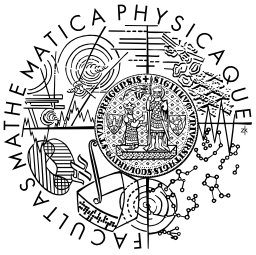


MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ FAKULTA
Univerzita Karlova

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Jan Frýda

Testování nové kamery na E152 - hvězdná proměnnost

Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: Dr. Petr Kabáth

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: Astronomie a astrofyzika

Praha 2023

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne ....

Podpis autora

Chtěl bych rád poděkovat svému vedoucímu dr. Petru Kabáthovi za veškerý věnovaný čas, rady a připomínky při vedení práce a Mgr. Jozefu Liptákovi za cenné připomínky a konzultace. Dále bych chtěl také poděkovat mé rodině za porozumění a podporu během vypracování práce i mimo něj.

Název práce: Testování nové kamery na E152 - hvězdná proměnnost

Autor: Jan Frýda

Katedra: Astronomický ústav UK

Vedoucí diplomové práce: Dr. Petr Kabáth, Astronomický ústav AV ČR

Abstrakt: Dalekohled E152 bude sloužit k budoucímu studiu vlastností exoplanet a je tak potřeba otestovat jeho instrumenty a připravit a vyzkoušet programy, které budou zpracovávat pozorované snímky. Tato sada programů, která provádí kalibraci snímků z fotometrické CCD kamery C4-16000 umístěné na dalekohledu E152, a aperturní a diferenciální fotometrii, byla vyvinuta, otestována a aplikována na sady snímků pocházejících z testovacího běhu kamery, během něhož byly pozorovány dvě eruptivní proměnné M hvězdy AU Microscopii (AU Mic) a DS Tucanae A (DS Tuc) se známými exoplanetami. Byly zjištěny problémy s vyčítacím systémem a flat snímky pocházejícími z kamery. Byly analyzovány světelné křivky AU Mic a DS Tuc. U DS Tuc nebyl detekován ani tranzit, ani erupce, u hvězdy AU Mic byla detekována erupce, jejíž energie ve filtru Sloan g byla odhadnuta jako $E_{erupce} = 8{,}7352.10^{27}$ erg, což sedí s očekávanou hodnotou v rámci chyby. V poli AU Mic byl detekován objekt s názvem 2MASS 20450857-3123234 a jedná se pravděpodobně o proměnnou hvězdu typu δ Scuti.

Klíčová slova: CCD kamera, proměnná hvězda, erupce, fotometrie, testování

Title: Testing of new CCD on E152 - stellar variability

Author: Jan Frýda

Department: Astronomical Institute of Charles University

Supervisor: Dr. Petr Kabáth, Astronomical Institute of the CAS

Abstract: E152 telescope will be used for future characterization of exoplanets and so testing of its instruments is needed along with construction and testing of a pipeline, which is going to process acquired frames. This pipeline, which performs calibration of frames from photometric CCD camera C4-16000 placed on the E152 telescope and aperture and differential photometry, has been developed, successfully tested and applied on sequences of frames acquired from a testing run of the camera. During this testing run, two flare stars AU Microscopii (AU Mic) and DS Tucanae (DS Tuc) with known exoplanets have been observed. Problems with electronics system and flat frames of the camera have been revealed. Light Curves of stars AU Mic and DS Tuc have been analyzed. No transit or flare has been detected for DS Tucanae A, but a flare has been detected for AU Mic whose energy in Sloan g filter has been approximated as $E_{flare} = 8{,}7352.10^{27}$ erg which is of the order of expected value within range of error. In the AU Mic field an object with name 2MASS 20450857-3123234 has been detected, it is likely a δ Scuti variable star.

Keywords: CCD camera, variable star, flare, photometry, testing

Obsah

Úvod **3**

1 Fotometrická pozorování - podpora vesmírných misí hledajících exoplanety **4**
1.1 Pozorování exoplanet a hvězd 4
1.2 Proměnné hvězdy 6
1.3 Odhad energie erupce eruptivní proměnné hvězdy 8

2 Dalekohled E152 **10**
2.1 Popis a využití 10
2.2 C4-16000 kamera 11
2.2.1 Specifikace čipu 12

3 Kalibrace fotometrických dat **14**
3.1 CCD kamera 14
3.2 Kalibrace CCD snímků 15
3.2.1 Kalibrace snímků pořízených kamerou C4-16000 15
3.3 Fotometrie 16
3.3.1 Aperturní fotometrie 19
3.3.2 Diferenciální fotometrie 21

4 Pipeline PLATOSpecPhot -kalibrace a diferenciální fotometrie snímků pořízených kamerou C4-16000 **23**
4.1 Struktura pipeline PLATOSpecPhot 23
4.1.1 `Pipeline.py` a `config.ini` 23
4.1.2 `Image_calibration.py` 25
4.1.3 `Files_and_folders_preparation.py` 26
4.1.4 `Master_images_creation.py` 27
4.1.5 `Photometry_parameters.py` 28
4.1.6 `Stars.py` 29
4.1.7 `Photometry.py` 30
4.1.8 `Centroid_shifting_and_LC_making.py` 32
4.1.9 `Plotting.py` 33
4.2 Porovnání pipeline PLATOSpecPhot a programu C-Munipack . . 34

5 Soubor dat a pozorování cílů **38**
5.1 Cíle pozorování 38
5.1.1 AU Microscopii 38
5.1.2 DS Tucanae A 38
5.2 Pozorování 38
5.3 Kalibrační snímky 39
5.3.1 Analýza linearity dark snímků 40

6 Analýza dat **47**
6.1 Světelné křivky 47
6.1.1 DS Tucanae A 47
6.1.2 AU Microscopii 51
6.1.2.1 Detekovaná erupce na AU Microscopii 52
6.1.2.2 Proměnná hvězda v poli AU Mic 55

Závěr **56**

Seznam použité literatury **58**

Seznam obrázků **61**

Seznam tabulek **64**

Seznam použitých zkratek **65**

Úvod

V současnosti bylo potvrzeno přes 5000 exoplanet, nicméně pro zpřesnění a prohloubení znalostí o exoplanetách je potřeba jich detekovat mnohem více. To bude mít za úkol družice PLATO, která po plánovaném startu v roce 2026 bude detekovat planetární tranzity u stovek tisíců hvězd. Na navržené exoplanetární kandidáty a hvězdy, okolo kterých exoplanetární kandidáti obíhají, se pak zaměří pozemské instrumenty s cílem potvrdit daného exoplanetárního kandidáta a provést dodatečná měření. Jedním z těchto pozemských instrumentů je dalekohled E152 na observatoři La Silla v Chile, který bude obstarávat spektroskopická a fotometrická měření exoplanetárních kandidátů a jejich hvězd detekovaných družicí PLATO. Na dalekohledu E152 jsou tak umístěné dva přístroje. Prvním z nich je spektrograf PLATOSpec, který bude provádět spektrografická měření, a druhým z nich je fotometrická CCD kamera C4-16000, která bude paralelně se spektroskopickým měřením spektrografu PLATOSpec provádět fotometrická měření. Tato měření jsou úplně prvním výstupem z dalekohledu E152, který byl po téměř dvaceti letech modernizován, a je tak potřeba je analyzovat a zjistit, zda vše funguje tak jak by mělo.

Dalekohled E152 byl v průběhu posledních několika let modernizován, a instrumenty na něm umístěné a software pro analýzu jejich výstupů se tak musí připravit a otestovat pro spuštění podpůrného měření. Tato práce se zaměřuje na fotometrická měření obstaraná CCD kamerou C4-16000 umístěnou na dalekohledu E152 v průběhu několika nocí a jejich analýzu.

Cílem této práce je navržení a vytvoření postupu zpracování fotometrických měření obstaraných CCD kamerou C4-16000, konkrétně se zaměřením na dvě proměnné M hvězdy AU Microscopii a DS Tucanae, což byly objekty pozorované kamerou C4-16000 nejvíce, následně pak použití tohoto postupu na zpracování těchto fotometrických měření a analýza výsledků.

V první kapitole je přiblížena teorie detekce exoplanet, proměnné hvězdy a jak se dá přibližně určit energie erupce proměnné hvězdy. Ve druhé kapitole je popsán dalekohled E152 a CCD kamera C4-16000. Ve třetí kapitole je popsána teorie kalibrace fotometrických měření a teorie diferenciální a aperturní fotometrie. Ve čtvrté kapitole je popsán postup zpracování fotometrických měření. V páté kapitole jsou popsány hvězdy AU Microscopii, DS Tucanae, a je uveden popis jejich pozorování spolu s příslušnými soubory dat. V šesté kapitole je pak popsána analýza dat a aplikace popsané teorie na výstupy z postupu zpracování fotometrických měření.

1. Fotometrická pozorování - podpora vesmírných misí hledajících exoplanety

1.1 Pozorování exoplanet a hvězd

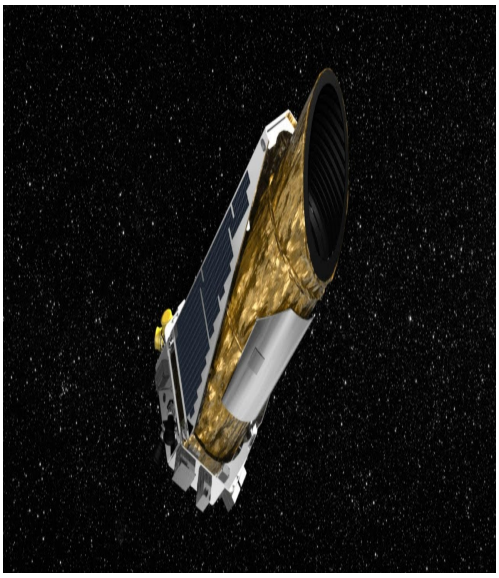
Od potvrzeného pozorování první exoplanety 51 Pegasi b Michelem Mayorem a Didierem Quelozem [Mayor a Queloz, 1995] v roce 1995 uplynulo již téměř 30 let. Za tuto dobu bylo potvrzených více než 5300 exoplanet a další tisíce čekají na potvrzení [Cal]. Většina z těchto exoplanet byla pozorována a potvrzena dvěma družicemi v rámci třech misí.

První z nich je družice Kepler od americké vesmírné agentury National Aeronautics and Space Administration (NASA), která odstartovala v roce 2009 a hledala tranzitující exoplanety u více než 150 000 hvězd v Mléčné dráze, než ukončila svoji činnost v rámci mise Kepler roce 2013 z důvodu poruchy. Našla přes polovinu dnes známých exoplanet. Zjistilo se však, že družice Kepler i přes její omezené možnosti manévrování stále může být používána k pozorování exoplanet. Byla tak přejmenována na družici K2 a byla využita pro misi K2, která byla spuštěna v roce 2014. Mise K2 ukončila svoji činnost v roce 2018 [Johnson, 2018] a nalezla přes 500 exoplanet. Druhou z družic je družice Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS) taktéž z NASA, která odstartovala v roce 2018 a přestože byla její činnost nejprve plánována jen na 2 roky, tak v roce 2023 stále pokračuje v pozorování nejbližších trpasličích hvězd od Země v naději na to, že detekuje tranzitující exoplanetu [Nas]. Potvrdila prozatím přes 300 exoplanet, ale přes 6000 možných kandidátů na exoplanetu stále čeká na potvrzení [Cal]. Obě družice jsou zobrazeny na Obrázku 1.1

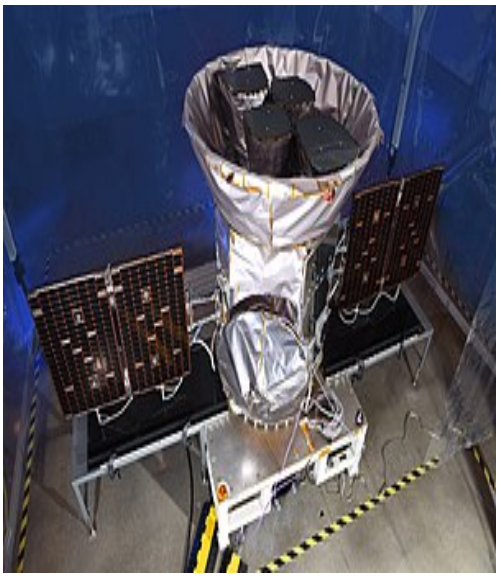
Pro další detekci exoplanet je v blízké době plánována mise PLAnetary Transits and Oscillations of stars (PLATO) od Evropské kosmické agentury (ESA). PLATO je vesmírný teleskop, který má být vypuštěn do L_2 libračního bodu soustavy Země-Slunce v roce 2026. Jeho cílem je fotometrické měření velkého počtu (řádově stovek tisíc) jasných hvězd na obloze s cílem detekovat exoplanetární tranzity a určit poloměr těchto exoplanet s velkou přesností (řádu jednotek procent), a určení hmotností, věku a poloměru zkoumaných hvězd metodou asteroseismologie. Na tato měření pak naváží pozemské observatoře, které budou na základě metody měření radiálních rychlostí zkoumat jak hmotnosti těchto exoplanet, tak i jejich atmosféry spektroskopickým měřením [Pla]. Jeho plánovaný vzhled je vyobrazen na Obrázku 1.2.

Mezi metody detekce exoplanet patří mimo měření radiálních rychlostí a tranzitní fotometrie také přímé zobrazení, gravitační čočkování a astrometrie. Ale měření radiálních rychlostí a tranzitní fotometrie jsou zdaleka nejefektivnějšími a nejužívanějšími metodami.

Metoda měření radiálních rychlostí se zakládá na skutečnosti, že pokud kolem pozorované hvězdy obíhá exoplaneta, pak hvězda spolu s ní obíhá kolem společného těžiště. To znamená, že se mění její radiální rychlost jak se nepatrně pohybuje tam a zpátky. Takovéto pohyby není v praxi možné pozorovat přímo,



(a) Družice Kepler



(b) Družice TESS

Obrázek 1.1: Vyobrazení družice Kepler ve Vesmíru (převzato z[Johnson, 2018]) a snímek družice TESS před startem (převzato z [Tes])

využívá se proto spektrálních čar a Dopplerova jevu. Jestliže má hvězda radiální rychlost směrem od Země, pak budou spektrální čáry světla pocházejícího od hvězdy posunuty ve spektru směrem do červené oblasti spektra, a pokud má hvězda radiální rychlost směrem k Zemi, pak budou spektrální čáry světla pocházejícího od hvězdy posunuty ve spektru směrem do modré oblasti spektra. Radiální rychlost v_r se pak určí jako

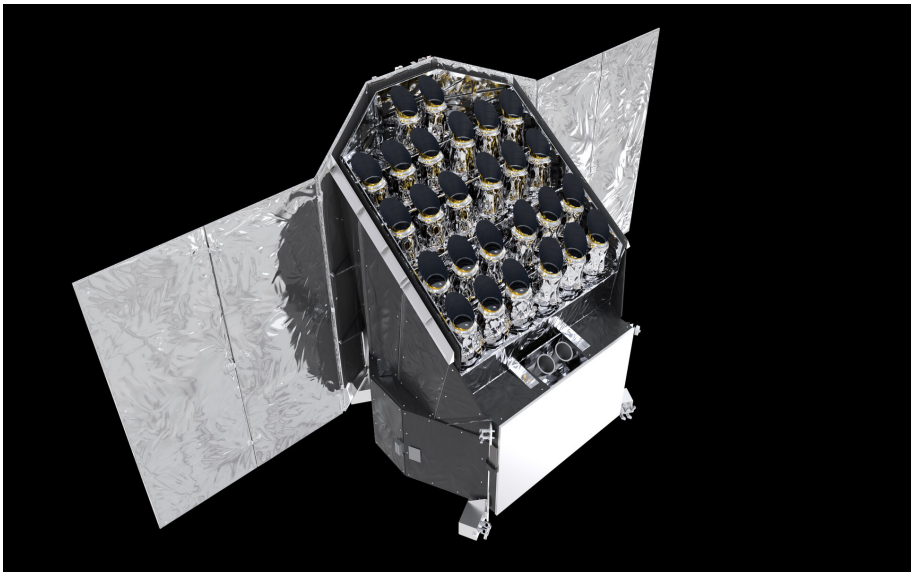
$$v_r = c\,\frac{\lambda_p - \lambda_0}{\lambda_0}\,, \tag{1.1}$$

kde λ_p je pozorovaná vlnová délka spektrální čáry, λ_0 je vlnová délka spektrální čáry, jakou bychom viděli, kdyby se hvězda nepohybovala radiálně a c je rychlost světla. Ze vzorce 1.2 plyne, že radiální rychlost systému hvězda a exoplaneta obíhajících okolo sebe může nabývat kladných i záporných hodnot. Ukázka naměřené křivky radiálních rychlostí je na Obrázku 1.3. Budeme-li pak uvažovat semiamplitudu radiální rychlosti $v_{r,semi}$ definovanou jako $v_{r,semi} = (v_{r,max} - v_{r,min})/2$, lze z Keplerových zákonů a Newtonova gravitačního zákona ukázat, že pro tuto semiamplitudu radiální rychlosti platí vztah [Lovis a Fischer]

$$v_{r,semi} = \sqrt{\frac{G}{1-e^2}}\; m_p \sin i\; (m_h + m_p)^{-1/2}\; a^{-1/2}\,, \tag{1.2}$$

kde G je gravitační konstanta, e je excentricita systému hvězda a exoplaneta, m_p je hmotnost **exo**planety, m_h je hmotnost hvězdy, a je velká poloosa pohybu elipsy, kterou hvězda při svém pohybu okolo společného těžiště opisuje, a i je úhel inklinace roviny pohybu hvězdy a exoplanety vůči rovině kolmé na rovinu pozorovatele. Z průběhu křivky radiálních rychlostí je možné určit $v_{r,semi}$, a a e. protože je m_p typicky řádově menší [1] než m_h, tak za předpokladu znalosti hmotnosti hvězdy m_h, která se určí spektroskopickou analýzou či měřením paralaxy, lze

[1] Například Jupiter je v porovnání se Sluncem přibližně tisíckrát méně hmotný.



Obrázek 1.2: Umělecký snímek plánovaného teleskopu PLATO. Převzato z [Esa]

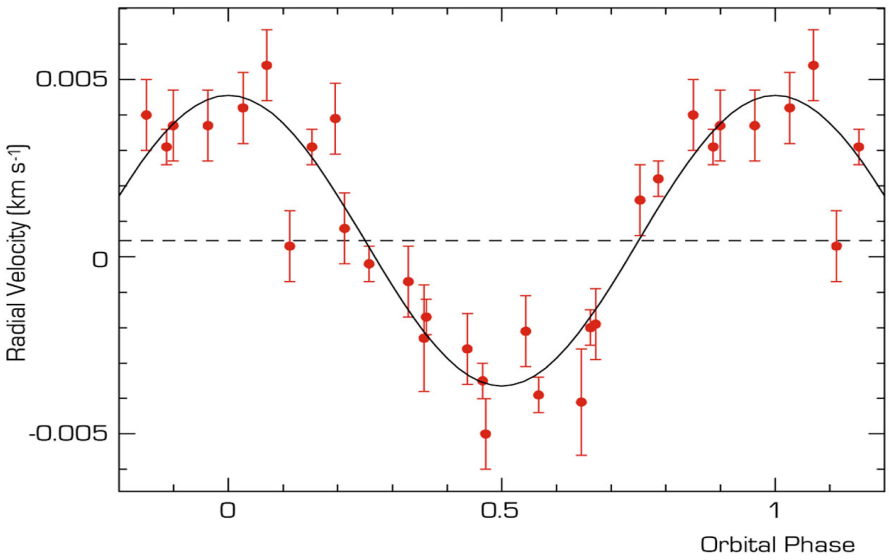
zanedbat m_p v součtu $(m_h + m_p)$, a tedy jsme z průběhu křivky radiálních rychlostí schopni spočítat veličinu $m_p \sin i$, která charakterizuje minimální hmotnost, jakou **exo**planeta může mít [Lovis a Fischer].

Pro přesné určení hmotnosti exoplanet m_p tak potřebujeme získat inklinační úhel i. Ten se dá odhadnout z druhé metody detekce exoplanety, kterou je tranzitní fotometrie. Pozorujeme-li tok záření z hvězdy, tedy pokud exoplaneta při svém oběhu začne přecházet na obloze přes hvězdný disk, tak příslušný tok záření z hvězdy poklesne. Zobrazíme-li si závislost pozorovaného toku záření na čase, takzvanou *světelnou křivku*, tak by byl vidět po nějakou dobu pokles toku záření z hvězdy. Ukázka takovéto světelné křivky indikující tranzitující exoplanetu je na Obrázku 1.4. Pokud by byl inklinační úhel i roven 0°, tak systém pozorujeme z vrchu a tranzit exoplanety nedetekujeme. Z toho lze usoudit, že pokud takový tranzit exoplanety detekujeme pravidelně, tak inklinační úhel i je blízký 90° a veličina $m_p \sin i$ je tak velmi blízko m_p [AST].

1.2 Proměnné hvězdy

Pro pozorování křivek radiálních rychlostí a světelných křivek je však nutné znát víc informací o hvězdě, ke které exoplaneta patří. Křivky radiálních rychlostí a světelné křivky totiž mohou být ovlivněny jevy, které souvisí se samotnou hvězdou. Hvězdám, jejichž tok záření se mění v čase (ne z důvodu tranzitu exoplanety), se říká *proměnné hvězdy*. Typicky se dělí na dva základní druhy.

Prvním z nich jsou *geometrické* proměnné hvězdy. Změna jasnosti geometrických proměnných hvězd souvisí se samotnou geometrií oběhu či rotace hvězdy. Do nich patří dva typy proměnných hvězd. Početnějšími a podrobněji zkoumanějšími z nich jsou *zákrytové* systémy. To typicky bývají dvojhvězdy či vícenásobné systémy, které se z důvodu gravitačního přitahování postupně periodicky zakrývají. Jejich úhel inklinace i je tak stejně jako u tranzitujících exoplanet také většinou blízký 90°. Protože jsou blízko sebe, vidíme je jako jednu hvězdu, která mění svoji jasnost. Méně početným zástupcem jsou *rotující* hvězdy. Jedná se o hvězdy

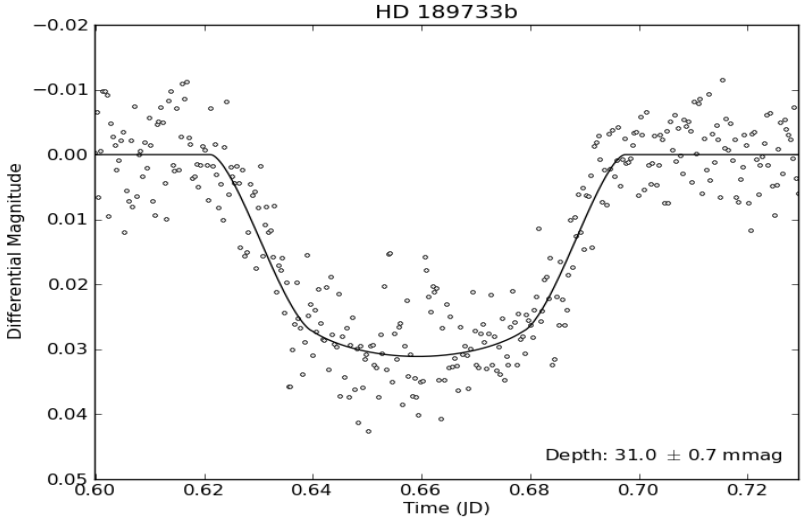


Obrázek 1.3: Graf měření radiálních rychlostí hvězdy μ Ara spektrografem HARPS. Převzato z [Santos a kol., 2004]

mající díky velmi silnému magnetickému poli na svém povrchu výrazné skvrny. Díky rotaci hvězdy tak klesá jejich jasnost tím, jak se skvrny postupně objevují a mizí z viditelné části hvězdy [Var].

Druhým z nich jsou *fyzické* proměnné hvězdy. Změna jasnosti fyzických proměnných hvězd souvisí se změnou fyzikálních parametrů hvězdy, konkrétně teploty a rozměru [Mašek]. Do nich patří další tři typy proměnných hvězd. *Pulzující* proměnné hvězdy periodicky expandují a kontrahují svůj povrch a tak detekujeme změny toku záření z důvodu toho, že tok záření závisí na poloměru hvězdy. Radiálně pulzující hvězda si zachovává svůj tvar, neradiálně pulzující hvězda ho může měnit. Pulzující proměnné hvězdy pulzují, aby zachovaly termodynamickou rovnováhu, ze které je hvězda vyváděna z důvodu změny opacity kvůli gravitačnímu tlaku [Harmanec a Brož, 2011]. *Kataklyzmické* proměnné hvězdy vykazují velmi nápadná zjasnění o 6 až 19 magnitudy [2] [Harmanec a Brož, 2011], které ale nebývají tak časté jako u výše zmíněných typů proměnných hvězd. Tyto změny jsou způsobovány termonukleárními procesy na povrchu či uvnitř hvězdy. Typicky se jedná o dvojhvězdy, z nichž jednou ze složek je horký bílý trpaslík. Může tak dojít k akreci hmoty na povrch bílého trpaslíka, což způsobí velmi výrazné zvýšení detekovaného toku záření, tomuto jevu se říká *nova* a její perioda bývá řádu desítek let [Harmanec a Brož, 2011]. Nakonec *eruptivní* proměnné hvězdy mají typicky menší změny toku záření než novy, ale jejich perioda bývá mnohem menší (řádu dní až několik let). Dochází k nim z důvodů různých procesů dějících se v jejich chromosférách, korónách a zejména také z důvodu erupcí v aktivní oblasti dané hvězdy, ke kterým dochází z důvodu rekonexe magnetického pole a dochází k nim u téměř všech typů hvězd v hlavní posloupnosti [Var].

[2] Po přepočtu toku záření na magnitudu dle vzorce 3.4



Obrázek 1.4: Světelná křivka hvězdy HD 189733 b s pozorovaným poklesem toku záření z důvodu tranzitu exoplanety. Převzato z [Mar]

1.3 Odhad energie erupce eruptivní proměnné hvězdy

Nejbližší hvězdou, jejíž erupce pozorujeme, je Slunce. U Slunce jsme schopni měřit energii sluneční erupce nejpřesněji ze všech hvězd, díky tomu, že Slunce je naše nejbližší hvězda. Schopnost prostorově rozlišit povrch Slunce umožňuje studium slunečních erupcí velmi detailně a díky tomu je možné hvězdným erupcím porozumět a zjistit mechanismus jejich vzniku a jejich vlastnosti [Shibayama a kol., 2013]. U jakékoliv jiné hvězdy ale není z důvodu přílišné vzdálenosti a nemožnosti prostorově rozlišit povrch hvězdy přesně možné provést studium jejich erupcí. Lze ale odhadnout [Shibayama a kol., 2013] energii pozorované erupce. Pro hvězdy spektrálního typu M bylo [Hawley a Fisher, 1992] ukázáno, že lze přibližně popsat spektrum hvězdné erupce ve viditelné oblasti jako záření černého tělesa pro efektivní teplotu $T_{flare} = 10000K$. Za tohoto předpokladu platí pro zářivý výkon erupce L_{flare} vztah

$$L_{flare} = \sigma_{SB}\ T_{flare}^4\ A(t)\,, \tag{1.3}$$

kde σ_{SB} je Stefan-Boltzmannova konstanta a $A(t)$ je plocha erupce [Shibayama a kol., 2013]. Hvězdu však pozorujeme jen v určitém rozmezí vlnových délek λ. V tom případě platí pro zářivý výkon hvězdy $L_{star}^{'}$ a zářivý výkon erupce $L_{flare}^{'}$ v použitém filtru vlnových délek vztahy

$$L_{star}^{'} = \pi R_{star}^2 \int (R_\lambda B_\lambda(T_{flare}))d\lambda\,, \tag{1.4}$$

$$L_{flare}^{'} = A(t) \int (R_\lambda B_\lambda(T_{flare}))d\lambda\,, \tag{1.5}$$

kde R_λ je křivka spektrální propustnosti použitého filtru vlnových délek, B_λ je Planckova funkce záření absolutně černého tělesa a R_{star} je poloměr hvězdy [Gün-

ther a kol., 2020]. Protože normalizovaná světelná křivka odpovídá relativní amplitudě hvězdné erupce

$$(F_{0,f}(t)/F_0) = L^{'}_{flare}/L^{'}_{star}\,, \tag{1.6}$$

kde ($F_{0,f}$ je tok záření během erupce a F_0 je tok záření z hvězdy mimo erupci [Vida a kol., 2019], tak lze $A(t)$ z rovnic 1.4, 1.5 a 1.6 vyjádřit jako

$$A(t) = (F_{0,f}(t)/F_0)\pi R^2_{star}\frac{\int(R_\lambda B_\lambda(T_{star}))d\lambda}{\int(R_\lambda B_\lambda(T_{flare}))d\lambda} \tag{1.7}$$

a konečnou energii erupce v použitém filtru vlnových délek jako

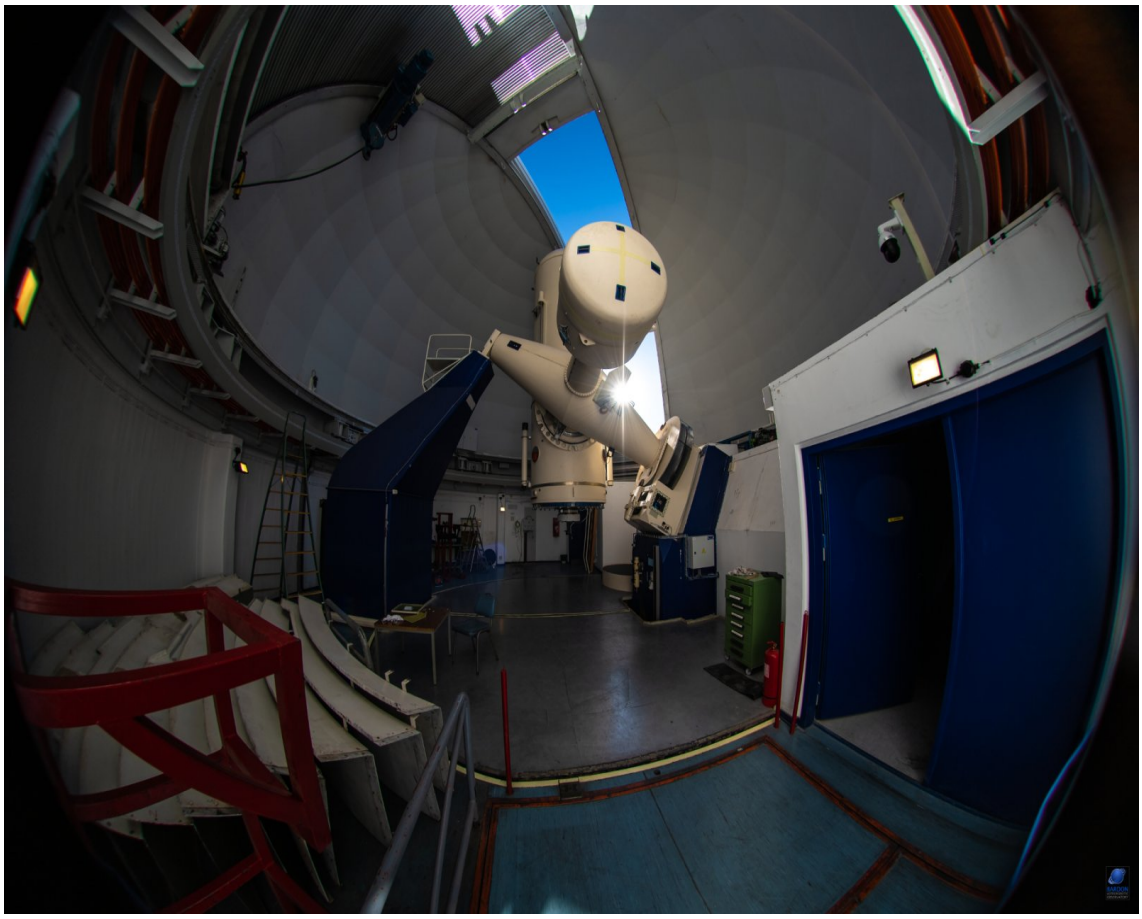
$$E_{flare} = \sigma_{SB}\ T^4_{flare}\ \pi R^2_{star}\frac{\int(R_\lambda B_\lambda(T_{star}))d\lambda}{\int(R_\lambda B_\lambda(T_{flare}))d\lambda}\int_{t_1}^{t_2}(F_{0,f}(t)/F_0)dt\,, \tag{1.8}$$

kde t_1 a t_2 jsou okamžiky začátku a konce erupce. Systematická chyba takto obdržené E_{flare} je odhadována na $\pm$ 66% [Shibayama a kol., 2013].

2. Dalekohled E152

2.1 Popis a využití

E152 dalekohled, vyfocený na Obrázku 2.1 se nachází v Evropské jižní observatoři (ESO) La Silla v Chile. Je jedním z vůbec prvních dalekohledů postavených v této observatoři, a to konkrétně v roce 1968. Byl používaný pro katalogizaci desítek tisíc hvězd v naší Galaxii a pro další objevy až do roku 2003, kdy byl vyřazen z provozu. V roce 2019 bylo rozhodnuto, že tento dalekohled bude znovu zrekonstruován a zmodernizován pod záštitou Astronomického ústavu Akademie věd České Republiky (dále AsÚ AVČR) a české firmy ProjectSoft HK. Hlavní motivací k tomuto rozhodnutí byl plán, že by dalekohled E152 v budoucnu mohl poskytovat podpůrná pozorování pro plánovanou misi PLATO [Ste]. Po dokončení rekonstrukce v roce 2022 byl tento dalekohled následně předán do správy AsÚ AVČR. Dalekohled je ovládán na dálku ze sídla AsÚ AVČR v Ondřejově.



Obrázek 2.1: Teleskop E152 vyfocený uvnitř kopule Zdeňkem Bardonem. Převzato z [Bardon, 2022]

E152 je primárně spektroskopický dalekohled. Nachází se ve výšce 2374 metrů nad mořem. Poloměr jeho hlavního zrcadla je 1,52 metru a poloměr jeho sekundárního zrcadla je 0,43 metru, obě tato zrcadla jsou vyrobena z borosilikátu. Jeho optická konfigurace je Cassegrain($f/14.9$) a jeho instalace je anglická

dvou-pilířová [Bardon, 2021].

Dalekohled E152 bude obstáravat podpůrná měření pro misi PLATO s využitím dvou přístrojů - spektrografu PLATOSpec a fotometrické CCD kamery C4-16000.

2.2 C4-16000 kamera

C4-16000 kamera je CCD kamera od firmy Moravské přístroje, využívající technologii CMOS přiblíženou v sekci 3.1. Vyobrazená je na Obrázku 2.2.

Obrázek 2.2: C4-16000 kamera zobrazená z několika úhlů. Převzato z [C4]

C4-16000 kamera má k dispozici odnímatelná filtrová kola různých velikostí (Obrázek 2.3) pro různý počet (typicky 5 nebo 7) světelných filtrů, které mohou filtrovat světlo různých vlnových délek [C4]. Pro kameru C4-16000 nainstalovanou na dalekohledu E 152 je k dispozici 5 Sloan filtrů (u, g, r, i, z) a úzkopásmový filtr centrovaný kolem vlnové délky H_α. Nejkratší možná expoziční doba kamery je 21μs, ale konstrukce závěrky je taková, že světlo začne dopadat na kameru řádek po řádku, což znamená, že celý čip je osvícený až po 86 ms. Maximální doba expozice není konstrukčně nijak omezená. Kamera je pro co největší eliminaci temného proudu chlazená Peltierovým termoelektrickým článkem a v závislosti na zdroji napětí se dá tento článek nastavit elektronickým ovladačem kamery tak, že je schopný zchladit čip kamery až o 35°C pod pokojovou teplotu s přesností 0,1°C [C4].

C4-16000 kamera je vybavena Gpixel GSENSE4040 CMOS čipem s rozlišením 4096×4096 pixelů. Velikost každého pixelu je 9×9 μm, což znamená skoro 37×37 mm plochy citlivé na světlo. Elektronický ovladač kamery podporuje binning až do rozměru 4×4 včetně asymetrických rozměrů [C4].

Obrázek 2.3: C4-16000 kamera bez filtrového kola (vlevo), se středně velkým filtrovým kolem (uprostřed) a s velkým filtrovým kolem (vpravo). Převzato z [C4]

2.2.1 Specifikace čipu

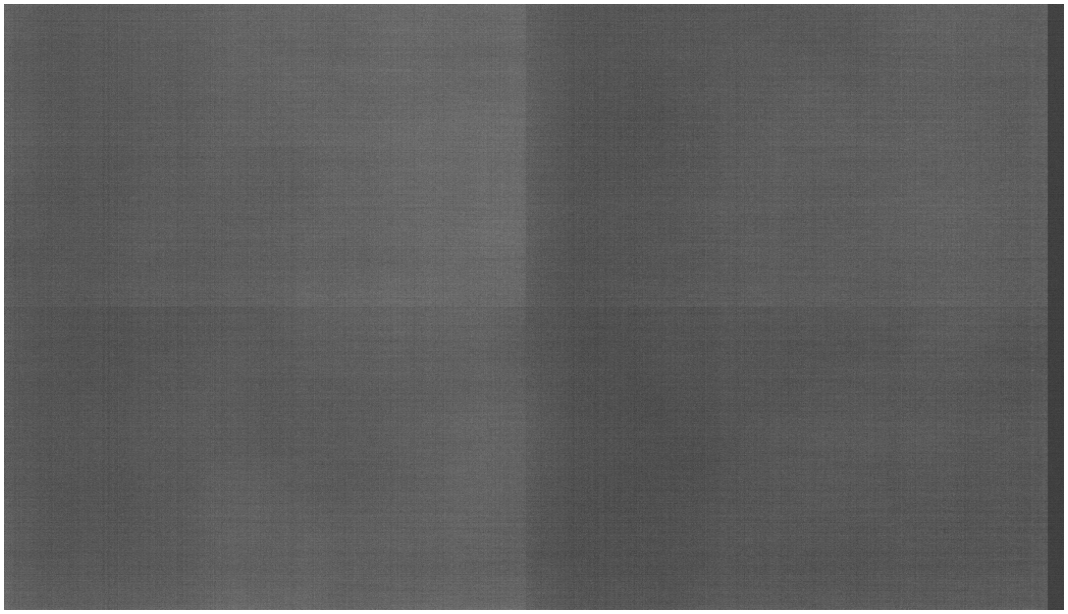
GSENSE4040 čip je rozdělený na 4 kvadranty znázorněné na Obrázku 2.4, každý s lehce rozdílným biasem. Tento rozdíl ale neovlivňuje významně fotometrické snímky. Na Obrázku 2.4 je možné napravo vidět takzvanou *overscan* oblast, což je oblast dalších 64×4096 pixelů [C4], které se používají pro odstranění malých variací v biasu [Newberry, 2008].

Specialitou tohoto čipu je organizace jeho elektroniky a samotný proces vyčítání. GSENSE4040 čip je vybaven dvěma skupinami 12-bitových analogově-digitálních převodníků pro každý pixel. Každý z těchto převodníků je schopen používat jiný gain η. První skupina používá takzvaný *low-gain* kanál, zatímco druhá skupina používá takzvaný *high-gain* kanál. Oba 12-bitové výstupy pak mohou být zkombinovány do finálního 16-bitového snímku s dynamickým rozsahem hodnot ADU, takzvaného *16-bit HDR snímku* [C4m]. Elektronický ovladač kamery C4-16000 nabízí čtyři vyčítací módy:

1. 16-bitový HDR mód
2. 12-bitový high-gain mód
3. 12-bitový low-gain mód
4. 16-bitový transformovaný low-gain mód.

První mód je výsledkem kombinace low-gain a high-gain snímků, druhý mód vrací příslušný low-gain snímek a třetí mód vrací příslušný high-gain snímek. Čtvrtý mód bude vysvětlen níže.

16-bitové HDR snímky vytvořené ze dvou 12-bitových snímků jsou v podstatě nerozeznatelné od opravdových 16-bitových snímků a jejich rozdíly jsou pro vědecké účely v porovnání s chybami jiných vlivů zanedbatelné [C4m]. Kombinace dvou 12-bitového high-gain a 12-bitového low-gain snímku probíhá dle [C4m] následovně:



Obrázek 2.4: Bias snímek GSENSE4040 čipu znázorňující 4 kvadranty s lehce rozdílnými hodnotami. Tmavý proužek napravo je overscan oblast. Převzato z [C4]

1. Jestliže high-gain pixel 12-bitového snímku je menší nebo roven předem definované hranici, tak tento high-gain pixel je beze změny použit jako pixel pro výsledný 16-bit HDR snímek. Tento je použit místo příslušného low-gain pixelu, protože má větší poměr signálu a šumu.

2. Jestliže high-gain pixel 12-bitového snímku je větší než předem definovaná hranice, tak je do výsledného 16-bit HDR snímku použit místo něj low-gain pixel 12-bitového snímku transformovaný transformační funkcí tak, aby jeho hodnota odpovídala hodnotě gainu příslušné high-gain snímkům. Tato funkce tedy zvětší hodnotu low-gain pixelu z intervalu hodnot 0–4096 na příslušnou hodnotu z intervalu hodnot 0–65535.

Čtvrtý vyčítací mód C4-16000 kamery tak vrátí low-gain snímek, ale transformovaný stejnou transformační funkcí.

Hodnota hranice je nastavená poblíž horního limitu hodnot 12-bitového snímku. Elektronické ovladače kamery C4-16000 používají hodnotu hranice 3600 ADU nastavenou výrobcem, tato hodnota dobře využije lineární část 12-bitového high-gain snímku [C4m].

3. Kalibrace fotometrických dat

3.1 CCD kamera

Pro zachycení signálu z hvězdy ve formě fotonů jsou využívány CCD kamery. Pracují na principu *fotoelektrického jevu*. Po dopadnutí fotonu na soustavu kondenzátorů s potenciálovými jámami (CCD čip neboli Charge Coupled Device), což může být například fotodioda nebo PN přechod, ve kterých jsou uloženy elektrony, dojde k absorpci fotonu a následném uvolnění elektronu z vazby za předpokladu, že má foton dostatečnou energii [Brož a Šolc, 2013]. Energie fotonu E se dá napsat jako

$$E = hf\,, \tag{3.1}$$

kde h je Planckova konstanta a f je frekvence fotonu. Jakmile E_{fotonu} je větší než $E_{ionizace}$ tak dojde k uvolnění elektronu z vazby.

Zjednodušeně se dá fungování CCD kamery popsat tak, že fotony o dostatečné energii dopadají na čip, po celou dobu expozice se tak shromažďují vodivostní elektrony, následně pak po ukončení expozice dojde ke změnám elektrických potenciálů na PN přechodech, což způsobí časově proměnný elektrický proud na výstupu, který je následně zesílen zesilovačem a analogově/digitálním (A/D) převodníkem převeden na takzvané *ADU* (Analog Digital Unit). ADU je bezrozměrná jednotka signálu, která je úměrná počtu uvolněných elektronů. Nabývá hodnot od 0 do $(2^N - 1)$ ADU, kde N je počet bitů A/D převodníku [Brož a Šolc, 2013]. Tato hodnota ADU je pak uložena pro daný pixel (jeden kondenzátor s potenciálovými jámami), kterých může být na jednom čipu několik, typické rozměry pro CCD kamery využívané pro fotometrická měření jsou 1024×1024, 2048×2048 nebo 4096×4096.

Převedení elektrického proudu na jednotku ADU se provede pomocí vzorce

$$ADU = \eta n_e\,, \tag{3.2}$$

kde n_e je počet uvolněných elektronů a η je tzv. *konverzní faktor* neboli *gain*, který je dán výrobcem dané CCD kamery a typicky mívá hodnotu $\eta = 1\ e^-/\mathrm{ADU}$ [Brož a Šolc, 2013].

Lze provést i součet signálu v sousedících pixelech o rozměru 2×2, 3×3, či více. Tomuto procesu se říká *binning* a má za následek zmenšení šumu signálu, ale zároveň i ztrátu rozlišení, protože rozměr čipu se tedy musí vydělit příslušným rozměrem pixelů, přes které provádíme součet.

CMOS (Complementary Metal Oxide Semiconductor) je jedna z technologií, která se používá pro konstrukci CCD kamer. U každého pixelu je adresovací logický obvod, u každého řádku pixelů pak zesilovače, společný A/D převodník a řídící elektronika. Tato konstrukce má za následek levnější výrobu čipu, menší rozměry čipu, protože část elektroniky je integrovaná přímo na čipu, menší spotřebu energie a menší tepelný šum. Na druhou stranu má za následek i menší zaplnění plochy čipu, či větši nehomogenitu pixelů [Brož a Šolc, 2013].

3.2 Kalibrace CCD snímků

Po proběhnutí expoziční doby máme k dispozici snímek S. Snímkem bez přívlastku je myšlen vstupní snímek, který je kalibrován a jedná se o ten, který je použit pro analýzu. Na tomto snímku S může být třeba pole hvězd, galaxií, či jiných vesmírných objektů. Pro účely této práce bude jako snímek S považováno pole hvězdy. Snímek S je však znečištěný třemi efekty, které nepochází od hvězd, a které je potřeba na daném snímku opravit. Pro odstranění vlivu těchto efektů na naměřený snímek je potřeba pořídit tři další druhy snímků.

Prvním z efektů je *temný proud*, což je tepelný signál, který pochází od elektronů uvolněných polovodičem bez vnějšího záření. Čipy jsou tedy většinou chlazené na velmi nízkou teplotu, aby byl tento temný proud co nejvíce eliminován.

Příslušným snímkem zachycujícím vliv temného proudu je takzvaný *dark snímek* (dark, D), který pořídíme expozicí stejně dlouhou jako původní snímek při stejné teplotě čipu, ale se zakrytým objektivem, aby byl co nejpřesněji změřen signál pocházející od temného proudu.

Druhým z efektů je *nulový proud* neboli *bias*, což je signál, který pochází ze samotného vyčítacího aparátu.

Příslušným snímkem zachycujícím vliv nulového proudu je takzvaný *bias snímek* (bias, B), který pořídíme co nejkratší expozicí se zakrytým objektivem, aby byl co nejpřesněji změřen signál vyčítacího aparátu bez vlivu temného proudu.

Třetím z efektů je *nerovnoměrnost pole*. To je signál pocházející od různé citlivosti jednotlivých pixelů, prachových zrn na krycím skle či filtrech nebo vinětací dalekohledu [Brož a Wolf, 2017].

Příslušným snímkem zachycujícím vliv nerovnoměrnosti pole je takzvaný *flat snímek* (flat, F), který pořídíme tak, že namíříme dalekohled na rovnoměrně osvícenou plochu, což může být například kupole dalekohledu, nebo obloha při svítání, kdy už nejsou vidět hvězdy. Protože je však flat snímek pořízen s otevřenou uzávěrkou, je potřeba k němu mít také vlastní dark snímek a bias snímek.

Po pořízení výše uvedených tří snímků máme k dispozici vše potřebné pro opravu původního snímku. Ta proběhne podle vzorce:

$$S_{opravený} = \frac{S - D - B}{F - D_{flat} - B_{flat}}, \tag{3.3}$$

a to pixel po pixelu [Brož a Wolf, 2017]. Pro eliminaci různých vad vyčítacího systému se pak dělá to, že se pořídí několik dark snímků, flat snímků a bias snímků a ty se poté zkombinují dohromady mediánem a až tento výsledný *master* snímek se použije do rovnice 3.3.

3.2.1 Kalibrace snímků pořízených kamerou C4-16000

Kvůli způsobu jakým C4-16000 kamera pořizuje snímky hvězd, popsaným v sekci 2.2.1 je potřeba upravit standardní postup redukce pro tyto snímky popsaný v sekci 3.2. Je totiž nutné vyřešit dva problémy, které tento způsob pořizování snímku způsobí.

První problém spočívá v tom, že signál pocházející od temného proudu je typicky velmi malý (teplota čipu byla typicky kolem -15°C). To znamená, že dark snímky v podstatě nikdy nepřekročí hranici 3600 ADU a tedy výsledné 16-bit

HDR dark snímky obsahují jenom high-gain pixely. Ale jestliže příslušný pixel výsledného 16-bit HDR světelného snímku překročí hranici 3600 ADU, tak se jedná o transformovaný low-gain pixel. Kdybychom tedy standardně odčítali 16-bit HDR dark snímek od 16-bit HDR světelného snímku, tak odečítáme high-gain pixely od transformovaných low-gain pixelů s jiným temným proudem a dalšími efekty [C4m].

Druhý problém spočívá v tom, že pixely typických flat snímků nabývají hodnot kolem poloviny dynamického rozsahu analogově-digitálního převodníku, což v případě 16 bitů znamená hodnoty kolem 32000 ADU. To znamená, že všechny pixely tohoto 16-bit HDR flat snímku jsou transformované low-gain pixely. Ale typický světelný snímek obsahuje mnoho temných míst, jejichž pixely mají hodnotu pod hranicí 3600 ADU a jsou tedy high-gain pixely. Kdybychom tedy standardně dělili 16-bit HDR světelný snímek 16-bit HDR flat snímkem, tak bychom na dělení všech high-gain pixelů použili low-gain pixely, které mají jinou světelnou odezvu, jiný temný proud, a podobně [C4m].

Je proto potřeba použít dark a flat snímek z high-gain kanálu, když jsou pixely světelného snímku pod hranicí 3600 ADU nebo rovny, a z low-gain kanálu, když jsou pixely světelného snímku nad hranicí 3600 ADU, ale transformované transformační funkcí. To tedy znamená, že je potřeba pořídit dva master snímky pro oba druhy opravných snímků. Jeden master snímek bude pořízen skrz 12-bit high-gain kanál a bude použit na pixely 16-bit HDR světelného snímku, které nepřekračují hranici 3600 ADU. Druhý snímek bude pořízen skrz 16-bit transformovaný low-gain kanál, a bude použit na pixely 16-bit HDR světelného snímku, které překračují hranici 3600 ADU [C4m]. Schéma procesu kalibrace snímků pro případ kamery C4-16000 je vyobrazeno na Obrázcích 3.1, 3.2, 3.3. Na Obrázcích 3.4, 3.5 je zobrazený nekalibrovaný snímek z kamery C4-16000 a následně ten samý snímek, ale kalibrovaný.

3.3 Fotometrie

Nyní když máme k dispozici sekvenci kalibrovaných snímků, můžeme je použít ke generování takzvané *světelné křivky*. To je závislost *magnitudy* zkoumané hvězdy v sekvenci snímků na čase. Pro praktické účely této práce lze definovat magnitudu m jako

$$m = -2{,}5 \log F \,, \tag{3.4}$$

a chybu jejího určení podle přenosu chyb dle [Englich, 2006] jako

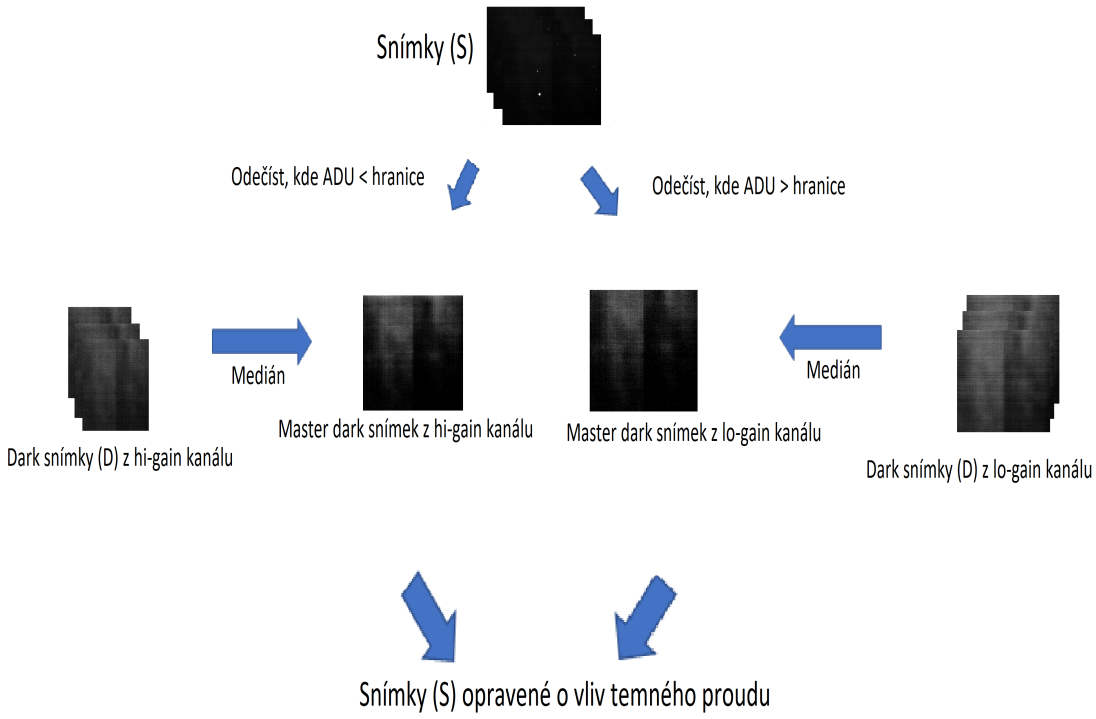
$$\delta m = \frac{2{,}5}{F \ln 10} \delta F \,, \tag{3.5}$$

kde F je signál v ADU a δF je chyba signálu v ADU, která se dle [Brož a Šolc, 2013] spočte jako

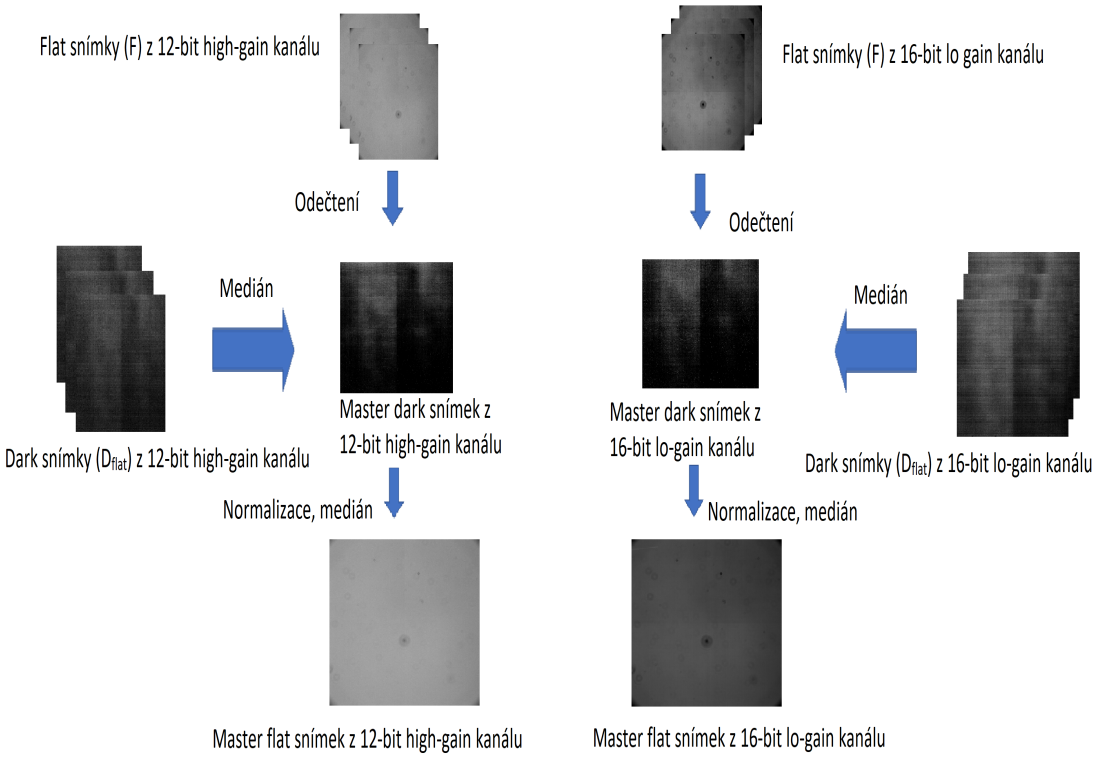
$$\delta F = \sqrt{\delta F_{hvězda}^2 + \delta F_{pozadí}^2} \,, \tag{3.6}$$

kde $\delta F_{hvězda}$ a $\delta F_{pozadí}$ jsou odmocniny z $F_{hvězda}$ a $F_{pozadí}$, a $F_{hvězda}$ je tok příslušející hvězdě, kde $F_{pozadí}$ je tok příslušející pozadí.

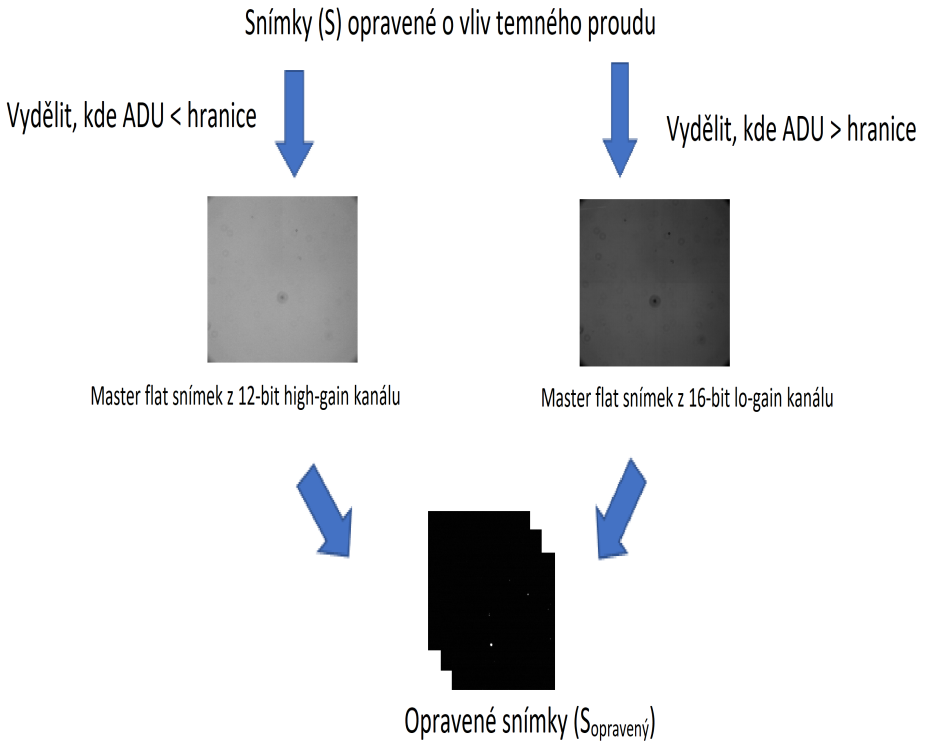
Potřebujeme v daném snímku tedy najít hvězdy, což znamená najít v snímku přibližně kruhové skupiny pixelů, jejichž hodnoty ADU jsou výrazně větší než



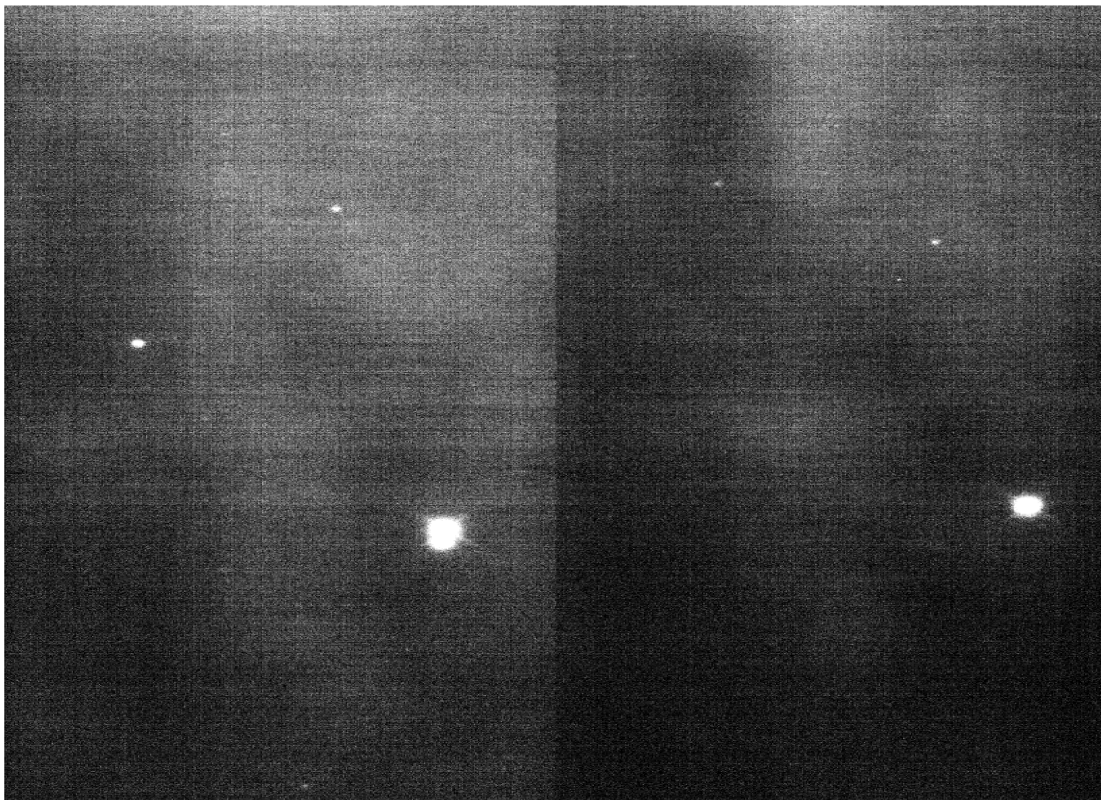
Obrázek 3.1: Schéma odečtení dark snímků (D) od snímků (S) pro případ kamery C4-16000



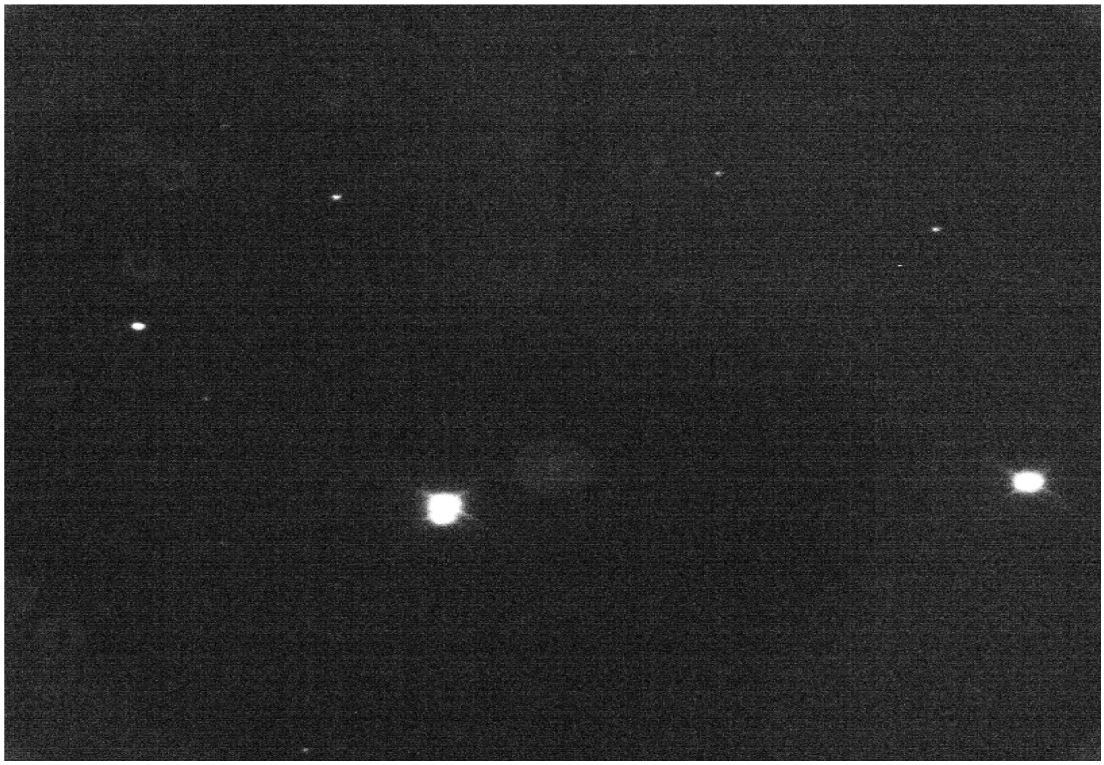
Obrázek 3.2: Schéma přípravy master flat snímků (F) pro případ kamery C4-16000



Obrázek 3.3: Schéma finálního procesu získávání opravených snímků (S)



Obrázek 3.4: Nekalibrovaný snímek (S) pole hvězdy DS Tucanae A z kamery C4-16000.



Obrázek 3.5: Kalibrovaný snímek (S) pole hvězdy DS Tucanae A z kamery C4-16000.

hodnoty pozaďových pixelů a odlišit je od náhodných fluktuací. Klasickým algoritmem pro detekci hvězd je DAOPHOT [Stetson, 1987].

Tento algoritmus spočívá v tom, že je snímek pixel po pixelu a jeho okolí fitován Gaussovou funkcí

$$G((\Delta i, \Delta j),\sigma) = e^{-\frac{\Delta i^2+\Delta j^2}{2\sigma^2}}\,, \tag{3.7}$$

kde $\sigma = FWHM/2.355$, FWHM [1] je pološířka Gaussovy funkce, $(\Delta i,\Delta j)$ je okolí pixelu $(i_0,\ j_0)$ [Brož a Wolf, 2017]. Pak hodnotu signálu $S_{i,j}$ v pixelu (i,j) aproximujeme jako

$$S_{i,j} \approx H_{i_0,j_0} G((i-i_0, j-j_0),\sigma) + b\,, \tag{3.8}$$

kde H_{i_0,j_0} je amplituda určená metodou nejmenších čtverců. Následně pak hledáme lokální maxima H taková, že $H_{(i_0,j_0)} > H_{min}$ a $H_{(i_0,j_0)} > H_{(i,j)}$, pro všechna (i, j) z okolí $(i_0,\ j_0)$. H_{min} a FWHM je určena předem jako vstup do algoritmu [Stetson, 1987]. Pokud jsou podmínky splněny, pak je (i_0, j_0) určen jako střed hvězdy [Brož a Wolf, 2017].

3.3.1 Aperturní fotometrie

Jakým způsobem zjistíme signál F příslušející dané hvězdě? Použijeme metodu *aperturní fotometrie* vyznačené na Obrázku 3.6. Je potřeba sečíst hodnoty ADU v těch pixelech, kam se zobrazila hvězda. Tyto pixely aproximujeme kruhovou aperturou, kterou ohraničíme střed hvězdy $(i_0,\ j_0)$. Všechny pixely nacházející

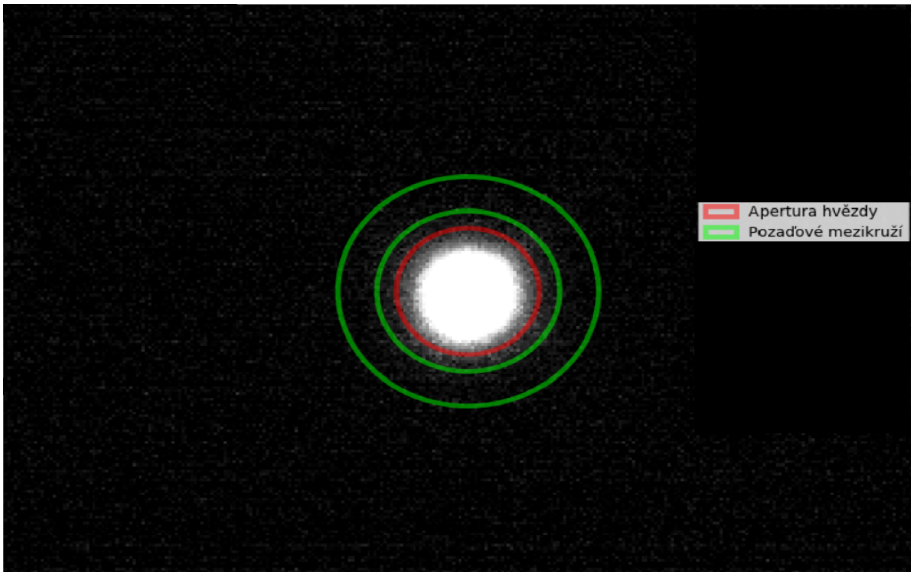
[1] z angl. Full-width-at-half-maximum

se uvnitř této kruhové apertury pak přispějí svými hodnotami k finálnímu signálu F, na který pak aplikujeme vzorec 3.4 a získáme tak magnitudu dané hvězdy. Toto provedeme pro celou sekvenci snímků a máme tak sekvenci magnitud, kterou je možné zobrazit v čase.

Od tohoto signálu je však potřeba ještě odečíst signál pocházející z nebeského pozadí, pro jehož eliminaci nelze aplikovat postup zmíněný v kapitole 3.2 a je třeba postupovat jinak. Existují dva způsoby, jakými lze zjistit pozaďový signál.

První způsob je iteračně získat pozaďový signál pro celý snímek. Algoritmus pro iterační zjištění pozaďového signálu je popsán v Pho [a]. Spočívá v tom, že se v první iteraci spočítá medián hodnot signálu v celém snímku. Poté pro předem specifikovaný σ-interval jsou odstraněny hodnoty, které tento medián překračují a proces se opakuje. Většinou stačí jen několik málo iterací pro konvergenci k pozaďové hodnotě signálu. Ta je poté odečtena od celého snímku.

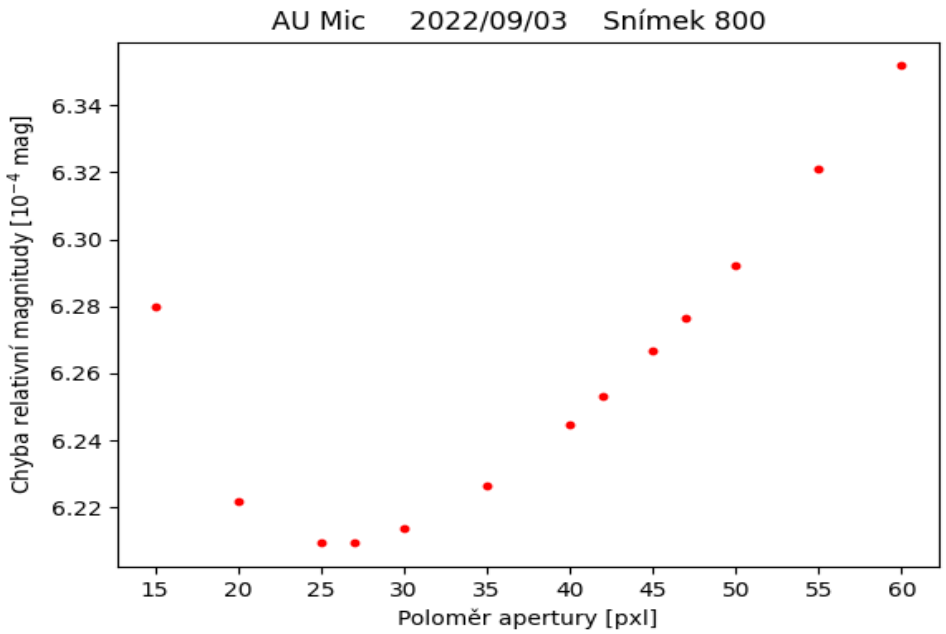
Druhý způsob vychází z myšlenky, že nejlépe se aproximuje signál pozadí, který musíme od signálu pocházejícího od hvězdy odečíst, v co nejbližším okolí samotné hvězdy. Nakreslíme si tak okolo středu hvězdy ještě mezikruží o vnitřním a vnějším poloměru větším než je poloměr apertury, ve které sčítáme signál z hvězdy. Vnitřní poloměr by měl být dostatečně blízko poloměru apertury, aby pozaďový signál co nejlépe aproximoval ten zachycený v apertuře, ale dostatečně velký na to, aby nezachytával signál z okraje hvězdy. Následně zjistíme *průměrnou* hodnotu signálu z tohoto mezikruží a vynásobíme jím plochu kruhové apertury. Tuto hodnotu pak následně odečteme od pozaďového signálu [Pho, a]. Kruhová apertura i s mezikružím je vyobrazena na Obrázku 3.6.



Obrázek 3.6: Přiblížený snímek hvězdy AU Mic s červeně vyznačenou kruhovou aperturou o poloměru 22 pixelů a zeleně vyznačeným mezikružím o vnitřním poloměru 28 pixelů a vnějším poloměru 40 pixelů.

Jak vybrat poloměr apertury samotné hvězdy? Apertura by neměla být tak malá, aby v ní byla jenom samotná hvězda, pak bude převažovat šum ze samotné hvězdy, ale zároveň by neměla zasahovat mimo samotnou hvězdu, protože by zachytávala šum z pozadí. Nejlepší je tedy vybrat poloměr, který sahá až na hranici hvězdy v poli. Zobrazíme-li si pro jeden snímek a danou hvězdu závislost chyby

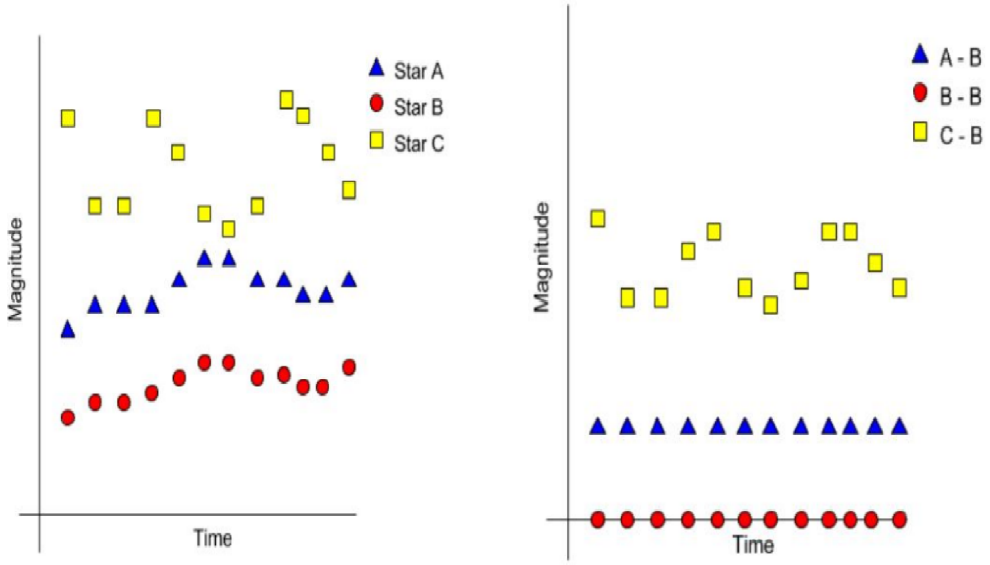
magnitudy na poloměru apertury, tak nejmenší chyba odpovídá nejvhodnějšímu poloměru apertury. Na Obrázku 3.7 je zobrazen graf takovéto závislosti.



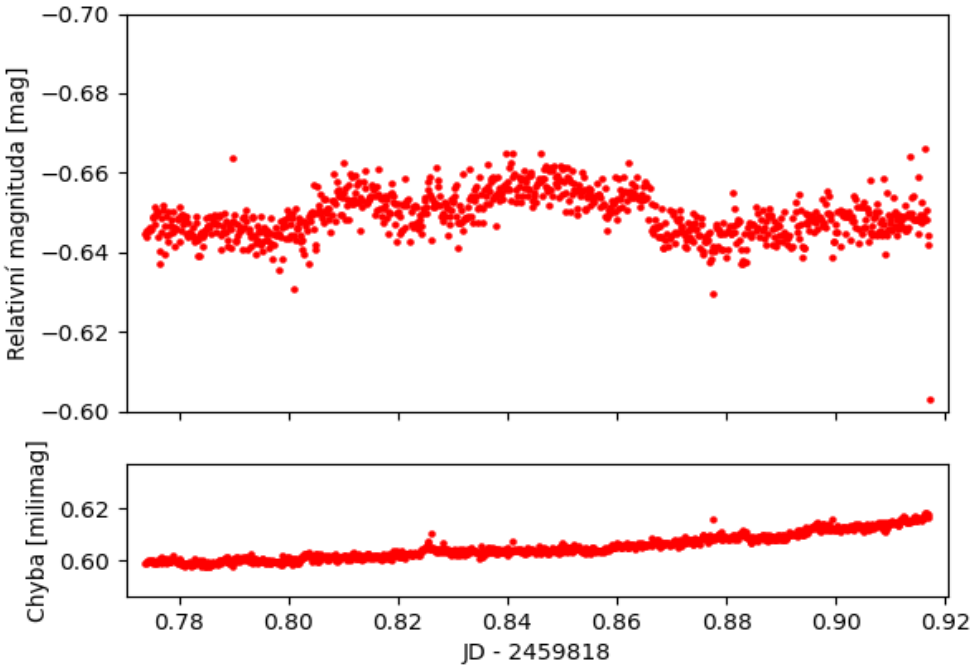
Obrázek 3.7: Závislost chyby relativní magnitudy na poloměru apertury pro 800. snímek pole hvězdy AU Mic naměřené kamerou C4-16000 na dalekohledu E 152. Nejlepší apertura je 27 pixelů, protože chyba je pro ni nejmenší.

3.3.2 Diferenciální fotometrie

Pro nejlepší zobrazení časové proměnnosti magnitudy pro danou hvězdu, který eliminuje i zbývající nežádoucí efekty, jako například světelné znečištění, lze použít metodu *diferenciální fotometrie*. Proces vedoucí k získání sekvence magnitud aplikujeme ještě na minimálně další dvě hvězdy ve snímku - *srovnávací* a *kontrolní*. Tyto dvě hvězdy by neměly být v čase proměnné. Poté odečteme od sebe magnitudy zkoumané hvězdy a srovnávací hvězdy jako $m_{hvězda} - m_{srovnávací}$ a magnitudy srovnávací hvězdy a kontrolní hvězdy jako $m_{srovnávací} - m_{kontrolní}$ a tyto dva rozdíly následně zobrazíme do grafu v závislosti na čase podobně, jako na Obrázku 3.8. Pokud je srovnávací a kontrolní hvězda neproměnná, bude jejich rozdíl konstantní, a rozdíl hodnot a průměru magnitud (ať už pro srovnávací nebo kontrolní hvězdu) bude také konstantní [Boy]. Pro ukázku toho, jak vypadají světelné křivky z reálných dat, je na Obrázku 3.9 ukázána světelná křivka hvězdy DS Tucanae A.



Obrázek 3.8: Graf přibližující proces diferenciální fotometrie. C je zkoumaná hvězda, B je srovnávací hvězda a A je kontrolní hvězda. Na levém obrázku jsou zobrazeny průběhy jejich magnitud v čase a na pravém obrázku jsou zobrazeny jejich rozdíly magnitud v čase. Převzato z [Ederoclite].



Obrázek 3.9: Světelná křivka hvězdy DS Tucanae A pozorovaná 26.8.2022 dalekohledem E 152.

4. Pipeline PLATOSpecPhot - kalibrace a diferenciální fotometrie snímků pořízených kamerou C4-16000

4.1 Struktura pipeline PLATOSpecPhot

Procesy nutné pro kalibraci sekvence snímků podle algoritmu popsaného v sekci 3.2.1 a generování světelné křivky popsané v sekci 3.3 bylo potřeba zautomatizovat. Pro spojení kalibrace snímků a diferenciální fotometrie dohromady a pro urychlení a zjednodušení celého procesu zpracování snímků pořízených kamerou C4-16000 v rámci této práce byla vytvořena pipeline[1] s názvem PLATOSpecPhot.

PLATOSpecPhot se skládá z deseti skriptů a jednoho konfiguračního souboru[2]. Skripty byly vytvořeny v programovacím jazyce Python za pomoci jeho knihoven `numpy`, `matplotlib`, `astropy`, `ccdproc` a `photutils`. PLATOSpecPhot je ovládaná z příkazové řádky a spustí se spuštěním skriptu `Pipeline.py`. To je hlavní řídící skript, který postupně spouští jednotlivé další skripty až do konce, kdy je zobrazen a uložen výstup v podobě světelné křivky hvězdy, jejíž souřadnice na snímku uživatel zadá, a světelné křivky kontrolní hvězdy. PLATOSpecPhot na několika místech vyžaduje zadání parametrů od uživatele a zároveň jsou v ní zabudovány kontrolní body, pokud chce uživatel například použít už zpracované snímky na generování světelné křivky jen s jinými parametry. Na obrázku 4.1 je zobrazena struktura celé pipeline PLATOSpecPhot.

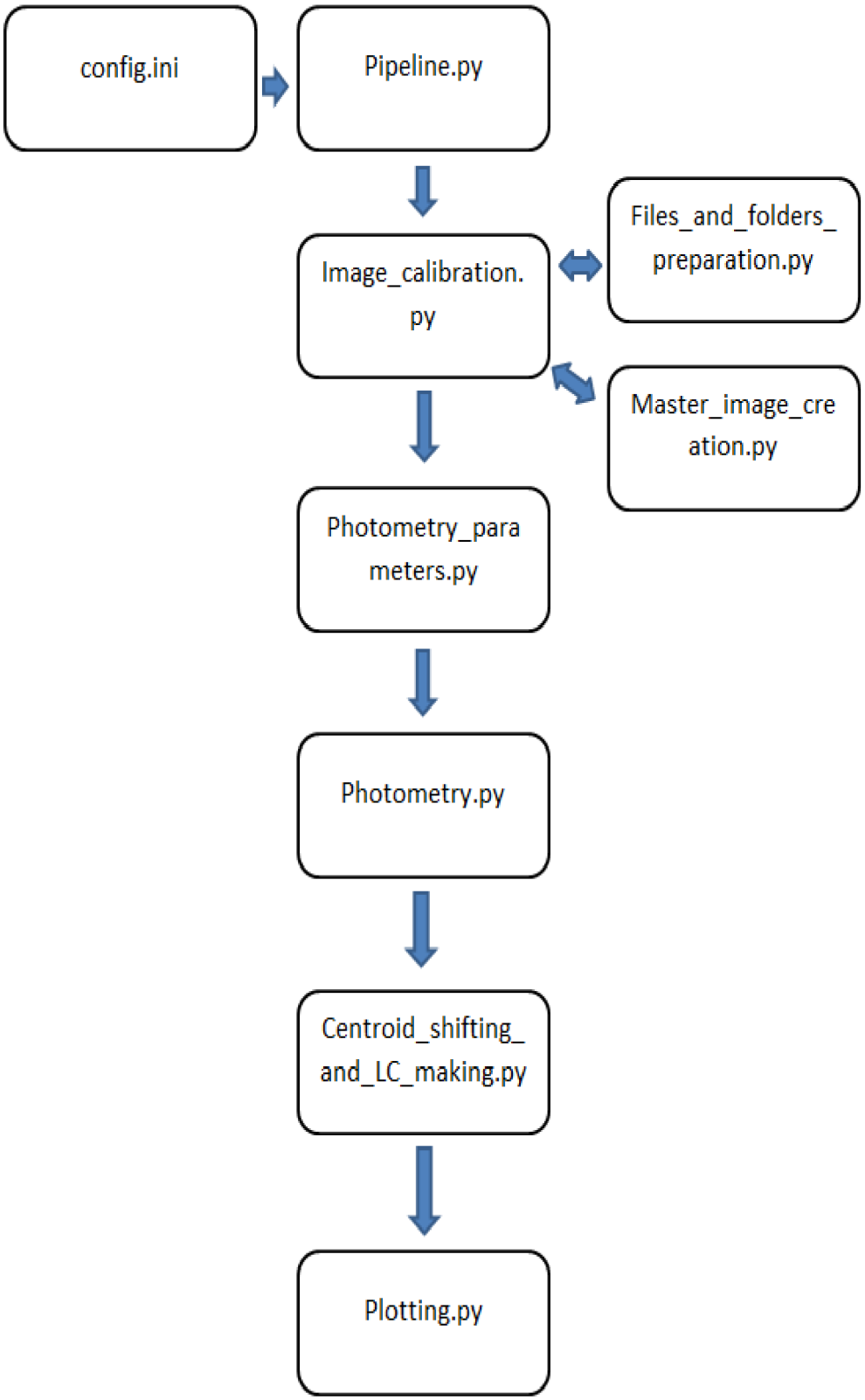
4.1.1 `Pipeline.py` a `config.ini`

Jako vstup do celé pipeline PLATOSpecPhot slouží konfigurační soubor s názvem `config.ini`. Ten obsahuje osm míst, kam uživatel napíše cesty k jednotlivým složkám obsahujícím nekalibrované snímky, dark snímky získané z 12-bit hi-gain kanálu, dark snímky získané z 16-bit lo-gain kanálu, flat snímky získané z 12-bit hi-gain kanálu, flat snímky získané z 16-bit lo-gain kanálu, dark snímky příslušející flat snímkům získaným z 12-bit hi-gain kanálu, dark snímky příslušející flat snímkům získaným z 16-bit lo-gain kanálu, a cestu ke složce do které se mají uložit všechny kalibrované snímky a textové soubory obsahující magnitudy a časy pro generování světelné křivky. Na obrázku 4.2 je ukázka obsahu konfiguračního souboru.

Tento konfigurační soubor je následně načten hlavním skriptem `Pipeline.py` po jeho spuštění. Následně pak hlavní skript `Pipeline.py` spouští jednotlivé kroky pipeline, vytváří složky pro ukládání redukovaných snímků, metadat pro fotometrii a textových souborů pro jednotlivé světelné křivky. Na obrázku 4.3 je ukázka skriptu `Pipeline.py`. Struktura skriptu `Pipeline.py` je:

[1] Sada programů prováděných sekvenčně.

[2] Kód je dostupný na adrese `https://github.com/AntaresI/PlatoSpecPhot` a je k dispozici v příloze práce.



Obrázek 4.1: Struktura pipeline PLATOSpecPhot vyvinutá pro snímky z kamery C4-16000

```
1
2 [PATHS]
3
4 ; Enter path to a folder containing only raw images of object
5 rawimages = G:\20220901\AU_Mic
6
7 ; Enter path to a folder containing only dark images with same exposition time obtained through hi-gain channel
8 imagedarkshi = G:\darks-2x2-m15C\12bitHiGain\4s\20220907
9
10 ; Enter path to a folder containing only dark images with same exposition time obtained through lo-gain channel
11 imagedarkslo = G:\darks-2x2-m15C\12bitHiGain\4s\20220907
12
```

Obrázek 4.2: Část konfiguračního souboru použitého v pipeline PLATOSpecPhot.

```
if after_calibration_or_not == "no":

        main_paths_obj_calib = Image_calibration()

        config = configparser.ConfigParser()
        config.read('config.ini')

        working_dir = config['PATHS']['workingdirectory']
        working_dir_path = Path(working_dir)

        reduced_lc_path = Path(working_dir +'\\calibrated\\Light_Curve')
        reduced_lc_path.mkdir(exist_ok=True)

        reduced_phot_path = Path(working_dir +'\\calibrated\\reduced_obj_phot' )
        reduced_phot_path.mkdir(exist_ok=True)


else:
        print("LOADING CALIBRATED IMAGES")
        config = configparser.ConfigParser()
        config.read('config.ini')

        working_dir = config['PATHS']['workingdirectory']
        working_dir_path = Path(working_dir)
```

Obrázek 4.3: Část hlavního skriptu `Pipeline.py`.

- Dotaz, zda byla provedena redukce snímků
- Spuštění skriptu pro redukci a vytváření složek
- Dotaz, zda byla provedena fotometrie snímků
- Spuštění skriptu pro fotometrii
- Zobrazení světelné křivky

4.1.2 Image_calibration.py

Tento skript nejprve načte konfigurační soubor, následně zavolá skript `Files_and_folders_preparation.py`, který předá pole s načtenými snímky, které budou používány v celé PLATOSpecPhot, pole s cestami ke složkám, do kterých se budou ukládat kalibrované snímky a master snímky, pole s cestami ke kalibrovaným snímkům, a pole názvů kalibrovaných snímků. Následně je pak zavolán skript

`Master_images_creation.py`, který předá pole s kalibrovanými snímky. Poté je provedena kalibrace podle kapitoly 3.2.1 a Obrázku 3.3. Nakonec jsou vytvořena pole s načtenými kalibrovanými snímky a jejich cestami. Na obrázku 4.4 je ukázka skriptu `Image_calibration.py`. Struktura skriptu `Image_calibration.py` je:

```
- Načtení konfiguračního souboru
- Zavolání skriptu připravujícího složky a pole snímků
- Zavolání skriptu vytvářejícího kalibrační snímky
- Provedení finální kalibrace
- Vytvoření polí s načtenými kalibrovanými snímky a jejich cestami
```

```python
'''LOADING CONFIG FILE'''
print("LOADING CONFIG FILE")
config = configparser.ConfigParser()
config.read('config.ini')
''''''''''''''''''''''''

'''GETTING THE PATH ARRAYS AND FILE ARRAYS FOR CALIBRATION FRAMES AND SCIENCE FRAMES'''
image_file_array, path_array, \
main_files_obj_raw, main_paths_obj_raw = file_and_folder_preparation(config)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

print('CALIBRATING RAW IMAGES')
'''GETTING MASTER FRAMES FOR CALIBRATION'''
calibration_files = file_calibration(image_file_array, path_array)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

counter = 0
threshold = 3600
'''PERFORMING THE CALIBRATION (WITH C4-16000 CAMERA SPECIALTY)'''
for file in main_paths_obj_raw:

    with fits.open(file) as obj_raw:
        obj_raw_data, helper = obj_raw[0].data, obj_raw[0].data

        obj_where_less = obj_raw_data < threshold
        obj_where_more = obj_raw_data > threshold
```

Obrázek 4.4: Část skriptu `Image_calibration.py`

4.1.3 Files_and_folders_preparation.py

Tento skript po načtení konfiguračního souboru připraví snímky pro použití v PLATOSpecPhot. Pro flat snímky opravuje pixely, jejichž hodnota ADU je rovna nule, aby bylo možné jimi dělit při použití vzorce 3.3 a také přidává do FITS hlavičky všech snímků používaných v PLATOSpecPhot jednotku ADU kvůli tomu, aby mohly být použity funkce z knihovny `ccdproc`. Na obrázku 4.5 je ukázka skriptu `Files_and_folders_preparation.py`. Struktura skriptu `Files_and_folders_ preparation.py` je:

```
- Inicializace polí, do kterých se budou ukládat načtené snímky a jejich
  cesty
- Načítání a ukládání snímků do pole
- Nalezení snímků, které už mají ve FITS hlavičce uvedenou jednotku ADU
- Inicializace pole, do kterého se budou ukládat jen flat snímky
```

- Ukládání flat snímků do pole
- Příprava cest snímků, které nemají ve FITS hlavičce uvedenou jednotku ADU
- Nahrazení nulových hodnot ve flat snímcích průměrnými hodnotami okolí
- Přidání jednotky ADU do hlaviček všech snímků, které ji tam nemají
- Vytvoření složek, kam se budou ukládat kalibrované snímky a master snímky

```
flat_files_dark_hi = os.listdir(flat_path_dark_hi)
flat_paths_dark_hi = [flat_path_dark_hi.__str__()+'\\'+flat_files_dark_hi[i]  \
                      for i in range(len(flat_files_dark_hi))]
all_files.extend(flat_paths_dark_hi)

flat_files_dark_lo = os.listdir(flat_path_dark_lo)
flat_paths_dark_lo  = [flat_path_dark_lo.__str__()+'\\'+flat_files_dark_lo[i] \
                       for i in range(len(flat_files_dark_lo))]

all_files.extend(flat_paths_dark_lo)


files_to_add_adu = list(set(all_files)-set(files_with_adu))
files_to_cycle_over = list(set().union(files_to_add_adu, flat_files))
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''


counter = 0
for file in files_to_cycle_over:
    with fits.open(file, 'update') as f:
        for hdu in f:

            '''BUNIT ADDITION'''

            hdu.header['bunit']='adu'
            ''''''''''''''''''''
```

Obrázek 4.5: Část skriptu `Files_and_folders_preparation.py`

4.1.4 `Master_images_creation.py`

Tento skript s využitím knihovny programovacího jazyka Python s názvem `ccdproc` vytvoří master dark snímek pro 12-bit hi-gain kanál, master dark snímek pro 16-bit lo-gain kanál, master flat snímek pro 12-bit hi-gain kanál a master flat snímek pro 16-bit lo-gain kanál, a to tak, že pro každý pixel vezme medián všech hodnot pro daný pixel příslušné sekvence kalibračních snímků. Následně je pak uloží do pole kalibračních snímků. Na obrázku 4.6 je ukázka skriptu `Master_images_creation.py`. Struktura skriptu `Master_images_creation.py` je:

- Inicializace pole, do kterého se budou načítat a ukládat kalibrační snímky
- Vytvoření obou master dark snímků
- Vytvoření obou master dark snímků pro flat snímky
- Odečtení příslušných master dark snímků od flat snímků
- Vytvoření obou master flat snímků

```
'''INITIALIZING ARRAY TO STORE THE REDUCTION FILES INTO'''

reduction_files = []
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''MASTER DARK FOR IMAGES CREATION'''

print('CREATING MASTER DARKS')

raw_darks_hi = image_file_array[1].files_filtered(imagetyp='dark', include_path=True)
raw_darks_lo = image_file_array[2].files_filtered(imagetyp='dark', include_path=True)

exptimerawdarks = image_file_array[1].summary['exptime'][0]

combined_raw_darks_hi = ccdp.combine(raw_darks_hi, method='median',mem_limit=2000e6,dtype='int16')
combined_raw_darks_lo = ccdp.combine(raw_darks_lo, method='median',mem_limit=2000e6,dtype='int16')

combined_raw_darks_hi.meta['combined'] = True
combined_raw_darks_lo.meta['combined'] = True

hi_dark_file_name = 'master_raw_dark_hi_{:6.2f}.fit'.format(exptimerawdarks)
lo_dark_file_name = 'master_raw_dark_lo_{:6.2f}.fit'.format(exptimerawdarks)

combined_raw_darks_hi.write(path_array[1] / hi_dark_file_name, overwrite=True)
combined_raw_darks_lo.write(path_array[1] / lo_dark_file_name, overwrite=True)
```

Obrázek 4.6: Část skriptu `Master_images_creation.py`

4.1.5 `Photometry_parameters.py`

Tento skript slouží k určení parametrů fotometrie od uživatele. Nejprve se skript uživatele zeptá na index referenčního kalibrovaného snímku, který chce použít pro testování různých fotometrických parametrů. Následně skript vyzve uživatele k zadání parametrů pro provedení fotometrie celé sekvence snímků. Jsou jimi:

1) σ, která specifikuje σ-interval pro iterační metodu získávání pozaďového signálu popsanou v 3.3.
2) standardní odchylka hodnot ADU vůči průměrné hodnotě ADU v celém snímku, při jejímž překročení už není pixel považován za pozaďový pixel.
3) minimální počet sousedících pixelů, které podle uživatele tvoří hvězdu, o hodnotě ADU větší než průměrná hodnota ADU nalezeného pozadí.
4) délka strany čtvercových segmentů, na které bude snímek rozdělen a v nich počítáno pozadí snímku separátně pro přesnější finální výsledek [Pho, b].
5) položířka Gaussovy funkce vystupující v rovnici 3.7 pro fitování snímku.
6) hranice hodnoty ADU, kterou pixel musí mít, aby vůbec mohl být považován za součást hvězdy, odpovídá veličině H_{min} v sekci 3.3.
7) a 8) jsou minimální a maximální hodnota ADU, které určují kontrast barev v zobrazeném snímku hvězdy, pokud má pixel hodnotu ADU menší než zadaná minimální hodnota ADU, tak pixel je zobrazen černě, pokud má pixel hodnotu ADU větší než maximální hodnota ADU, tak je zobrazen bíle.
9) poloměr kruhu, který se zobrazí okolo detekovaných hvězd pro orientaci uživatele.

Parametry 7), 8) a 9) slouží jen pro zobrazení referenčního snímku se zakroužkovanými hvězdami, aby byly dobře vidět a nehrají v samotném výpočetním procesu fotometrie žádnou roli.

Následně je zavolán skript `Sources.py`, který pro referenční snímek vrátí masku s detekovanými hvězdami. Poté je uživateli zobrazen snímek s označenými hvězdami ve snímku a uživatel je následně dotázán, jestli proběhlo vše v pořádku. Pokud ne, tak je uživatel dotázán na novou sadu parametrů a proběhne celý skript znovu. Pokud ano, tak tyto parametry budou použity následně pro celou sekvenci snímků. Na obrázku 4.7 je ukázka skriptu `Photometry_parameters_.py`. Struktura skriptu `Photometry_parameters_.py` je:

```
- Dotázání se uživatele na index referenčního snímku pro testování
  parametrů fotometrie
- Dotázání se uživatele na parametry fotometrie
- Zavolání skriptu Stars.py vracejícího detekované hvězdy a pozadí v
  referenčním snímku
- Vytváření pole souřadnic středů detekovaných hvězd
- Zobrazení referenčního snímku s označenými detekovanými hvězdami
- Dotázání se uživatele, jestli chce použít tyto parametry fotometrie
  pro všechny snímky
```

```
user_input_array = user_parameter_input.split(",")
user_input_array = [int(param) for param in user_input_array]
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

# mask = pht.make_source_mask(data, nsigma=30, npixels=5, sigclip_sigma=5, sigclip_iters=20, \
#    dilate_size=11)  deprecated since photutils 1.5.0
'''GETTING DETECTED STARS AND BACKGROUND OF AN IMAGE'''
stars, bkg = getting_stars(user_input_array, data_test_img)
''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''GETTING POSITIONS OF CENTROIDS OF THE STARS'''
positions = np.transpose((stars['xcentroid'], stars['ycentroid']))
apertures = CircularAperture(positions, r=user_input_array[8])
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''PLOTTING THE IMAGE WITH CIRCLED STARS'''
plt.figure(figsize=(8,8))
plt.imshow(data_test_img, cmap='Greys_r', origin='lower', vmin=user_input_array[6], \
           vmax=user_input_array[7], interpolation='nearest')
apertures.plot(color='red', lw=1.5, alpha=0.5)
plt.show()
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

error = calc_total_error(data_test_img-bkg.background, bkg.background_rms, 0.85)
print("Median of error is: ", np.median(error))

'''ASKING USER WHETHER TO USE THESE PARAMETERS FOR THE WHOLE PHOTOMETRY'''
while True:
```

Obrázek 4.7: Část skriptu `Photometry_parameters_.py`

4.1.6 `Stars.py`

Tento skript nejprve vytvoří masku pro možné pixely, které nepatří mezi pozaďové pixely. Následně spočítá pole pozadí v referenčním snímku. A nakonec

detekuje hvězdy použitím algoritmu DAOPHOT přiblíženým v sekci 3.3 na referenční kalibrovaný snímek, od kterého je odečteno pole pozadí. Funkce knihovny `photutils` s názvem `DAOStarFinder` vyžaduje jako svůj vstup referenční snímek. Proto se v tomto skriptu používá pro určení pole pozadí pouze iterační metoda z 3.3.1, protože toto pole se dá odečíst od referenčního kalibrovaného snímku. Vzhledem k tomu, že tento skript slouží jen k detekci hvězd a ne k počítání součtu hodnot ADU pixelů hvězdy, tak toto nevadí. Uživatel bude později během chodu pipeline PLATOSpecPhot bude dotázán, zda chce pro určení pozadí použít iterační metodu, nebo metodu využívající mezikruží. Na obrázku 4.8 je ukázka skriptu `Stars.py`. Struktura skriptu `Stars.py` je:

- `Maskování možných hvězd`
- `Výpočet pozadí referenčního snímku`
- `Detekce hvězd algoritmem DAOPHOT`

```
mean, median, std = sigma_clipped_stats(data_img,mask=mask, sigma=user_input_array[0],
                                        maxiters=20)

#https://photutils.readthedocs.io/en/stable/background.html#d-background-and-noise-estimation

'''BACKGROUND COMPUTATION'''
bkg_estimator = pht.SExtractorBackground(sigma_clip=sigma_clip)
bkg = pht.Background2D(data_img, (user_input_array[3], user_input_array[3]), mask=mask,
                       sigma_clip=sigma_clip, bkg_estimator=bkg_estimator)
print("Mean of background is: ", mean," Median of background is: ", bkg.background_median,
      " Median of standard deviation of background is: ", bkg.background_rms_median)
''''''''''''''''''''''''''''

'''STAR DETECTION VIA DAOPHOT ALGORITHM'''
daofind = pht.DAOStarFinder(fwhm=user_input_array[4], threshold=user_input_array[5],
                            exclude_border=True, sharplo=0.2, sharphi=1.0, roundlo=-1,
                            roundhi=1)

sources = daofind(data_img - bkg.background)

if sources is None:
    print('Using IRAFStarFinder instead')
    iraffind = pht.IRAFStarFinder(fwhm=user_input_array[4], threshold=user_input_array[5],
                                  exclude_border=True, sharplo=0.2, sharphi=1.0, roundlo=-1,
                                  roundhi=1)
    sources = iraffind(data_img - bkg.background)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
```

Obrázek 4.8: Část skriptu `Stars.py`

4.1.7 `Photometry.py`

Tento skript s použitím parametrů fotometrie obdržených od uživatele ze skriptu `Photometry_parameters.py` provede fotometrii pro celou sekvenci snímků. Nejprve se skript zeptá uživatele, zda chce pro určení pozadí dané hvězdy použít iterační metodu nebo metodu mezikruží. Následně skript vyzve uživatele k napsání poloměrů všech kruhových apertur, které chce využít pro počítání součtu hodnot ADU ve hvězdě. Pokud zvolí uživatel metodu mezikruží, tak se ještě skript zeptá na vnitřní a vnější poloměr mezikruží. Následně skript pro každý snímek zavolá opět skript `Stars.py`, který vrátí detekované hvězdy v daném snímku,

pro všechny poloměry provede součet hodnot ADU pro všechny hvězdy v daném snímku a odečte pozadí vybranou metodou. Následně přepočítá výsledek na magnitudu dle vzorce 3.4 a uloží všechny součty a polohy hvězd na snímku do metasouboru, který má stejný název jako snímek, ale s přidanou předponou -phot. Na obrázku 4.9 je ukázka skriptu `Photometry.py`. Struktura skriptu `Photometry.py` je:

- Zeptání se uživatele na metodu výpočtu pozadí
- Pokud zvolena metoda mezikruží, pak zeptání se uživatele na vnitřní a vnější poloměr mezikruží
- Zeptání se uživatele na poloměry apertur
- Inicializace souboru s metadaty a načtení snímku
- Zavolání skriptu Stars.py vracejícího detekované hvězdy ve snímku
- Vytváření pole souřadnic středů detekovaných hvězd
- Provedení aperturní fotometrie (s odečteným pozadím, pokud uživatel zvolil iterační metodu výpočtu pozadí) pro všechny poloměry apertur
- Výpočet pozadí a jeho odečtení od hodnot z aperturní fotometrie pro všechny poloměry apertur (pokud uživatel zvolil metodu mezikruží pro výpočet pozadí)
- Přepočet součtu hodnot ADU pro všechny hvězdy a poloměry na magnitudu
- Uložení magnitud a příslušných centroidů do souboru metadat

```
'''CREATING PHOT METADATA FILE AND LOADING IMAGE'''
rootname,_ = os.path.splitext(ifile)
photfile = str(reduced_phot_path)+"\\"+rootname.split("\\")[-1]+"-phot.fits"
data_img = fits.getdata(ifile)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''GETTING DETECTED STARS IN THE IMAGE'''
sources, bkg = getting_apertures(user_input_array, data_img)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

# https://photutils.readthedocs.io/en/stable/aperture.html#aperture-photometry-with
#-multiple-apertures-at-each-position

'''GETTING POSITIONS OF CENTROIDS OF THE STARS'''
positions = [(ix,iy) for ix,iy in zip(sources['xcentroid'],sources['ycentroid'])]
apertures = [pht.CircularAperture(positions, r=r) for r in radii]
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''PERFORMING APERTURE PHOTOMETRY'''
error = calc_total_error(data_img-bkg.background, bkg.background_rms, 1/0.85)
aper_phot = pht.aperture_photometry(data_img, apertures, error=error)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''
print(len(aper_phot))
print(aper_phot['xcenter'],aper_phot['ycenter'])

'''SUBTRACTING FLUX FROM CIRCULAR ANNULUS AND CONVERTING FLUX TO MAGNITUDE'''
for j in range(len(radii)):
```

Obrázek 4.9: Část skriptu `Photometry.py`

4.1.8 Centroid_shifting_and_LC_making.py

Tento skript provede posun centroidů a vytvoření polí s hodnotami magnitud pro tři hvězdy v rámci procesu diferenciální fotometrie. V průběhu sekvence snímků se mohou polohy hvězd měnit. Kdyby nebyly centroidy posunuty zpět na polohu centroidů v referenčním snímku, tak by po zadání poloh proměnné, srovnávací a kontrolní hvězdy hrozilo, že skript vybere v souboru s metadaty chybnou hvězdu, protože uživatelem zadané souřadnice jsou jenom jedny pro jeden referenční snímek. Tedy musí dojít k posunu centroidů.

Nejprve se tedy skript zeptá uživatele na index referenčního kalibračního snímku, vůči kterému má skript posunout polohy centroidů všech hvězd na všech ostatních snímcích. Následně se skript zeptá uživatele na souřadnice proměnné, srovnávací a kontrolní hvězdy na daném referenčním snímku. Následně jsou načteny polohy centroidů pro referenční kalibrační snímek a jiný snímek v sekvenci a spočítají se rozdíly poloh centroidů všech hvězd v x-ové a y-ové ose zvlášť a pro obě osy se načtou do pole. Vznikne tak počet hodnot rozdílů poloh rovný součtu součinů počtu hvězd v referenčním snímku a počtu hvězd v jiném snímku ze sekvence. Nejvíce hodnot rozdílů poloh tak bude rovno právě hodnotě, kterou je potřeba k polohám centroidů daného snímku přičíst, aby polohy odpovídaly polohám centroidů referenčního snímku. Na pole hodnot rozdílů poloh je tak aplikován histogram, aby byly zachyceny i případné odchylky od pravé hodnoty posunu. Hodnota binu, do kterého spadá nejvíce rozdílů poloh, je pak ta, která je přičtena k centroidům všech hvězd v daném snímku pro danou osu a proces se opakuje pro všechny snímky.

Po dokončení posunu centroidů pak skript snímek od snímku určí centroid nejblíže zadaným souřadnicím proměnné, srovnávací a kontrolní hvězdy a jejich magnitudy načte do pole pro všechny poloměry apertur spolu s časy měření. Na obrázku 4.10 je ukázka skriptu `Centroid_shifting_and_LC_making.py`. Struktura skriptu `Centroid_shifting_and_LC_making.py` je:

- `Dotázání se uživatele na index referečního snímku pro posun souřadnic centroidů`
- `Dotázání se uživatele na souřadnice proměnné, srovnavácí a kontrolní hvězdy na referenčním snímku`
- `Načtení centroidů všech hvězd na referenčním snímku`
- `Načtení centroidů všech hvězd na snímku v sekvenci`
- `Inicializace polí hodnot rozdílů poloh centroidů pro x-ovou a y-ovou osu`
- `Výpočet hodnot rozdílů poloh centroidů pro x-ovou a y-ovou osu a načtení těchto hodnot do příslušného pole`
- `Výpočet histogramu pole a určení nejfrekventovanější hodnoty jako hodnoty posunu pro obě osy`
- `Přičtení určené hodnoty posunu v dané ose ke všem polohám centroidů pro daný snímek`
- `Inicializace polí, do kterých se budou ukládat hodnoty magnitud pro proměnnou, srovnávací a kontrolní hvězdu`
- `Načtení souboru s metadaty pro daný snímek`
- `Načtení a uložení data pozorování do všech polí`
- `Určení nejbližšího centroidu proměnné hvězdy vůči jejím zadaným souřadnicím od uživatele`
- `Uložení magnitudy proměnné hvězdy do příslušného pole pro všechny`

  poloměry apertur
- Určení nejbližšího centroidu srovnávací hvězdy vůči jejím zadaným souřadnicím od uživatele
- Uložení magnitudy srovnávací hvězdy do příslušného pole pro všechny poloměry apertur
- Určení nejbližšího centroidu kontrolní hvězdy vůči jejím zadaným souřadnicím od uživatele
- Uložení magnitudy kontrolní hvězdy do příslušného pole pro všechny poloměry apertur
- Uložení všech polí spolu s hodnotami poloměrů apertur do textového souboru

```
reduced_phot_path = Path(working_dir +'\\reduced\\reduced_obj_phot' )
reduced_phot_path.mkdir(exist_ok=True)

'''GETTING INDEX OF IMAGE USED FOR CENTROID SHIFTING FROM USER'''
user_matching_index_input = input("Enter index of an image which you want to use for centroid \
                                  shifting. The index of an image corresponds to its position\
                                   in the reduced folder. Index of the image: ")
user_matching_index_input = int(user_matching_index_input)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''


'''GETTING COORDINATES OF TARGET,COMPARISON AND VALIDATION STAR'''
user_coordinates_targ_input = input("Write down the coordinates of target star (visual) in form \
                                   of xcoord, ycoord. Then press enter: ")
user_coordinates_comp_input = input("Write down the coordinates of comparison star in form\
                                   of xcoord, ycoord. Then press enter:   ")
user_coordinates_vali_input = input("Write down the coordinates of validation star in form\
                                   of xcoord, ycoord. Then press enter:   ")
user_coordinates_targ_input = user_coordinates_targ_input.split(",")
user_coordinates_comp_input = user_coordinates_comp_input.split(",")
user_coordinates_vali_input = user_coordinates_vali_input.split(",")
x_targ, y_targ = (int(user_coordinates_targ_input[0]), int(user_coordinates_targ_input[1]))
x_comp, y_comp = (int(user_coordinates_comp_input[0]), int(user_coordinates_comp_input[1]))
x_vali, y_vali = (int(user_coordinates_vali_input[0]), int(user_coordinates_vali_input[1]))
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''



'''GETTING COORDINATES OF THE STARS FROM MATCHING IMAGE METADATA FILE'''
rootname,_=os.path.splitext(main_paths_obj_red[user_matching_index_input])
photfile = str(reduced_phot_path)+"\\"+rootname.split("\\")[-1]+"-phot.fits"
```

Obrázek 4.10: Část skriptu `Centroid_shifting_and_LC_making.py`

4.1.9 `Plotting.py`

Tento skript zobrazí výslednou světelnou křivku. Nejprve skript vypočte rozdíly magnitud proměnné a srovnávací hvězdy, a srovnávací a kontrolní hvězdy, spočte příslušné standardní odchylky a vypíše je. Poté se skript zeptá uživatele na to, kterou aperturu chce použít. Následně skript spočte chyby magnitud a zeptá se uživatele, jestli chce zobrazit i je. Poté je zobrazena světelná křivka jak rozdílu proměnné a srovnávací hvězdy, tak rozdílu srovnávací a kontrolní hvězdy. Následně se skript zeptá uživatele, zda nechce zobrazit světelnou křivku ještě pro jinou aperturu. Pokud uživatel odmítne, je celý proces dokončen. Na obrázku 4.11 je ukázka skriptu `Plotting.py`. Struktura skriptu `Plotting.py` je:

- Výpočet rozdílů magnitud a jejich standardních odchylek pro dané dvojice hvězd

- Dotázání se uživatele na index apertury, jejíž světelnou křivku chce zobrazit
- Výpočet chyb rozdílů magnitud pro příslušnou aperturu
- Dotázání se uživatele, zda chce zobrazit chybové úsečky
- Zobrazení světelné křivky
- Dotázání se uživatele, zda chce zobrazit světelnou křivku pro jinou aperturu

```
'''COMPUTING DIFFERENCES OF MAGNITUDES AND COMPUTING STANDARD DEVIATIONS'''
print('WRITING OUT ALL STANDARD DEVIATIONS')

for i in range(len(radii)):
    iaper = i
    targ_lc_diff = targ_lc[iaper+1,:]-comp_lc[iaper+1,:]
    vali_lc_diff = comp_lc[iaper+1,:]-vali_lc[iaper+1,:]
    print("Aperture number ",i," radius ",radii[i],"px"," STD C-K: ",round(np.nanstd(vali_lc_diff)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

'''GETTING FROM USER WHICH APERTURE TO PLOT'''
while True:
    which_aper_num = input("Enter the aperture number which you want to use for plotting: ")

    if int(which_aper_num) in range(len(radii)):
        break
    else:
        print("This number doesn't correspond to any aperture.")

aper_num = int(which_aper_num)
''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''''

targ_lc_diff = targ_lc[aper_num+1,:]-comp_lc[aper_num+1,:]
vali_lc_diff = comp_lc[aper_num+1,:]-vali_lc[aper_num+1,:]

'''COMPUTING ERRORS OF DIFFERENCES OF MAGNITUDES FOR THE CORRESPONDING CHOSEN APERTURE'''
err_targ = targ_lc[aper_num+num_of_apertures+1,:]
```

Obrázek 4.11: Část skriptu `Plotting.py`

4.2 Porovnání pipeline PLATOSpecPhot a programu C-Munipack

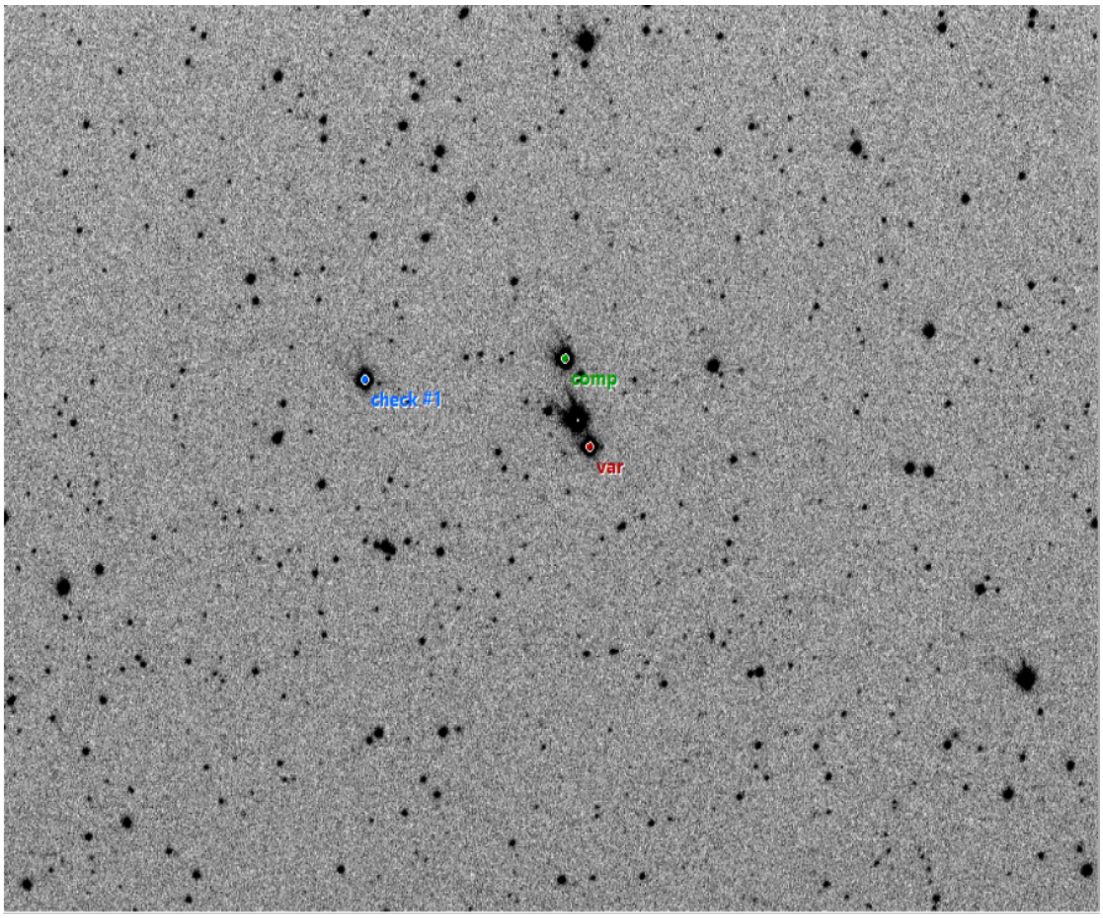
Pro zjištění, zda PLATOSpecPhot funguje tak, jako fungují typicky užívané programy pro zpracování fotometrických měření, bylo provedeno porovnání výstupů z pipeline a ze softwaru C-Munipack.

Soubor dat, který byl vložen jak do PLATOSpecPhot, tak do C-Munipack, nepocházel z měření kamerou C4-16000 z důvodu toho, že C-Munipack nebyl schopen zpracovat soubory dat z kamery C4-16000 a z neznámého důvodu hlásil chybové hlášky. Byl tedy použit soubor dat z měření 65 cm dalekohledem v Ondřejově, které proběhlo v noci z 23.3.2022 na 24.3.2022 od 19:04 UTC do 3:53 UTC a jehož cílem byla zákrytová dvojhvězda TIC 12036. Byly pořízeny tutéž noc i příslušné kalibrační snímky a rovnou na místě zkombinovány do master snímků. 65 cm dalekohled v Ondřejově je vybaven fotometrickou kamerou, která nevyužívá systém dvojích vyčítacích kanálů jako kamera C4-16000, tedy proces kalibrace probíhá přesně podle postupu popsaného v 3.2 a podle rovnice 3.3.

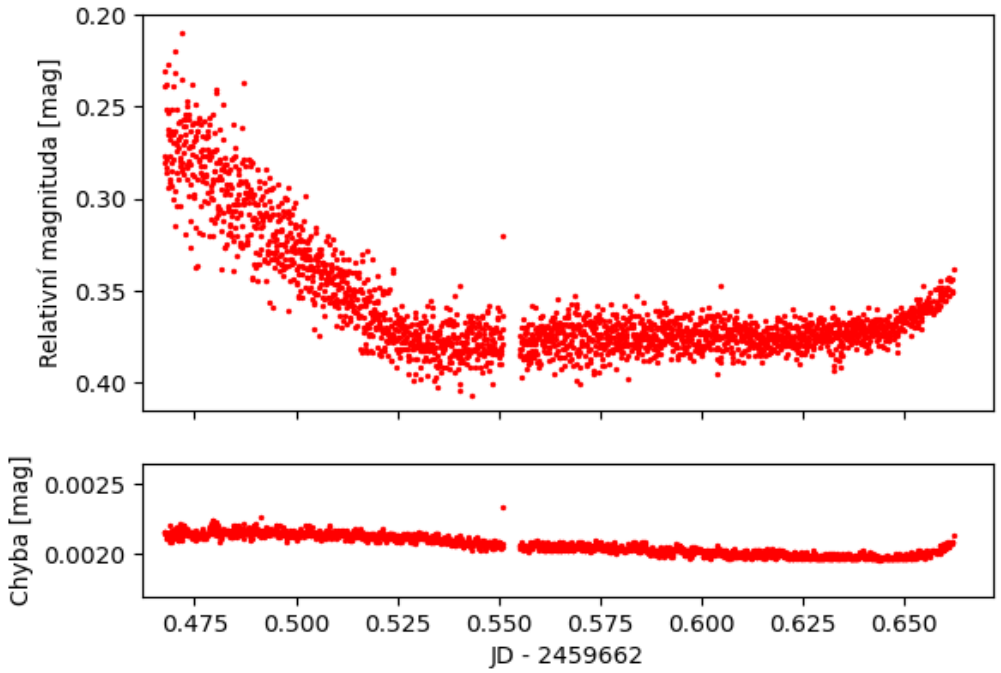
Vzhledem k tomu, že byly kalibrační snímky zkombinovány rovnou při měření, tak bylo potřeba samotnou kalibraci snímků provést manuálně v kódu, pipeline PLATOSpecPhot není stavěná na to, aby jí bylo možné dát rovnou předem vytvořený master snímek. Tímto postupem nicméně nebyla vnesena do výsledné světelné křivky žádná systematická chyba, pouze se musely manuálně načíst master snímky v příslušné části pipeline. V tabulce 4.1 jsou uvedeny parametry testovacího souboru dat pro PLATOSpecPhot - typ snímků, expoziční doba snímků t_{exp}(s), počet snímků $N_{snímků}$ a rozměry jednoho snímku v pixelech. Na Obrázku 4.12 je znázorněno pole TIC 12036 s označenou proměnnou, srovnávací a kontrolní hvězdou. Na Obrázcích 4.13 a 4.14 je zobrazena světelná křivka hvězdy TIC 12036 vygenerovaná se stejnými vstupními parametry jak softwarem C-Munipack tak PLATOSpecPhot.

Typ snímků	$N_{snímků}$	t_{exp}(s)	Rozměry [pxl]
TIC 12036	2393	4	1092×736
Master Dark	1	4	1092×736
Master Flat	1	4	1092×736

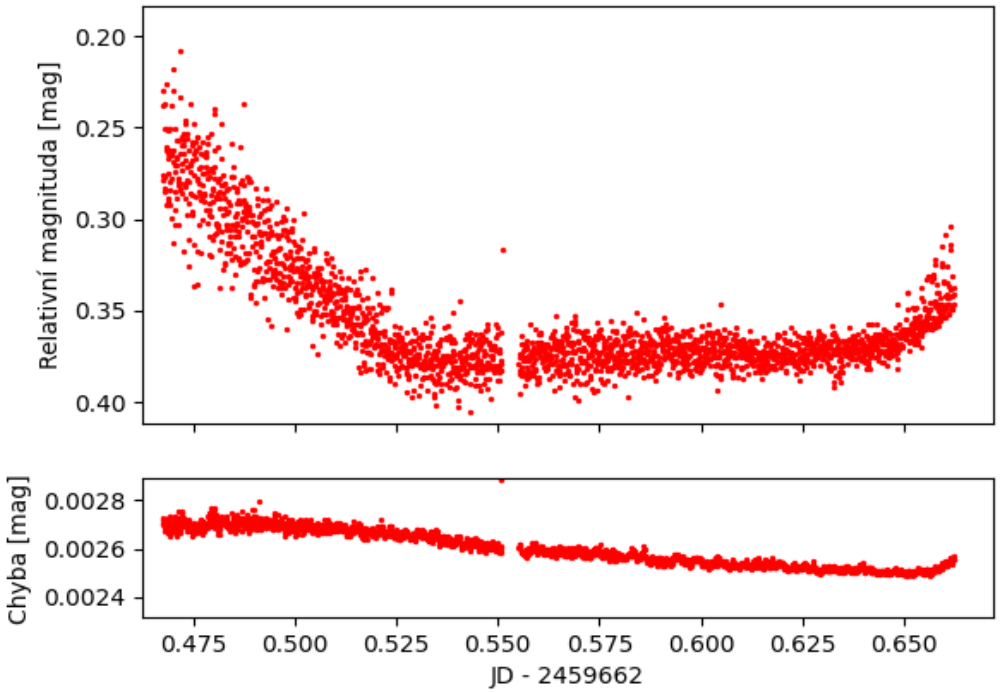
Tabulka 4.1: Testovací data hvězdy TIC 12036



Obrázek 4.12: Snímek pole zákrytové dvojhvězdy TIC 12036 (Var), srovnávací hvězdy (Comp) a kontrolní hvězdy (check ♯1).



Obrázek 4.13: Světelná křivka dvojhvězdy TIC 12036 vytvořená softwarem C-Munipack



Obrázek 4.14: Světelná křivka dvojhvězdy TIC 12036 vytvořená PLATOSpecPhot.

Obě světelné křivky, na kterých je dobře viditelný zákryt, se shodují až na koncové body. Jak je vidět v [Mun], implementace DAOPHOT algoritmu je v softwaru C-Munipack více komplikovaná. Různé algoritmy na hledání centroidů hvězd mohou nalézt nepatrně lišící se polohy, proto lze očekávat, že se výstupy z různých softwarů nemusí shodovat stoprocentně. Pro neshodu v chybách platí podobný argument, zde je ovšem zcela zřejmé, že C-Munipack používá jiný vzorec na výpočet chyby, který se nepodařilo v dokumentaci nalézt. Přesto vzhledem k významné shodě hodnot magnitudy pro převážnou většinu snímků lze říci, že pipeline PLATOSpecPhot dává očekávané výsledky.

5. Soubor dat a pozorování cílů

5.1 Cíle pozorování

5.1.1 AU Microscopii

Prvním z cílů pozorování v této práci je eruptivní proměnná hvězda AU Microscopii (AU Mic), která se nachází v souhvězdí Mikroskopu. Jedná se o hvězdu spektrální třídy M. Obíhají okolo ní dvě exoplanety AU Mic b a AU Mic c. Lze na ní pozorovat ve viditelném spektru průměrně 2,147 erupcí denně [Gilbert a kol., 2022]. Její parametry jsou uvedeny v Tabulce 5.1 a je znázorněna na Obrázku 5.1.

Parametr	Hodnota
Efektivní teplota	3700 ± 100 K
Hmotnost	0,50 ± 0,03 $M_\odot$
Poloměr	0,70 ± 0,03 $R_\odot$
Perioda rotace	4,863 ± 0,010 d
Věk	22 ± 3 Myr
Vzdálenost	9,7248 ± 0,0046 pc
Jasnost ve filtru V	8,627 mag
Rektascenze	$20^h\ 45^m\ 09{,}53^s$
Deklinace	$-31^{\mathrm{deg}}\ 20m\ 27{,}24s$
Hloubka tranzitu	0,3 %

Tabulka 5.1: Parametry hvězdy AU Mic. Převzato z [Martioli a kol., 2021], z [Gaia Collaboration, 2020] a hloubka tranzitu je převzata z [Plavchan a kol., 2020], ale autor neuvádí přesnou hodnotu tranzitu, byla proto odhadnuta z příslušného grafu uvedeného v článku.

5.1.2 DS Tucanae A

Druhým z cílů pozorování v této práci je eruptivní proměnná hvězda DS Tucanae A (DS Tuc) nacházející se v souhvězdí Tukana. Jedná se o hvězdu spektrální třídy G, která spolu s hvězdou DS Tucanae b tvoří dvojhvězdu. Obíhá okolo ní exoplaneta DS Tuc A b. Lze na ní pozorovat ve viditelném spektru průměrně 2 erupce denně [Colombo a kol., 2022]. Její parametry jsou uvedeny v Tabulce 5.2 a je znázorněna na Obrázku 5.2.

5.2 Pozorování

Pozorování hvězd DS Tuc a AU Mic kamerou C4-16000 umístěnou v ohnisku dalekohledu E152 proběhlo v několika nocích mezi 22.8.2022 a 5.9.2022. V tomto období byly také pořízeny snímky potřebné pro kalibraci. Všechny snímky byly pořízeny ve filtru Sloan g, který propouští světlo mezi vlnovými délkami 408 nm

Obrázek 5.1: Pole hvězdy AU Mic (nejvýraznější hvězda). Převzato z [Sim].

Parametr	Hodnota
Efektivní teplota	5542 ± 21 K
Hmotnost	0,959 ± 0,031 $M_{\odot}$
Poloměr	0,872 ± 0,027 $R_{\odot}$
Perioda rotace	2,85 ± 0,03 d
Věk	22 ± 3 Myr
Vzdálenost	9.7248 ± 0.0046 pc
Jasnost ve filtru V	8,469 ± 0,013 mag
Rektascenze	23^h39^m 39,48^s
Deklinace	-69$^{\text{deg}}$ 11m 44,7s
Hloubka tranzitu	0,2936 ± 0.0026 %

Tabulka 5.2: Parametry hvězdy DS Tuc. Převzato z [Benatti a kol., 2019] a hloubka tranzitu převzata z [Newton a kol., 2019].

a 545 nm. Overscan oblast nebyla samotným elektronickým ovladačem kamery zahrnuta do pořízených snímků, pořízené snímky tak mají pro binning 1 × 1 velikost 4096 × 4096 pixelů a pro binning 2 × 2 velikost 2048 × 2048. Všechny pořízené snímky mají formát FITS [1]. V tabulce 5.3 jsou uvedeny pozorovací dny t_{obs} (d.m.), hvězdy, které byly v daný den pozorovány, expoziční doba snímků t_{exp}(s), počet snímků $N_{snímků}$, binning snímků a časové rozmezí, během kterého byly snímky pro daný den pořízeny (t_{begin} (UTC) a t_{end} (UTC)).

5.3 Kalibrační snímky

Během pozorovacího období byly také pořízeny kalibrační snímky opět ve filtru Sloan g. V tabulce 5.4 jsou uvedeny dny pořízení kalibračních snímků, expo-

[1] Flexible Image Transport System

Obrázek 5.2: Pole hvězdy DS Tuc (nejvýraznější hvězda). Převzato z [Sim].

ziční doba kalibračních snímků, počet kalibračních snímků, binning kalibračních snímků a typ kalibračních snímků.

5.3.1 Analýza linearity dark snímků

Linearita samotné CCD kamery je klíčovou vlastností, kterou musí mít. Linearita kamery prakticky znamená, že závislost průměrného signálu zachyceného v celém snímku na době expozice je lineární. To je důležité proto, protože pokud by kamera vyčítala nelineárně, tak má pro různé expoziční doby různou citlivost pixelů a ve světelné křivce by se objevily defekty, které by znehodnotily celou analýzu. Linearita CCD kamery se ověřuje buď pomocí vědeckých snímků, tedy snímků pole hvězd, galaxií či jiných objektů, nebo pomocí flat snímků, protože je potřeba ověřit, jak dobře reaguje vyčítací mechanismus na fotony dopadající na CCD čip. Během testovacího běhu nicméně nebylo pořízeno dostatečné množství vědeckých snímků či flat snímků v různých expozičních dobách tak, aby bylo možné linearitu CCD kamery ověřit. Během testovacího běhu však bylo pořízeno několik sad dark snímků v různých expozičních dobách, které jsou v intervalu od 0,02 s do 300 s. V Tabulkách 5.5 a 5.6 jsou uvedeny parametry těchto sad dark snímků.

Alespoň lze tedy ověřit, jak lineární je vyčítací mechanismus, co se dark snímků týče a porovnat s údajem, který uvádí výrobce a který je podložený Obrázkem 5.3. Na něm lze vidět, že okolo expoziční doby $t_{exp} = 25s$ kamera přestává být lineární. Je možné provést analýzu linearity pro dark snímky a porovnat ho s údajem uváděným výrobcem. To ale nicméně neprokazuje, že je samotná CCD kamera lineární.

Pro každou expoziční dobu byla vzata naměřená sekvence snímků a z ní mediánovou kombinací vytvořen master snímek. Pro každý master snímek byla následně vzata průměrná hodnota ADU vyskytující se v něm. Toto bylo provedeno separátně pro binning 1×1 a 2×2 a pro vyčítací kanál 12-bit hi-gain a 16-bit lo-gain. Příslušné závislosti jsou vyobrazeny na Obrázcích 5.5, 5.4, 5.6 a 5.7.

t_{obs} (d.m.)	Hvězda	$N_{snímků}$	t_{exp}(s)	binning	t_{begin} (UTC)	t_{end} (UTC)
22.8.	DS Tuc	1049	5	1×1	3:49	10:19
23.8.	DS Tuc	498	5	1×1	4:38	9:42
26.8.	AU Mic	2386	3	1×1	0:11	6:26
26.8.	DS Tuc	927	3	1×1	6:29	10:00
27.8.	AU Mic	1962	3	1×1	23:10	4:51
27.8.	DS Tuc	525	3	1×1	7:46	10:11
28.8.	DS Tuc	683	3	1×1	5:20	9:55
29.8.	AU Mic	488	3	1×1	4:36	8:28
29.8.	DS Tuc	185	3	1×1	8:40	10:01
30.8.	DS Tuc	344	5	1×1	7:18	9:52
31.8.	AU Mic	173	5	4×4	8:08	9:08
31.8.	DS Tuc	87	1; 5	1×1; 4×4	9:21	9:46
1.9.	AU Mic	313	2	2×2	5:19	7:20
1.9.	DS Tuc	444	2	2×2	7:22	10:15
2.9.	AU Mic	511	3	2×2	5:30	9:15
3.9.	AU Mic	1439	2	2×2	23:35	7:22
3.9.	DS Tuc	539	1	2×2	7:22	10:11
4.9.	DS Tuc	174	3	2×2	9:12	10:29
5.9.	DS Tuc	299	3	1×1	7:39	10:06

Tabulka 5.3: Soubory snímků hvězd DS Tuc a AU Mic.

t_{obs} (d.m.)	Typ snímků	Kanál	$N_{snímků}$	t_{exp}(s)	binning
22.8.	Dark	12-bit hi-gain	20	5	1×1
22.8.	Dark	16-bit lo-gain	10	5	1×1
23.8.	Dark	12-bit hi-gain	20	5	1×1
23.8.	Dark	16-bit lo-gain	30	5	1×1
26.8.	Dark	12-bit hi-gain	20	3	1×1
26.8.	Dark	16-bit lo-gain	20	3	1×1
7.9.	Dark	12-bit hi-gain	10	4	2×2
7.9.	Dark	16-bit lo-gain	13	4	2×2
24.8.	Flat	12-bit hi-gain	5	10	1×1
26.8.	Flat	12-bit hi-gain	10	10	1×1
31.8.	Flat	12-bit hi-gain	16	0.05	1×1
24.8.	Flat	16-bit lo-gain	10	10	1×1
26.8.	Flat	16-bit lo-gain	10	10	1×1
31.8.	Flat	16-bit lo-gain	16	0.2	1×1
8.9.	Flat	12-bit hi-gain	5	1	2×2
8.9.	Flat	12-bit hi-gain	7	0.2	2×2
8.9.	Flat	12-bit hi-gain	10	2	2×2
8.9.	Flat	16-bit lo-gain	9	1	2×2
8.9.	Flat	16-bit lo-gain	13	0.2	2×2
8.9.	Flat	16-bit lo-gain	10	3	2×2

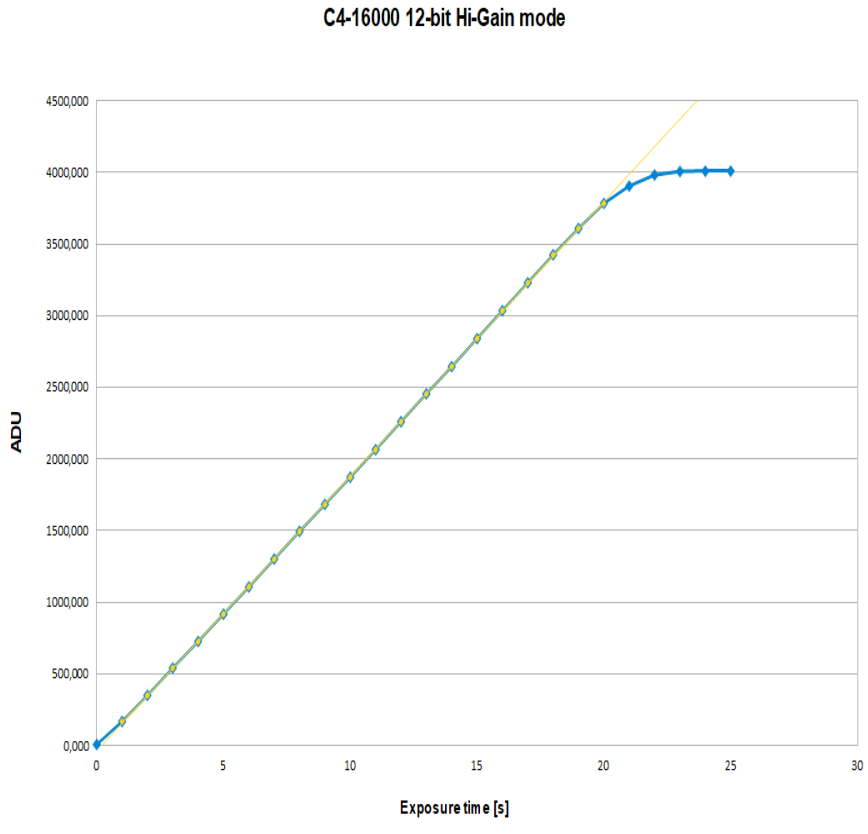
Tabulka 5.4: Soubory kalibračních snímků použitých pro zpracování

t_{obs} (d.m.)	Kanál	$N_{snímků}$	t_{exp}(s)
31.8.	12-bit hi-gain	10	0.05
31.8.	12-bit hi-gain	10	0.10
31.8.	12-bit hi-gain	9	0.20
31.8.	12-bit hi-gain	10	1
26.8.	12-bit hi-gain	20	3
29.8.	12-bit hi-gain	10	4
23.8.	12-bit hi-gain	20	5
29.8.	12-bit hi-gain	10	6
29.8.	12-bit hi-gain	10	7
29.8.	12-bit hi-gain	10	10
31.8.	12-bit hi-gain	10	20
31.8.	12-bit hi-gain	10	30
31.8.	12-bit hi-gain	5	60
3.7.	12-bit hi-gain	5	100
6.9.	12-bit hi-gain	10	120
24.8.	12-bit hi-gain	10	180
24.8.	12-bit hi-gain	5	300
31.8.	16-bit lo-gain	10	0.05
31.8.	16-bit lo-gain	10	0.10
31.8.	16-bit lo-gain	10	0.20
31.8.	16-bit lo-gain	10	1
26.8.	16-bit lo-gain	20	3
29.8.	16-bit lo-gain	10	4
23.8.	16-bit lo-gain	10	5
29.8.	16-bit lo-gain	10	6
29.8.	16-bit lo-gain	10	7
29.8.	16-bit lo-gain	10	10
31.8.	16-bit lo-gain	10	20
30.8.	16-bit lo-gain	10	30
29.8.	16-bit lo-gain	5	60
3.7.	16-bit lo-gain	5	100
6.9.	16-bit lo-gain	10	120
24.8.	16-bit lo-gain	10	180
24.8.	16-bit lo-gain	5	300

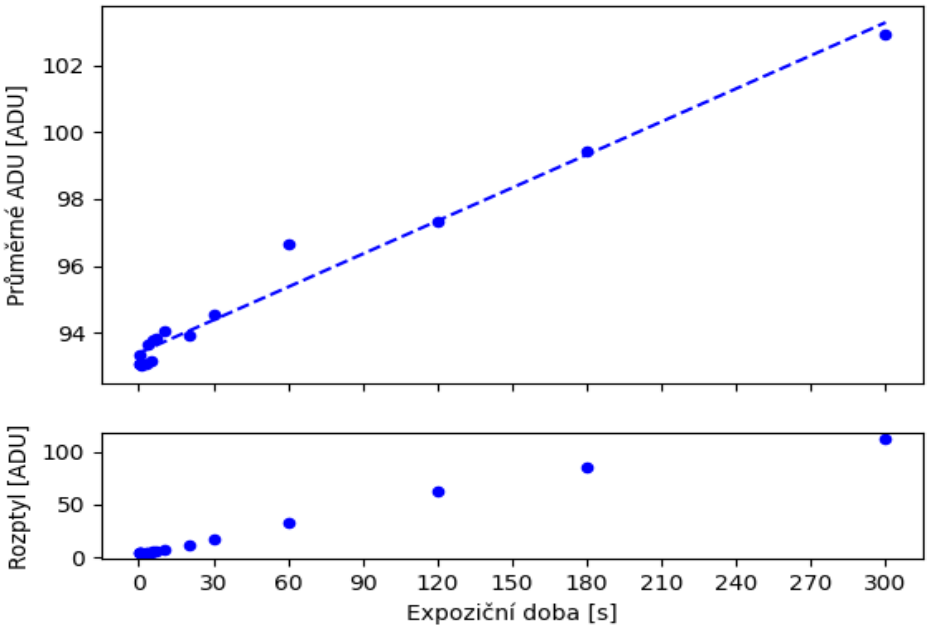
Tabulka 5.5: Analyzovaný soubor dark snímků pořízený v binningu 1×1

t_{obs} (d.m.)	Kanál	$N_{snímků}$	t_{exp}(s)
7.9.	12-bit hi-gain	10	4
7.9.	12-bit hi-gain	10	5
8.9.	12-bit hi-gain	10	30
6.9.	12-bit hi-gain	10	60
2.9.	12-bit hi-gain	10	120
6.9.	12-bit hi-gain	10	180
7.9.	16-bit lo-gain	13	4
7.9.	16-bit lo-gain	10	5
8.9.	16-bit lo-gain	10	30
6.9.	16-bit lo-gain	10	60
2.9.	16-bit lo-gain	10	120
6.9.	16-bit lo-gain	10	180

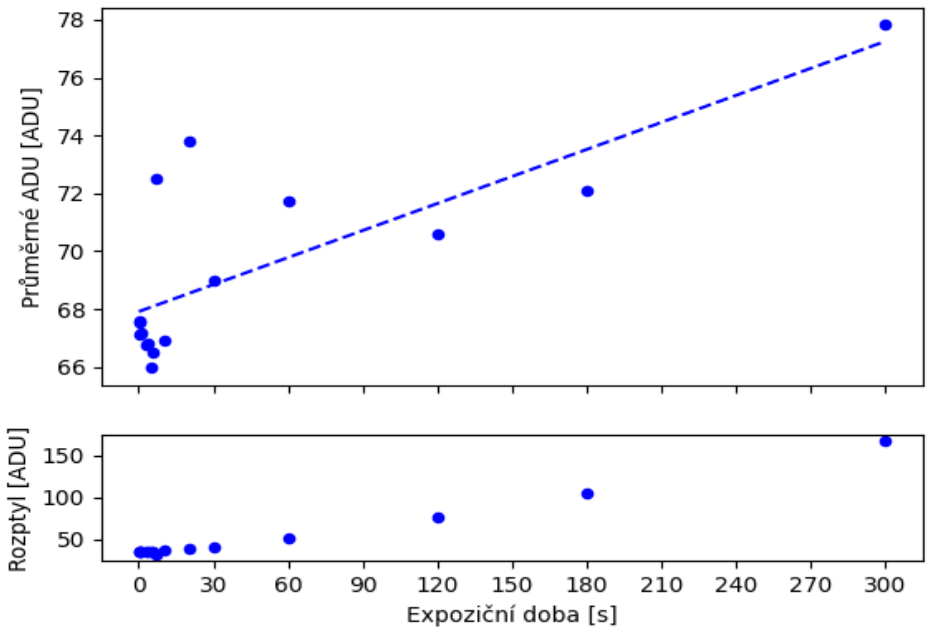
Tabulka 5.6: Analyzovaný soubor dark snímků pořízený v binningu 2×2



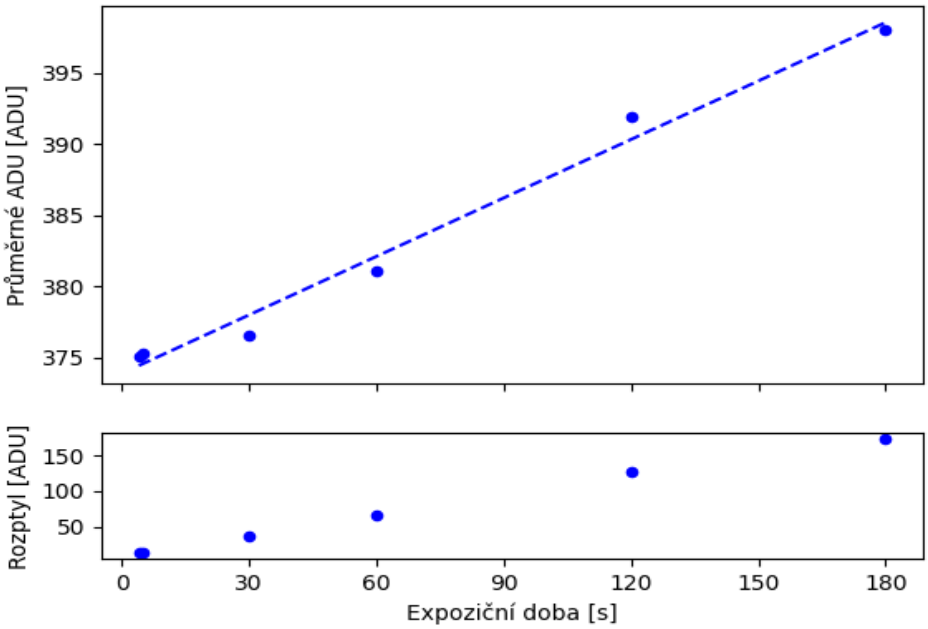
Obrázek 5.3: Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro kameru C4-16000 v 12-bit lo-gain kanálu. Charakter snímků nebyl výrobcem popsán. Převzato z [C4].



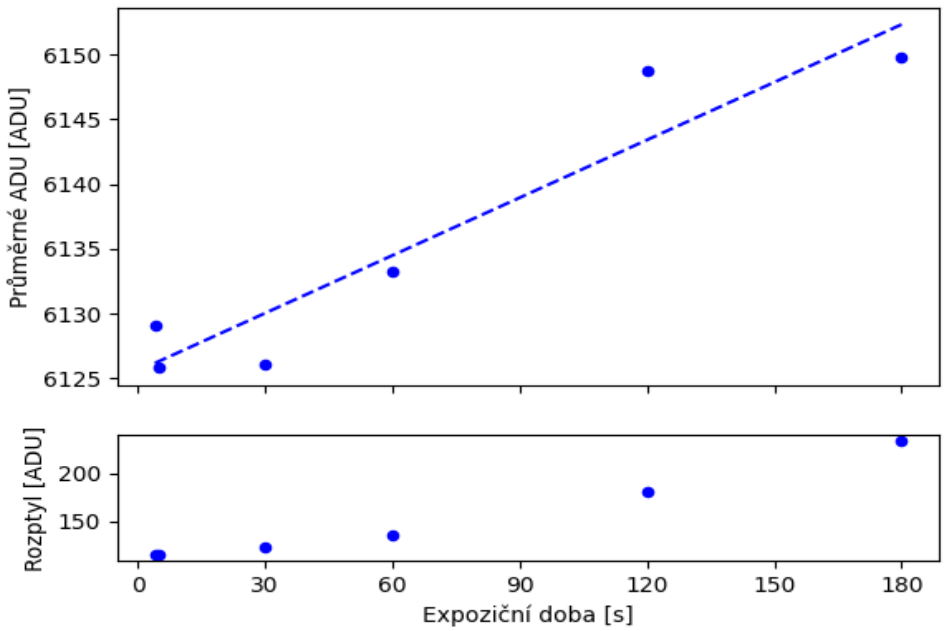
Obrázek 5.4: Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 12-bit hi-gain a binningu 1×1.



Obrázek 5.5: Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 16-bit lo-gain a binningu 1×1.



Obrázek 5.6: Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 12-bit hi-gain a binningu 2×2.



Obrázek 5.7: Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 16-bit lo-gain a binningu 2×2.

Z grafů je vidět, že vyčítací systém pro dark snímky je lineární v celém rozsahu expoziční doby od 0,05 s do 300 s, ale pro expoziční doby větší než 30 s už je rozptyl nad 10% průměrné hodnoty ADU a tedy nelze s jistotou potvrdit, že pro expoziční doby větší než 30 s je vyčítací systém pro dark snímky lineární. Pro expoziční doby menší než 30 s je rozptyl už pod hodnotou 10% průměrné hodnoty a dá se tak potvrdit, že pro expoziční doby menší než 30 s je vyčítací systém pro dark snímky lineární. V grafu 5.7 si lze také povšimnout, že vyčítací systém hlásí hodnoty kolem 6140 pro 16-bit lo-gain vyčítací kanál. To je chybná hodnota, která souvisí zřejmě se špatným nastavením samotného vyčítacího algoritmu od výrobce kamery.

6. Analýza dat

6.1 Světelné křivky

Data uvedená v tabulkách 5.3 a 5.4 byla použita jako vstup do pipeline PLATOSpecPhot pro vykreslení světelných křivek hvězd DS Tuc a AU Mic. Na Obrázku 6.1 je znázorněno pole hvězdy DS Tuc s označenou polohou hvězdy DS Tuc, polohou srovnávací hvězdy a polohou kontrolních hvězd, a na Obrázcích 6.2 a 6.3 je znázorněno pole hvězdy AU Mic s označenou polohou AU Mic, polohou srovnávacích hvězd a polohou kontrolních hvězd.

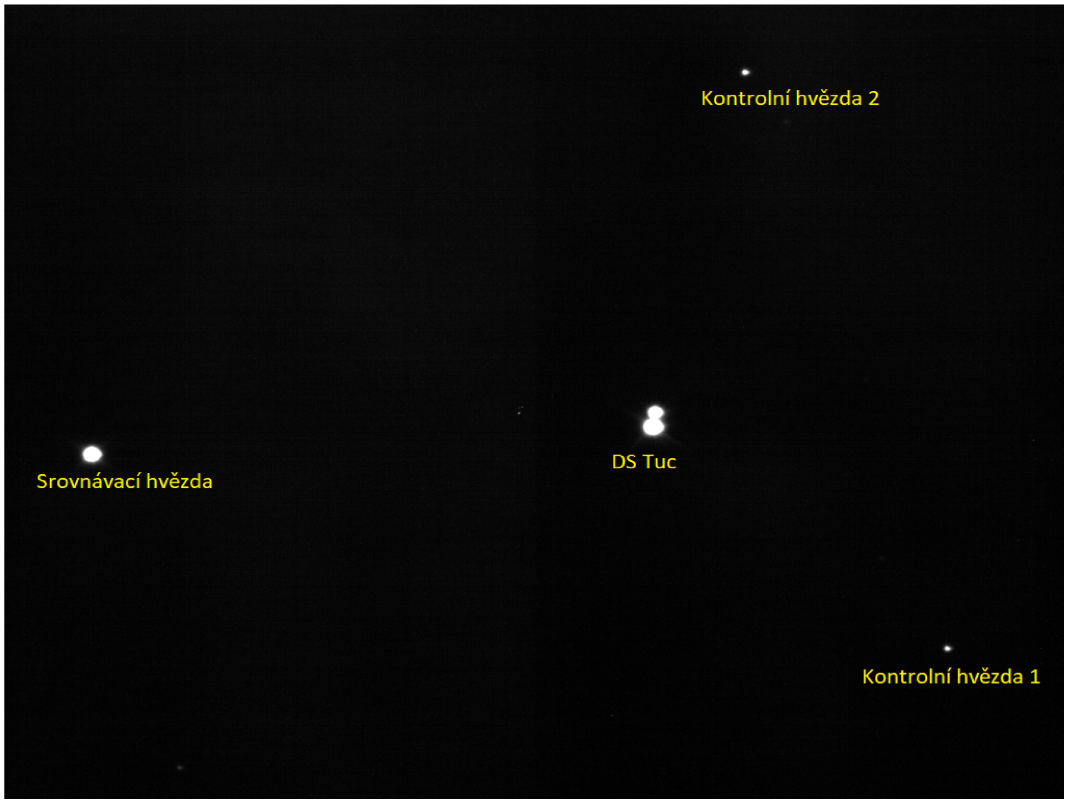
Pro případ měření v binningu 2×2 nebyly naměřeny správné kalibrační dark snímky, sekvence dark snímků s nejmenší expoziční dobou měla expoziční dobu 4 s místo potřebných 1 s, 2 s a 3 s. Navíc je s dark snímky v binningu 2×2 problém popsaný v 5.3.1, kdy vyčítací systém dává nesmyslné hodnoty pro 16-bit lo-gain kanál. Z toho důvodu bylo nutné přistoupit k tomu, že byla pro snímky pole hvězd v binningu 2×2 použita jen jedna sada snímků z 12-bit hi-gain kanálu. Takový postup samozřejmě vnáší do výsledných hodnot systematickou chybu. Jedná se však o rozdíl expozičních dob v řádu jednotek sekund a detektor je v tomto časovém rozpětí lineární. Jak lze vidět na Obrázcích 5.5 a 5.4, tak pro expoziční doby kolem 4 s jsou průměrné hodnoty jednotek ADU téměř totožné. Co se týče ale rozdílu samotného průměru hodnot jednotek ADU pro 12-bit hi-gain kanál a 16-bit lo-gain kanálu, tak podle Obrázků 5.5 a 5.4 lze jeho odhad určit jako 100 ADU. Vzhledem k tomu, že hodnoty ADU u hvězd měřených v 2×2 binningu jsou řádově tisíce až desetitisíce jednotek ADU, tak systematická chyba vnesená použitím chybných redukčních snímků je odhadována nanejvýš jako jednotky procent.

6.1.1 DS Tucanae A

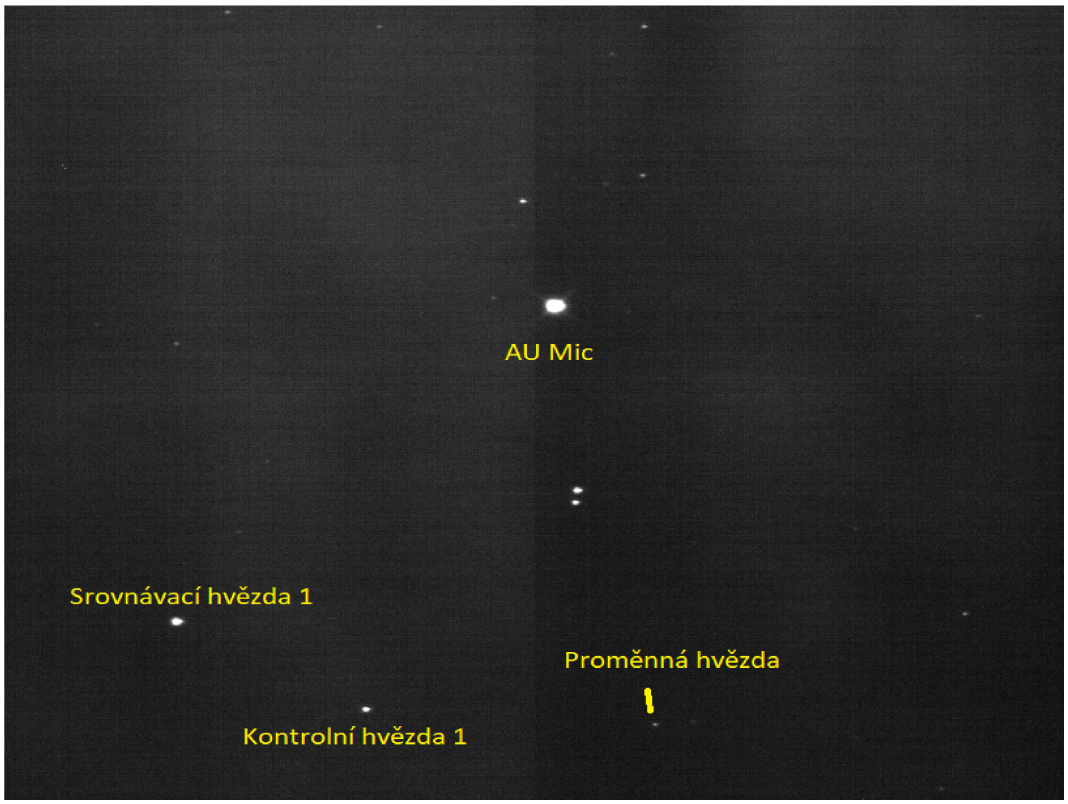
Pro některé dny nebyly napozorované snímky hvězdy DS Tucanae A (DS Tuc) zpracovány. Z pozorování dne 23.8. bylo zpracováno jen prvních 429 snímků, protože v následujících snímcích se dostala srovnávací hvězda mimo pole a kontrolní hvězdy také střídavě nebyly v poli přítomny, jak se celé pole posouvalo v průběhu pozorování. Pozorování dne 30.9. nebylo zpracováno, protože kamera byla tak nezaostřená, že hvězda DS Tuc splynula s hvězdou DS Tucanae B, která se na Obrázku 6.1 nachází nad DS Tuc. Pozorování dne 31.8. nebylo zpracováno, protože bylo k dispozici pouze 87 snímků, přičemž některé z nich byly pořízeny v binningu 4×4 k čemuž nebyly k dispozici kalibrační snímky. Pozorování ve dny 1.9. a 3.9. nebyla zpracována, protože kontrolní hvězdy se střídavě dostávaly celé mimo pole. Pozorování dne 4.9. nebylo zpracováno, protože byly snímky pořízeny v dobu, kdy už na observatoři La Silla vycházelo Slunce, které postupně přesvítilo hvězdy v poli.

Pro zbylé dny byla naměřená pozorování zpracována v PLATOSpecPhot, výsledné světelné křivky jsou znázorněny na Obrázku 6.4, a příslušné chyby z fotometrie jsou znázorněny na Obrázku 6.5.

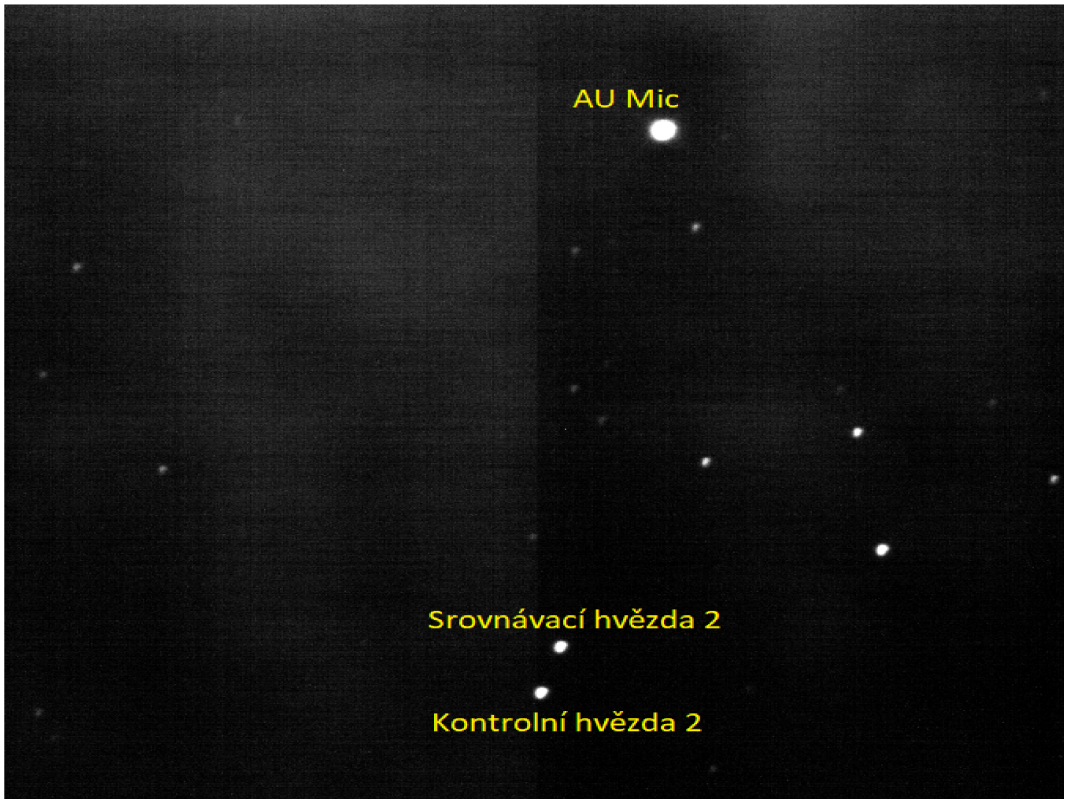
Na světelných křivkách hvězdy DS Tuc si lze povšimnout několika věcí. Velká prodleva u světelné křivky DS Tuc ze dne 22.8 (JD 2459814) byla způsobena tím,



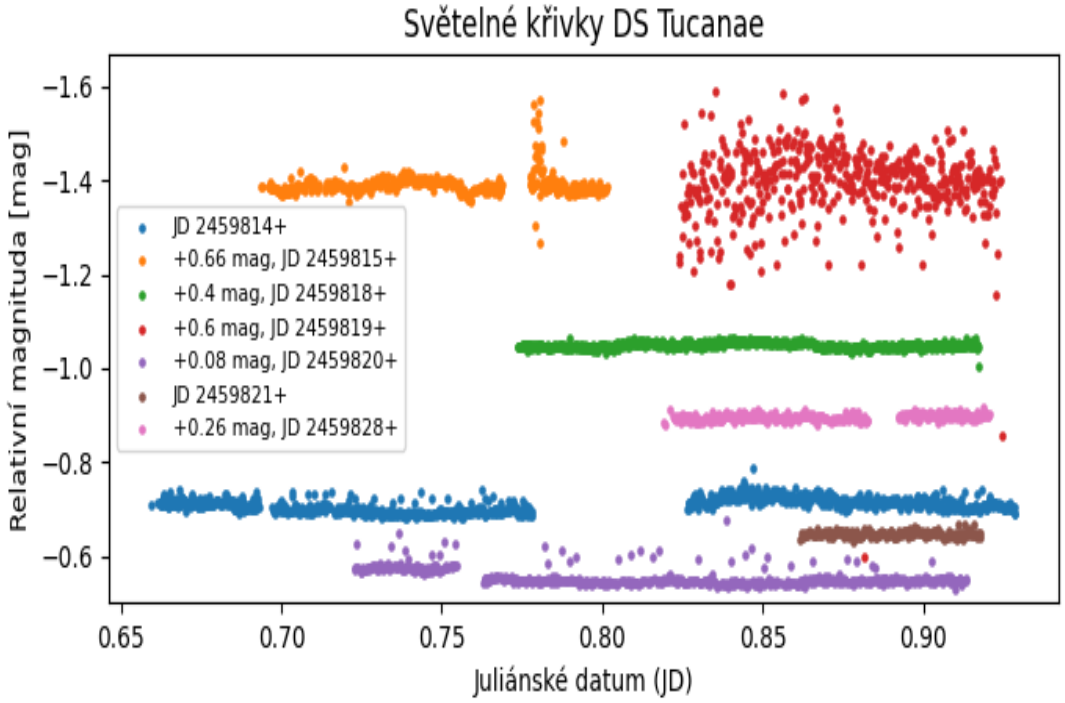
Obrázek 6.1: Pole hvězdy DS Tuc z kamery C4-16000.



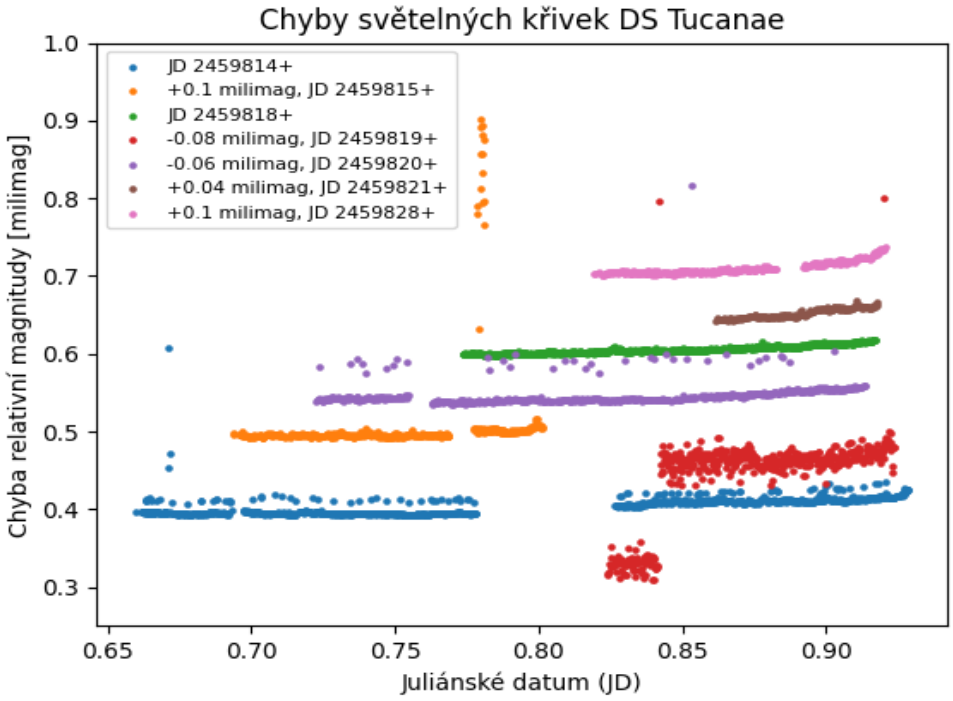
Obrázek 6.2: Pole hvězdy AU Mic z kamery C4-16000 pozorované ve všech uvedených dnech kromě 2.9.



Obrázek 6.3: Pole hvězdy AU Mic z kamery C4-16000 pozorované 2.9.



Obrázek 6.4: Graf světelných křivek hvězdy DS Tuc. Různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě.



Obrázek 6.5: Graf chyb z fotometrie jednotlivých bodů světelných křivek hvězdy DS Tuc. Různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé křivky chyb jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě.

že dalekohled už nemohl pozorovat v pozici, ve které se nacházel a musel být ovládacím systémem přesunut na opačnou stranu v kupoli, došlo tedy k takzvanému *meridian flipu* neboli přetočení dalekohledu kolem osy rektascenze při přiblížení ke zdánlivému poledníku na nebeské sféře. Nárůst relativní magnitudy u světelné křivky DS Tuc ze dne 23.8. (JD 2459815) po prodlevě způsobné otáčením dalekohledu v kupoli je způsoben tím, že kamera stále během pozorování zaostřovala a všechny hvězdy v poli byly velmi rozmazané. Velký rozptyl relativní magnitudy světelné křivky DS Tuc ze dne 27.8. (JD 2459819) je způsoben tím, že hvězda DS Tuc se nachází blízko své souputnice DS Tucanae B a v této sekvenci byly u sebe v poli tak blízko, že jejich okraje se už částečně dotýkaly, tedy střídavě byla a nebyla tvořená spodní část aperturní kružnice hvězdou místo okrajem s menším počtem ADU. U světelné křivky DS Tuc ze dne 29.8. (JD 2459821) si lze povšimnout viditelného poklesu relativní magnitudy po prodlevě způsobené otáčením dalekohledu v kupoli. Tento pokles je spojený s tím, že následně se nacházela jak hvězda DS Tuc, tak srovnávací hvězda v jiném kvadrantu pole než před otáčením dalekohledu a jak je znázorněno na Obrázku 2.4, tak různé kvadranty čipu kamery C4-16000 mají různou citlivost. To by sice měl spravit příslušný master flat snímek, ale nespravuje, důvodem bude zřejmě komplikovaná struktura samotného GSENSE 4040 čipu, ke kterému výrobce neuvádí bližší informace a bude tak potřeba provést další testování ohledně správné kalibrace snímků, pokud hvězda v průběhu pozorování přejde do jiného kvadrantu. Toto přesunutí hvězdy do jiného kvadrantu se v případě pozorování hvězdy DS Tuc stalo jen v tento den. Dále

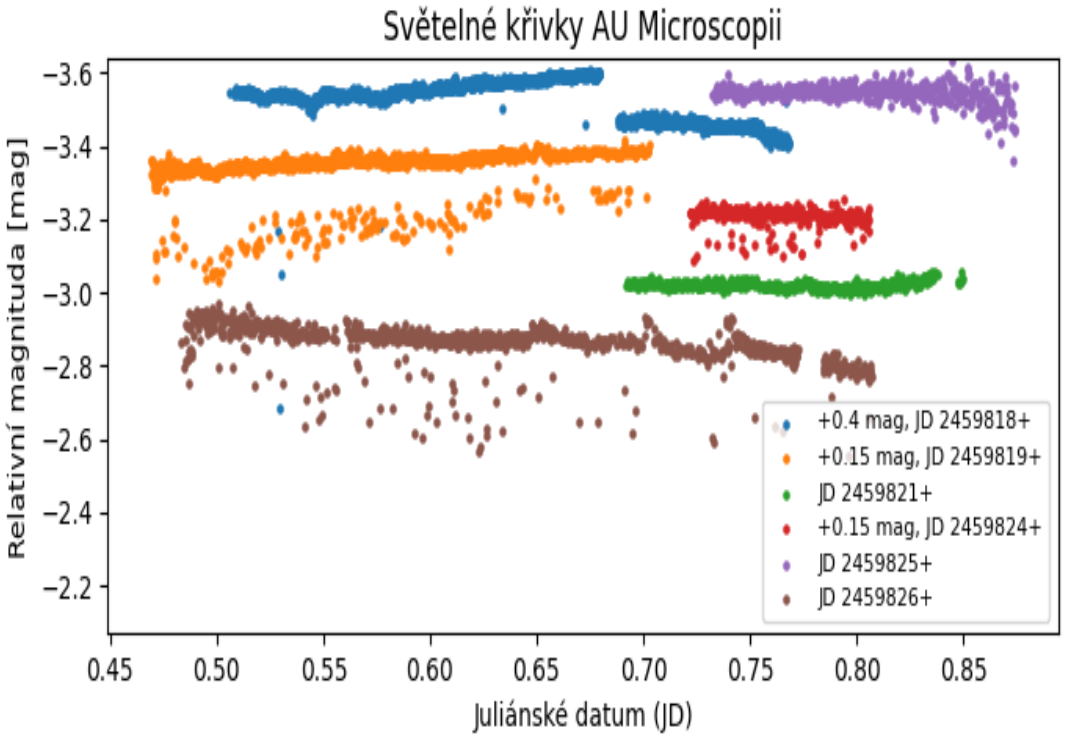
si lze povšimnout pro světelnou křivku DS Tuc ze dne 29.8. různých bodů odchýlených od světelné křivky. To může být způsobené buď nesprávnou opravou souřadnic centroidu hvězdy DS Tuc nebo srovnávací hvězdy, či nějakými chybami ve vyčítacím systému kamery C4-16000. Nebyla detekována žádná erupce během testovacího běhu ani tranzit exoplanety.

6.1.2 AU Microscopii

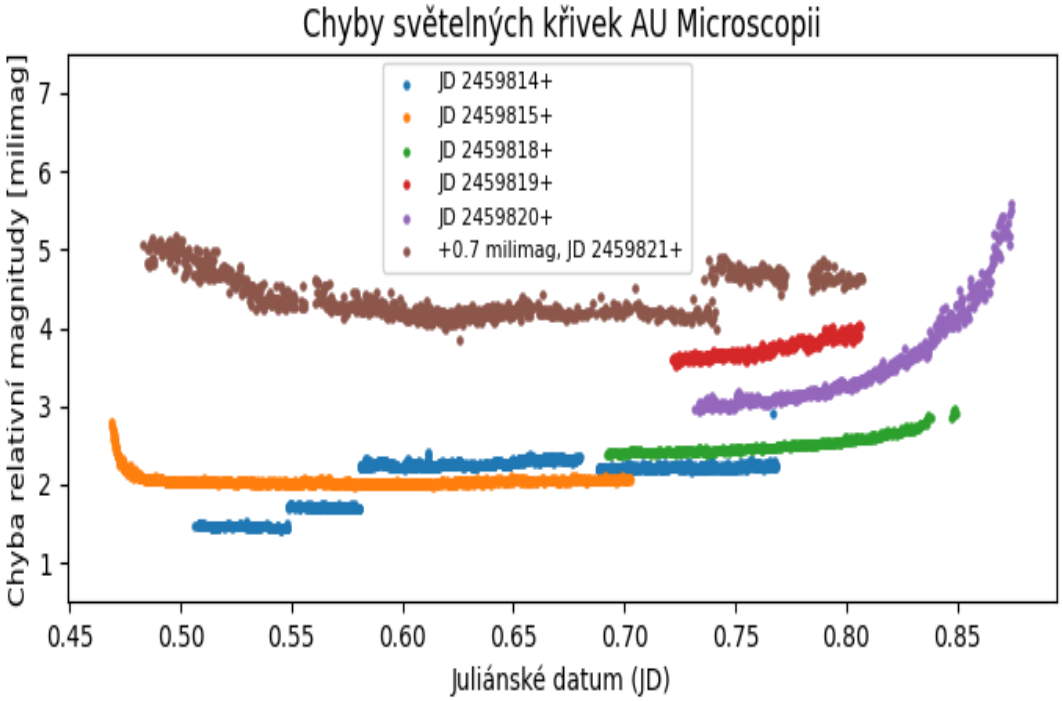
Pozorování hvězdy AU Microscopii (AU Mic) nebylo zpracováno jen v jednom dni a to dne 31.8., protože všechny snímky byly pořízený v binningu 4×4, ke kterému nejsou k dispozici žádné kalibrační snímky.

Pro ostatní dny byla naměřená pozorování zpracována v PLATOSpecPhot, výsledné světelné křivky jsou znázorněny na Obrázku 6.6, a příslušné chyby jsou znázorněny na Obrázku 6.7.

Co se týče světelných křivek AU Mic, tak u světelné křivky ze dne 26.8. je možné si opět povšimnout stejného efektu čipu GSENSE 4040 jako u pozorování hvězdy DS Tuc z 29.8., kdy opět došlo k prodlevě kvůli přesouvání dalekohledu na opačnou stranu kupole a hvězda AU Mic se následně nacházela v jiném kvadrantu pole. Okolo JD = 2459818,55 si lze povšimnout poklesu relativní magnitudy, nicméně jednalo se pouze o chvilkové potemnění srovnávací hvězdy, jak lze vidět na Obrázku 6.8, na kterém je graf rozdílu magnitudy srovnávací hvězdy a kontrolní hvězdy 1 v poli AU Mic.



Obrázek 6.6: Graf světelných křivek hvězdy AU Mic, různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě.



Obrázek 6.7: Graf chyb z fotometrie jednotlivých bodů světelných křivek hvězdy AU Mic, různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě.

Dále u světelných křivek AU Mic ze dnů 27.8. (JD 2459819), 1.9. (JD 2459824) a 3.9. (JD 2459826) si lze všimnout množství bodů, které se nacházejí pod světelnou křivkou, což může být opět způsobeno nesprávnou opravou souřadnic centroidu hvězdy AU Mic nebo srovnávací hvězdy, či chybami ve vyčítacím systému kamery C4-16000. Nebyl detekován žádný tranzit exoplanety během testovacího běhu.

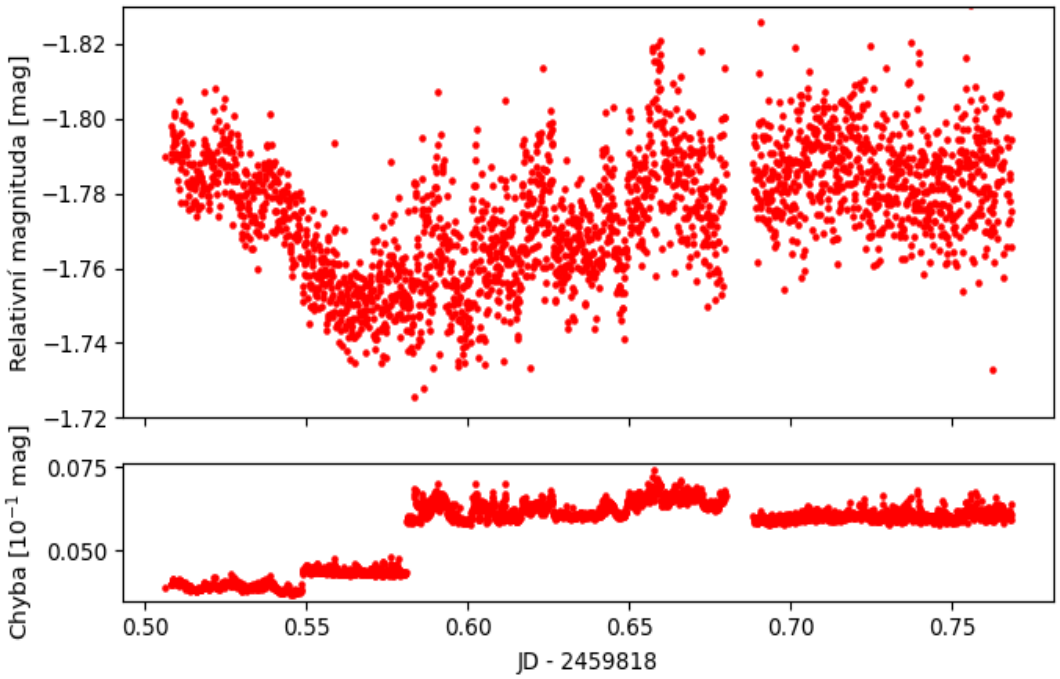
6.1.2.1 Detekovaná erupce na AU Microscopii

Byla detekována erupce během pozorování hvězdy AU Mic dne 3.9. (JD 2459826). Na Obrázku 6.9 je znázorněna celá světelná křivka AU Mic ze dne 3.9., na Obrázku 6.10 je znázorněn příslušný graf rozdílu magnitudy srovnávací hvězdy a kontrolní hvězdy 1 pole AU Mic a na Obrázku 6.11 je přiblížena světelná křivka pro časový úsek erupce spolu s fitovanou časovou závislostí pro účely využití vzorce 1.8. Závislost relativní magnitudy na čase byla fitována bimodální Gaussovou funkcí ve tvaru

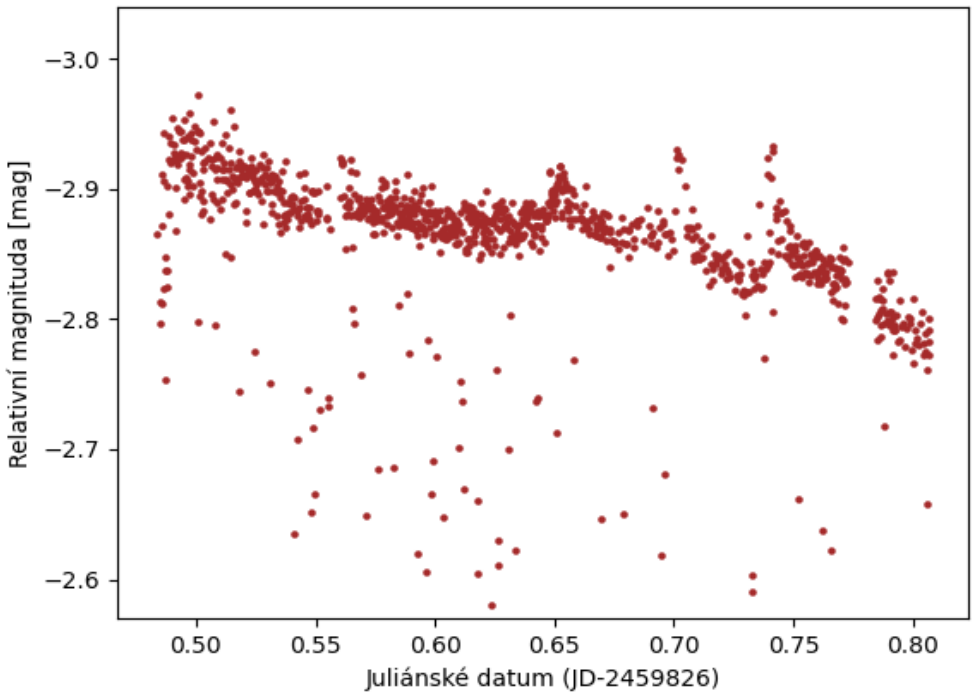
$$bi(x, \mu_1, \sigma_1, A_1, \mu_2, \sigma_2, A_2) = A_1\ e^{-(x-\mu_1)^2/(2\sigma_1^2)} + A_2\ e^{-(x-\mu_2)^2/(2\sigma_2^2)}\,. \tag{6.1}$$

Výsledné parametry fitu jsou $\mu_1 = (-7{,}57 \pm 22559{,}30)$, $\sigma_1 = (6{,}48 \pm 8839{,}79)$, $A_1 = (-6{,}46 \pm 14333{,}10)$, $\mu_2 = (0{,}7025 \pm 0{,}0002)$, $\sigma_2 = (0{,}0016 \pm 0{,}0002)$, $A_2 = (-0{,}0072 \pm 0{,}0096)$.

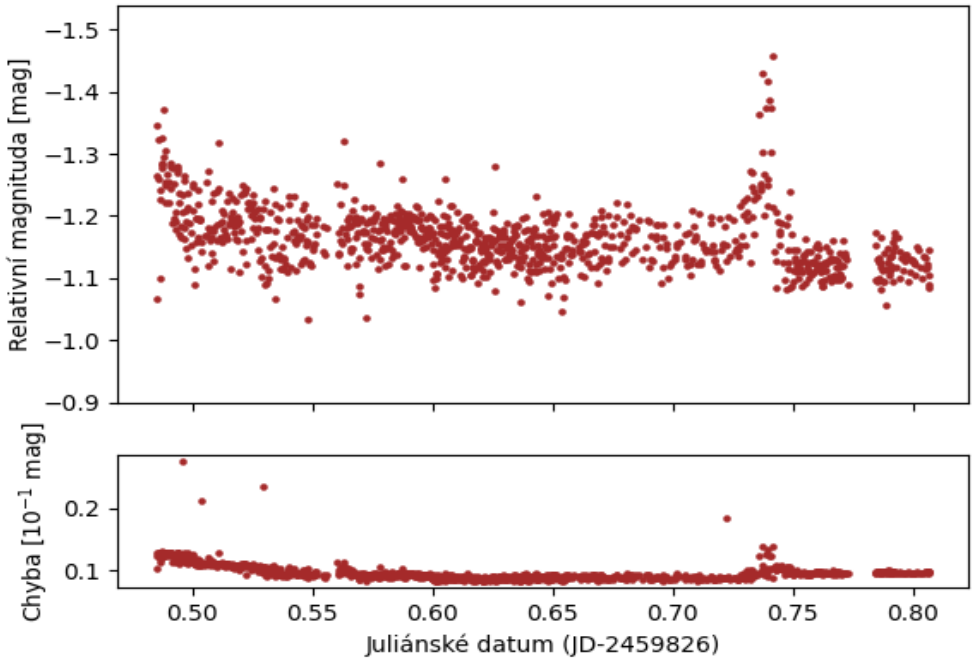
Následně byla provedena numerická integrace plochy pod křivkou fitu na Obrázku 6.11 obdélníkovou metodou pro získání posledního integrálu ve vzorci 1.8.



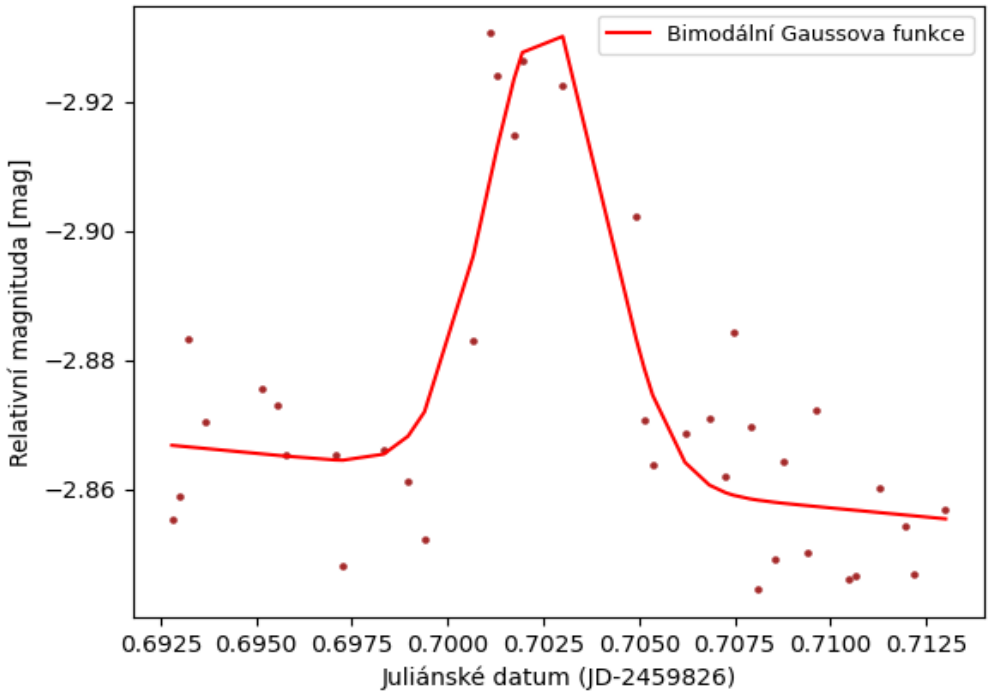
Obrázek 6.8: Graf rozdílů magnitud srovnávací a kontrolní hvězdy 1, a jejich příslušných chyb z fotometrie, v poli AU Mic pozorovaném 26.8. Je vidět potemnění srovnávací hvězdy kolem JD = 2459818,55 což znamená, že příslušná část světelné křivky AU Mic neznačí tranzit.



Obrázek 6.9: Světelná křivka AU Mic z pozorování 3.9.



Obrázek 6.10: Graf rozdílů magnitud srovnávací hvězdy 1 a kontrolní hvězdy 1, a jejich příslušných chyb z fotometrie, v poli AU Mic z pozorování 3.9.

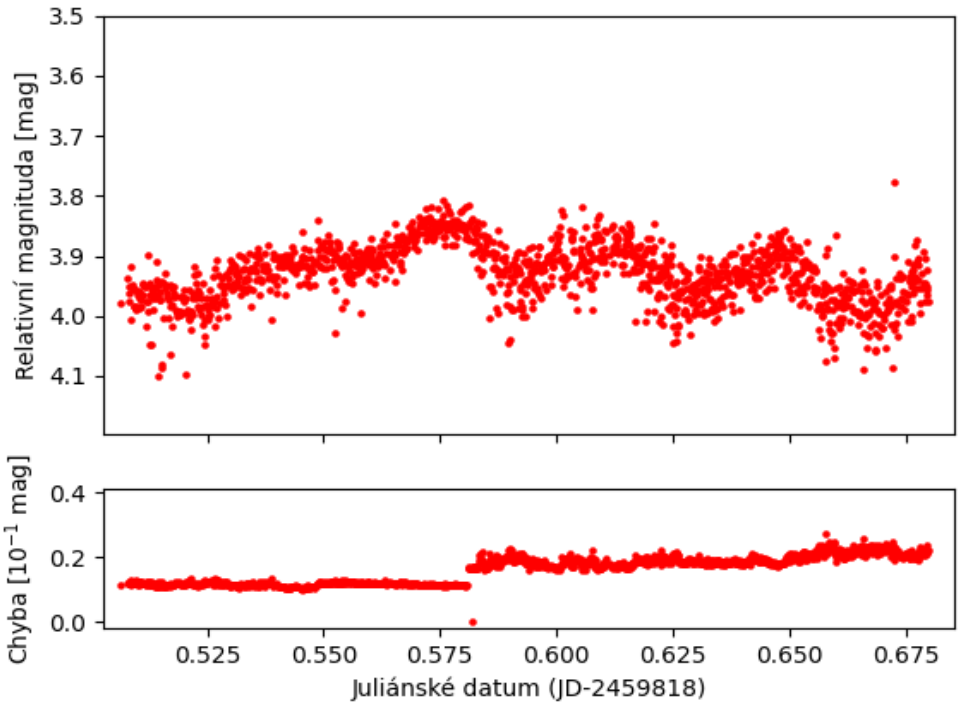


Obrázek 6.11: Přiblížená detekovaná erupce AU Mic s fitovanou bimodální Gaussovou funkcí.

Předtím bylo nutné magnitudy normalizovat na hodnotu mediánu. Jako okamžiky začátku a konce erupce byly vzaty hodnoty $t_1 = 2459826{,}6983$ a $t_2 = 2459826{,}7079$. Výsledný integrál byl určen jako $\int_{t_1}^{t_2}(F_{0,f}(t)/F_0)dt = 0{,}0096$. Použitý filtr pro pozorování byl Sloan g, bylo tedy potřeba najít hodnoty jeho transmisní křivky. Ty byly vzaty z [Sds]. Za použití této transmisní křivky pak bylo možné spočíst energii detekované erupce ve filtru Sloan g jako
$E_{erupce} = 8{,}7352.10^{27}$ erg
V článku [Feinstein a kol., 2022] jsou uvedeny hodnoty vypočtených energií erupcí hvězdy AU Mic v dalekém UV spektru řádu 10^{29} erg až 10^{31} erg. V této oblasti spektra lze čekat, že erupce bude mít řádově větší energii. Proto i přesto, že chyba spočtené E_{erupce} je řádově velká vzhledem k velkým chybám parametrů fitu a značné aproximaci erupce jako absolutně černého tělesa, tak lze říct, že výsledná E_{erupce} řádově sedí s očekávanými hodnotami.

6.1.2.2 Proměnná hvězda v poli AU Mic

V poli AU Mic při analýze pozorování z 26.8 (JD 2459819) byla nalezena proměnná hvězda. Na Obrázku 6.12 je její světelná křivka. Světelná křivka neobsahuje část po přesunu dalekohledu, protože poté se hvězda posunula na jiný kvadrant a téměř nebyla detekovatelná. Jedná se o objekt s názvem 2MASS 20450857-3123234, tento objekt nebyl nalezen v katalogu proměnných hvězd GCVS ani ASAS a podle odhadované periody kolem jedné hodiny by se mohlo jednat o proměnnou hvězdu typu δ Scuti, tedy to, co je vidět na Obrázku 6.12, jsou pravděpodobně pulzace.



Obrázek 6.12: Světelná křivka nové proměnné hvězdy 2MASS 20450857-3123234 v poli AU Mic 26.8.

Závěr

Pro fotometrickou CCD kameru C4-16000 byla zkonstruována pipeline PLATOSpecPhot v programovacím jazyce Python a dostupná na GitHubu [1], která provádí příslušnou kalibraci snímků z kamery s ohledem na dvojí vyčítací kanály kamery a také aperturní a diferenciální fotometrii hvězd nacházejících se na snímcích. Pipeline PLATOSpecPhot byla otestována na testovací sekvenci snímků hvězdy TIC 12036 pořízené 65-cm dalekohledem v Ondřejově a výsledná světelná křivka je až na pár bodů identická s křivkou vygenerovanou programem C-Munipack. Pro přesnější potvrzení by ale bylo potřeba použít více testovacích sad, které by případně ukázaly na chyby v pipeline.

Mezi dny 22.8.2022 a 5.9.2022 proběhl testovací běh dalekohledu E152 na observatoři La Silla v Chile, na kterém byla umístěna fotometrická kamera C4-16000. Cíli byly eruptivní proměnné M hvězdy DS Tucanae A (DS Tuc) a AU Microscopii (AU Mic), které byly pozorovány téměř každou noc. Příslušné sekvence snímků byly v PLATOSpecPhot zpracovány a výstupem bylo 7 světelných křivek DS Tuc a 6 světelných křivek AU Mic.

Byla provedena analýza linearity dark snímků pořízených kamerou C4-16000, cílem bylo zjistit, zda jsou dark snímky lineární v rozsahu expoziční doby dané výrobcem až do expoziční doby $t_{exp} = 25$ s. To bylo v rámci chyby potvrzeno, nicméně analýza linearity dark snímků nemůže být použita k argumentaci, že kamera C4-16000 je lineární, k tomu je potřeba použít hvězdné snímky či flat snímky. Ty ovšem nebyly k dispozici v rozsahu více expozičních dob za jednu noc a pro jedno pozorované pole.

Přišlo se na dva problémy související s kamerou C4-16000 a jejím vyčítacím systémem. Kvadranty čipu jsou různě citlivé a flat snímky tento problém neopravují dostatečně. Není zřejmé, čím to je způsobeno, ale problém bude potřeba hledat v samotné konstrukci čipu. Pro eliminaci tohoto jevu během pozorování v rámci mise PLATOSpec tak bude potřeba zafixovat jak pozorovanou hvězdu, tak srovnávací a kontrolní v jednom kvadrantu a zajistit, aby se během měření nepřesunuly do jiného kvadrantu, dokud nebude problém vyřešen. Vyčítací systém kamery C4-16000 pro snímky pořízené v lo-gain kanále a binningu 2×2 dává až dvacetkrát větší hodnoty, než je očekáváno. Zde se jedná o chybu v programování a bude muset být opravena před spuštěním ostrého pozorování.

U hvězdy DS Tuc nebyl detekován ani tranzit exoplanety, ani erupce. U hvězdy AU Mic nebyl detekován tranzit exoplanety, ale byla detekována erupce v pozorování 3.9.2022. Při aproximaci erupce M hvězdy jako černého tělesa o teplotě 10 000 K lze použít aproximativní metodu na vypočítání energie erupce M hvězdy v závislosti na použitém filtru pozorování. Tato energie v rozsahu vlnových délek filtru Sloan g určena jako
$E_{erupce} = 8{,}7352.10^{27}$ erg,
kde ale chyba může dosahovat až řádové velikosti kvůli velkým chybám parametrů fitu a protože se jedná o velmi aproximativní metodu, nelze obecně považovat erupci za absolutně černé těleso.

V poli AU Mic byl detekován objekt s názvem 2MASS 20450857-3123234. Jeho světelná křivka vykazuje periodu kolem jedné hodiny a jedná se tak pravdě-

[1] `https://github.com/AntaresI/PlatoSpecPhot`

podobně o δ Scuti proměnnou hvězdu, pro lepší výsledky ale bude potřeba pořídit více světelných křivek tohoto objektu.

Seznam použité literatury

AST1100 lecture notes. https://www.uio.no/studier/emner/matnat/astro/nedlagte-emner/AST1100/h08/undervisningsmateriale/lecture3.pdf. [přístup: 17.3.2023].

Differential Photometry. https://boyce-astro.org/differential-photometry/. [přístup: 4.2.2023].

C4 Series CMOS Cameras. https://www.gxccd.com/art?id=607&lang=409. [přístup: 4.2.2023].

C4 Series Scientific CMOS Camera User's Guide. https://www.gxccd.com/download/C4%20Manual.pdf. [přístup: 5.2.2023].

NASA Exoplanet Archive Statistics. https://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/docs/counts_detail.html. [přístup: 17.3.2023].

Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). https://exoplanets.nasa.gov/tess/. [přístup: 17.3.2023].

TESS Spacecraft Beauty Shots. https://svs.gsfc.nasa.gov/12782. [přístup: 17.3.2023].

Plato factsheet. https://www.esa.int/Science_Exploration/Space_Science/Plato_factsheet. [přístup: 17.3.2023].

Research Summary. https://www.astro.umd.edu/openhouse/7research/research-summary.html. [přístup: 17.3.2023].

Munipack Aperture Photometry. https://munipack.physics.muni.cz/man_aphot.html. [přístup: 25.4.2023].

Background Estimation. https://photutils.readthedocs.io/en/stable/background.html, a. [přístup: 4.2.2023].

Background2D. https://photutils.readthedocs.io/en/stable/api/photutils.background.Background2D.html#photutils.background.Background2D, b. [přístup: 10.4.2023].

PLATO (PLAnetary Transits and Oscillation of Stars). https://www.eoportal.org/satellite-missions/plato#eop-quick-facts-section. [přístup: 4.2.2023].

Filter Profile Service. http://svo2.cab.inta-csic.es/svo/theory/fps3/index.php?id=SLOAN/SDSS.g&&mode=browse&gname=SLOAN&gname2=SDSS#filter. [přístup: 28.4.2023].

Simbad query. https://simbad.cds.unistra.fr/simbad/sim-id?Ident=au+mic&NbIdent=1&Radius=2&Radius.unit=arcmin&submit=submit+id. [přístup: 18.3.2023].

The E152 telescope in the Chilean Atacama Desert is in Czech use. https://stelweb.asu.cas.cz/en/2022/04/13/the-e152-telescope-in-the-chilean-atacama-desert-is-in-czech-use/. [přístup: 4.2.2023].

Types of Variable Stars: A Guide for Beginners. https://www.aavso.org/types-of-variables-guide-for-beginners. [přístup: 17.3.2023].

Z. Bardon. Znovuzrození E152. https://www.astro.cz/clanky/ostatni/znovuzrozeni-e152.html, 2021. [přístup: 4.2.2023].

Z. Bardon. Český dalekohled E152 na La Silla v Chile „žije"! https://www.astro.cz/clanky/ostatni/cesky-dalekohled-e152-na-la-silla-v-chile-zije.html, 2022. [přístup: 4.2.2023].

S. Benatti et al. A possibly inflated planet around the bright young star DS Tucanae A. *Astronomy and Astrophysics*, 630, oct 2019. doi: 10.1051/0004-6361/201935598.

M. Brož and M. Šolc. *Fyzika sluneční soustavy*. 1. vydání. Matfyzpress, Praha, 2013. ISBN: 978-80-7378-236-8.

M. Brož and M. Wolf. *Astronomická měření*. 1. vydání. Matfyzpress, Praha, 2017. ISBN: 978-80-7378-354-9.

Gaia Collaboration. Gaia Data Release 2: Variable stars in the colour-absolute magnitude diagram. *Astronomy and Astrophysics*, 623, apr 2020. doi: 10.1051/0004-6361/201833304.

S. Colombo et al. Short-term variability of DS Tucanae A observed with TESS. *Astronomy and Astrophysics*, 661, feb 2022. doi: 10.1051/0004-6361/202243086.

A. Ederoclite. Photometry. https://edisciplinas.usp.br/pluginfile.php/4648977/mod_resource/content/1/12%20AGA0414%20Photometry.pdf. [přístup: 4.2.2023].

J. Englich. *Úvod do praktické fyziky*. 1. vydání. Matfyzpress, Praha, 2006. ISBN: 80-86732-93-2.

A. Feinstein et al. AU Microscopii in the Far-UV: Observations in Quiescence, during Flares, and Implications for AU Mic b and c. *The Astronomical Journal*, 164, August 2022. doi: 10.3847/1538-3881/ac8107.

E. Gilbert et al. Flares, Rotation, and Planets of the AU Mic System from TESS Observations. *The Astronomical Journal*, 163, apr 2022. doi: 10.3847/1538-3881/ac23ca.

M. Günther et al. Stellar Flares from the First TESS Data Release: Exploring a New Sample of M Dwarfs. *The Astronomical Journal*, 159(2), jan 2020. doi: 10.3847/1538-3881/ab5d3a.

P. Harmanec and M. Brož. *Stavba a vývoj hvězd*. 1. vydání. Matfyzpress, Praha, 2011. ISBN: 978-80-7378-165-1.

S. Hawley and G. Fisher. X-Ray–heated Models of Stellar Flare Atmospheres: Theory and Comparison with Observations. *The Astrophysical Journal Supplement*, 78, feb 1992. doi: 10.1086/191640.

M. Johnson. Kepler and K2. `https://www.nasa.gov/mission_pages/kepler/overview/index.html`, 2018. [přístup: 17.3.2023].

Ch. Lovis and D. Fischer. Radial Velocity. `http://exoplanets.astro.yale.edu/workshop/EPRV/Bibliography_files/Radial_Velocity.pdf`. [přístup: 17.3.2023].

M. Mašek. Proměnné hvězdy a exoplanety. `https://www.astro.cz/na-obloze/promenne-hvezdy-a-exoplanety.html`. [přístup: 17.3.2023].

E. Martioli et al. New constraints on the planetary system around the young active star AU Mic Two transiting warm Neptunes near mean-motion resonance. *Astronomy and Astrophysics*, 649, mar 2021. doi: 10.1051/0004-6361/202040235.

M. Mayor and D. Queloz. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature*, 378(1):355–359, Nov 1995. doi: 10.1038/378355a0.

M. Newberry. Tech Note: Using the Overscan Bias Correction. `https://mirametrics.com/tech_note_overscan_bias.php`, 2008. [přístup: 5.2.2023].

E. Newton et al. TESS Hunt for Young and Maturing Exoplanets (THYME): A Planet in the 45 Myr Tucana-Horologium Association. *The Astrophysical Journal Letters*, 880, July 2019. doi: 10.3847/2041-8213/ab2988.

P. Plavchan et al. A planet within the debris disk around the pre-main-sequence star AU Microscopii. *Nature*, 582, June 2020. doi: 10.1038/s41586-020-2400-z.

Santos et al. The HARPS survey for southern extra-solar planets. *Astronomy and Astrophysics*, 426(1):L19–L23, sep 2004. doi: 10.1051/0004-6361:200400076.

Shibayama et al. Superflares on Solar-type Stars Observed with Kepler. I. Statistical Properties of Superflares. *The Astrophysical Journal Supplement*, 209 (1), nov 2013. doi: 10.1088/0067-0049/209/1/5.

P. Stetson. DAOPHOT: A Computer Program for Crowded-Field Stellar Photometry. *Publications of the Astronomical Society of the Pacific*, 99, march 1987. doi: 10.1086/131977.

K. Vida et al. Flaring Activity of Proxima Centauri from TESS Observations: Quasiperiodic Oscillations during Flare Decay and Inferences on the Habitability of Proxima b. *The Astrophysical Journal*, 884(2), oct 2019. doi: 10.3847/1538-4357/ab41f5.

Seznam obrázků

1.1 Vyobrazení družice Kepler ve Vesmíru (převzato z[Johnson, 2018]) a snímek družice TESS před startem (převzato z [Tes]) 5
1.2 Umělecký snímek plánovaného teleskopu PLATO. Převzato z [Esa] 6
1.3 Graf měření radiálních rychlostí hvězdy μ Ara spektrografem HARPS. Převzato z [Santos a kol., 2004] 7
1.4 Světelná křivka hvězdy HD 189733 b s pozorovaným poklesem toku záření z důvodu tranzitu exoplanety. Převzato z [Mar] 8

2.1 Teleskop E152 vyfocený uvnitř kopule Zdeňkem Bardonem. Převzato z [Bardon, 2022] 10
2.2 C4-16000 kamera zobrazená z několika úhlů. Převzato z [C4] . . . 11
2.3 C4-16000 kamera bez filtrového kola (vlevo), se středně velkým filtrovým kolem (uprostřed) a s velkým filtrovým kolem (vpravo). Převzato z [C4] 12
2.4 Bias snímek GSENSE4040 čipu znázorňující 4 kvadranty s lehce rozdílnými hodnotami. Tmavý proužek napravo je overscan oblast. Převzato z [C4] 13

3.1 Schéma odečtení dark snímků (D) od snímků (S) pro případ kamery C4-16000 17
3.2 Schéma přípravy master flat snímků (F) pro případ kamery C4-16000 17
3.3 Schéma finálního procesu získávání opravených snímků (S) 18
3.4 Nekalibrovaný snímek (S) pole hvězdy DS Tucanae A z kamery C4-16000. 18
3.5 Kalibrovaný snímek (S) pole hvězdy DS Tucanae A z kamery C4-16000. 19
3.6 Přiblížený snímek hvězdy AU Mic s červeně vyznačenou kruhovou aperturou o poloměru 22 pixelů a zeleně vyznačeným mezikružím o vnitřním poloměru 28 pixelů a vnějším poloměru 40 pixelů. . . . 20
3.7 Závislost chyby relativní magnitudy na poloměru apertury pro 800. snímek pole hvězdy AU Mic naměřené kamerou C4-16000 na dalekohledu E 152. Nejlepší apertura je 27 pixelů, protože chyba je pro ni nejmenší. 21
3.8 Graf přibližující proces diferenciální fotometrie. C je zkoumaná hvězda, B je srovnávací hvězda a A je kontrolní hvězda. Na levém obrázku jsou zobrazeny průběhy jejich magnitud v čase a na pravém obrázku jsou zobrazeny jejich rozdíly magnitud v čase. Převzato z [Ederoclite]. 22
3.9 Světelná křivka hvězdy DS Tucanae A pozorovaná 26.8.2022 dalekohledem E 152. 22

4.1 Struktura pipeline PLATOSpecPhot vyvinutá pro snímky z kamery C4-16000 24
4.2 Část konfiguračního souboru použitého v pipeline PLATOSpecPhot. 25
4.3 Část hlavního skriptu `Pipeline.py`. 25
4.4 Část skriptu `Image_calibration.py` 26

4.5 Část skriptu `Files_and_folders_preparation.py` 27
4.6 Část skriptu `Master_images_creation.py` 28
4.7 Část skriptu `Photometry_parameters_.py` 29
4.8 Část skriptu `Stars.py` 30
4.9 Část skriptu `Photometry.py` 31
4.10 Část skriptu `Centroid_shifting_and_LC_making.py` 33
4.11 Část skriptu `Plotting.py` 34
4.12 Snímek pole zákrytové dvojhvězdy TIC 12036 (Var), srovnávací hvězdy (Comp) a kontrolní hvězdy (check ♯1). 35
4.13 Světelná křivka dvojhvězdy TIC 12036 vytvořená softwarem C-Munipack 36
4.14 Světelná křivka dvojhvězdy TIC 12036 vytvořená PLATOSpecPhot. 36

5.1 Pole hvězdy AU Mic (nejvýraznější hvězda). Převzato z [Sim]. . . 39
5.2 Pole hvězdy DS Tuc (nejvýraznější hvězda). Převzato z [Sim]. . . 40
5.3 Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro kameru C4-16000 v 12-bit lo-gain kanálu. Charakter snímků nebyl výrobcem popsán. Převzato z [C4]. 43
5.4 Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 12-bit hi-gain a binningu 1×1. 44
5.5 Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 16-bit lo-gain a binningu 1×1. 44
5.6 Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 12-bit hi-gain a binningu 2×2. 45
5.7 Graf závislosti vyčteného počtu ADU na expoziční době pro dark snímky pořízené v testovacím běhu kamery C4-16000, v kanálu 16-bit lo-gain a binningu 2×2. 45

6.1 Pole hvězdy DS Tuc z kamery C4-16000. 48
6.2 Pole hvězdy AU Mic z kamery C4-16000 pozorované ve všech uvedených dnech kromě 2.9. 48
6.3 Pole hvězdy AU Mic z kamery C4-16000 pozorované 2.9. 49
6.4 Graf světelných křivek hvězdy DS Tuc. Různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě. 49
6.5 Graf chyb z fotometrie jednotlivých bodů světelných křivek hvězdy DS Tuc. Různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé křivky chyb jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě. 50
6.6 Graf světelných křivek hvězdy AU Mic, různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě. 51
6.7 Graf chyb z fotometrie jednotlivých bodů světelných křivek hvězdy AU Mic, různá barva odpovídá jiné pozorovací noci jejíž datum je uvedené v legendě v JD formátu, některé světelné křivky jsou posunuty o hodnotu uvedenou v legendě. 52

6.8 Graf rozdílů magnitud srovnávací a kontrolní hvězdy 1, a jejich příslušných chyb z fotometrie, v poli AU Mic pozorovaném 26.8. Je vidět potemnění srovnávací hvězdy kolem JD = 2459818,55 což znamená, že příslušná část světelné křivky AU Mic neznačí tranzit. 53
6.9 Světelná křivka AU Mic z pozorování 3.9. 53
6.10 Graf rozdílů magnitud srovnávací hvězdy 1 a kontrolní hvězdy 1, a jejich příslušných chyb z fotometrie, v poli AU Mic z pozorování 3.9. 54
6.11 Přiblížená detekovaná erupce AU Mic s fitovanou bimodální Gaussovou funkcí. 54
6.12 Světelná křivka nové proměnné hvězdy 2MASS 20450857-3123234 v poli AU Mic 26.8. 55

Seznam tabulek

4.1 Testovací data hvězdy TIC 12036 35

5.1 Parametry hvězdy AU Mic. Převzato z [Martioli a kol., 2021], z [Gaia Collaboration, 2020] a hloubka tranzitu je převzata z [Plavchan a kol., 2020], ale autor neuvádí přesnou hodnotu tranzitu, byla proto odhadnuta z příslušného grafu uvedeného v článku. 38
5.2 Parametry hvězdy DS Tuc. Převzato z [Benatti a kol., 2019] a hloubka tranzitu převzata z [Newton a kol., 2019]. 39
5.3 Soubory snímků hvězd DS Tuc a AU Mic. 41
5.4 Soubory kalibračních snímků použitých pro zpracování 41
5.5 Analyzovaný soubor dark snímků pořízený v binningu 1×1 . . . 42
5.6 Analyzovaný soubor dark snímků pořízený v binningu 2×2 . . . 43

Seznam použitých zkratek

DS Tuc – DS Tucanae A
AU Mic - AU Microscopii
Pipeline - sada programů prováděných sekvenčně
Master snímek - výsledný snímek složený z několika snímků aritmetickou operací
Dark snímek - snímek vygenerovaný vyčítáním temného proudu
Flat snímek - snímek vygenerovaný pozorováním rovnoměrně osvícené plochy
CCD - Charged Coupled Device
ADU - Analog Digital Unit, analogově digitální jednotka používaná k vyčítání toho, kolik elektronů bylo vybuzeno dopadajícím fotonem na čip CCD kamery