

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky  
Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně

---

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

# **PLOŠNÁ FOTOMETRIE KOMET**

BOŘIVOJ HLAVA

BRNO 2009

Děkuji především vedoucímu mé bakalářské práce Filipu Hrochovi za výborné rady, trpělivost, ochotu a množství času, jenž věnoval mně a této práci. Dále bych rád poděkoval také mojí přítelkyni Magdě za trefné poznámky k této práci a za velkou pomoc při odstraňování gramatických chyb.

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci napsal samostatně, výhradně s použitím citovaných pramenů a podle pokynů vedoucího bakalářské práce. Souhlasím se zapůjčováním práce a jejím zveřejňováním.

V Brně dne

Bořivoj Hlava

**Anotace:**

Tato práce se zabývá plošnou fotometrií komet 17P/Holmes a C/2006 W3 (Christensen). V prvních třech kapitolách nalezneme přehled poznatků o kometách, stručné informace o fotometrii, informace o využitých observatořích a o pozorovaných kometách. Praktická část práce obsahuje zpracování a analýzu získaných snímků a následné srovnání výsledků s fotometrií galaxií.

Klíčová slova: kometa, 17P/Holmes, C/2006 W3 (Christensen), plošná fotometrie

**Abstract:**

This work deals with surface photometry of comet 17P/Holmes and C/2006 W3 (Christensen). First three chapters contain review of information about comets, some information about photometry, information about used observatories and about observed comets. Practice section contains process and analysis of our images and confrontation results with photometry of galaxies.

Keywords: comet, 17P/Holmes, C/2006 W3 (Christensen), surface photometry

# Obsah

Úvod.....	6
<b>1 Komety.....</b>	<b>7</b>
1.1 Původ sluneční soustavy.....	7
1.2 Historie studia komet.....	7
1.2.1 Starověké kometární představy.....	8
1.2.2 Komety křižující mezi planetami.....	8
1.2.3 Eliptická dráha.....	9
1.3 Fyzika komet.....	10
1.3.1 Jádro.....	10
1.3.2 Koma.....	11
1.3.3 Plazmový ohon.....	12
1.3.4 Prachový ohon.....	13
1.3.5 Chemické složení.....	14
1.4 Dynamika kometárních drah.....	15
1.4.1 Krátkoperiodické komety.....	15
1.4.2 Dlouhoperiodické komety.....	16
1.4.2 Vznik a původní dráhy komet.....	17
<b>2 Fotometrie.....</b>	<b>19</b>
2.1 Elektromagnetické záření.....	19
2.1.1 Detekce elektromagnetického záření v astronomii.....	19
2.1.2 Hvězdná velikost.....	20
2.2 Plošná fotometrie komet.....	21
2.2.1 Původ a vznik kometárního záření.....	21
<b>3 Pozorování.....</b>	<b>23</b>
3.1 Místa pozorování.....	23
3.1.1 Observatoř ÚTFA.....	23
3.1.2 Hvězdárna a planetárium Mikuláše Koperníka.....	23
3.2 Pozorované komety.....	23
2.1.1 17P/Holmes.....	23
2.1.1 C/2006 W3 (Christensen).....	24
<b>4 Zpracování pozorování.....</b>	<b>25</b>
4.1 Úvod.....	25
4.2 Příprava snímků.....	25
4.2.1 Korekce.....	25
4.2.2 Skládání.....	26
4.2.3 Kalibrace.....	27

4.3 Fitování elips .....	28
4.3.1 Fitování podle intenzit (FI) .....	28
4.3.2 Fitování podle tvaru izofot (FTI) .....	28
4.3.2 Využití metod .....	29
<b>5 Výsledky .....</b>	<b>30</b>
5.1 Zpracování a porovnání výsledků .....	30
5.1.1 Problém hvězd .....	30
5.1.2 Porovnání fotometrických profilů .....	31
5.1.3 Porovnání excentricity .....	35
5.2 Srovnání s plošnou fotometrií galaxií .....	37
5.2.1 de Vaucouleursův zákon .....	37
5.2.2 Porovnání výsledků .....	38
<b>Závěr .....</b>	<b>40</b>
<b>Literatura .....</b>	<b>41</b>
<b>Přílohy .....</b>	<b>44</b>

# Úvod

Komety lidstvo fascinovaly odjakživa. Během starověku a středověku byly považovány za nositelky špatných zpráv – předzvěstí katastrof. V současné době už je poznání komet o kus dál. Před více jak 20 lety proletěla kolem nejslavnější Halleyovy komety poprvé člověkem postavená sonda. V roce 2005 dokonce řízeně narazil projektil sondy Deep Impact do komety 9P/Tempel, abychom mohli studovat materiál, který tento náraz z komety vymrštil. Je zřejmé, že průzkum komet kráčí mílovými kroky vpřed a budoucí plány nejsou o nic méně ambiciózní. V roce 2014 by měla sonda Rosetta (ESA) doručit ke kometě přistávací modul.

I přes to, že jsme se za posledních několik desetiletí dozvěděli o kometách spoustu nového, pořád zůstává mnoho otázek nezodpovězených. Dalším poznáním těchto zajímavých objektů naší sluneční soustavy se dozvíme něco více nejen o kometách samotných, ale o celém našem planetárním systému a jeho historii.

Tato práce se věnuje plošnému rozložení jasů v komě komet. Izofoty v komě se aproximují elipsami a následným zpracováním se vytváří tzv. fotometrické profily. Na základě vzhledu těchto profilů se usuzuje na některé parametry komet a vzhled profilů se porovnává s poznatky z fotometrie galaxií.

# Kapitola 1

## Komety

### 1.1 Původ sluneční soustavy

Podle moderních představ se datuje vznik naší sluneční soustavy do doby přibližně před 4,6 miliardami roků. Předpokládáme, že právě tehdy se začal, pravděpodobně jako následek exploze blízké supernovy, smršťovat oblak mezihvězdné hmoty, z kterého později vzniklo Slunce, planety a spousta dalších menších těles nacházejících se v našem planetárním systému. Značná část těchto těles prošla od svého vzniku různými přeměnami. Máme tu především energii přicházející ze Slunce a poměrně časté srážky těles. Tyto, ale i spousta dalších procesů, se podílely na formování těles sluneční soustavy a jejich materiál více či méně pozměnily.

Avšak existují i tělesa nepozměněná, nebo pozměněná pouze velice málo. Tělesa, jejichž složení by mělo odpovídat složení našeho planetárního systému v jeho počátcích. Takovými tělesy jsou právě komety. Za vše může skutečnost, že hlavní zásobárna komet – Oortův oblak – se nachází na okraji našeho systému. Kometární jádra jsou v něm značně izolována od většiny vlivů, které by mohly materiál komet významněji ovlivnit a pozměnit, a to včetně těch nejzásadnějších výše popsaných. Energie přicházející sem ze Slunce je v těchto místech už málo a hustota těles je tak nízká, že ke srážkám dochází jen velmi zřídka.

A tak kromě krásné podívané, kterou nám komety na noční obloze dovedou čas od času přichystat, nám také pomáhají poznávat a představovat si, jak pravděpodobně vypadala naše sluneční soustava při svém vzniku a jak postupně probíhal její vývoj až po současnost.

### 1.2 Historie studia komet

Lidstvo komety na nebi pozorovalo už od nepaměti a zároveň s pozorováními se snažilo také pochopit, co to komety vlastně jsou a kde se na nebi znenadání berou. I přes to, že již v průběhu starověku byly učiněny první pokusy o podání fyzikální vysvětlení kometární podstaty, byly kometám v průběhu starověku a později i středověku přikládány nadpřirozené vlastnosti. Po dlouhá staletí se věřilo, že zjevení komety zvěstuje nějakou pohromu nebo krveprolití. Současně s tímto nejvýznamnějším kometárním výkladem se komety používaly také k přesnějším astrologickým předpovědím. Takové předpovědi, tedy přesněji hlavně jejich příprava, nám do značné míry pomohly při zkoumání komet, neboť poskytovaly leckdy poměrně přesná pozorovatelská data. K předpovědím bylo nutné znát kromě polohy komety i její tvar, velikost, barvu, dobu po kterou byla pozorovatelná, apod.

Nicméně i již zmíněné fyzikální vysvětlení podstaty komet prošlo dlouhou cestou vývoje. Od počátků, kdy byly komety chápány jako zažehnuté výpary v atmosféře, přes poznání kometární periodicity až po současnost, kdy jsou komety zkoumány vesmírnými sondami.

## 1.2.1 Starověké kometární představy

První všeobecně uznávaný pokus o vysvětlení kometární podstaty byl předložen Aristotelem (384 – 322). Aristoteles dělil svět na sublunární a supralunární, přičemž jak už název napovídá, sféra Měsíce tvořila jakousi hranici mezi světem sublunárním (pod Měsícem) a supralunárním (Měsíc a vše za ním). Supralunární svět byl považován za prakticky neměnný a byl dále dělen do soustavy dalších sfér, na nichž byla upevněna všechna nebeská tělesa. Přestože byl Aristoteles dozajista geniálním myslitelem své doby, komety zařadil na základě jejich proměnlivosti chybně do světa sublunárního, když je označil za atmosférický jev vznikající vzplanutím suchých a teplých výparů.

I když jsme ve starověku, době dalece předcházející objevení dalekohledu, objevujeme už tady názory mnohem prozíravější a modernější, než je názor Aristotelův. „Nemyslím, že komety jsou náhlá vzplanutí, ale zařazuji je mezi trvalé výtvořiny přírody. Je to výsada planet, že opisují na své oběžné dráze oblouky. Jestli mají takovou zakřivenou dráhu komety, nemohu říci. Ty dvě, které se objevily v naší době, ji určitě měly.“ [1] Předpoklady a poznání, jež se stanou triumfem astronomie až na přelomu 17. a 18. století. Takto je vyslovuje Lucius Annaeus Seneca (asi 4 př.n.l. – 65 n.l.), filozof, politik a literát císařského Říma. Seneca jde ještě dále a kromě zařazení komet mezi planety předpokládá dokonce i jejich periodicitu.

I přes tyto moderní myšlenky se především díky obrovské autoritě Aristotela uchytil předpoklad výparů v atmosféře Země. Tento názor byl postupně přejat dalšími autory a jako paradigma byl šířen jak během života tvůrce, tak i dlouhá staletí po jeho smrti. Například ještě před přibližně čtyřmi stoletími Daniel Basilius z Deutschenberka (1585 – 1626) napsal: „Vědětí tedy sluší, že kométa, jako i jiná ohnivá v povětří plápolání, jest dejm a pára z země sanejtrné, mastné a suché, paprslkováním a mocí jak Slunce, tak i jiných planetův a hvězd vzhůru do povětří shromážděná, kdež potomně hnutím jak živlů, tak i nebe se zapaluje a způsob okrouhlé, vlasaté, dlouhé aneb ocasaté figury následuje.“ [1]

## 1.2.2 Komety křižující mezi planetami

Chybný názor o podstatě komet jakožto atmosférického jevu dokázal vyvrátit až v druhé polovině 16. století vynikající astronom dánského původu Tycho Brahe (1546 – 1601). Po tom co v roce 1577 pozoroval a proměřoval polohu jasné komety, dospěl k závěru, že se kometa musí nacházet až za drahou Měsíce a pohybuje se tedy ve stejném prostoru jako planety. Stejně jako u planet nebyl totiž Tycho schopen tehdejšími přístroji změřit denní paralaxu komety, narozdíl od Měsíce, jehož denní paralaxa v té době už měřitelná byla. Tím Tycho zpochybnil soustavu sfér a zároveň opravil aristotelovskou představu komet v atmosféře Země.

Po tom, co byly komety správně identifikovány jako tělesa pohybující se naší sluneční soustavou, však vyvstanuly další otázky. Tou první, přímo se nabízející, bylo určení dráhy komety v prostoru. Řešení tohoto problému se jako jeden z prvních chopil Johannes Kepler (1571 – 1630), který nám mimo jiné dal tři slavné zákony o pohybu těles a upřesnil, že se planety pohybují po elipsách. Pro komety navrhl řešení zcela odlišné od planet. Předpokládal, že komet je ve vesmíru obrovské množství a v rychlém sledu za sebou vznikají a zase zanikají. Přičemž podle Keplera byla každá sledovaná kometa jiná a každá



míjela Zemi po dráze podobné přímce. Ironií osudu tak soudil Kepler především na základě pozorování komety z roku 1607, komety, která bude později pojmenována Halleyova. Keplerův chybný předpoklad byl založen na skutečnosti, že komety byly pozorovány pouze na velmi krátkém úseku svojí eliptické dráhy, který se mohl snadno jevit jako přímka. Navíc v té době ještě nebylo známo, že kometa dělá kolem Slunce obratku, a tak byla jedna a tatáž kometa před přísluním a po přísluní běžně brána jako by šlo o dvě různé komety.

4. listopadu 1680 objevil královský hvězdář berlínské observatoře Gottfried Kirch (1639 – 1710) jednu důležitou kometu, která byla později pojmenována po svém objeviteli. Dráha této komety byla k postavení Země velice výhodná, takže ji bylo možné pozorovat od listopadu 1680 až do února 1681. Před přísluním i po něm – od malého a nepříliš jasného objektu až po zářivou obryni a zase zpět. Toho, že kometa provedla obratku kolem Slunce, si díky tomu všiml větší počet pozorovatelů prakticky najednou, mezi nimi takové osobnosti jako John Flamsteed (1646 – 1719), Sir Isaac Newton (1643 – 1727) nebo Edmond Halley (1656 – 1742).

Právě následná spolupráce posledních dvou zmíněných posunula nebeskou mechaniku, i když nejen tu, o pořádný kus dále. Newton za vydatné podpory a pobízení ze strany Halleyho sepsal na počátku roku 1685 dílo *O pohybu těles*. Rok na to následuje stěžejní Newtonovo dílo *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, zkrácené známé jen jako *Principia*, dílo které je významným mezníkem jak pro celou fyziku, tak i pro výzkum komet. Je zde popsáno působení gravitace mezi tělesy a předloženo je i vysvětlení pohybu a tvaru drah všech těles v okolí Země včetně komet. Jejich pozorování je tu předloženo dokonce jako jeden z důkazů správnosti nové gravitační teorie.

### 1.2.3 Eliptická dráha

Newton ve svých dílech předpokládal pro komety dráhu parabolickou. Toho se chopil Halley a pokračoval ve studiu komet, přičemž použil Newtonovu metodu stanovení dráhy. Rozhodl se použít a prostudovat všechna svědectví o kometách, která mohla být dostatečně důvěryhodná a přesná, celkem vybral 24 komet. Mezi nimi byla také kometa z roku 1531, pozorovaná Petrem Apianem (1495 – 1552), kometa z roku 1607, kterou sledoval Kepler a kometa z roku 1682, jež pozoroval sám Halley. Po výpočtu parabolických drah Halley došel k závěru, že by tato tři pozorování mohla být projevem stejného nebeského tělesa – komety, která se pravidelně vrací. Na základě tohoto předpokladu propočítal dráhu komet znovu, ale nyní počítal dráhu eliptickou. Halley zjistil, že se skutečně jedná o jednu kometu a předpověděl následně její návrat na rok 1758. Kometa se předpovězeného roku bohužel neukázala, ale jak spočítal pařížský matematik Alexis Claude Clairaut (1713 – 1765), nebyla to náhoda a Halleyho předpověď podložená gravitační teorií opravdu byla správná. Zpoždění 2 roky bylo způsobeno gravitačním vlivem Jupiteru a Saturnu.

Následně nebeskou mechaniku, a tím i určování a propočet dráhy komet, doladili do detailu především Joseph Louis Lagrange (1736 – 1813) a Pierre Simon de Laplace (1749 – 1827). Laplace ve svém díle *Mécanique céleste* podal důkladný a logický přehled, zahrnul a zmínil zde vše. Od komet až po planety s měsíci a nezapomíná se zmínit ani o dalších důležitých částech nebeské mechaniky, jako jsou např. precese, nutace a librace.

## 1.3 Fyzika komet

Slovo kometa pochází z řečtiny a vystihuje její vzhled. Kometa vypadá jako hvězda s vlasy nebo ocasem, v češtině se proto ujal i dnes již poměrně zastaralý název – vlasatice. Pod slovem kometa se obvykle rozumí rozsáhlý nebeský úkaz, skládající se z pevného kometárního jádra obklopeného komou. Celý úkaz dotváří následně ještě rozsáhlý ohon, který je dvojího druhu – plasmový a prachový.

### 1.3.1 Jádro

Kometární jádro je pevné těleso s průměrem v rámci několika kilometrů, skládající se z důkladně promíchaného ledu<sup>1</sup> a prachu. Koncept kometárního jádra jakožto zmrzlého slepence nebo „špinavé sněhové koule“ původně navrhl v roce 1950 americký astronom Fred Whipple (1906 – 2004). Ve vzdálenějších částech sluneční soustavy je kometa tvořena pouze jádrem a ostatní části (koma, ohon) kometa postrádá. Ale jak se jádro na své parabolické dráze blíží Slunci, začíná se jeho povrch ohřívat a díky tomu zmrzlé plyny sublimují. Tímto procesem z jádra postupně začínají unikat různé plyny, které s sebou strhávají i některé pevné části, a vytváří tak kolem jádra rozsáhlou komu.

Jedním z důležitých efektů výše popsaného procesu jsou negravitační síly, které ovlivňují pohyb komety. V 19. století bylo lidstvo již schopno spočítat dráhy krátkoperiodických komet na základě gravitačního působení velice přesně, nicméně u některých krátkoperiodických komet (2P/Encke, 1P/Halley) byly pozorovány rozdíly mezi vypočteným průchodem komety periheliem a jejím skutečným průchodem. Rozdíl se pohyboval v rámci několika dní a byl to jeden z opěrných bodů pro Whippleovu teorii ledového slepence. Tato teorie vysvětlila, že sublimující plyny fungují na podobném principu jako raketový motor. Plyny unikající určitou rychlostí z jádra udělují na základě 3. newtonova zákona o akci a reakci jádru impuls síly v opačném směru.

O tom, zda je kometa těmito negravitačními silami bržděna nebo naopak urychlována, rozhodují dvě základní skutečnosti. První je směr rotace jádra. Jádro je zahříváno mnohem více ze strany přivrácené aktuálně ke Slunci, takže z této strany je i únik materiálu mnohem intenzivnější. Směr rotace vůči oběžné dráze rozhodne o tom, jestli dojde k urychlení nebo naopak zpomalení komety tímto unikajícím materiálem. Druhou skutečností je fakt, že aktivita komety není přesně závislá na její vzdálenosti od Slunce. Pokud dráhu rozdělíme přímkou vedoucí periheliem a afeliem na dvě symetrické části, v odpovídajících bodech těchto dvou částí bude kometární aktivita různě velká. Tato asymetrie vede ke změně oběžné doby tělesa.

Model špinavé sněhové koule byl potvrzen snímky, které nám zaslaly v roce 1986 při průletu kolem komety 1P/Halley sondy Vega a Giotto. Jádro této komety bylo identifikováno jako nepravidelné těleso s rozměry 16 x 8 x 7 km. Aktivní oblasti s výtrysky plynů pokrývají asi 30% oblasti ozářené sluncem, noční strana jádra je v mnohem menší míře pokryta aktivními oblastmi také. Překvapující na snímcích je malé albedo jádra. Jádro Halleyovy komety odráží pouze přibližně 3,5% dopadajícího slunečního záření. Tento nečekaný jev je pravděpodobně způsoben na uhlík bohatými organickými molekulami, které pokrývají většinu jádra. Hmotnost tohoto jádra byla určena na  $1 - 6 \cdot 10^{14}$  kg.

---

<sup>1</sup> Nejedná se pouze o vodní led, i když ten tvoří naprostou většinu.



Obrázek 1.1: Snímek jádra komety 1P/Halley pořízený sondou Giotto 14. března 1986. Slunce se na snímku nachází vlevo, 29° nad horizontem. Nejmenší rozlišitelné detaily na snímku mají rozměr asi 100 m. [2]

Průměrná hustota kometárního jádra byla na základě měření a pozorování několika různých komet stanovena na  $400 - 1200 \text{ kg/m}^3$ . V roce 1994 nám s řešením problému, jaká je stavba kometárního jádra, významně pomohla kometa Shoemaker-Levy 9, která dopadla na Jupiter poté, co se předchozího roku díky gravitačnímu působení planety rozpadla na množství menších fragmentů. To nám umožnilo poměrně přesně spočítat síly působící na jádro komety a tak určit jeho pevnost. Výpočty ukázaly, že síla dostačující na rozdělení jednotlivých částí komety je poměrně malá – přibližně  $10^2 \text{ N/m}^2$ , tento výsledek potvrdila i pozorování některých dalších komet, roztrhaných při přílišném přiblížení ke Slunci. Jádro komety je tedy pravděpodobně tvořeno málo soudržnou konglomerací menších ledových „kometisimál“.

### 1.3.2 Koma

Koma kolem kometárního jádra vzniká, když se kometa přiblíží ke Slunci. Sluneční záření ohřívá jádro, v důsledku toho dochází k sublimaci některých těkavějších látek, především vody. Vznikající plyny následně unikají do okolního vakua, gravitace kometárního jádra je příliš malá, než aby dokázala udržet stabilní atmosféru. Molekuly plynů jsou od jádra urychlovány rychlostmi odpovídajícími jejich tepelnému pohybu. Unikající plyny strhávají z povrchu komety i zrnka prachu, menší zrnka jsou urychlena na rychlost unikajícího plynu, větší zrnka mají rychlost nižší.

Zjednodušený model počítá s tím, že k úniku plynů tvořících koma dochází rovnoměrně z celého povrchu jádra. Nicméně ve skutečnosti je celá situace mnohem složitější a komplexnější. Na noční straně jádra je únik plynů výrazně nižší. Navíc ani na ozářené straně jádra není únik rovnoměrný a jsou zde aktivní a neaktivní oblasti. Složitost modelování vzniku komy a pohybu unikajících plynů dokumentuje obrázek 1.1 s množstvím viditelných výtrysků.

Ze zhruba desítky různých původních molekul jsou v roztahující se komě tvořeny spousty nových chemických sloučenin. Může za to energie ze slunečního záření, sekundární elektronové procesy a také některé v plynech uskutečňované chemické reakce. Sluneční záření, především jeho ultrafialové složky, vytváří radikály a ionty. Vysoce reaktivní radikály a ionty interagují především s neutrálními atomy a molekulami. Děje se tak ve vnitřních částech komy, kde je tlak dostatečně velký, aby k srážkám jednotlivých částic docházelo relativně často. Disociací vody vzniká vodík (H) a hydroxilový radikál (OH). Obě částice mají značné množství energie, přičemž vodík vzhledem ke svojí nižší hmotnosti expanduje rychleji než ostatní částice v komě. Důsledkem toho je obrovské vodíkové halo obepínající komu s obvyklým rozměrem  $\sim 10^5$  km. Toto vodíkové halo je viditelné pouze v ultrafialové části spektra a ze Země je nepozorovatelné. Jeho existence byla poprvé potvrzena družicí OAO-2 v roce 1969.

### 1.3.3 Plazmový ohon

Kometární plazmový nebo iontový ohon má svůj původ ve srážkách molekul a radikálů v komě s částicemi slunečního větru, při kterých dochází k výměně náboje částic. Na takto poznamenané kometární částice začne následně značnou silou působit magnetické pole Slunce, které vzniklé ionty prudce urychluje ve směru od Slunce. Tím u komety vzniká přímý plazmový ohon, často nazývaný také ohon Typu I. Jeho typicky namodralou barvu způsobují ionty  $\text{CO}^+$ .

Před tím, než se plazmová fyzika vyvinula na důležitou disciplínu vesmírné fyziky, snažili se fyzikové vysvětlit původ plazmového ohonu jinými způsoby, založenými na některých prvotních průzkumech tohoto jevu. U zrodu moderního studia interakce mezi kometou a slunečním větrem stál německý astrofyzik Ludwig Biermann (1907 – 1986), který v roce 1951 začal statisticky porovnávat měření směru plazmového ohonu několika komet. Zjistil, že směr ohonu se pohybuje v rozmezí  $3^\circ$  od přímého směru od Slunce. Biermann z toho udělal závěr, že musí existovat „sluneční korpuskulární<sup>2</sup> záření“, které interaguje s kometárními ionty a urychluje je na vysoké rychlosti. Rychlost částic tohoto slunečního záření stanovil na 100 km/s.

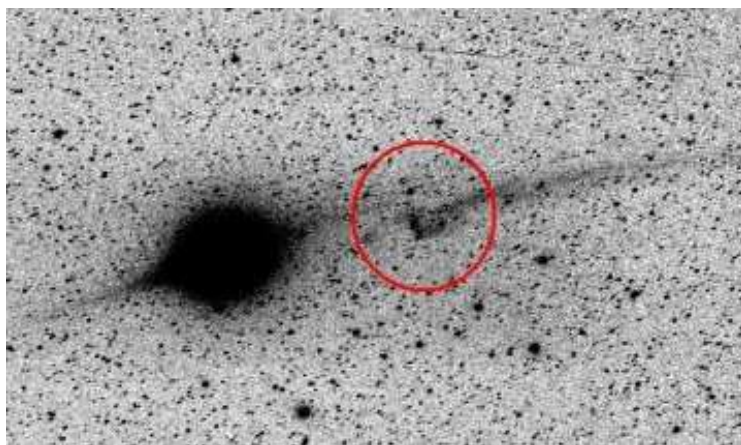
Toto vysvětlení ale později narazilo na jisté nesrovnalosti. Částice slunečního plazmatu by musely mít obrovskou hustotu, aby byly schopny vytvářet plazmový ohon v takové podobě, v jaké ho pozorujeme. Tento problém vyřešil švédský plazmový fyzik Hannes Alfvén (1908 – 1995), když předpokládal, že magnetické pole Slunce se rozkládá napříč meziplanetárním prostorem do značných vzdáleností od Slunce. Kometa se pohybuje v tomto magnetickém poli a její částice jsou urychlovány především tímto polem směrem od Slunce.

V blízkosti kometárního jádra vzniká šoková vlna. Nalezneme zde místo, kde jsou kometární částice, samotným jádrem urychlené směrem ke Slunci, interakcí se slunečním větrem a magnetickým polem zpomaleny až se zastaví. V blízkém okolí jádra vzniká dutina v magnetickém poli, která je následně těmito částicemi obtékána. Hranice mezi dutinou obklopující jádro a obtékajícím plazmatem se nazývá ionopauza.

---

<sup>2</sup> Korpuskulární záření je představováno proudem částic. Jedná se tedy o uspořádaný pohyb velkého množství částic. [3]

Plazmový ohon často vykazuje značně nepravidelné struktury, nebo se dokonce od komety oddělí, aby následně kometě vyrostl nový plazmový ohon. Předpokládáme, že tento jev je způsoben přechodem přes hranici, kde sluneční magnetické pole mění polaritu.



Obrázek 1.2: Održený plazmový ohon komety C/2007 N3 Lulin. [4]

### 1.3.4 Prachový ohon

Prachové částice jsou uvolňovány z jádra a začleňují se do expandujícího plynu tvořícího komu. Původní směr jejich pohybu je totožný s pohybem okolního plynu – směrem od jádra. Následně se ale směr všech prachových zrněk mění v důsledku tlaku slunečního záření na směr od Slunce.

Zpočátku to vypadá, že se prachová zrnka pohybují po stejné oběžné dráze jako komet, pokud zanedbáme počáteční rychlost, kterou jim udělí plyn unikající z jádra. Nicméně jak jsou malá prachová zrnka<sup>3</sup> urychlována postupně tlakem slunečního záření ve směru od Slunce, velká poloosa jejich oběžné dráhy se pomalu zvětšuje. Důsledkem toho se snižuje jejich oběžná rychlost a zrnka se postupně vzdalují od kometárního jádra i ve směru oběhu. Tento efekt vytváří zahnutost prachového kometárního ohonu pozorovanou u většiny komet.

Vzhledem k tomu, že výsledný účinek slunečního větru na zrnka je dán poměrem průřezu zrnka a jeho hmotnosti, vzdalují se různě velká zrnka od sebe v závislosti na svojí velikosti. Menší zrnka jsou urychlována ve směru od Slunce rychleji, velká zrnka naopak pomaleji. Také produkce prachu může být periodická nebo pouze sporadická pro jednotlivé aktivní oblasti na povrchu jádra. Občas může dojít dokonce k „výbuchu“ na povrchu jádra, při kterém je produkováno obrovské množství částic velmi rozdílných rozměrů v poměrně krátkém časovém úseku. Všechny tyto efekty vytvářejí v prachovém ohonu komety složité struktury.

V roce 1866 Giovanni Schiaparelli (1835 – 1910) zjistil, že oběžná dráha meteorického roje Perseidy je nápadně podobná oběžné dráze komety 109P/Swift-Tuttle. To bylo první definitivní spojení mezi kometami a meteorickými roji. Od té doby bylo identifikováno několik komet jako původce některého meteorického roje. Např. komet 1P/Halley je původcem Aquarid a Orionid, komet 55P/Tempel-Tuttle je spojována s Leonidami a komet 2P/Encke s Tauridy. Za vše může obrovská eroze povrchu kometárního jádra během

<sup>3</sup> Velikost prachových zrněk je obvykle v rozmezí 1 – 5  $\mu\text{m}$ .

průchodu vnitřními částmi sluneční soustavy. Kromě menších prachových zrn, tvořících prachový ohon, se z komety uvolňují a jsou proudy plynů strhávány i větší částice ( $r > 100 \mu\text{m}$ ). Vzhledem ke své relativní velikosti nejsou tato zrna tak snadno odfouknuta z oběžné dráhy komety tlakem slunečního záření. Jejich dráha je proto pozměněna pouze málo, z části rychlostí udělenou zrnům plyny unikajícími z jádra a z části právě tlakem slunečního záření.

Pokud oběžnou dráhou větších kometárních zrn proletí Země, dochází ke srážkám těchto částic s naší planetou. Částice vstoupí velkou rychlostí do atmosféry, třením se zahřejí na vysoké teploty a vypaří, čímž vzniká pozorovatelný jev zvaný meteor. Protože je částic při průchodu Země jejich oběžnou dráhou velké množství, můžeme pozorovat množství meteorů v krátkém časovém úseku, což je jev označovaný jako meteorický roj. Meteory typicky shoří ve výškách 80 – 120 km nad povrchem. Relativní rychlost vůči Zemi se pohybuje mezi 15 – 25 km/s u meteorů spojených s kometami Jupiterovy rodiny (např. 2P/Encke) a 50 – 70 km/s u meteorů pocházejících od komet Halleyova typu (např. 109P/Swift-Tuttle).

### 1.3.5 Chemické složení

Jak bylo zmíněno už v předchozím textu, studium chemického složení komet je důležité, protože zde nalézáme záznam chemického složení prvotní sluneční mlhoviny, zamrzlý do kometárního ledu a prachových zrn. Složení komet bylo zkoumáno pomocí identifikace čar jednotlivých prvků ve spektru, v několika případech hmotnostním spektrometrem umístěným na sondách prolétajících v blízkosti komety. Sonda Stardust v roce 2006 dokonce dopravila vzorek kometárního prachu na Zemi.

V kometárním materiálu bylo objeveno velké množství různých druhů molekul, od jednodušších, jako např.  $\text{C}_2$ ,  $\text{S}_2$ ,  $\text{CO}_2$  [2], až po poměrně složité aromatické uhlovodíky, např. fenol ( $\text{C}_6\text{H}_5\text{OH}$ ), naftalen ( $\text{C}_{10}\text{H}_8$ ) nebo anthracen ( $\text{C}_{14}\text{H}_{10}$ ) [5]. V tabulce 1.1 se nachází přehled zastoupení jednotlivých typů molekul v ledu komety 1P/Halley. Zastoupení všech molekul s výjimkou  $\text{H}_2\text{O}$  se však může jádro od jádra mírně odlišovat a vzhledem k tomu, že jádro komety není zcela homogenní, může se zastoupení měnit dokonce i v různých částech jednoho jádra.

<b><math>\text{H}_2\text{O}</math></b>	<b>0,85</b>
<b>CO</b>	<b>0,04</b>
<b><math>\text{CO}_2</math></b>	<b>0,03</b>
<b><math>\text{H}_2\text{CO}</math></b>	<b>0,02</b>
<b><math>\text{CH}_2\text{OH}</math></b>	<b>0,02</b>
<b><math>\text{N}_2</math></b>	<b>0,01</b>
<b>ostatní</b>	<b>0,03</b>

Tabulka 1.1: Poměr zastoupení molekul v ledu komety 1P/Halley. [2]

Zajímavé výsledky přináší zkoumání poměru hmotnosti uvolněného prachu ku hmotnosti uvolněného plynu. Komety mohou být jak velice prašné (poměr  $> 1$ ), tak téměř bezprašné (poměr  $< 0,1$ ), např. u komety 1P/Halley se tento poměr pohybuje kolem čísla 2. Na současné vysvětlení tohoto stavu je nutno pohlížet s opatrností. Předpokládáme, že méně prašné

komety ve skutečnosti obsahují z větší části zrnka, která díky své stavbě hůře odrážejí záření, a tak je problematické je detekovat. Podle současných teorií je totiž nepředstavitelné, že by kometa dokázala vzniknout bez toho, aby obsahovala značné množství prachových částic. Předpokládáme, že právě na prachových částicích kondenzují plyny tvořící kometární led a tím tak vytváří prvotní stavební prvky pro vznik komety.

Podle poměru redukovaných a oxidovaných chemických látek můžeme určit, kde kometa původně vznikla. Komety z Oortova oblaku jsou více podobné mezihvězdným strukturám a jsou bohatší na oxidy. Naproti tomu některé krátkoperiodické komety jsou svým složením více podobné ostatním tělesům sluneční soustavy a obsahují více redukovaných látek. Příkladem nám může být opět kometa 1P/Halley, jedná se o krátkoperiodickou kometu, ale její materiál je bohatý na oxidy. Předpokládáme proto, že se jedná o kometu s původem vzniku v Oortově mračnu, ale později zachycenou ve vnitřních částech sluneční soustavy.

Prvek	Led	Prach
H	0,5929	0,4810
C	0,0570	0,1934
N	0,0154	0,0100
O	0,3347	0,2114
Na	-	0,0024
Mg	-	0,0238
Al	-	0,0016
Si	-	0,0439
S	-	0,0171
Ca	-	0,0015
Fe	-	0,0124
Ni	-	0,0010

Tabulka 1.2: Poměr zastoupení nejčastějších prvků v kometárním materiálu. [2]

## 1.4 Dynamika kometárních drah

Doba potřebná pro jeden oběh komety kolem Slunce se podle současných poznatků může pohybovat v rozmezí několika málo roků<sup>4</sup> až několika milionů let. Komety s dobou oběhu kratší než 200 let nazýváme krátkoperiodické, ostatní komety jsou dlouhoperiodické, případně dokonce neperiodické. Jak bylo řečeno už v předchozích kapitolách, komety se obvykle pohybují po dráze kopírující tvar elipsy, která je značně excentrická. V případě neperiodických komet probíhá pohyb po parabole nebo hyperbole.

### 1.4.1 Krátkoperiodické komety

Krátkoperiodické komety se obvykle člení dále na dvě podskupiny – na komety Jupiterovy rodiny (JR) a komety Halleyova typu (HT). Přičemž komety JR mají oběžnou dobu kratší než 20 let, naproti tomu komety HT mají obvykle dobu oběhu delší než 20 let (existuje

<sup>4</sup> Nejkratší známou oběžnou dobu má kometa 2P/Encke. Jeden oběh kolem Slunce vykoná za 3,3 roku.

několik výjimek). Hlavním kritériem pro hodnocení, zda se jedná o kometu HT nebo JR, je tzv. Tisserandův invariant. Hodnotu Tisserandova invariantu vypočteme podle rovnice<sup>5</sup>

$$T = \frac{a_p}{a} + 2 \cdot \sqrt{\frac{a}{a_p} (1 - e^2) \cos i}, \quad (1.1)$$

kde  $a$  je velká poloosa kometární dráhy,  $e$  excentricita kometární dráhy a  $i$  je sklon kometární dráhy vůči rovině dráhy perturbujícího tělesa (v našem případě obvykle Jupiter), jehož velká poloosa je  $a_p$ . Hraniční hodnotou je  $T = 2$ , přičemž komety JR mají hodnoty vyšší a komety HT naopak nižší.

### Komety Jupiterovy rodiny

Do dnešního dne (duben 2009) známe 353 zástupců této skupiny komet [7]. Komety Jupiterovy rodiny se pohybují po velice nestabilních drahách, které jsou často pozměňovány gravitačním působením Jupiteru. Některé komety s nízkou rychlostí se při blízkém přiblížení k Jupiteru dokonce mohou stát jeho dočasným satelitem.

U komet obíhajících po krátkoperiodických oběžných drahách dochází k významným ztrátám materiálu. Hlavní příčinou, kromě odpařování těkavějších látek, je obvykle i rozdělení jádra na několik menších částí, případně dokonce jeho úplný rozpad na obrovské množství samostatných objektů. V případě, že nedojde k desintegraci jádra, může prach po odpaření většiny povrchových zásob těkavých látek vytvořit „krustu“ kolem zbytku jádra. Tento nový obal jádra zabrání dalšímu odpařování a ukončí tak kometární aktivitu, přičemž jádro následně vypadá jako asteroid. Předpokládáme proto, že dokonce některé z blízkozemních asteroidů patřících do rodiny Amor a Apollo jsou ve skutečnosti neaktivní jádra komet Jupiterovy rodiny. Tomuto názoru nasvědčuje i skutečnost, že některé tyto asteroidy mají typicky kometární dráhy.

### Komety Halleyova typu

Do dnešního dne (duben 2009) známe 53 zástupců této skupiny komet [7]. Tato skupina je pojmenována po svém nejznámějším zástupci, kometě 1P/Halley. Komety se vyznačují velkou excentricitou dráhy, kdy  $e > 0,75$ . Perihelium těchto komet se pohybuje v rozmezí 0,19 – 4,04 AU a sklon dráhy vůči rovině oběhu planet je značně variabilní. Na základě těchto poznatků proto předpokládáme, že se jedná o mezistupeň mezi kometami dlouhoperiodickými a krátkoperiodickými.

## 1.4.2 Dlouhoperiodické komety

Za hlavní zásobárnu komet je považováno Oortovo mračno. Předpokládáme, že počet kometárních jader v něm obsažených se pohybuje v řádu až  $10^{12}$ . Dráhy objektů v tomto kometárním mračnu jsou, kromě gravitačního působení při vzájemném přiblížení, významně pozměňovány především při bližším průchodu hvězdy nebo velkého molekulového mračna. Taková přiblížení velice hmotných těles, případně i hustotní vlny v galaxii, vyšlou část

<sup>5</sup> Vztah převzat ze zdroje [6].



komet do mezihvězdného prostoru mimo gravitační vliv Slunce a část naopak do vnitřních částí sluneční soustavy. Ne všechny komety nově přicházející z Oortova mračna jsou opravdu „nové“. Malá část komet je po vstupu do planetárního regionu opět vymrštěna do Oortova mračna a následně se může celý proces se vstupem komety do vnitřních částí sluneční soustavy opakovat.

Po tom, co u komety dojde k extrémní redukci vzdálenosti od Slunce v perihelu a dostane se do oblasti planet, dochází obvykle k dalšímu rušení její dráhy. Podílejí se na něm především planety, největší vliv mají plynní obří. Leckdy dochází k velice významným úpravám dráhy, kdy se kometa přestává vracet při oběhu do Oortova mračna a její dráha se významně zkracuje. Postupně může dojít až k přeměně komety na krátkoperiodickou, případně naopak k jejímu vymrštění do mezihvězdného prostoru.

Dlouhoperiodické komety lze dělit podle jejich dráhy. Komety přicházející z Kuiperova pásu a komety, které se pohybují ve vnitřních oblastech sluneční soustavy již dlouhou dobu, mají obvykle dráhu jen velice málo skloněnou vůči rovině oběhu planet. Taktéž obíhají v naprosté většině případů ve stejném směru jako planety. Naopak vzhledem k tomu, že Oortovo mračno je kulového tvaru, komety přicházející z něho mají sklon dráhy vůči planetám náhodný. Tyto komety mohou dokonce obíhat proti směru oběhu planet – takový pohyb nazýváme retrográdním.

### 1.4.3 Vznik a původní dráhy komet

S tím, jak se sluneční pramlhovina smršťovala, docházelo kvůli zákonu zachování momentu hybnosti k vytváření určitých struktur. Částice s menším momentem hybnosti směřovaly do centra, kde postupně vznikalo protoslunce. Částice s větším momentem hybnosti naopak směřovaly od středu a vytvářely planetární disk. Prachové částice z planetárního disku se postupně akumulovaly do těles o velikosti v řádu kilometrů, kterým říkáme planetesimály. Tělesa pokračovala prostřednictvím srážek v růstu, až dosáhla velikostí dnešních asteroidů a nakonec vytvořila protoplanety – předchůdce dnešních planet. Především vnější protoplanety působením svého silného gravitačního pole poslaly část zbývajících planetesimál do mezihvězdného prostoru a malou část z nich uložily do Oortova mračna. Nízké teploty, typické pro okrajové oblasti vznikající sluneční soustavy, zajistily zachování těchto těles skládajících se z různých druhů zmrzlých těkavých látek a prachových částic. Tyto planetesimály – nebo spíše už „kometesimály“ – se svým složením a svou stavbou značně podobaly dnešním kometárním jádrům.

Předpokládáme, že ve svých počátcích převážná část kometárních jader vznikla na okraji planetárního regionu, nedaleko oběžné dráhy Neptunu. Jádra v Neptunově gravitační sféře vlivu byla strhávána do vnitřních částí planetárního regionu, odkud byla následně gravitačním působením především Jupiteru a Saturnu vysílána do vzdálenějších částí sluneční soustavy nebo i mimo ni. Je pravděpodobné, že gravitační síla Jupiteru je dostatečná, aby dokázala změnit eliptickou oběžnou dráhu komety v jeho vlivu přímo na hyperbolickou. Významnou roli v tomto procesu hrály i blízké průchody hvězd a velkých molekulových mračen, jejichž působení dokázalo velkou část komet odstranit z oblastí vnitřní sluneční soustavy.

Alternativní vysvětlení předpokládá, že většina komet vznikla již přímo ve vnitřních částech Oortova mračna, při prvotních fázích kolapsu sluneční pramlhoviny. Tato teorie dále

počítá s tím, že tato zásobárna komet byla následně významně zredukována, především působením okolních hvězd a velkých molekulových mračen. Většina hvězd vzniká ve shlucích a nikoliv samostatně, proto předpokládáme, že takto vzniklo i Slunce. Důsledkem toho v počátcích nebyla sluneční soustava ušetřena velice častých gravitačních zásahů svých souputnic v oblastech, kde se nacházela kometární jádra. Po rozpadu hvězdokupy se většina jader pomalu přesunula do vzdálenějších oblastí Oortova mračna, výjimečně některá zamířila do vnitřních oblastí sluneční soustavy.

Většina poznatků v podkapitole 1.2 byla převzata ze zdroje [1], poznatky v podkapitolách 1.3 a 1.4 pocházejí převážně ze zdroje [2].

## Kapitola 2

# Fotometrie

### 2.1 Elektromagnetické záření

Elektromagnetické záření se skládá z vln, šířících se vakuem nebo materiálem. Podle teorie Jamese Clerka Maxwella (1831 – 1879) se jedná o kombinaci příčného postupného vlnění magnetického a elektrického pole, přičemž jednotlivé složky spolu oscilují ve fázi, jsou na sebe kolmé a zároveň jsou kolmé ke směru šíření elektromagnetické vlny. Důležitými parametry elektromagnetického záření jsou rychlost jeho šíření ve vakuu  $c$ , frekvence s jakou oscilují jednotlivé složky  $f$  a vlnová délka záření  $\lambda$ . Tyto parametry jsou spolu spojeny vztahem<sup>6</sup>

$$c = \lambda f. \quad (2.1)$$

Pokud má tok záření jednu vlnovou délku, nazýváme ho monochromatickým. Reálné zdroje ale monochromatické nikdy nejsou a vyzařují ve více vlnových délkách najednou.

V roce 1905 Albert Einstein (1879 – 1955) navrhl teorii, podle které se při emisi nebo absorpci záření atomem nepředává energie spojitě, ale diskrétně. Těmto malým „kouskům“ energie v elektromagnetickém záření říkáme foton. Každý foton má podle Einsteinovy teorie kromě energie i svoji hybnost, přičemž energie fotonu se dá vyjádřit rovnicí<sup>7</sup>

$$E = hf, \quad (2.2)$$

a velikost hybnosti fotonu rovnicí

$$p = \frac{hf}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (2.3)$$

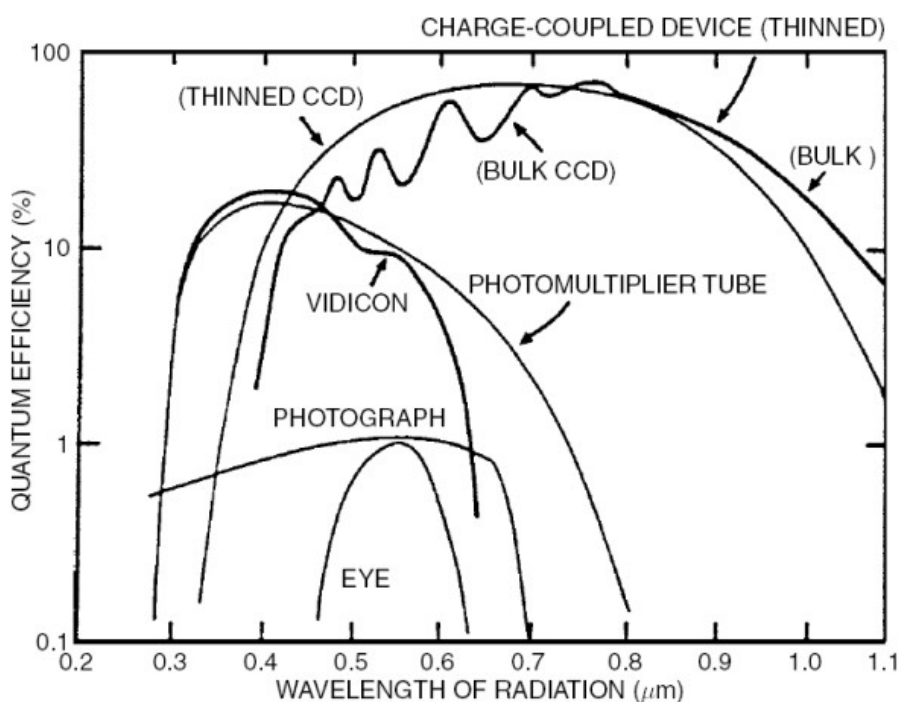
#### 2.1.1 Detekce elektromagnetického záření v astronomii

V průběhu historie se v astronomii používaly různé detektory elektromagnetického záření, více či méně vhodné k fotometrii. V počátcích se astronomové museli spoléhat výhradně na svůj zrak. Lidské oči ovšem mají značná omezení a nevýhody. Nejsou např. schopny určit jasnost objektu absolutně, ale pouze relativně při srovnání s jiným objektem. Dále jsou schopny elektromagnetické záření detekovat pouze v úzkém pásmu vlnových délek. Později přišla na řadu fotografická fotometrie. Zásadní výhodou fotografie je přesnější stanovení jasnosti objektu a také možnost uchovat obraz po delší dobu. Následovala fotometrie pomocí fotonásobiče, která využívá fotoefektu. Jedná se o velice přesnou metodu k určování jasnosti hvězd používanou i v současné době, ovšem je to metoda také značně náročná.

<sup>6</sup> Konstanta  $c$  je jednou ze základních fyzikálních konstant,  $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ .

<sup>7</sup> Konstanta  $h$  ve vztahu je Planckova konstanta,  $h = 6,63\cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} = 4,14\cdot 10^{-15} \text{ eV}\cdot\text{s}$ .

CCD<sup>8</sup> je v současnosti nejužívanějším způsobem detekce elektromagnetického záření v astronomické fotometrii. CCD je polovodičová elektronická součástka vyvinutá roku 1970 W. Boylem (\* 1924) a G. Smithem (\* 1930) v Bellových laboratořích [9]. Poprvé bylo CCD využito k astronomickým účelům v roce 1975. Jedná se o zařízení schopné zachycovat záření po delší dobu, převádět ho na elektrický a následně digitální signál. Citlivost CCD je s dříve užívanými metodami nesrovnatelná, pohybuje se v řádu několika dopadlých fotonů. Navíc má CCD mnohem větší rozsah vlnových délek, které je schopno zaznamenat.



Obrázek 2.1: Závislost množství zachyceného záření na vlnové délce u různých typů detektorů [9].

Kromě různé citlivosti detektoru při různé vlnové délce musíme počítat také s tím, že záření přicházející od námi zkoumaného objektu má při různých vlnových délkách různou intenzitu. S tímto faktem nám pomáhají se vyrovnat různé systémy fotometrických filtrů. Tyto systémy zavádějí filtry vymezující jistou oblast elektromagnetického spektra, ve které zaznamenáváme záření a kterou následně zkoumáme. Asi neznámějším a v této práci využívaným systémem je tzv. Johnsonův UVB systém.

filtr	U	B	V	R	I	J
$\lambda$ [nm]	365	440	550	700	900	1250

Obrázek 2.2: Přehled filtrů Johnsonova fotometrického systému [10].

<sup>8</sup> Zkratka z Charge-coupled devices, v překladu „nábojově vázané prvky“.

## 2.1.2 Hvězdná velikost

Pro měření jasnosti objektů v astronomii se používá logaritmická jednotka toku přicházejícího záření – hvězdná velikost. Důvody využití právě této jednotky jsou především historické. Hvězdná velikost je určena pomocí Pogsonovy rovnice a její jednotkou je magnituda (mag). Vztah lze vyjádřit následujícím porovnáním toku ze dvou různých objektů

$$m_1 - m_2 = -2,5 \log_{10} \frac{f_1}{f_2}, \quad (2.4)$$

kde  $f_1$  a  $f_2$  jsou toky záření od porovnávaných objektů a  $m_1$  a  $m_2$  jsou hvězdné velikosti objektů. Z rovnice vyplývá, že objekt se stokrát vyšší jasností, v porovnání s druhým objektem, má hvězdnou velikost o 5 mag nižší než tento druhý objekt.

## 2.2 Plošná fotometrie komet

Výše uvedené poznatky k hvězdným velikostem platí pro hvězdy, případně jiné bodové objekty. Při fotometrii komet ale narážíme na objekty, které rozhodně bodové nejsou a jasnost komety je v různých jejích částech různá. Je tedy potřebné zavést veličinu vhodnou pro popis záření přicházejícího pouze z určité oblasti zkoumaného objektu, případně přímo z jednotlivých pixelů snímku. K těmto účelům se používá plošná hvězdná velikost  $\mu$ . Uvádí se v jednotkách  $\text{mag} \cdot \text{arcsec}^{-2}$ . Pogsonovu rovnici, vyjadřující poměr mezi plošnou hvězdnou velikostí a obecnou hvězdnou velikostí, lze vyjádřit jako

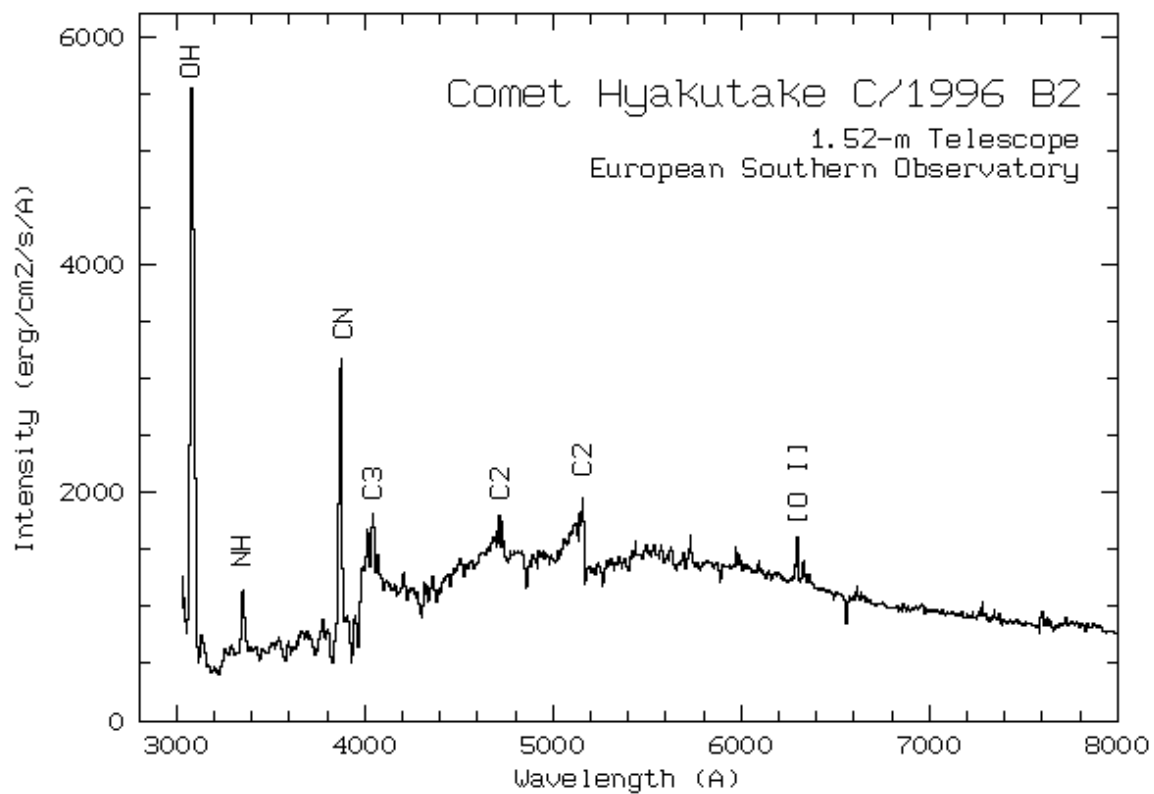
$$\mu = m_0 - 2,5 \log_{10} \frac{\xi}{F_0}, \quad (2.5)$$

kde  $\xi$  je tok záření z plochy 1 čtvereční arcsec,  $F_0$  je tok záření od referenční hvězdy a  $m_0$  její hvězdná velikost.

### 2.2.1 Původ a vznik kometárního záření

Komety narozdíl od hvězd nezáří samovolně, ale pouze pokud je jim dodávána energie ve formě záření jiného tělesa. Prozatím neznáme žádnou kometu vyskytující se mimo naši sluneční soustavu, takže hlavním dodavatelem záření pro všechny známé komety je Slunce.

Záření přicházející od komet se dá rozdělit na dva základní typy. Prvním typem je záření pocházející přímo ze Slunce, odražené směrem k pozorovateli prachovými částicemi v komě a prachovém ohonu komety. Druhý typ záření nejprve pohltí ionty molekul, které se nacházející především v komě a plazmovém ohonu. Poté jsou tyto absorbované fotony opět emitovány na specifických vlnových délkách. Následkem výše popsaných procesů lze ve spektrech komet rozlišit sluneční kontinuum a emisní pásy jednotlivých molekul.



Obrázek 2.2: Spektrum komety C/1996 B2 (Hyakutake). Spektrum bylo pořízeno Evropskou jižní observatoří (ESO) [11]. Na svislé ose je vynesena intenzita záření, na vodorovné ose vlnová délka<sup>9</sup>.

<sup>9</sup> Vlnová délka je uvedena v angstromech (Å). 1 Å = 10<sup>-10</sup> m = 0,1 nm.

## Kapitola 3

# Pozorování

### 3.1 Místa pozorování

#### 3.1.1 Observatoř ÚTFA

Snímky komety C/2006 W3 (Christensen) zpracovávané v této práci byly pořízeny v rámci předmětu Astronomické praktikum Filipem Hrochem a studenty 5. listopadu 2008 na observatoři Ústavu teoretické fyziky a astrofyziky Přírodovědecké fakulty Masarykovy univerzity v Brně. Observatoř se nachází<sup>10</sup> na Kraví hoře v Brně poblíž Hvězdárny a planetária Mikuláše Koperníka.

Observatoř je vybavena dalekohledem Newtonova typu s primárním zrcadlem o průměru 62 cm a ohniskovou vzdáleností 2,73 m. Dalekohled je na paralaktické montáži a v sekundárním ohnisku je umístěna Dual CCD kamera ST-8 Santa Barbara Instruments Group s čipem KAF-1600. Při použití maximálního rozlišení 1530 x 1020 pixelů je měřítko  $c = 0,678''/\text{pixel}$ . Zorné pole přístroje má velikost asi 17' x 11' [12].

#### 3.1.2 Hvězdárna a planetárium Mikuláše Koperníka

Snímky komety 17P/Holmes byly pořízeny 30. října a 1. listopadu 2007 Matúšem Kockou na Hvězdárně a planetáriu Mikuláše Koperníka v Brně. Zeměpisné souřadnice místa pozorování jsou totožné s předchozí observatoří.

K pozorování byl použit dalekohled Newtonova typu s průměrem primárního zrcadla 40 cm a ohniskovou vzdáleností 1,75 m. Dalekohled využívá CCD kameru ST-7 Santa Barbara Instrument Group. Kamera dokáže dosáhnout maximálního rozlišení 765 x 510 pixelů s měřítkem přibližně  $c = 1,082''/\text{pixel}$ . Přístroj disponuje zorným polem o velikosti asi 14' x 9'.

### 3.2 Pozorované komety

#### 3.2.1 17P/Holmes

Tuto periodickou kometu objevil v listopadu roku 1892 anglický amatérský astronom Edwin Holmes (1842 – 1919). Tehdy došlo k výraznému zjasnění této komety po průchodu perihelem. Další pozorování komety, tentokrát již s normálním průběhem bez neobvyklého výrazného zjasnění, proběhla při následujících dvou návratech a následně byla kometa na několik desetiletí ztracena. Znovuobjevení se dočkala až roku 1964 po tom, co její dráhu

---

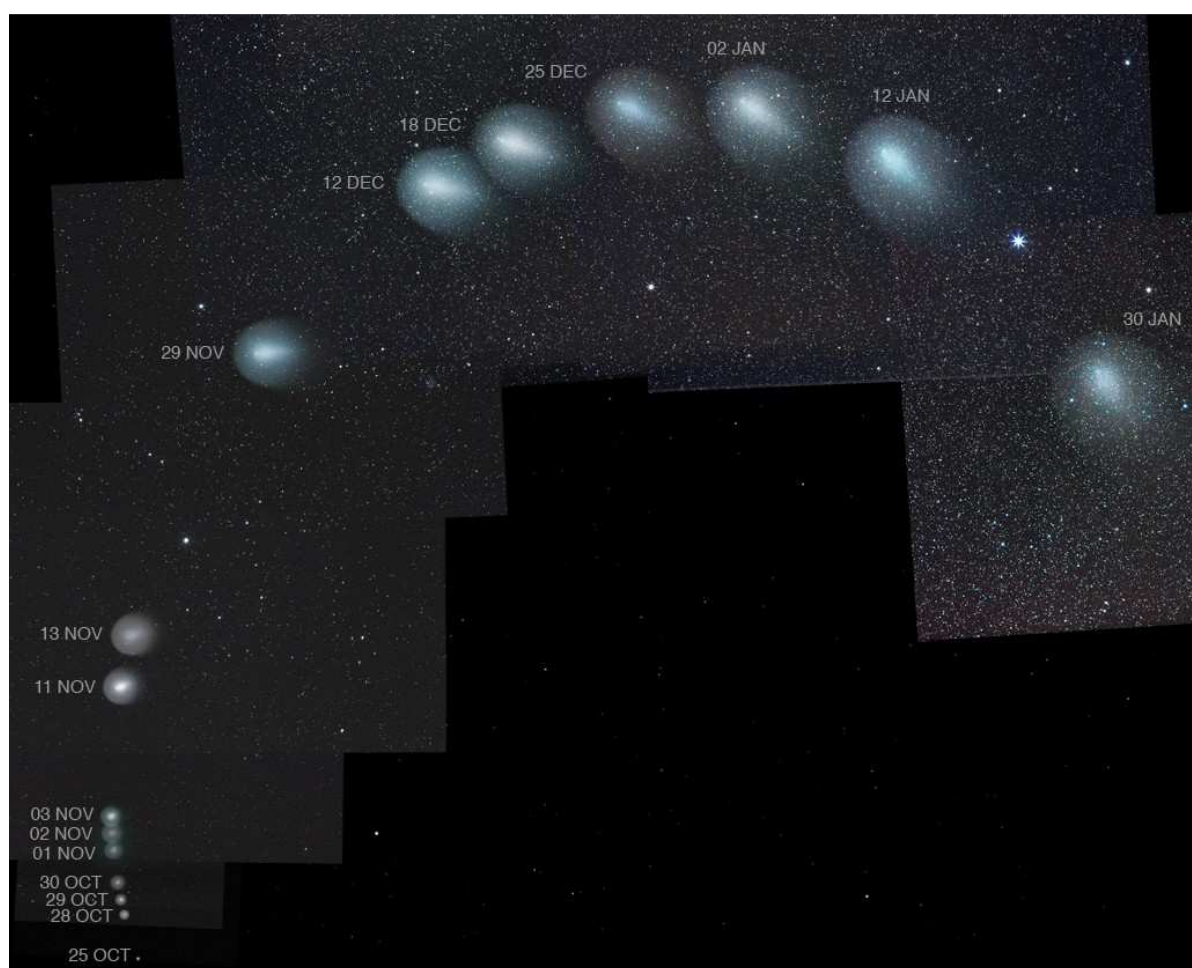
<sup>10</sup> Umístění observatoře: 16°35'00,53" východní zeměpisné délky, 49°12'15,88" severní zeměpisné šířky, 304 m.n.m. [12].

zpřesnil za použití počítače britský astronom Brian G. Marsden (\* 1937). Kometa je členkou Jupiterovy rodiny. Obíhá po dráze s periodou 6,89 roku a s perihelem vzdáleným od Slunce 2,05 AU. Prozatím poslední průchod perihelem proběhl 4. května 2007 [13].

Dne 24. října 2007 došlo 172 dní po průchodu perihelem k nečekanému výraznému zjasnění komety. Toto zjasnění se podobalo svým průběhem zjasnění z roku 1892, při kterém byla kometa objevena, ale dosáhlo většího rozdílu jasnosti. Jasnost komety se během několika dnů zvýšila z téměř 17 mag až na 2,3 mag [14]. Jedná se o dosud nejvýraznější rychlé zjasnění komety.

Příčina prudkého zjasnění komety není dosud přesně známa. Obrovský mrak plynu a prachu nabízí možnost srážky s jiným tělesem. Jako více pravděpodobné se ale jeví vysvětlení, že uvnitř komety vzniklo větší množství plynů, které si následně prorazily cestu k povrchu komety.

Další informace o kometě 17P/Holmes je možné dohledat ve zdroji [15].



Obrázek 3.1: Kompozice ukazující průběh zjasnění komety od října 2007 do ledna 2008 [16].

### 3.2.2 C/2006 W3 (Christensen)

Jedná se o neperiodickou kometu, kterou objevil astronom E. J. Christensen 18. listopadu 2006 v rámci projektu Catalina Sky Survey [17]. Perihelem vzdáleným od Slunce 3,13 AU kometa projde 6. července 2009 [18], přičemž později dosáhne podle předpokladů jasnosti přibližně 8 mag.



## Kapitola 4

# Zpracování pozorování

### 4.1 Úvod

Cílem zpracování snímků jednotlivých komet je určení fotometrického profilu – plošné jasnosti v závislosti na vzdálenosti od středu jasnosti. Koma komety ale ve většině případů není kruhově symetrická, svým tvarem se mnohem více blíží elipse. Tato kapitola by nás proto měla seznámit v první řadě s úpravou snímků, která předchází získávání dat. Následně vysvětlí i způsob, jak se vypořádáváme v této práci s eliptickou symetrií komet.

### 4.2 Příprava snímků

Než ze snímků začneme získávat data potřebná pro sestavení fotometrických profilů, je nutné tyto snímky nejprve připravit. V první řadě jsme museli opravit do maximální možné míry chyby způsobené technikou. Následně bylo provedeno složení více snímků pořízených postupně v průběhu několika desítek minut do snímku jednoho, z důvodu potlačení měřicích šumů. Nakonec bylo nutné tok záření získaný ze snímků kalibrovat na běžně používané hvězdné velikosti. Velká část poznatků v této podkapitole je převzata ze zdroje [19].

#### 4.2.1 Korekce

Snímek pořízený CCD technikou je ovlivněn dvěma základními negativními vlivy. Jedná se o tepelný šum a o různou citlivost jednotlivých pixelů na CCD čipu. Oba tyto jevy se dají potlačit pomocí korekčních snímků. U snímků použitých v této práci byla korekce provedena pouze na tepelný šum. Vhodné snímky pro korekci citlivosti jednotlivých pixelů bohužel nebyly k dispozici, proto k této úpravě nedošlo.

#### Tepelný šum

K odstranění tohoto problému se používá tzv. temný snímek (dark frame). Kamera je běžně sice chlazená na nízké teploty, nicméně úplně odstranit tepelný šum nelze. Navíc výrobci ve většině případů posunují bod nulové intenzity, kdy při dopadu několika fotonů kamera nezaznamná pouze těchto několik fotonů, ale přičte k nim i jistou konstantu. Tímto se zabránilo situaci, kdy by z důvodu náhodných fluktuací mohl čip vykazovat zápornou intenzitu detekovaného signálu.

Abychom se s těmito problémy vyrovnali, pořídili jsme temné snímky, kdy na čip nedopadalo žádné záření. Snímky byly pořízeny se stejnou délkou expozice, při použití stejného filtru a také stejného rozlišení jako námi zpracovávané snímky. Temných snímků bylo pořízeno více a následně z nich byl vytvořen snímek jeden, jehož hodnoty jsou aritmetickým průměrem jednotlivých snímků. Takový postup je výhodný ke snížení vlivu náhodného šumu. Výsledný temný snímek byl odečten od zpracovávaných vědeckých

snímků. Při odčítání a výpočtu aritmetického průměru mezi snímky vše probíhá mezi souhlasnými pixely jednotlivých snímků.

K vytvoření zprůměrovaného temného snímku a jeho odečítání od vědeckých snímků byl použit balík programů *Munipack* [20]. Aritmetický průměr temných snímků byl sestaven programem *mdark*, odečtení výsledného temného snímku od zpracovávaných kometárních snímků následně provedl program *darkbat*.

#### 4.2.2 Skládání

Při skládání snímků musíme řešit dva základní problémy. Snímky mohou být vzájemně vůči sobě mírně posunuty a pootočený. Druhý problém je, že kometa se vůči hvězdám v pozadí pohybuje.

##### Posunutí/pootočení snímků

S řešením nám opět pomohl systém *Munipack*. Nejdříve bylo nutné určit jednotlivé hvězdy na snímcích, k tomu byly použity astrometrické a fotometrické programy *muniphot*. Zmíněné programy vypsaly do textového souboru souřadnice všech identifikovaných hvězd na snímcích a provedly u hvězd aperturní fotometrii přes různě velké clonky. Pro naše potřeby byly využity pouze hvězdné polohy. Jejich porovnáním jsme určili posunutí a pootočení jednotlivých snímků vůči sobě navzájem. Porovnání snímků provedl program *munimatch*, který porovnává všechny snímky s námi zadaným referenčním snímkem a vytváří pro snímky soubory s maticemi určujícími jejich posunutí a pootočení vůči zadanému snímku.

##### Pohyb komety

Při skládání snímků komety pořízených v delším časovém intervalu (více jak desítky sekund), je nutné se vypořádat s jejím pohybem vůči hvězdám na pozadí. Námi používaný formát snímků FITS obsahuje u každého snímku hlavičku, která udává důležité údaje týkající se snímku včetně času jeho pořízení. To nám umožňuje při znalosti směru a rychlosti pohybu komety určit posunutí jednotlivých snímků potřebné pro vyrovnání pohybu komety.

Parametry pohybu komety po obloze byly získány ze zdroje [21]. Následně bylo potřeba určit orientaci našich snímků a na základě toho poupravit směr pohybu komety. Zbytek práce, tedy upravení souborů s maticemi, popisujícími posunutí a pootočení snímků, o parametr vyrovnávající vlastní pohyb komety, obstaral script *tra.py* [22] ze systému *Munipack*.

Samotné složení snímků bylo provedeno programem *kombine*. Program sečetl hodnoty odpovídajících pixelů na snímcích, které byly předně posunuty a pootočený podle souborů s maticemi. Výsledkem je složený snímek, na kterém došlo k roztažení hvězd do podoby přímek a přesnému složení komety.



Obrázek 4.1: Kometa C/2006 W3 (Christensen). Tento snímek byl složen ze 30 snímků. Skládané snímky měly expoziční dobu 30 s a byly pořízeny v průběhu 54 min.

### 4.2.3 Kalibrace

Tok záření na námi zpracovávaných snímcích je kromě vlastní jasnosti objektů ovlivněn také aktuálními pozorovacími podmínkami a vlastnostmi přístroje, který snímky pořizoval. Abychom dosáhli vyjádření jasnosti hvězd a komety v hodnotách porovnatelných s pozorováním uskutečněným kdekoliv jinde a na jakémkoliv přístroji, je nutné provést kalibraci.

Pro kalibraci byl použit vždy jeden z nesložených snímků. Na snímku bylo pomocí hvězdného katalogu *Aladin* [23] určeno vždy několik referenčních hvězd, k nimž byla v katalogu uvedena příslušná hvězdná velikost. Následně byla na snímku provedena aperturní fotometrie vybraných hvězd systémem *Gaia* [24]. Všechny skládané snímky měly stejnou expoziční dobu, takže stačilo hodnoty získané aperturní fotometrií vynásobit počtem skládaných snímků, abychom získali hodnoty pro výsledný složený snímek. Takto získané hodnoty byly využity k určení tzv. instrumentální hvězdné velikosti  $m$ , jejíž hodnotu je možno vyjádřit pomocí Pogsonovy rovnice v upraveném tvaru<sup>11</sup>

$$m = 25 - 2,5 \cdot \log_{10} I, \quad (4.1)$$

kde  $I$  je hodnota toku záření získaná z příslušného objektu na složeném snímku.

Následně došlo k porovnání instrumentálních hvězdných velikostí referenčních hvězd s hvězdnými velikostmi získanými z katalogu *Aladin*. Ze získaných rozdílů byla aritmetic-

<sup>11</sup> Číslo 25 ve vztahu je hodnota zvolená jako nulová úroveň. Toto číslo napomáhá získávání instrumentálních hvězdných velikostí nepřiliš vzdálených skutečným hodnotám. Hodnota je dána konvencí.

kým průměrem určena pro každý složený snímek konstanta  $\Delta m$ , která umožňuje přepočítávat instrumentální hvězdné velikosti na okalibrované skutečné hvězdné velikosti.

### 4.3 Fitování elips

Jak již bylo zmíněno v úvodu, jako nejvhodnější aproximace tvaru kometární komy se ve většině případů jeví elipsa. Nejinak tomu je i na snímcích zpracovávaných v rámci této práce. Fitováním většího počtu elips různých intenzit na komu komety získáme poměrně dobrý přehled o rozložení jasu.

Fitování elips bylo prováděno systémem *Gaia*. Programy v *Gaie* obsažené byly původně navrženy pro fitování elips na snímky galaxií, nicméně způsob jakým zpracovávají data ze snímku je předurčuje k využití ve fotometrii libovolného objektu, jehož tvar je možné dobře aproximovat elipsou. *Gaia* umožňuje využití dvou různých metod pro fitování elips. První metodou je analýza intenzit (intensity analysis), druhou možností je analýza podle tvaru izofot (isophote contours).

Po vytvoření elipsy byly nejdůležitějšími parametry délka hlavní poloosy  $a$ , intenzita jasu podle níž se elipsa vykreslovala a excentricita elipsy  $e$ . Intenzita jasu byla převedena a okalibrována na hvězdnou velikost  $m$ .

#### 4.3.1 Fitování podle intenzit (FI)

Metoda fitování podle intenzit v systému *Gaia* je založena na programu ELLPRO ([25], [26], [27]). Program podle zadání vybere určitou hodnotu intenzity a následně vykreslí elipsu. Linie elipsy je vedena tak, aby pixely, které protíná, měly hodnotu intenzity co nejméně vzdálenou předem vybrané hodnotě.

#### 4.3.2 Fitování podle tvaru izofot (FTI)

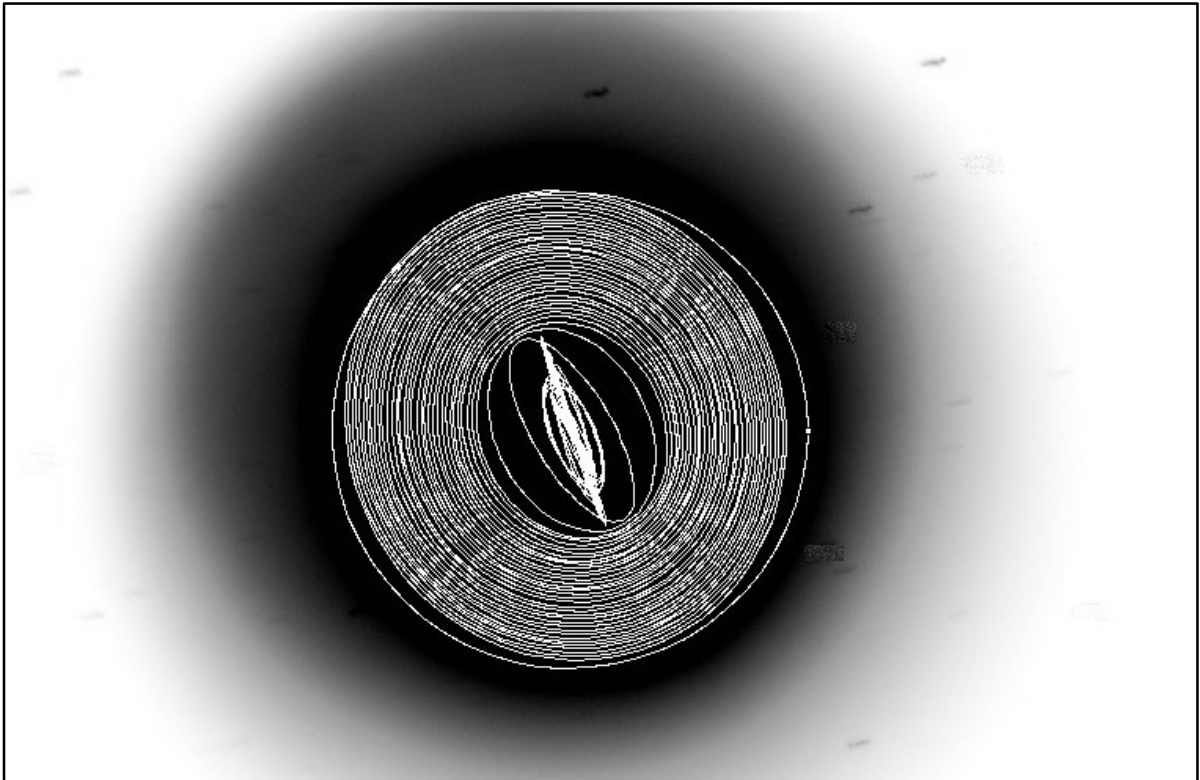
Fitování podle tvaru izofot v *Gaie* je založeno na programu ELLFOU ([25], [28], [29]). Program podobně jako předchozí vybere dle našeho zadání určitou hodnotu intenzit. Následně ale nejdříve vykreslí izofotu pro danou hodnotu a až poté vykreslí elipsu. V tomto případě je linie elipsy vedena tak, aby elipsou protínané pixely byly co nejméně vzdáleny od pixelů tvořících izofotu.

#### 4.3.3 Využití metod

Informace o tom, kdy je vhodnější využít jednotlivé metody, byly čerpány především ze zdrojů [30] a [31]. Obě metody je možné využít ve většině podmínek, kdy vykazují objekty poměrně přesnou elipticitu a postupnou změnu intenzit, s podobnou úspěšností. Nicméně všeobecně je doporučeno využití metody FI spíše na objekty rozkládající se na malém počtu pixelů, kdy je vykreslení izofoty nepřesnější. Naopak metodu FTI je vhodné používat spíše na rozsáhlé objekty (rozsáhlé počtem pixelů).

Při fitování elips bylo otestováno využití obou metod na všech snímcích a výsledek odpovídal výše zmíněným doporučením. Při vykreslování elips na pixelově malou kometu C/2006 W3 (Christensen) byla metoda FTI prakticky nepoužitelná. Elipsy při okrajích komety byly vyhovující, ale komety blíže středu vykazovaly obrovskou elipticitu ( $e > 20$ )

a značně náhodné rozložení orientace hlavní poloosy. Naproti tomu metoda FI dávala poměrně věrohodné výsledky ve všech oblastech komety. U komety 17P/Holmes se naopak jevilo ve většině oblastí komety jako přesnější využití metody FTI. Metodu FI bylo nutné použít pouze ve středových oblastech, kde metoda FTI opět vykazovala jasně nesmyslné výsledky.



Obrázek 4.2: Invertovaný snímek komety 17P/Holmes. Na snímku zobrazené elipsy byly vykresleny metodou FTI. Je dobře vidět, že v centrálních oblastech podává tato metoda nepoužitelné výsledky.

## Kapitola 5

# Výsledky

### 5.1 Zpracování a porovnání výsledků

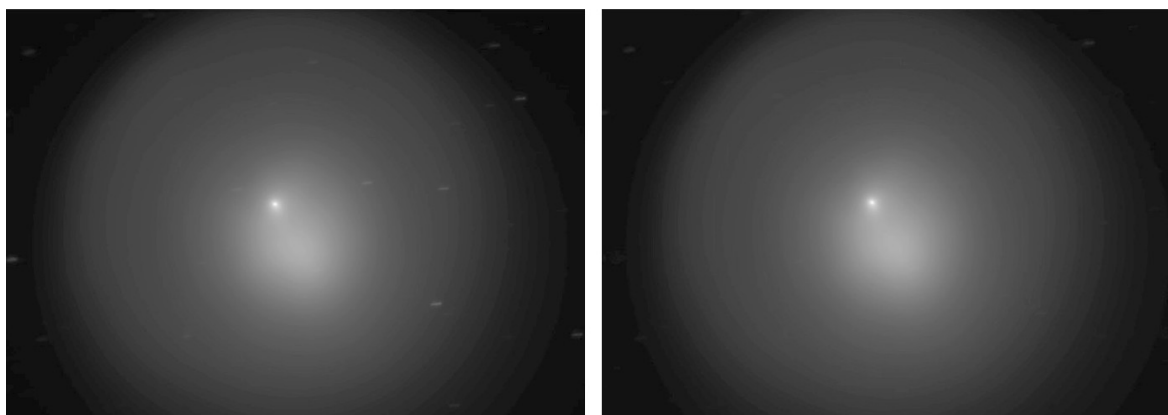
Důležitou součástí této práce je i zpracování a zhodnocení výsledků fitování elips na jednotlivé složené snímky komet. Parametry elips, které nám spočítal program *Gaia*, je nutné vynést do grafů a zpřehlednit tak získané výsledky.

datum	čas (UT)	kometa	observatoř	filtr	počet snímků
31.10.07	23:03:27 - 23:32:49	17P/Holmes	HaP MK	R	22
31.10.07	23:06:30 - 23:38:19	17P/Holmes	HaP MK	V	24
01.11.07	16:57:33 - 17:31:41	17P/Holmes	HaP MK	R	29
01.11.07	16:59:22 - 17:32:47	17P/Holmes	HaP MK	V	30
05.11.08	20:46:36 - 21:40:45	C/2006 W3 (Christensen)	MonteBoo	B	30
05.11.08	20:47:49 - 21:41:55	C/2006 W3 (Christensen)	MonteBoo	R	28
05.11.08	20:47:13 - 21:41:21	C/2006 W3 (Christensen)	MonteBoo	V	30

Tabulka 5.1: Přehled všech snímků použitých v rámci této práce. „HaP MK“ je zkratka pro Hvězdárnu a planetárium Mikuláše Koperníka, „MonteBoo“ je lidový název observatoře ÚTFA.

#### 5.1.1 Problém hvězd

Kometa C/2006 W3 (Christensen) má na použitých snímcích malou úhlovou velikost a žádná z jasnějších hvězd nezasahuje do její komy. Bohužel kometa 17P/Holmes je přesně opačný případ. Její úhlový rozměr je značný a vzhledem k tomu, že se rozprostírá na převážující části snímku, promítá se do komy hned několik jasnějších hvězd.



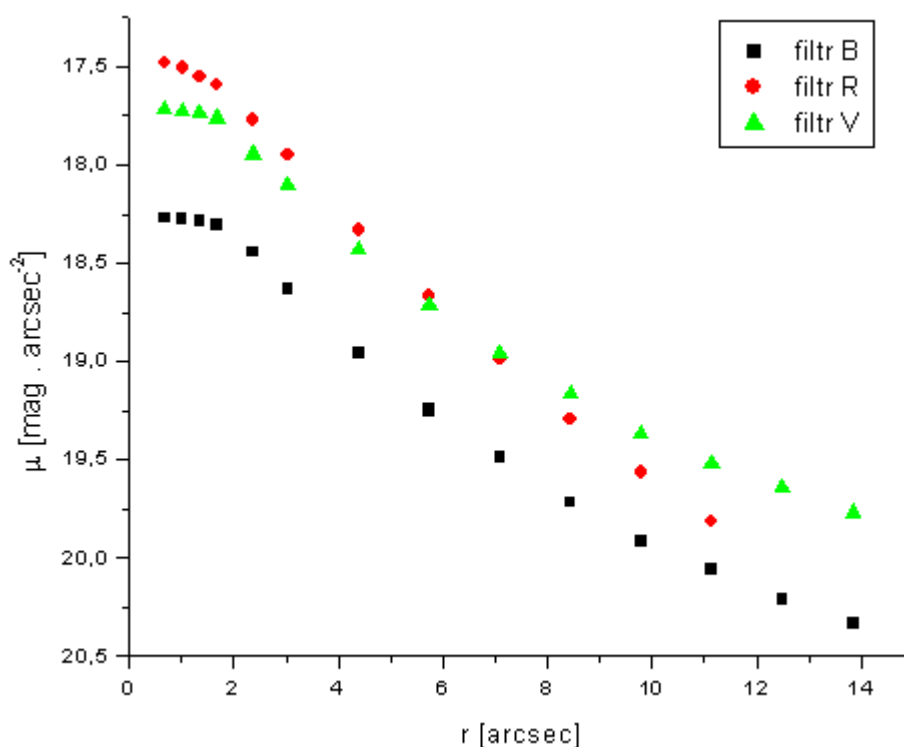
Obrázek 5.1: Snímek komety 17P/Holmes. Vlevo s hvězdami promítnutými do komy, napravo po odstranění hvězd programem *Gaia*. Jedná se o složený snímek pořízený 31.10. ve filtru R.

Přítomnost hvězd značně ovlivňuje parametry jednotlivých elips, přičemž metoda FI je v tomto ohledu náchylnější a jasnější hvězdy v ní mohou způsobovat významnější odchylky. Bylo proto nutné hvězdy odstranit a pokusit se do největší možné míry potlačit jejich vliv na snímek. Vymazávání hvězd ze snímku bylo prováděno programem *Gaia*, který umožňuje označení nežádoucí oblasti a její nahrazení intenzitou jasu převzatou z nejbližšího okolí vybrané oblasti [32].

### 5.1.2 Porovnání fotometrických profilů

Fotometrické profily byly vytvořeny zanesením parametrů většího počtu fitovaných elips do grafu. Pokud bychom na jedné z os grafu vykreslili velkou poloosu těchto elips, dostali bychom výsledky do určité míry zkreslené, protože jednotlivé elipsy mají různou excentricitu. Tento problém řešíme zavedením efektivního poloměru  $r$ , jehož hodnota je rovna geometrickému průměru velké a malé poloosy elipsy. Následné vynesení jasnosti jednotlivých elips v závislosti na efektivním poloměru vykreslené elipsy, nám dobře dokumentuje průběh plošné jasnosti napříč celou kometou.

#### C/2007 W3 (Christensen)

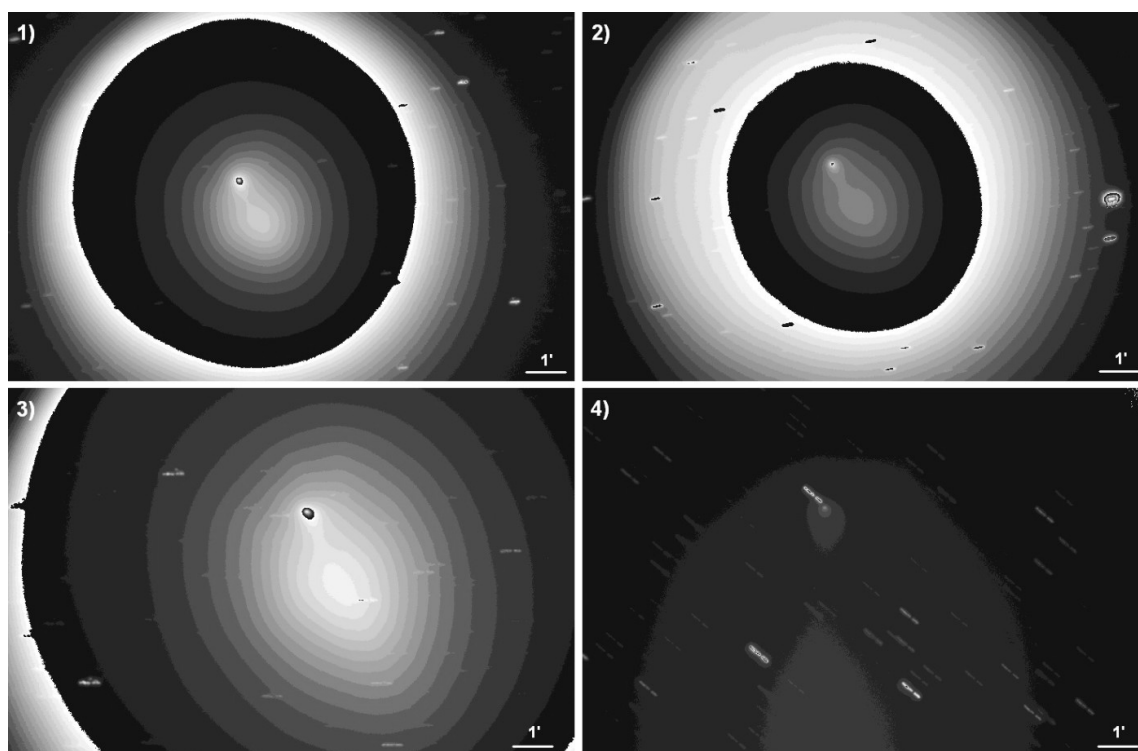


Obrázek 5.2: Fotometrický profil komety C/2006 W3 (Christensen) vykreslený pro filtry B, V a R.

Na fotometrickém profilu komety C/2006 W3 (Christensen) je velice dobře patrná vnitřní část komy, která těsně obklopuje jádro. Tato část dosahuje do vzdálenosti  $\sim 2''$ . Při vzdálenosti komety od Země, která v době pozorování byla 3,38 AU, to znamená poloměr této části  $\sim 4\,900$  km. Žádné další dělení nebo prudší změny v radiální jasnosti komy nejsou zřetelné. Dobře zřetelný je ovšem znatelně prudší pokles jasnosti ve filtru R (700 nm). Velikost komy se z pořízených snímků podařilo určit na  $\sim 14''$ , což odpovídá při již zmíněné vzdálenosti  $\sim 34\,300$  km.

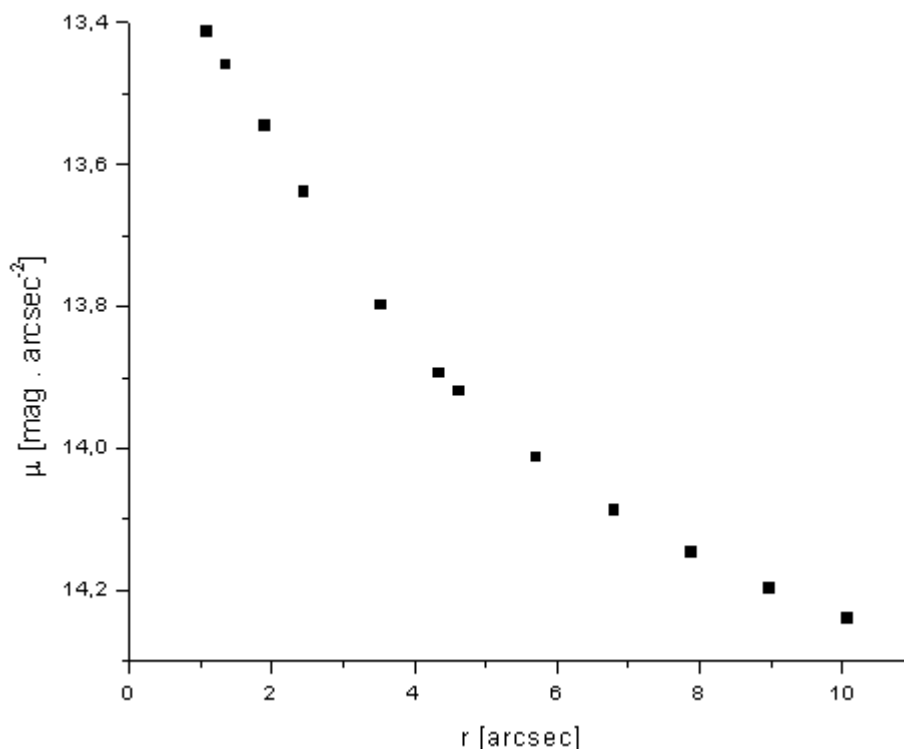
### 17P/Holmes

Kromě netypického prudkého zjasnění popsaného už v podkapitole 3.2.1, vykazuje kometa 17P/Holmes také poněkud netypicky dva středy jasnosti v komě. Obě zjasnění jsou dobře zřetelná na obrázku 5.3. Byl proto vytvořen fotometrický profil zvlášť pro výraznější zjasnění mimo střed souměrnosti komy a zvlášť pro zbytek komy. Při vytváření profilu komy bez zjasnění mimo střed souměrnosti bylo toto zjasnění odstraněno podobným způsobem jako hvězdy. Bohužel nesymetrické zjasnění je mnohem větší než jakákoliv hvězda na snímku. Proto se dá předpokládat, že elipsy vykreslované v centrálních oblastech komy jsou tímto umělým odstraněním ovlivněny.



Obrázek 5.3: Složené snímky komety 17P/Holmes se zvýrazněnou strukturou. Zvýraznění bylo provedeno programem *Gaia*. První snímek byl pořízen 31. 10., druhý je z 01. 11., třetí z 05. 11. a čtvrtý z 27. 11.

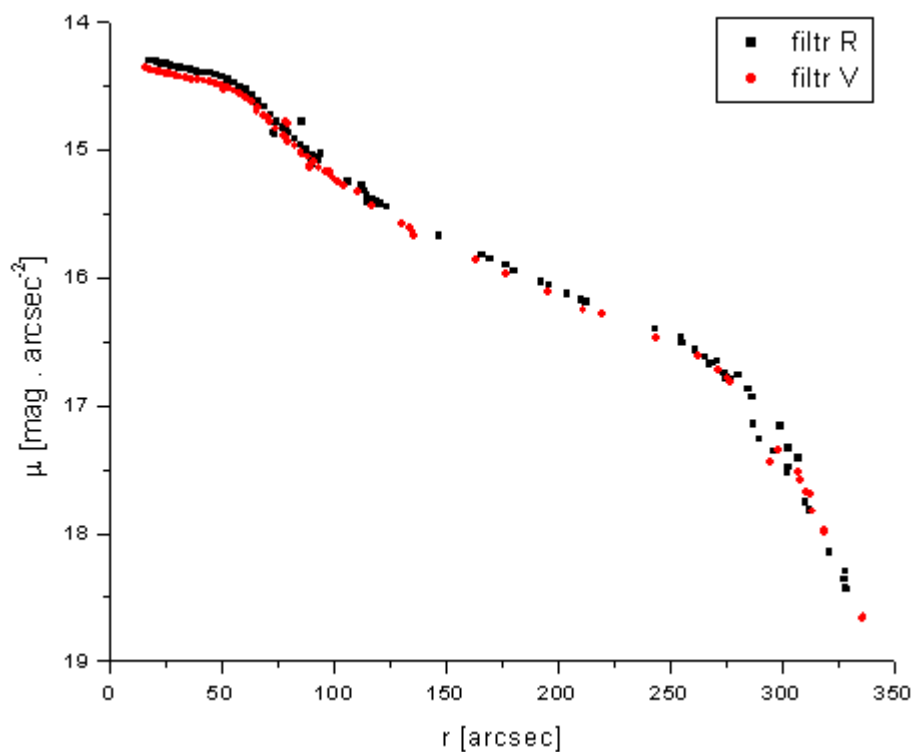




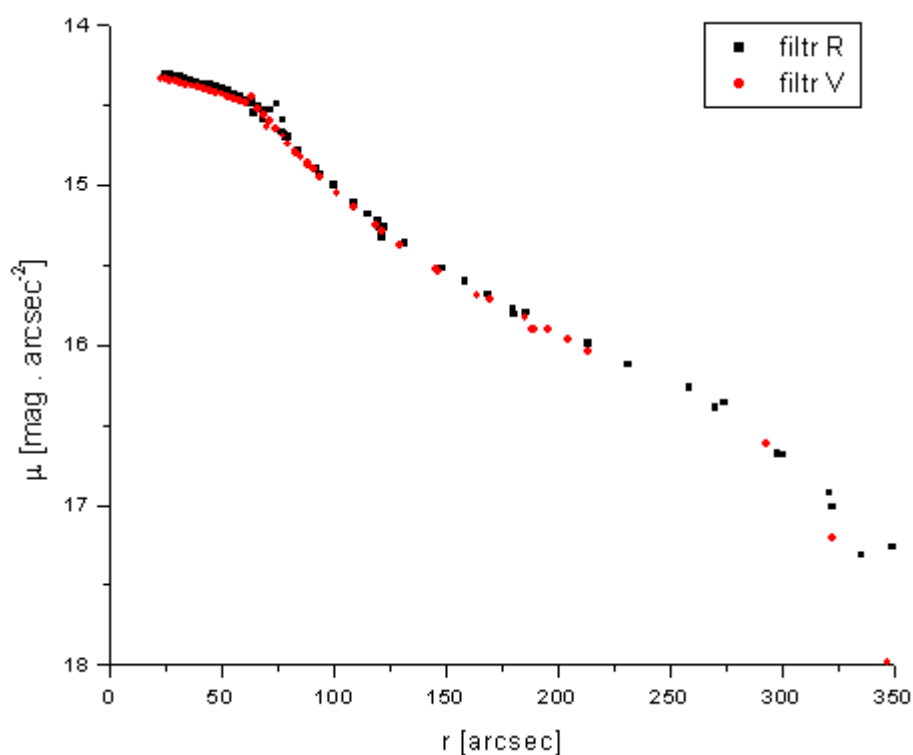
Obrázek 5.4: Profil zjasnění mimo střed symetrie na snímku komety 17P/Holmes ve filtru R.

Z fotometrických profilů komety 17P/Holmes (obrázky 5.5 a 5.6) lze poměrně přesně určit hranici vnitřní části komy, která obepíná jádro a na snímku z 31. 10. 2007 se nachází ve vzdálenosti  $\sim 60''$  od středu symetrie. Zatímco vnitřní část komy vykazuje pouze pozvolný pokles jasnosti, na již zmíněné hranici dochází ke změně a pokles je dále mnohem významnější. Tento nízký pokles jasnosti je pravděpodobně způsoben únikem značného množství materiálu ze samotného jádra. Prudší pokles jasnosti pokračuje až do vzdálenosti  $\sim 280''$  od středu symetrie, kde se dá předpokládat začátek okraje komy. Následující pokles je ještě prudší a jedná se o plynulý přechod komy do prázdného meziplanetárního prostoru.

Při srovnání obrázků 5.5 a 5.6 je dobře patrné rozpínání celé komy. Přestože oba obrázky od sebe dělí necelých 18 hodin, u obou výše zmíněných hranic došlo k jasně patrnému posunu. U hranice vnitřní části komy se jedná o  $\sim 10''$ , u druhé hranice jde o  $\sim 40''$ . Okraj komy se navíc poněkud více „rozmažal“, přechod už není tolik zřetelný. Vzdálenost této komety od Země v době pořízení snímků byla 1,62 AU. To znamená nárůst vnitřní části komy v průběhu 18 hodin o  $\sim 11\,750$  km a okrajových částí komy dokonce o  $\sim 47\,000$  km. Tyto údaje odpovídají rychlosti  $\sim 182,3$  m·s<sup>-1</sup> pro vnitřní část komy a rychlosti  $\sim 729,4$  m·s<sup>-1</sup> pro okrajové části komy. Poloměr komy na snímcích z 01. 11. je  $\sim 451\,300$  km.



Obrázek 5.5: Fotometrický profil komety 17P/Holmes z 31. 10. 2007. Zjasnění mimo střed symetrie bylo odstraněno. Profil je vykreslen pro filtry V a R.

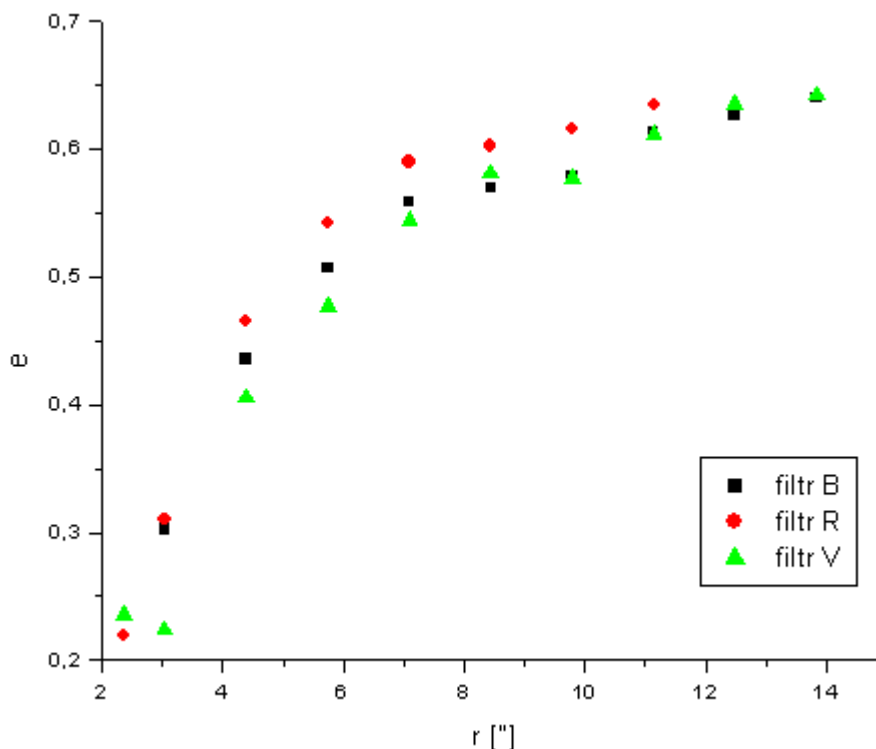


Obrázek 5.6: Fotometrický profil komety 17P/Holmes z 01. 11. 2007. Zjasnění mimo střed symetrie bylo odstraněno. Profil je vykreslen pro filtry V a R.

### 5.1.3 Porovnání excentricity

Dalším parametrem elips zkoumaným v rámci této práce je excentricita  $e$ . Pro snadné porovnání byly sestaveny grafy, v nichž je vynešen na vodorovné ose opět efektivní poloměr  $r$ , na ose svislé se nachází již zmíněná excentricita  $e$ .

#### C/2006 W3 (Christensen)

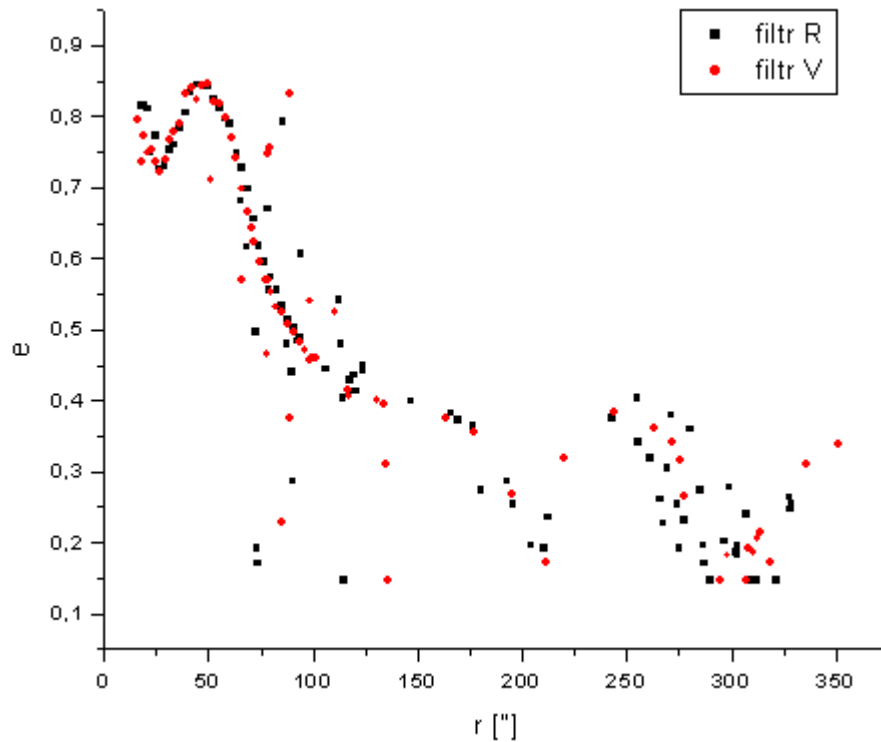


Obrázek 5.7: Závislost excentricity jednotlivých elips na jejich efektivním poloměru. Graf obsahuje data komety C/2006 W3 (Christensen).

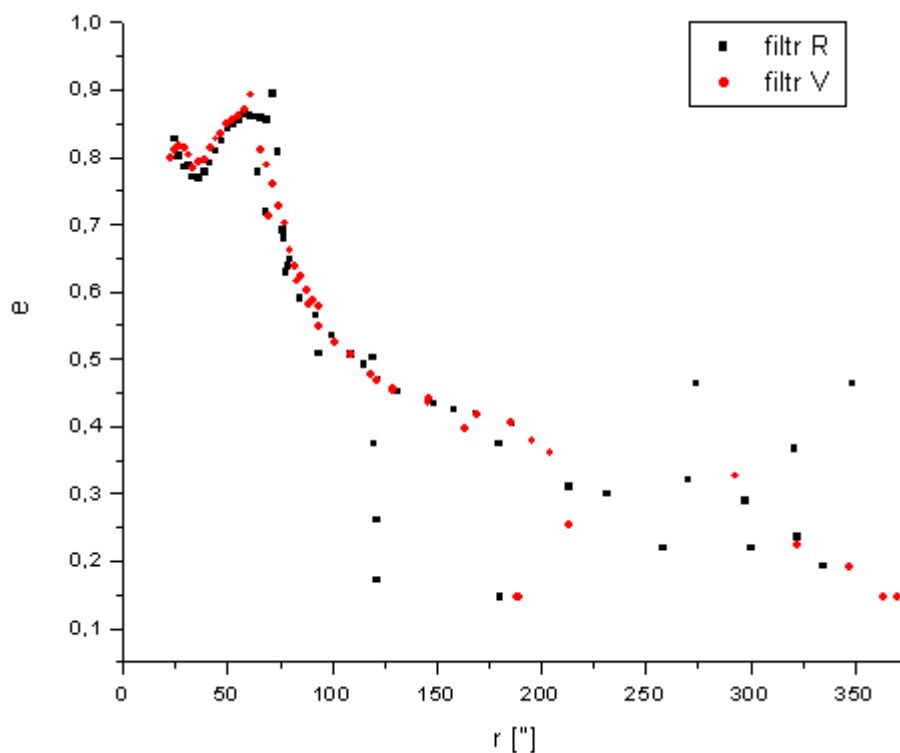
Graf komety C/2007 W3 (Christensen) (obrázek 5.7) nezobrazuje žádný dobře rozeznatelný rozdíl mezi jednotlivými filtry. Nižší excentricita elips směrem k jádru komety je pravděpodobně způsobena skutečností, že se hmota od jádra šíří přibližně sféricky. Naopak růst excentricity směrem k okrajům komy je nejspíše způsoben především působením slunečního větru na komu. Při této interakci dochází k protahování komy ve směru od Slunce a tím ke zvyšování excentricity elips.

#### 17P/Holmes

I v grafu pro kometu 17P/Holmes (obrázek 5.8 a 5.9) není vidět prakticky žádný rozdíl mezi jednotlivými filtry, nicméně graf má opačnou tendenci než graf komety předchozí. Naopak excentricita je větší blízko jádra a klesá směrem k okrajům komy. Předpokládá se, že jádro komety se rozštěpilo na minimálně dvě aktivní části, které se od sebe mírně vzdálily. Tento stav je dobře zachycen na obrázku 5.3, kde je viditelné i postupné vzdalování jednotlivých jasnějších oblastí. To je nejspíše důvodem protažených elips v blízkosti jádra komety.



Obrázek 5.8: Závislost excentricity jednotlivých elips na jejich efektivním poloměru. Graf obsahuje data komety 17P/Holmes 31. 10. 2007. Zjasnění mimo střed symetrie bylo odstraněno.



Obrázek 5.9: Závislost excentricity jednotlivých elips na jejich efektivním poloměru. Graf obsahuje data komety 17P/Holmes ze dne 01. 11. 2007. Zjasnění mimo střed symetrie bylo odstraněno.

Pokud si prohlédneme oba grafy (5.8 a 5.9) důkladněji, zjistíme, že křivka tvořená jednotlivými body je v oblasti jádra nejen značně zvýšena, ale má i poměrně zajímavý průběh. Pro popis použijme snímek 5.8. Nejvyšší vrchol křivky se nachází ve vzdálenosti  $\sim 50''$  od jádra. Za tímto bodem následuje pokles a vzápětí zase vzestup. Střed elips byl určen v centrálním zjasnění komety. Pokles se tedy můžeme pokusit interpretovat jako stav, kdy se poloměr elips již natolik zmenšil, že se většina jasnosti, tvořící zjasnění mimo střed symetrie, nachází mimo elipsu. Po poklesu ovšem dochází k opětovnému růstu v blízkosti středu komety. Tento růst u komety C/2006 W3 (Christensen) ale přítomen nebyl, tudíž není nejspíše způsoben samotným jádrem. Mohlo by se jednat o stejnou příčinu jako při předchozím vzestupu excentricity. Tedy že samotné centrální zjasnění není tvořeno jedním jediným jádrem, ale větším počtem těles, z kterých se uvolňuje materiál.

## 5.2 Srovnání s plošnou fotometrií galaxií

Pro fotometrii komet se v dostupné literatuře nepodařilo dohledat žádný univerzální zákon, který by dokázal popsat pokles jasu ve fotometrickém profilu. Při snaze porovnávat výsledky byla proto využita fotometrie eliptických galaxií, která se v určitých ohledech fotometrii komet prováděné v této práci velice podobá. Galaxie se na snímku jeví jako plošný objekt, stejně jako kometa. Fotometrický profil pro galaxii se obvykle získává fitováním většího množství elips, tedy postupem srovnatelným s postupem využitým zde na vytváření fotometrického profilu komet. Na rozdíl od komet ale u fotometrie eliptických galaxií existuje zákon, pomocí něhož se dá popsat profil plošného jasu v závislosti na vzdálenosti od středu galaxie [33].

### 5.2.1 De Vaucouleursův zákon

Jedná se o jeden z nejdůležitějších poznatků fotometrie eliptických galaxií. Tento zákon, nazývaný obvykle také 1/4 zákon, platí pro eliptické galaxie a pro centrální výdutě galaxií spirálních. Zákon nám říká, že radiální průběh plošného jasu závisí na 1/4 mocnině vzdálenosti od centra objektu. Platí tedy vztah

$$\mu \sim r^{1/4}. \quad (5.1)$$

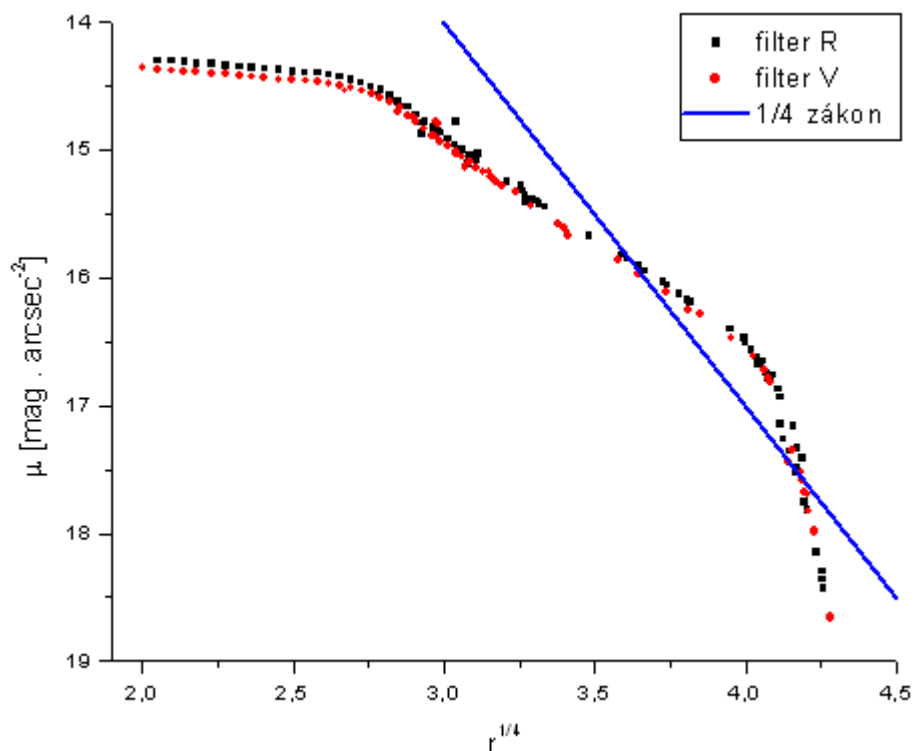
Podrobnější odvození úprav 1/4 zákona pro různé okolnosti a jeho využití ve spojitosti s eliptickými galaxiemi lze dohledat ve zdroji [33].

V případě, že 1/4 zákon nevystihuje tvar galaktického profilu dostatečně přesně, využívá se vzorec v pozměněné formě

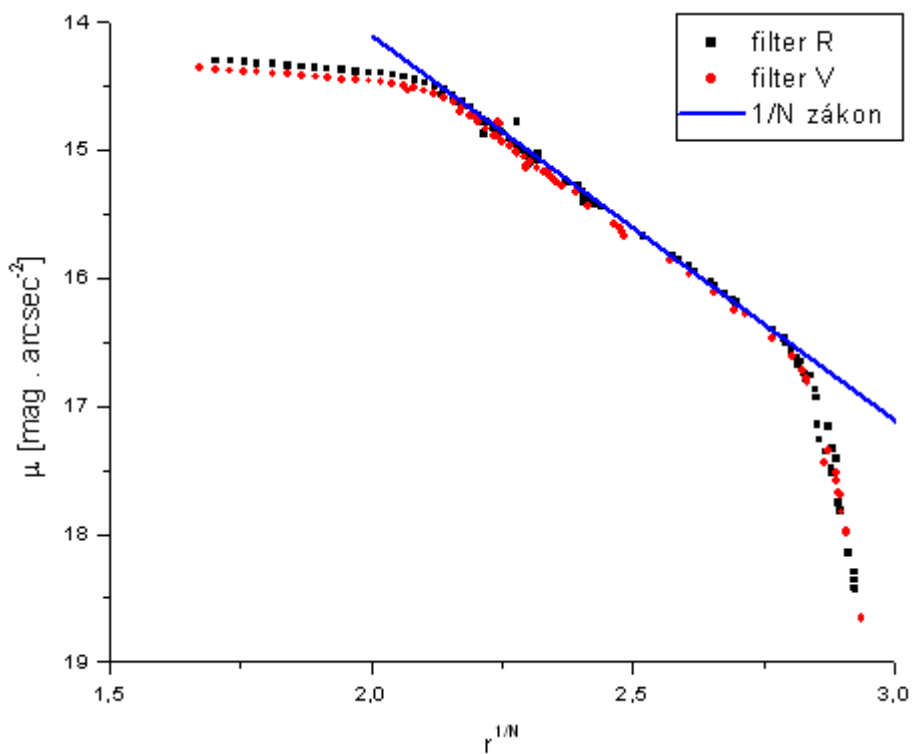
$$\mu \sim r^{1/N}. \quad (5.2)$$

Za  $N$  se dosazuje číslo tak, aby výsledná křivka co nejpřesněji vystihla tvar zkoumaného galaktického fotometrického profilu [33].

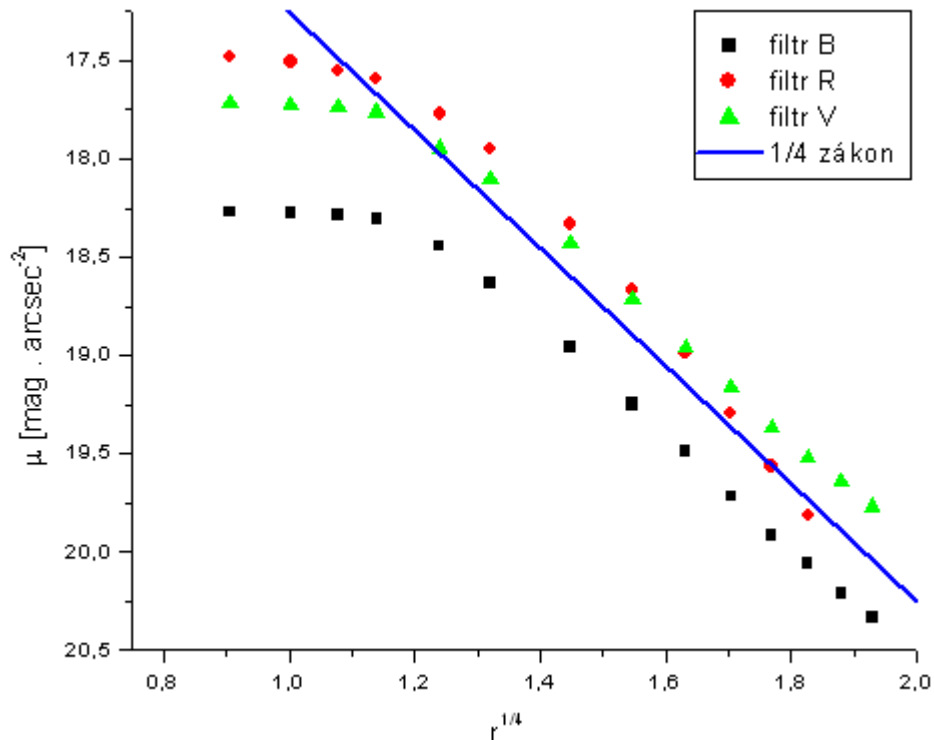
## 5.2.2 Porovnání výsledků



Obrázek 5.10: 1/4 zákon vyneseny do grafu společně s daty komety 17P/Holmes ze 31. 10. 2007.



Obrázek 5.11: Fotometrický profil komety 17P/Holmes proložený 1/N zákonem. Za  $N$  byla v tomto případě dosazena hodnota 5,4.



Obrázek 5.12: Fotometrický profil komety C/2006 W3 (Christensen) s vynesným 1/4 zákonem.

Z obrázku 5.10 je dobře vidět, že 1/4 zákon je na kometu 17P/Holmes nepoužitelný. Nicméně po změně mocniny (obrázek 5.11) na 1/5,4 je již výsledek zcela odlišný a nová křivka je ve výborné shodě s částí kometárního profilu. Výjimku tvoří oblast v blízkosti jádra a oblast naopak na samém okraji komy. Podle tvrzení ze zdroje [33] ale i křivka u eliptických galaxií obecně vykazuje největší shodu s fotometrickým profilem v oblastech, které se nenacházejí blízko středu nebo okraje galaxie.

Na obrázku 5.12 vidíme proložení profilu komety C/2006 W3 (Christensen). Proložení tohoto profilu 1/4 zákonem dopadlo lépe než v předchozím případě a už s touto mocninou zákon vystihuje tvar profilu velice dobře. Výjimkou je opět oblast v blízkosti středu.

Úspěšnost, s jakou se povedlo prokládat získané kometární profily 1/4 zákonem nebo 1/N verzí zákona, je vzhledem k naprosto odlišné podstatě komet a galaxií překvapující. Na základě těchto výsledků se nabízí myšlenka, že by rovnováha v komě komet mohla být udržována způsobem do značné míry podobným způsobu, jakým je udržována v galaxiích.

# Závěr

Cílem bakalářské práce bylo studium plošného jasu komet. Pro vyšetření průběhu plošného jasu v závislosti na vzdálenosti od středu komety (tzv. fotometrický profil) bylo nutné izofoty v komě komety aproximovat elipsami. Dále se analyzovala excentricita elips u komet, taktéž především v závislosti na vzdálenosti od středu komety. Dalším cílem bylo porovnání získaných výsledků se zákony běžně aplikovanými na popis průběhu plošného jasu v eliptických galaxiích. Zákon používaný běžně při fotometrii galaxií byl zvolen proto, že podobný zákon pro komety neexistuje a eliptické galaxie se tvarem značně blíží obvyklému tvaru komy komety, který je možno u obou objektů s poměrně dobrými výsledky aproximovat elipsou. V práci byly zpracovávány snímky komet 17P/Holmes a C/2007 W3 (Christensen).

Při studiu fotometrických profilů bylo u obou studovaných komet zjištěno poměrně dobře rozeznatelné dělení komy na vnitřní a vnější část. U komety 17P/Holmes byla zjištěna velice rychlá expanze komy, dosahující v okrajových částech rychlosti  $\sim 729,4$  m/s. Studium excentricity elips ukázalo fakt, který byl ze snímků už pouhým pohledem zřejmý – kometa má dva body se zvýšenou jasností, tedy dvě tělesa uvolňující do okolního prostoru materiál. Vyšetření průběhu excentricity přivádí k myšlence, zda neexistuje kromě těchto dvou aktivních těles i méně výrazné těleso třetí, nacházející se poblíž středu komety. K potvrzení této myšlenky by však bylo vhodné zpracování snímků z doby před 24. říjnem 2007, kdy došlo k prudkému zjasnění komety. Předpokládá se, že zjasnění komety bylo způsobeno prudkým uvolněním velkého množství akumulovaných plynů, které mohly rozdělit jádro na několik fragmentů. Studium výše zmíněných snímků, na kterých podle všech předpokladů bylo ještě jádro vcelku, by se mohlo pokusit ověřit, zda za vzestupem excentricity elips v těsné blízkosti jádra není samo jádro a jeho aktivita.

Porovnáním získaných výsledků se zákonem používaným pro eliptické galaxie bylo zjištěno, že tento zákon na velkou část komy aplikovat lze velice dobře. Tento fakt nám nabízí myšlenku, jak moc si jsou vlastně podobné procesy udržující rovnováhu v těchto různých vesmírných objektech. Velice zajímavé by zajisté bylo vyšetření fotometrických profilů tímto způsobem u většího počtu komet.



# Literatura

- [1] V. Železný. *Návrat první dámy*. Panorama, Praha, 1986.
- [2] P. R. Weissman, L. McFadden, T. V. Johnson. *Encyclopedia of the Solar System*. Academic Press, San Diego, 1999.
- [3] Wikipedie – otevřená encyklopedie, *Záření*:  
<http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD>.
- [4] News and information about Sun-Earth environment:  
<http://www.spaceweather.com/>.
- [5] S. J. Clemett and coauthors. *Identification of Aromatic Organic Matter from Comet 81P/Wild 2 by Itra-L2MS*. 38th Lunar and Planetary Science Conference in League City, Texas, 03/2007.
- [6] Wikipedia – The Free Encyclopedia, *Tisserand's Parameter*:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Tisserand's\\_parameter](http://en.wikipedia.org/wiki/Tisserand's_parameter).
- [7] List of Jupiter-Family and Halley-Family Comets:  
<http://www.physics.ucf.edu/~yfernandez/cometlist.html>.
- [8] D. Halliday, R. Resnick, J. Walker. *Fyzika*. Vutim a Prometheus, 2006.
- [9] S. B. Howell. *Handbook of CCD astronomy*. Cambridge University Press, 2006.
- [10] Z. Mikulášek, J. Krtička. *Základy fyziky hvězd*, skripta. Masarykova Univerzita, Brno, 2007.
- [11] ESO Press Releases and Photos 1996:  
<http://www.eso.org/public/outreach/press-rel/pr-1996/>.
- [12] MonteBoo Observatory:  
<http://physics.muni.cz/mb/>.
- [13] Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. 17P/Holmes:  
<http://www.cfa.harvard.edu/iau/Ephemerides/Comets/0017P.html>.
- [14] D. Fischer. The Cosmic Mirror:  
<http://www.astro.uni-bonn.de/~dfischer/mirror/306.html>.

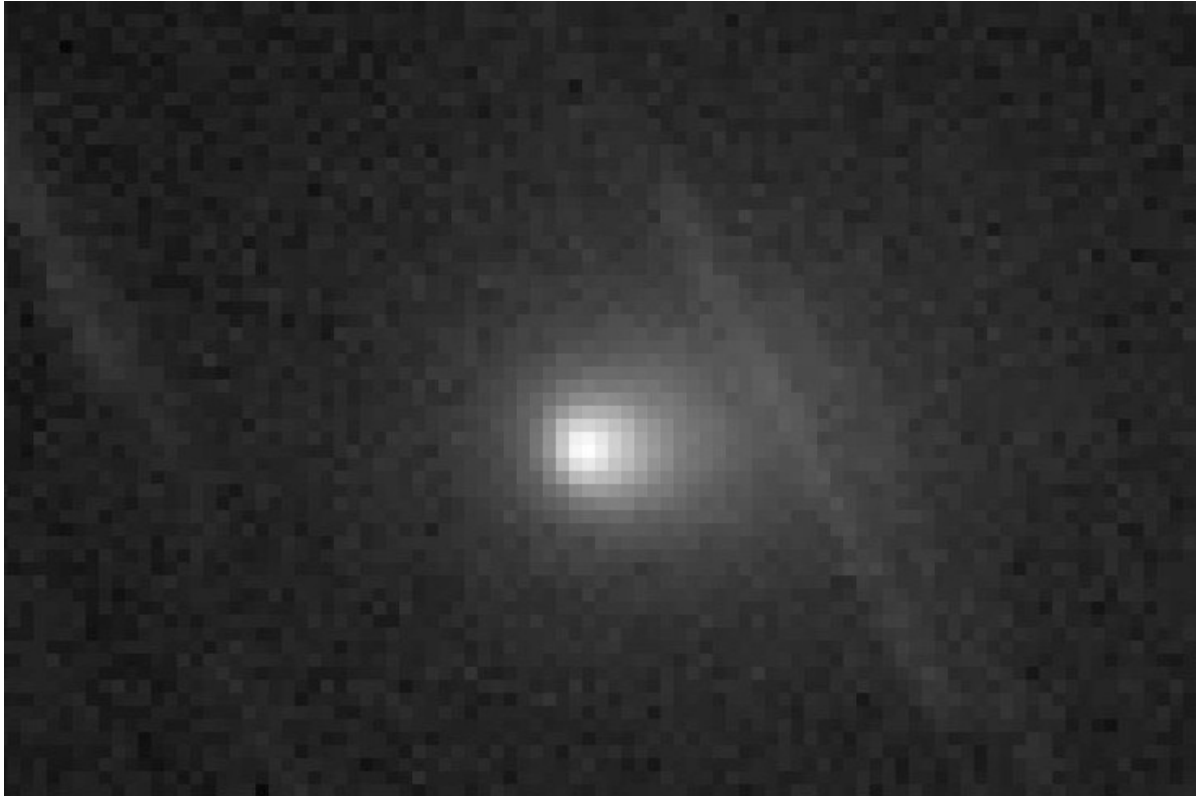
- [15] K. Kinoshita. *17P/Holmes*. Gary W. Kronk's Cometography:  
<http://www.cometography.com/pcomets/017p.html>.
- [16] Wikipedia – The Free Encyclopedia, *Comet Holmes*:  
[http://en.wikipedia.org/wiki/Comet\\_Holmes](http://en.wikipedia.org/wiki/Comet_Holmes).
- [17] Seiichi Yoshida's Home Page, C/2006 W3 (Christensen):  
<http://www.aerith.net/comet/catalog/2006W3/2006W3.html>.
- [18] Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics. C/2006 W3 (Christensen):  
<http://www.cfa.harvard.edu/iau/Ephemerides/Comets/2006W3.html>.
- [19] F. Hroch. *Astronomické praktikum*. Brno, 2006.  
<http://physics.muni.cz/~hroch/apraktik.pdf>.
- [20] F. Hroch. *Computer Programs for CCD Photometry*. 20th Stellar Conference of the Czech and Slovak Astronomical Institutes, 1998.
- [21] Jet Propulsion Laboratory: Solar System Dynamics – HORIZONS System:  
<http://ssd.jpl.nasa.gov/?horizons>.
- [22] F. Hroch, K. Hornoch. [CCD-CD] *skladani snimku na kometu*:  
<http://amper.ped.muni.cz/pipermail/ccd/2002-January/000145.html>.
- [23] The Aladin Sky Atlas:  
<http://aladin.u-strasbg.fr/aladin.gml>.
- [24] GAIA – Graphical Astronomy and Image Analysis Tool:  
<http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/gaia/gaia.html>.
- [25] GAIA – Image analysis capabilities:  
<http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/gaia/sun214.htx/node7.html>.
- [26] ELLPRO – Performs an ellipse fitting galaxy profile using simple intensity analysis:  
<http://docs.jach.hawaii.edu/star/sun180.htx/node45.html>.
- [27] Profiling galaxies using intensity analysis:  
<http://www.astro.gla.ac.uk/users/norman/star/esp/sun180.htx/node32.html>.
- [28] ELLFOU – Ellipse fitting galaxy profiles using contour analysis:  
<http://docs.jach.hawaii.edu/star/sun180.htx/node44.html>.
- [29] Profiling galaxies using contour analysis:  
<http://www.astro.gla.ac.uk/users/norman/star/esp/sun180.htx/node33.html>.

- [30] Limitations of ELLPRO and ELLFOU:  
<http://www.starlink.rl.ac.uk/star/docs/sun180.htx/node35.html>.
- [31] Choosing between ELLPRO and ELLFOU:  
<http://www.starlink.rl.ac.uk/star/docs/sun180.htx/node34.html>.
- [32] GAIA – Image Patching:  
<http://star-www.dur.ac.uk/~pdraper/gaia/gaia.htx/patch.html>.
- [33] K. Bartošková. *Plošná fotometrie eliptických galaxií*, bakalářská práce. Masarykova Univerzita, Brno, 2007.

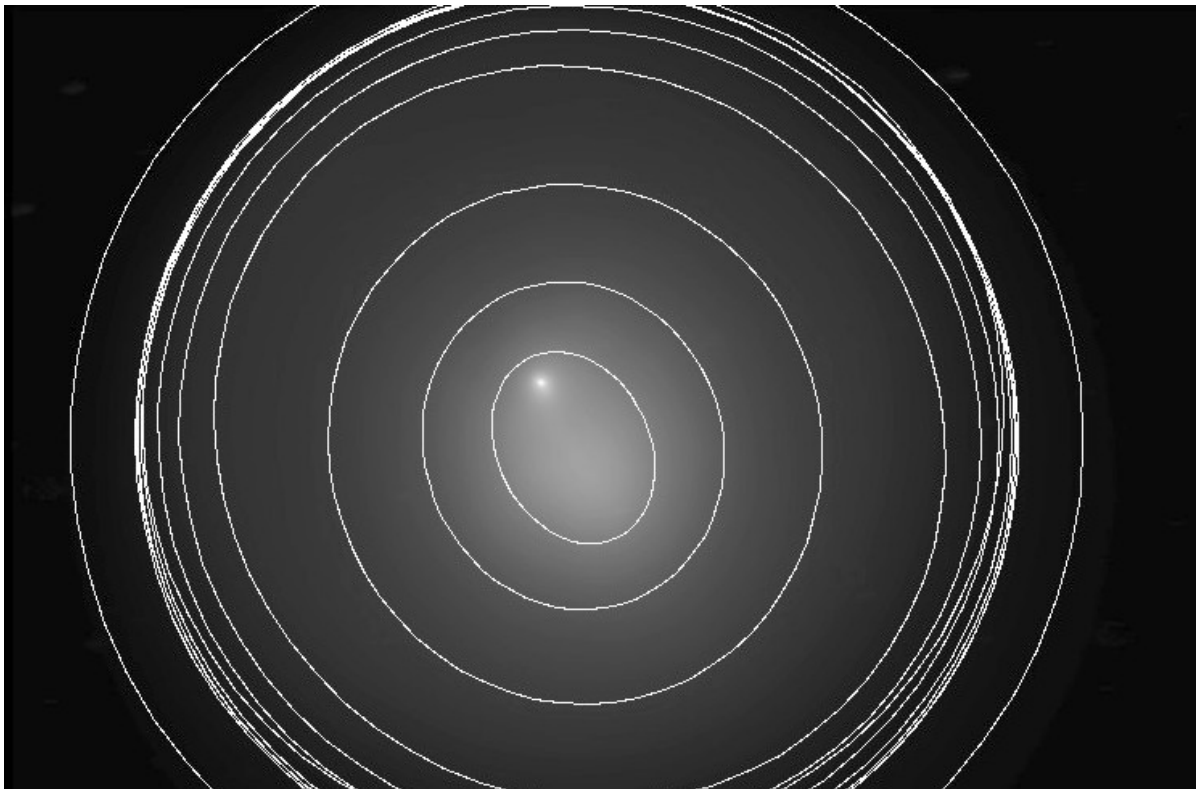
# Přílohy



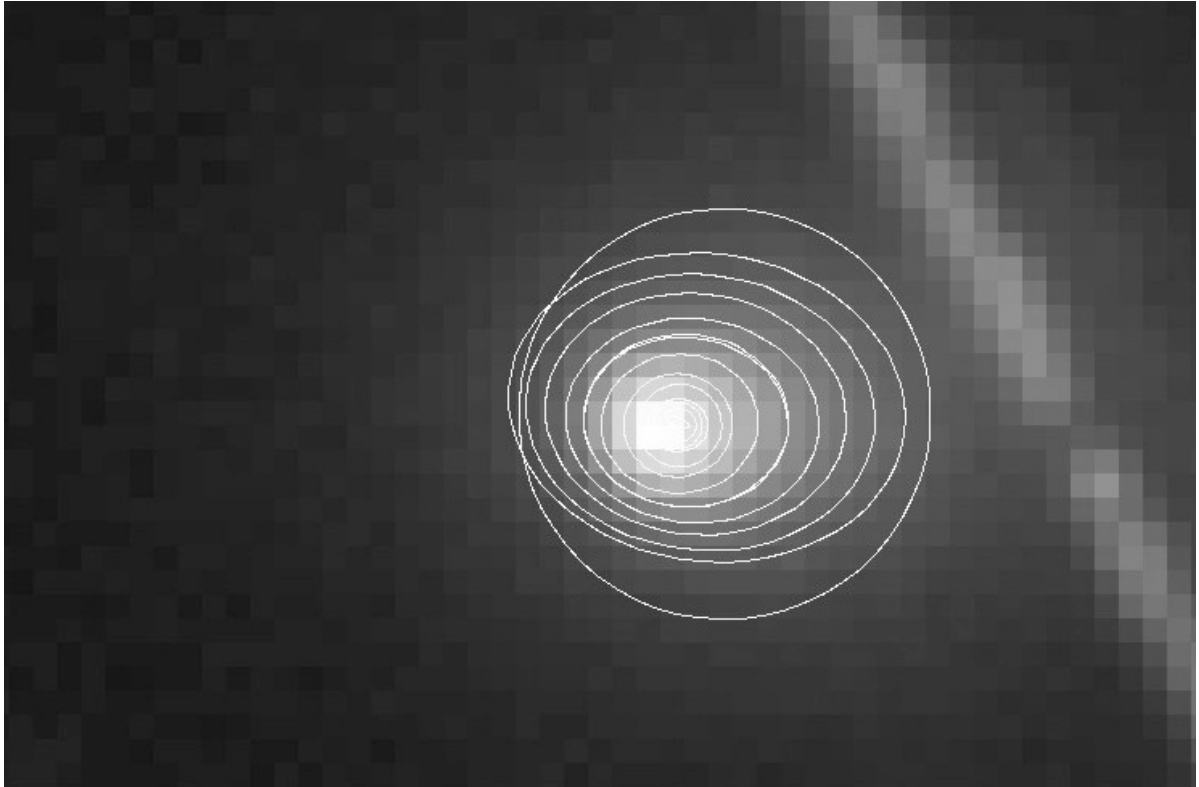
Obrázek A.1: Složený snímek komety 17P/Holmes ze 31. 10. 2007. Snímek byl pořízen ve filtru R, celková doba expozice je 11 min.



Obrázek A.2: Složený snímek komety C/2006 W3 (Christensen). Snímek je pořízen ve filtru R a celková doba expozice je 14 min. Jedná se o zvětšený výřez z původního snímku, proto jsou tak dobře viditelné jednotlivé pixely.



Obrázek A.3: Ukázka fitování elips metodou *isophote contours* na snímek komety 17P/Holmes.



Obrázek A.4: Ukázka fitování elips metodou *intensity analysis* na snímku komety C/2006 W3 (Christensen) .