.

Velmi zřetelné rozdělení mezi apexovým a helionovým zdrojem v histogramu Tisserandova parametru 5.11 je projekcí typických dráhových vlastností těchto meteorů (viz vztah 3.2 v sekci 3.4). Apexový zdroj je tvořen převážně retrográdními meteory, tedy meteory na drahách se sklonem asi $120^\circ < i < 180^\circ$, z čehož plyne nízká hodnota parametru. Dráhy helionových meteoroidů mají malé sklony, vysoké výstřednosti a menší velikosti velkých poloos (afel leží většinou uvnitř dráhy Jupitera), tudíž Tisserandův parametr vychází větší.

Pro srovnání s obrázkem 5.12 uvádím obrázek 5.15, jenž ukazuje průběh obdobné závislosti. Interval hodnot v mém měření byl menší, než je znázorněn zde, nicméně v rozmezí $\log m = -3$ až $\log m = -1$ Ceplechova grafu vychází směrnice tečny asi $-0,55$, tedy stejná jako v mojí závislosti pro tělesa skupiny A, avšak menší než u křivky pro všechna tělesa.

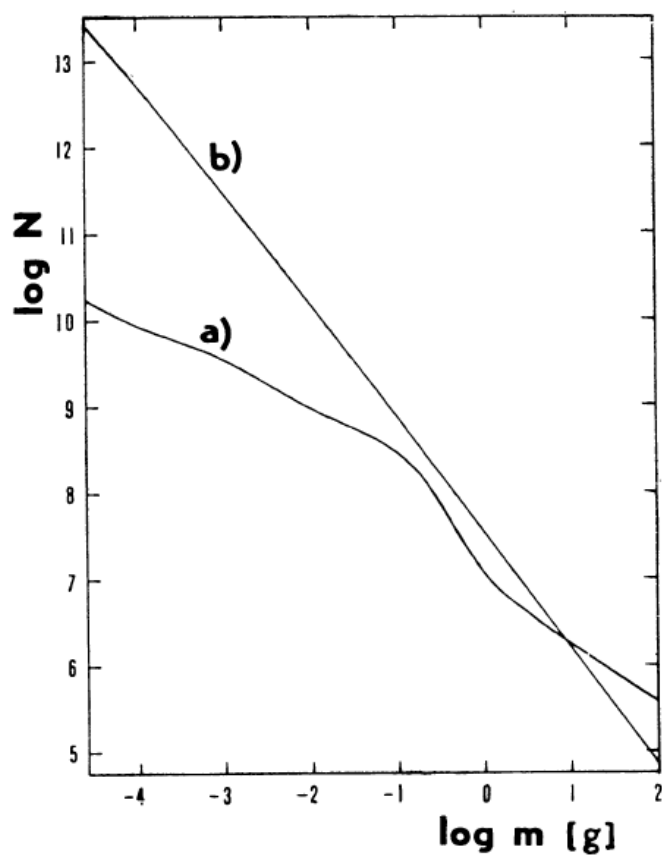
V posledním grafu v sekci výsledků jsem přímkou zobrazil vzdálenost $Q = 5,2 \text{ AU}$ jakožto poloměr dráhy Jupitera, jelikož by to měla být jakási hranice oddělující meteoroidy různých původů. Na meteoroidy při oběhu kolem Slunce totiž působí rušivé gravitační síly planet (především Jupitera), které mění tvar jejich dráhy² a afelová vzdálenost se může významně zmenšit – může se přiblížit z Oortova

²při přibližném zachování Tisserandova parametru



Obrázek 5.14: Histogramy rozložení rychlostí, velkých poloos, sklonů a excentricit meteorů naměřených radiovou metodou. Zdroj: (Wiegert et al., 2009, s. 301)

oblaku až na několik astronomických jednotek, avšak ke zmenšení pod velikost oběžné dráhy Jupitera by působením gravitace nemělo dojít. Jak ale můžeme vidět (v horní levé části grafu), existuje značné množství meteoroidů na drahách s menšími afely. To je důkazem působení negravitačních sil, pro něž poloměr dráhy Jupitera nepředstavuje žádnou hranici.



Obrázek 5.15: Kumulativní počet částic dopadajících na celou Zemi za celý rok. **a)** znázorňuje naměřená data (velmi přesná pro $\log m \geq -3$ a **b)** simulace z r. 1985. Zdroj: (Ceplecha, 1988, s. 230)

Kapitola 6

Další možnosti řešení

V této práci by bylo možné pokračovat zpracováním meteorů i z druhé poloviny noci, aby byla získaná data kompletnější a statistický vzorek větší. Omezily by se tak některé výběrové efekty, např. poměry počtu meteorů z různých radiantových zdrojů. Také by bylo možné pokračovat v tvorbě tabulek a grafů a porovnávat údaje s jinými pracemi. V takovém případě by mohl vzniknout i vědecky zajímavý soubor dat hodný publikace.

Část IV

Závěrečná část

Kapitola 7

Závěr

Cílem mé práce bylo digitálně zpracovat data z běžné letní noci a popsat vlastnosti získaného souboru. To se mi vcelku dobře povedlo, získal jsem všechny běžně uváděné údaje a také své výsledky porovnal s měřeními jiných autorů. Jelikož se moje technika a metoda zpracování odlišovala od uváděných referencí (týkala se např. jinak velkých těles), některé výsledky se neshodovaly dokonale. Nikdy ale rozdíly nebyly příliš velké a odlišnosti bylo možné vysvětlit teoretickými poznatky.

Konkrétně jsem ověřil, že sporadické meteory přilétají na obloze především ze čtyř oddělených zdrojů. Zkoumal jsem vlastnosti těles z těchto zdrojů jako rychlost vletu do atmosféry, typické výstřednosti drah nebo velikosti Tisserandova parametru. Meteoroidy v souboru jsem rozdělil také do čtyř skupin podle výšek, v nichž začínají zářit. Ukázal jsem, že každá z těchto skupin má kromě fyzikálních vlastností i odlišné dráhové elementy. Zjistil jsem, že rozdílná výška začátku souvisí s jiným průběhem hmotností.

Při studiu uvedených referencí jsem poznal, jak zpracované jsou již teorie popisující vývoj meziplanetární hmoty ve sluneční soustavě a jaké množství dalších údajů o meteorech se dá zkoumat. I přesto si ale myslím, že bychom ani v dnešní době neměli zapomínat se na oblohu dívat "postaru" pouhým okem a užívat si estetického zážitku při pozorování komet, hledání planetek nebo při nenadálém přeletu jasného meteoru.

Kapitola 8

Význam a přínos práce

Význam této práce je především demonstrativní – ukazuje celý postup od naměření syrových dat až po získání výsledků. Je vidět, že při použití správné teorie je možné poměrně snadno dojít k podobným závěrům, k nimž se meteorická astronomie postupně přibližovala desítky let.

Z vědeckého hlediska je moje práce méně obvyklá, neboť každý meteor je v ní do značné míry měřen osobně, na rozdíl od mnoha prací využívajících převážně automatické zpracování. Tím je dosaženo velmi vysoké přesnosti: souřadnice radiantu vycházejí běžně s chybou v řádu desetin stupně, chyby určení rychlosti a většiny parametrů (s výjimkou afelové vzdálenosti) v řádu procent. Nevýhodou tohoto postupu je velká časová náročnost a tudíž menší objem dat.

Literatura

- BOROVÍČKA, J. et al. A survey of meteor spectra and orbits. *Icarus*. 2005, č 174, s. 15–30. ISSN 0019-1035.
- CAMPBELL-BROWN, M. D. High resolution radiant distribution and orbits of sporadic radar meteoroids. *Icarus*. 2008, č 196, s. 144–163. ISSN 0019-1035.
- CAMPBELL-BROWN, M. D. Optical observations of meteor. *Earth, Moon, and Planets*. 2004, č 95, s. 521–5531. ISSN 1573-0794.
- ČAPEK, D. *Meteority, meteory, meteoroidy II*. [online]. [staženo 12. 2. 2012]. Dostupné z: <astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/Capek/Capek_VK2PDF.pdf>.
- CEPLECHA, Z. *Earth's influx of different populations of sporadic meteoroids from photographic and television data*. Ondřejov Observatory, Czechoslovakia : Publishing House of the Czechoslovak Academy of Sciences, Astronomical Institute, Czechoslovak Academy of Sciences, 1988.
- CEPLECHA, Z. – BOROVÍČKA, J. Meteors. In BENEST, D. – FROESCHLE, C. (Ed.) *Interrelations between Physics and Dynamics for Minor Bodies in the Solar System*. 1991. s. 318–323.
- CEPLECHA, Z. – BOROVÍČKA, J. et al. Meteor Phenomena and Bodies. *Space Science Reviews*. 1998, č 84, s. 327–471. ISSN 0038-6308.
- COOK, A. F. A Working List of Meteor Streams. In HEMENWAY, C. L. et al. (Ed.) *Evolutionary and Physical Properties of Meteoroids*. Washington, D. C.: NASA, 1973. s. 183–191.
- FURUTI, C. A. *Three Modifications for Azimuthal Projections* [online]. [cit. 12. 2. 2012]. Dostupné z: <<http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/tisserand.html>>.
- JENNISKENS, P. *Meteor Shower and ther Parent Comets*. Cambridge : Cambridge University Press, 2006. 790 s. ISBN 0-521-85349-4.

JEWITT, D. *The Tisserand Parameter* [online]. [cit. 12. 2. 2012]. Dostupné z: <<http://www2.ess.ucla.edu/~jewitt/tisserand.html>>.

KIKWAYA ELUO, J.-B. Bulk density of small meteoroids. Master's thesis, The School of Graduate and Postdoctoral Studies, The University of Western Ontario, 2011. [Online], <<ir.lib.uwo.ca/cgi/viewcontent.cgi?article=1177&context=etd>>, [staženo 12. 2. 2012],.

PECINA, P. – CEPLECHA, Z. et al. New Aspects in Single-Body Meteor Physics. *Bulletin of the Astronomical Institutes of Czechoslovakia*. 1982, roč. 34, č. 2, s. 102–121. ISSN 0004-6248.

PLAVEC, M. *Meteorické roje*. Praha : Nakladatelství československé akademie věd, 1956. 273 s.

TICHÝ, M. *Kolik je planetek XI* [online]. 1. 1. 20012. [cit. 18. 2. 2012]. Dostupné z: <<http://www.planetky.cz/article.php3?sid=289>>.

WIEGERT, P. et al. A dynamical model of sporadic meteor complex. *Icarus*. 2009, č 201, s. 295–310. ISSN 0019-1035.

<<<http://planety.astro.cz>>>

<<<http://www.aldebaran.cz>>>

<<http://frigg.physastro.mnsu.edu/spect_flat.html>>

Část V

Přílohy

Příloha A

Výpočet dráhy meteoroidu

Text vychází z Ceplecha – Borovička (1991) a Plavec (1956).

Pro výpočet dráhy meteoroidu budeme potřebovat znát jeho heliocentrickou polohu a rychlost, tj. celkem šest veličin (jedná se o vektory), pomocí nichž se určí parametry dráhy a poloha meteoroidu na ní. Heliocentrická poloha je v podstatě shodná polohou Země, jež se dá pro dané datum najít v tabulkách. Vypočíst bude třeba heliocentrickou rychlost. K tomu použijeme složky naměřené rychlosti \bar{v} meteoroidu vzhledem k pozorovateli, dané její velikostí a rovníkovými souřadnicemi δ_R a α_R radiantu.

Nejprve je nutné tuto rychlost opravit o vliv rotace Země, s níž se při pozorování sčítá.

$$v_E = \frac{2\pi (\bar{R}_n + \bar{h}_n) \cos \bar{\varphi}'_n}{86164}$$

Celý výpočet obsahuje mnoho "geometrických" úprav, především převodů mezi rovníkovými, ekliptikálními, azimutálními a pravoúhlými souřadnicemi; ty uvádět nebudu.

Po odečtení vlivu rotace je třeba vektor rychlosti opravit o vliv zemské přitažlivosti. Ač je jev meteorů způsoben v podstatě náhodným střetem tělesa sluneční soustavy se Zemí, nikoli jeho přitažením k Zemi, má zemská gravitace vliv na zakřivení dráhy krátce před kolizí, a ten je třeba započítat. Konkrétně se gravitace projeví tzv. zenitovou atrakcí, tj. přiblížením zdánlivého radiantu meteoru blíže k zenitu. Rozdíl je dán vztahem

$$\Delta z_c = 2 \operatorname{arctg} \left(\frac{v_{\infty c} - v_G}{v_{\infty c} + v_G} \operatorname{tg} \frac{z_c}{2} \right).$$

Nyní nastává odečtení rychlosti pohybu Země kolem Slunce. Ta je součtem radiální a tečné rychlosti,

$$v_{AP} = \sqrt{\left(\frac{dr}{dt} \right)^2 + \left(r \frac{dL_{SUN}}{dt} \right)^2}.$$

Po výpočtu a následné transformaci dostaneme heliocentrickou rychlost meteoroidu a již snadno vypočteme velkou poloosu jeho dráhy jako

$$a = \frac{GM_S r}{2GM_S - rv_H^2}.$$

Délku vzestupného uzlu určíme velmi snadno – meteoroid se se Zemí střetl právě ve vzestupném nebo sestupném uzlu svojí dráhy, v důsledku čehož je délka vzestupného uzlu rovna ekliptikální délce Slunce v den pozorování pro vzestupný nebo ekliptikální délce -180° pro sestupný uzel.

Sklon dráhy je dán (mimo jiné) vztahem

$$\operatorname{tg} i = \frac{\pm R \dot{z}}{X \dot{y} - Y \dot{x}},$$

kde X, Y, Z jsou pravoúhlé souřadnice polohy Země, R vzdálenost Země od Slunce a veličiny s tečkou složky rychlosti meteoroidu.

Excentricitu určíme ze vztahu

$$e = \sqrt{1 - \frac{p}{a}},$$

kde $p = \frac{b^2}{a}$ je tzv. parametr elipsy.

Je zřejmé, že určení dráhových elementů pomocí heliocentrické rychlosti a polohy meteoroidu je poměrně přímočarou záležitostí. Nejproblematictější částí výpočtu je přechod od pozorované rychlosti k heliocentrické. V době výpočetní techniky však ani tato část není žádnou překážkou.

Příloha B

Výstup z programu Metrec

Číslo metrecu	Datum a čas	Kurtáček	Podoba v zorném poli	Jasnost	Onofejov						
09819178	20.08.2009	01:16	Me	208 46	EH	5,7	ANT	Me	280 50	D	4,0
09819179	20.08.2009	01:24	Me	208 46	F	1,3	PER	Me	280 50	EH	1,3
09819180	20.08.2009	01:32	Me	208 46	H	2,8	PER	N			
09819181	20.08.2009	01:30	Me	208 46	B	1,8	PER	N			
09819182	20.08.2009	01:37	Me	208 46	I	3,1	PER	Me	280 50	G	3,6
09819183	20.08.2009	01:31	Me	208 46	E	1,3		Me	280 50	E	1,4
09819184	20.08.2009	01:39	Me	208 46	BE	2,6		Me	280 50	E	3,1
09819185	20.08.2009	01:45	Me	208 46	G	3,8		N			
09819186	20.08.2009	01:51	N					Me	280 50	H	2,0
09819187	20.08.2009	01:52	Me	208 46	EH	2,5		Me	280 50	D	2,2
09819188	20.08.2009	01:52	N					Me	280 50	I	8,3
09819189	20.08.2009	01:43	Me	208 46	H	7,4	PER	N			
09819190	20.08.2009	01:41	Me	208 46	H	3,2		N			
09819191	20.08.2009	01:31	Me	208 46	D	10,1		Me	280 50	B	2,4
09819192	20.08.2009	02:12	N					Me	280 50	H	1,5
09819193	20.08.2009	02:37	Me	208 46	E	2,4		Me	280 50	E	2,5
09819194	20.08.2009	02:32	Me	208 46	B	5,7		Me	280 50	E	3,5
09819195	20.08.2009	02:33	N					Me	280 50	H	4,6
09819196	20.08.2009	02:57	Me	208 46	F	2,3	ANT	Me	280 50	HE	4,6
09819197	20.08.2009	02:10	Me	208 46	C	1,2		D	280 50	H	1,5
09819198	20.08.2009	02:36	Me	208 46	B	1,7		Me	280 50	E	1,5
09819199	20.08.2009	02:00	Me	208 46	F	2,5		Me	280 50	EH	3,1
09819200	20.08.2009	02:30	Me	208 46	FE	1,2		Me	280 50	E	2,2
09819201	20.08.2009	03:46	Me	208 46	H	4,0	PER	N			
09819202	20.08.2009	03:34	Me	208 46	G			N			
09819203	20.08.2009	03:43	D	208 46	H			Me	280 50	E	1,3
09819204	20.08.2009	03:47	Me	208 46	HG	3,0		N			
09819205	20.08.2009	03:58	PER	208 46	BA	5,5	PER	Me	280 50	C	3,2
09819206	20.08.2009	03:51	Me	208 46	E	1,2		Me	280 50	E	1,1
09819207	20.08.2009	03:29	N					Me	280 50	F	2,1
09819208	20.08.2009	03:49	Me	208 46	E	1,8		Me	280 50	E	2,3
09819209	20.08.2009	03:02	N					Me	280 50	F	1,3
09819210	20.08.2009	03:46	N					Me	280 50	F	1,3
09819211	20.08.2009	03:05	Me	208 46	E	1,7		N			
09819212	20.08.2009	03:35	Me	208 46	E	1,7		Me	280 50	E	1,7
09819213	20.08.2009	03:51	Me	208 46	H	1,5		N			
09819214	20.08.2009	04:21	Me	208 46	ED	1,4		Me	280 50	B	2,2
09819215	20.08.2009	04:21	N					Me	280 50	I	4,3

Příloha C

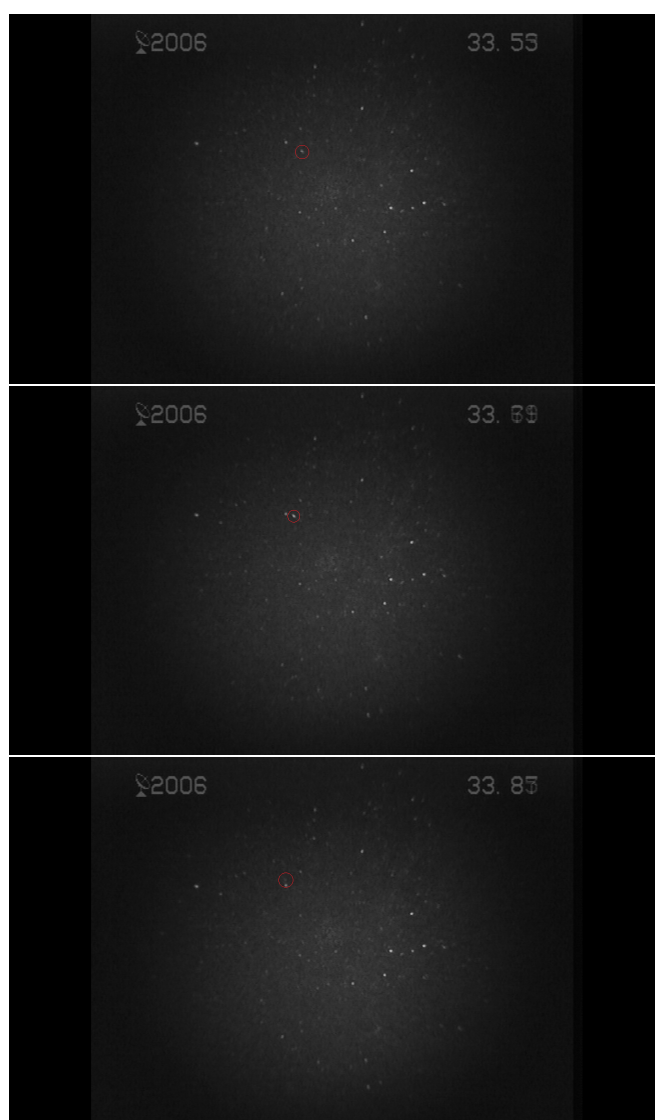
Pracovní tabulka s údaji

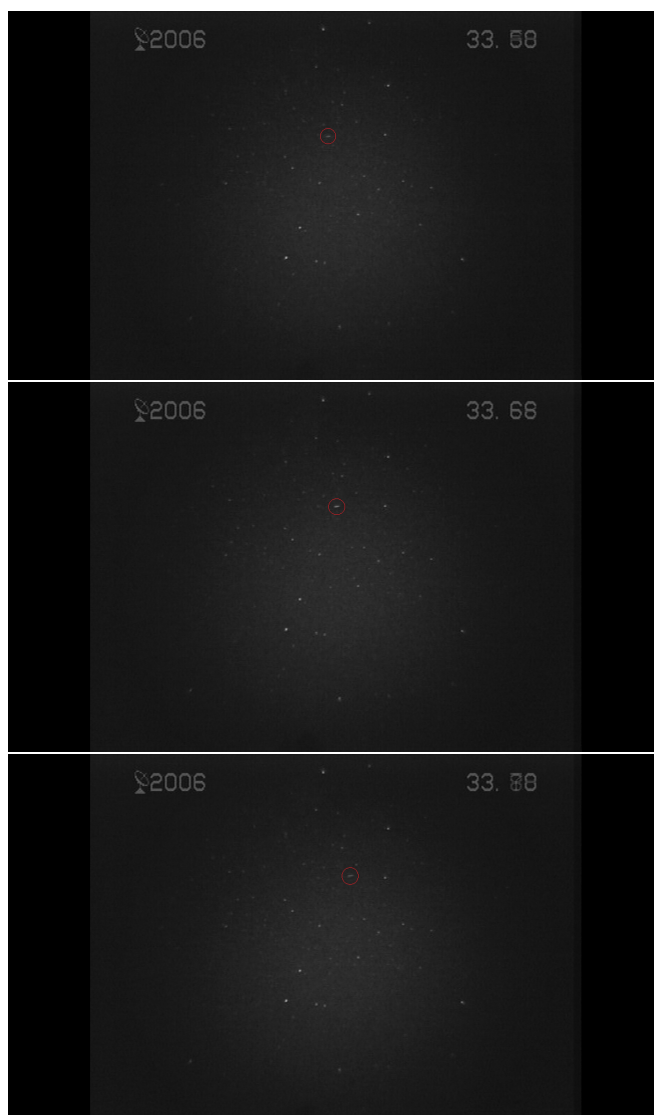
TYP	RTYP	MET	V	HB	HM	HE	ZR	LOGM	KB	PERI	APH	INCL	TJ
"C"	"J"	4.	25.99	98.1	87.2	81.6	9.	-1.72	7.3	0.97	5.2	36.8	2.58
"C"	"H"	2.	19.58	98.3	91.8	87.3	80.	-0.60	7.8	0.81	4.4	5.7	3.1
"C"	"A"	15.	65.41	115.8	108.1	100.6	72.	-2.41	7.8	0.96	35.2	131.2	-0.50
"C"	"J"	23.	16.21	90.5	83.5	77.5	42.	-1.28	7.20	0.94	4.3	7.7	3.8
"B"	"T"	3.	40.09	101.3	97.4	93.4	31.	-2.96	7.29	0.94	6.4	66.2	1.88
"C"	"A"	5.	60.04	112.6	109.8	101.1	61.	-3.21	7.8	0.96	-23.0	108.1	-0.86
"A"	"J"	6.	16.38	82.2	76.6	72.5	14.	-1.08	7.82	1.1	3.0	17.7	3.63
"C"	"A"	8.	58.47	113.0	107.7	100.5	63.	-2.70	7.4	0.93	29.5	107.9	-0.02
"C"	"A"	9.	53.08	110.5	103.9	99.2	60.	-3.07	7.7	1.00	2.2	107.8	2.97
"A"	"J"	10.	15.51	80.5	75.8	73.3	19.	-1.24	7.91	0.99	3.1	13.7	3.61
"A"	"J"	12.	60.58	107.6	100.6	90.0	65.	-2.96	7.44	0.59	17.6	123.1	0.06
"C"	"A"	17.	53.39	111.3	104.9	96.3	56.	-2.62	7.1	0.92	2.7	106.7	2.57
"C"	"A"	19.	60.27	113.7	107.9	104.0	63.	-3.14	7.3	0.94	69.2	112.3	-0.31
"A"	"J"	20.	22.63	90.5	86.4	82.9	5.	-2.23	7.50	0.99	4.4	30.7	2.90
"C"	"J"	21.	42.47	105.2	98.3	92.7	48.	-2.60	7.13	0.32	4.3	65.4	2.53
"A"	"J"	22.	17.57	86.8	80.9	78.4	38.	-1.60	7.58	0.87	3.2	10.2	3.56
"C"	"T"	25.	53.68	112.0	105.5	100.0	46.	-3.25	6.92	1.1	39.0	94.0	0.17
"B"	"H"	28.	24.62	94.8	89.9	86.9	56.	-2.00	7.36	0.33	1.7	11.6	5.77
"C"	"A"	29.	55.43	113.7	109.6	103.5	63.	-2.96	6.94	0.85	3.5	110.7	2.4
"B"	"H"	30.	30.74	99.8	92.2	87.0	63.	-1.92	7.25	0.26	2.7	6.3	4.15
"C"	"A"	32.	59.34	112.6	104.9	98.4	61.	-3.03	7.7	0.92	11.5	113.4	0.39
"C"	"J"	35.	60.03	113.5	102.3	94.0	50.	-2.44	6.96	0.62	203.7	116.4	-0.38
"C"	"J"	36.	24.22	96.8	91.9	87.4	42.	-2.10	7.12	0.96	4.3	33.0	2.89
"C"	"J"	37.	12.62	88.7	86.4	82.6	56.	-1.39	7.14	1.1	2.7	1.8	3.90
"C"	"H"	38.	23.25	98.8	94.1	87.7	43.	-2.04	6.93	0.65	3.5	13.2	3.37
"C"	"A"	41.	57.27	112.0	106.9	103.1	63.	-3.15	7.8	0.81	5.6	112.4	1.22
"C"	"T"	42.	37.73	103.5	95.7	84.3	20.	-2.39	7.4	0.94	4.4	62.8	2.45
"C"	"A"	43.	61.24	114.2	108.4	104.0	65.	-3.13	7.4	0.93	2.1	142.4	2.61
"C"	"A"	44.	61.63	115.0	109.9	104.2	65.	-3.28	6.99	0.83	2.5	143.4	2.31
"A"	"J"	46.	16.46	84.0	81.6	78.7	48.	-1.70	7.77	0.91	3.9	5.5	3.21
"C"	"J"	47.	26.82	102.3	89.6	82.5	28.	-1.57	6.78	1.1	10.6	37.5	1.84
"A"	"J"	48.	20.71	89.0	86.6	84.5	44.	-2.32	7.60	0.98	4.4	25.5	2.95
"B"	"A"	50.	56.73	109.9	106.4	103.3	72.	-3.00	7.29	0.75	1.2	143.1	4.57
"A"	"T"	53.	34.56	95.9	89.2	84.7	17.	-2.36	7.53	0.97	4.2	56.3	2.61
"A"	"J"	54.	11.68	76.2	74.1	71.0	35.	-1.25	7.92	1.1	1.4	6.1	5.34
"C"	"H"	55.	22.28	96.3	90.6	86.4	49.	-1.85	7.10	0.69	4.2	7.5	3.8
"C"	"J"	56.	20.77	94.6	85.7	82.8	21.	-1.92	7.8	1.00	4.1	27.0	3.4
"A"	"J"	58.	18.71	84.3	78.1	74.1	23.	-1.43	7.81	1.00	2.9	24.0	3.64
"C"	"A"	59.	52.53	109.9	93.2	85.5	55.	-1.49	7.7	0.85	3.4	101.6	2.22
"A"	"A"	60.	64.51	101.9	95.2	90.5	61.	-3.41	7.88	0.94	4.4	143.2	1.8
"A"	"T"	61.	30.67	94.8	88.9	78.3	20.	-2.37	7.49	0.99	2.5	51.2	3.62
"A"	"H"	62.	42.15	99.0	94.4	84.3	56.	-2.06	7.61	0.06	4.4	24.0	2.63
"C"	"A"	64.	58.33	113.4	107.6	101.3	63.	-2.64	7.1	0.76	33.0	108.9	-0.04
"C"	"A"	65.	65.83	113.4	106.4	100.3	56.	-3.23	7.10	0.99	20.8	133.6	-0.36
"A"	"A"	67.	55.33	98.9	93.2	88.6	53.	-3.28	7.90	0.87	1.5	125.3	3.87
"A"	"J"	68.	46.62	100.7	89.9	84.5	33.	-3.00	7.51	0.36	5.7	79.0	1.86
"A"	"J"	69.	17.27	85.2	84.8	81.6	20.	-2.07	7.65	0.84	1.9	16.8	4.73
"C"	"T"	70.	35.08	102.3	92.6	84.4	46.	-2.09	7.12	0.87	2.4	59.9	3.65
"C"	"H"	72.	22.95	99.1	89.1	85.8	52.	-1.49	6.93	0.58	2.9	5.4	3.86
"C"	"A"	73.	65.45	117.7	106.9	93.3	61.	-2.21	6.87	0.64	7.6	157.2	0.38
"C"	"J"	74.	57.17	114.6	107.4	103.1	81.	-2.28	7.14	0.29	42.5	113.6	-0.03
"C"	"A"	77.	61.74	113.7	107.5	102.9	54.	-3.38	7.00	0.97	14.9	119.5	0.07
"C"	"J"	78.	17.45	94.4	88.0	81.2	37.	-1.64	6.95	1.1	3.6	20.0	3.31
"A"	"H"	79.	25.3	90.3	88.2	83.5	59.	-2.14	7.77	0.49	2.9	0.6	3.88
"A"	"A"	80.	66.83	105.7	100.7	91.6	58.	-3.14	7.63	1.1	12.8	140.2	-0.17

TYP	RTYP	MET	V	HB	HM	HE	ZR	LOGM	KB	PERI	APH	INCL	TJ
"D"	"A"	86.	62.46	119.9	104.5	92.7	49.	-2.17	6.62	1.1	33.6	119.2	-0.30
"C"	"A"	87.	60.31	111.8	107.2	102.3	56.	-3.19	7.10	0.88	23.7	114.5	-0.05
"C"	"A"	88.	50.57	110.8	104.4	97.6	56.	-2.74	6.98	0.21	1.5	145.4	5.81
"C"	"A"	89.	65.66	112.3	107.5	100.7	61.	-3.46	7.20	1.1	4.0	148.8	1.10
"C"	"H"	91.	26.20	99.8	96.1	91.1	45.	-2.37	6.98	0.47	2.9	12.5	3.83
"A"	"A"	93.	65.17	101.5	98.6	91.2	66.	-2.96	7.97	0.95	3.4	152.2	1.42
"A"	"H"	94.	35.95	94.4	90.0	85.1	70.	-2.52	7.92	0.21	3.7	24.7	3.19
"B"	"T"	96.	32.88	96.8	91.4	87.3	27.	-2.72	7.41	1.1	3.1	55.0	3.17
"A"	"J"	97.	46.24	98.4	89.8	85.2	30.	-3.13	7.67	0.34	3.6	83.7	2.72
"C"	"T"	98.	42.92	108.3	104.6	98.4	23.	-2.96	6.85	0.96	3.4	76.4	2.63
"C"	"A"	99.	68.17	113.3	107.9	101.7	61.	-3.51	7.17	1.1	8.5	152.1	0.06
"C"	"A"	102.	65.07	113.6	107.6	103.3	64.	-3.32	7.13	1.1	2.6	159.5	1.92
"C"	"T"	104.	38.76	105.6	98.8	89.8	28.	-2.12	6.94	1.1	4.9	65.2	2.24
"A"	"A"	107.	53.65	101.1	92.7	85.8	36.	-3.24	7.63	0.95	2.5	108.0	2.66
"C"	"A"	108.	70.19	119.7	104.9	97.4	61.	-2.47	6.83	1.1	227.9	151.4	-1.06
"A"	"H"	109.	42.52	96.3	91.5	84.7	51.	-2.80	7.81	0.10	9.2	16.2	1.49
"C"	"A"	110.	55.56	110.5	103.9	95.0	42.	-3.16	7.4	1.1	2.8	112.2	2.35
"C"	"H"	111.	26.75	98.2	92.2	89.8	57.	-2.15	7.19	0.49	4.0	0.8	3.15
"C"	"T"	112.	37.64	107.6	103.7	97.9	28.	-3.06	6.77	1.1	5.2	62.5	2.20
"C"	"A"	113.	65.39	113.9	107.4	103.2	56.	-3.15	7.6	0.83	3.9	157.6	1.23
"D"	"J"	114.	26.00	104.4	89.8	83.9	30.	-1.59	6.59	1.1	5.0	38.2	2.63
"B"	"J"	115.	51.09	108.5	105.8	102.4	71.	-3.16	7.26	0.11	3.8	112.7	2.47
"A"	"T"	116.	36.82	92.7	89.7	83.7	19.	-2.57	7.86	0.95	2.3	65.4	3.65
"C"	"J"	118.	49.52	107.3	104.7	95.5	30.	-3.31	7.9	0.47	2.4	102.3	3.46
"B"	"A"	119.	60.09	107.8	102.7	88.6	47.	-2.89	7.32	0.97	14.0	114.3	0.21
"C"	"A"	120.	61.68	114.2	107.3	101.7	48.	-3.19	6.94	1.1	3.7	130.2	1.48
"C"	"A"	122.	54.67	110.0	101.8	97.8	26.	-3.14	7.1	0.91	12.1	99.6	0.61
"A"	"J"	125.	39.73	95.7	89.6	83.1	22.	-2.37	7.70	0.42	5.7	55.8	2.15
"C"	"H"	126.	40.86	108.3	97.8	93.2	44.	-2.68	6.85	0.20	21.8	26.8	0.96
"C"	"J"	128.	68.38	118.2	112.1	107.5	68.	-3.46	6.94	0.76	13.4	168.2	-0.29
"C"	"H"	130.	23.95	97.2	91.8	89.6	64.	-2.01	7.19	0.48	2.4	7.7	4.43
"C"	"A"	131.	63.07	117.4	107.2	97.2	40.	-2.66	6.75	0.96	7.0	129.7	0.57
"C"	"T"	132.	15.49	92.4	83.3	77.6	28.	-1.38	6.96	1.1	1.3	20.5	5.44
"A"	"J"	133.	38.87	95.8	91.7	85.8	64.	-2.39	7.83	0.59	4.6	59.1	2.46
"D"	"A"	134.	61.65	120.2	94.1	89.3	48.	-1.30	6.59	0.94	79.3	116.5	-0.40
"C"	"A"	136.	65.76	116.2	103.2	95.1	46.	-2.89	6.88	0.79	8.2	148.1	0.27
"C"	"T"	139.	31.76	103.3	96.8	89.1	38.	-2.14	6.91	1.00	5.7	49.5	2.30
"B"	"H"	140.	37.99	101.3	95.9	90.2	50.	-2.70	7.29	0.14	4.3	9.6	2.77
"A"	"A"	141.	58.05	99.9	96.1	88.5	43.	-3.04	7.83	0.99	3.4	118.2	1.88
"A"	"A"	148.	64.29	102.0	95.0	88.9	43.	-3.28	7.79	1.00	6.4	134.9	0.60
"C"	"A"	149.	61.58	111.9	103.4	100.3	47.	-3.09	7.8	0.94	8.5	122.4	0.49
"C"	"A"	150.	59.62	115.1	104.1	96.1	44.	-2.68	6.83	0.94	38.0	110.8	-0.15
"C"	"H"	152.	33.16	103.0	94.7	88.7	50.	-1.92	7.2	0.20	2.9	7.1	3.91
"A"	"T"	155.	43.49	94.6	90.5	84.2	39.	-2.72	7.92	0.95	7.3	73.3	1.59
"C"	"H"	156.	40.03	106.2	98.2	91.8	59.	-2.30	7.5	0.14	6.9	15.5	1.91
"C"	"H"	157.	25.31	98.1	89.6	85.8	49.	-1.89	7.10	0.49	3.0	7.6	3.77
"C"	"A"	158.	70.50	120.4	105.9	98.5	58.	-2.70	6.77	1.00	16.2	163.9	-0.55
"B"	"H"	161.	32.69	100.0	97.6	88.7	64.	-2.40	7.31	0.18	2.2	23.8	4.79
"D"	"A"	164.	56.58	132.5	89.6	83.8	42.	-0.80	5.88	0.92	62.8	101.5	-0.07
"D"	"A"	165.	66.44	121.1	97.1	89.8	37.	-2.06	6.58	0.76	193.0	141.7	-0.80
"C"	"J"	166.	69.68	118.3	101.4	93.2	66.	-2.06	6.94	1.1	7.3	172.6	0.10
"D"	"T"	170.	34.59	108.3	97.6	91.4	16.	-2.40	6.61	0.92	4.8	55.4	2.44
"A"	"H"	172.	26.1	93.7	89.6	85.8	47.	-2.25	7.47	0.56	4.3	12.9	2.98
"C"	"A"	173.	65.72	115.7	107.4	95.5	72.	-2.32	7.8	0.50	13.5	165.6	-0.09
"A"	"J"	160.	15.78	84.3	81.9	78.0	18.	-1.92	7.62	0.86	1.4	18.5	5.56

Příloha D

Záběry ze záznamu meteoru





První trojice obrázků zachycuje přelet meteoru zachycený stanicí Kunžak, druhá trojice ukazuje tentýž meteor ze stanice Ondřejov.

Příloha E

Ukázka programu pro statistické výpočty

```
REAL LAMBDA
INTEGER SKEX,SKINC, SKPER, SKV, SKTIS, SKTIS2, SKMA, SKC1, SKC2,
+ SKC, SKM2
SINC(X)=SIN(X)/X
open(28,file='ladeni.dat')
PI=3.141592654
DG=180./PI
ED0=147.-90.
E=23.5/DG
OPEN(4,FILE='ROJE.TXT',STATUS='OLD')
DO I=1,60
READ(4,*) ROJ(I),ZDROJ(I),RA(I),RQ(I),RI(I),ROM(I),RUZ(I)
4 FORMAT(A3,A17,F10.4,F7.3,F9.3,F7.1,F9.2)
IF(ROJ(I).EQ.' ') ROJ(I)=ROJ(I-1)
RE(I)=1.-RQ(I)/RA(I)
END DO
CLOSE(4)
OPEN(5,FILE='METEOR.LST',STATUS='OLD')
N=0
10 READ(5,*,END=99)
READ(5,*)
READ(5,1) MET,IROK,IMES,IDEN,CH,CM,CS,AR,DR,ZR,V,AG,DGC,VG,A,E,QP,
+ QA,OM,UZEL,SKL,AINV,HB1,HM1,HE1,AMAG1,AMAS1,NS1,PKB,Q
1 FORMAT(I8,I5,1X ,I2,1X ,I2,F4.0,2F3.0,7F7.2,F8.3,3F7.3,
+F7.2,F8.3,F7.2,F7.3,1X,3F6.1,F6.2,E9.1,I4,F6.2,F6.0)
READ(5,2) AR0,DR0,ZR0,V0,AG0,DG0,VG0,A0,E0,QP0,QA0,OM0,UZEL0,
+ SKLON0,AINV0,HB2,HM2,HE2,AMAG2,AMAS2,NS2
2 FORMAT(29X,7F7.2,F8.3,3F7.3,
+F7.2,F8.3,F7.2,F7.3,1X,3F6.1,F6.2,E9.1,I4)
HB=MAX(HB1,HB2)
HM=(HM1+HM2)/2.
HE=MIN(HE1,HE2)
AMAG=MIN(AMAG1,AMAG2)
AMAS=MAX(AMAS1,AMAS2)
M=0
DO I=1,N
IF(MET.EQ.U(I,1)) M=I
END DO
```

```

IF(M.EQ.0) THEN
N=N+1
M=N
END IF
ROZ(M)=ABS(HB1-HB2)
POM(M)=AMAS1/AMAS2
U(M,1)=MET
U(M,2)=V
U(M,3)=HB
U(M,4)=HM
U(M,5)=HE
U(M,6)=ZR
U(M,7)=LOG10(AMAS)
U(M,8)=PKB
U(M,9)=QP
U(M,10)=QA
U(M,11)=SKL
U(M,15)=E
U(M,12)=5.202/A+2.*SQRT(A/5.202*(1.-E**2))*COS(SKL/DG)
CALL PREVOD(AG,DGC,ED,ES)
CALL WINKEL(ED,ES,ED0,X,Y)

...

SUBROUTINE WINKEL(AG,DGC,AG0,X,Y)
SINC(X)=SIN(X)/X
PI=3.141592654
DG=180./PI
FI1=50./DG
CFI1=COS(FI1)
AG=AG-AG0
IF(AG.GT.180.) AG=AG-360.
IF(AG.LT.-180.) AG=AG+360.
IF(AG.GT.180.) AG=AG-360.
IF(AG.LT.-180.) AG=AG+360.
AGR=AG/DG
DGCR=DGC/DG
ALF=ACOS(CFI1*COS(AGR/2.))
X=0.5*(AGR*CFI1+2.*COS(DGCR)*SIN(AGR/2.)/SINC(ALF))
Y=0.5*(DGCR+SIN(DGCR)/SINC(ALF))
RETURN
END

SUBROUTINE PREVOD(AGD,DGCD,ED,ES)
PI=3.141592654
DG=180./PI
E=23.5/DG
AG=AGD/DG
DGC=DGCD/DG
ES=ASIN(SIN(DGC)*COS(E)-COS(DGC)*SIN(AG)*SIN(E))
COSED=COS(DGC)*COS(AG)/COS(ES)
SINED=(SIN(DGC)*SIN(E)+COS(DGC)*SIN(AG)*COS(E))/COS(ES)
IF(COSED.GT.0.) THEN
ED=ASIN(SINED)*DG
ELSE
ED=180-ASIN(SINED)*DG
ENDIF
IF(ED.LT.0.) ED=ED+360
ES=ES*DG
RETURN
END

```